

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН
Объединенный институт высоких температур РАН
Научный совет РАН по физике плазмы
Научный совет РАН по комплексной проблеме
«Физика низкотемпературной плазмы»

Государственный научный центр РФ ТРИНИТИ
Научно-технологический центр ПЛАЗМАИОФАН
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

**XLVIII МЕЖДУНАРОДНАЯ ЗВЕНИГОРОДСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФИЗИКЕ ПЛАЗМЫ И
УПРАВЛЯЕМОМУ ТЕРМОЯДЕРНОМУ СИНТЕЗУ
ISPAF-2021**

15 – 19 марта 2021 г.

г. Москва

СБОРНИК ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ

Финансовая поддержка:

Научно-технологический центр ПЛАЗМАИОФАН
Проектный центр ИТЭР ГК РОСАТОМ
Государственный научный центр РФ ТРИНИТИ

Москва, 2021

УДК 533.9
PACS 52.20-52.75
ББК 22.333
М43

**XLVIII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу
15 – 19 марта 2021 г., г. Звенигород. Сборник тезисов докладов.
М.: ЗАО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН», 2021 г. – 246 с.**

В сборник включены тезисы докладов по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, представленные на XLVIII Международную Звенигородскую конференцию по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу учеными из институтов Министерства науки и высшего образования РФ, Российской академии наук, предприятий российской государственной корпорации РОСАТОМ, Национального Исследовательского Центра «Курчатовский институт», университетов и высших учебных заведений России, стран СНГ, научных центров стран Европейского Союза, США, Японии и других организаций.

Составители:

В.А. Иванов, И.А. Гришина, М.Л. Нагаева, Д.Г. Васильков, С.А. Двинин,
В.С. Воробьев, Г.А. Вергунова, А.И. Мещеряков

Макет – И.А. Гришина, М.Л. Нагаева, С.Н. Сатунин

ISBN 978-5-6042115-4-0

© ЗАО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН»
© Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН
© Авторы, 2021

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences
Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences
Scientific Council on Plasma Physics, Russian Academy of Sciences
Scientific Council on the Complex Problem “Physics of Low Temperature Plasma”,
Russian Academy of Sciences

Science and Technology Center PLASMAIOFAN
State Research Center of Russian Federation TRINITY
National Research Nuclear University MEPhI
Lomonosov Moscow State University

XLVIII International Zvenigorod Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion ICPAF-2021

March 15-19, 2021

Moscow

BOOK OF ABSTRACTS

Financial Support

Science and Technology Center PLASMAIOFAN
Project Center ITER of the State Corporation ROSATOM
State Research Center of Russian Federation TRINITY

Moscow, 2021

PACS 52.20–52.75

XLVIII International Zvenigorod Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion. March 15-19, 2021, Zvenigorod. Book of Abstracts
Moscow: Science and Technology Center PLASMAIOFAN, 2021– pp. 246

This book includes the abstracts on plasma physics and controlled fusion presented at the **XLVIII International Zvenigorod Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion** in 2021 (**ICPAF-2021**) by scientists from the institutes of Russian Academy of Sciences and Ministry of Science and Higher Education of Russia, from organizations of the Russian State Corporation ROSATOM, from the National Research Center “Kurchatov Institute”, from the leading universities of higher education system of Russia, as well as from scientific centers and laboratories of the Commonwealth of Independent States (CIS), EU, USA, Japan and from other countries.

Compiled by:

V.A. Ivanov, I.A. Grishina, M.L. Nagaeva, D.G. Vasilkov, S.A. Dvinin, V.S. Vorobyev, G.A. Vergunova, A.I. Meshcheryakov

Layout by:

I.A. Grishina, M.L. Nagaeva, S.N. Satunin

© Science and Technology Center PLASMAIOFAN

© Prokhorov General Physics Institute, RAS

© Authors, 2021

ISBN 978-5-6042115-4-0

Программный комитет

Коврижных Л.М.	доктор физико-математических наук, НТЦ ПЛАЗМАИОФАН, председатель
Александров А.Ф.	доктор физико-математических наук, МГУ
Бурдаков А.В.	доктор физико-математических наук, ИЯФ СО РАН
Воробьев В.С.	доктор физико-математических наук, ОИВТ РАН
Вергунова Г.А.	кандидат физико-математических наук, ФИАН
Готт Ю.В.	доктор физико-математических наук, НИЦ «Курчатовский институт»
Гребенщиков С.Е.	кандидат физико-математических наук, ИОФ РАН
Гусаков Е.З.	доктор физико-математических наук, ФТИ РАН
Гуськов С.Ю.	доктор физико-математических наук, ФИАН
Двинин С.А.	доктор физико-математических наук, МГУ
Денисов Г.Г.	член-корреспондент РАН, ИПФ РАН
Иванов А.А.	доктор физико-математических наук, ИЯФ СО РАН
Иванов В.А.	кандидат физико-математических наук, ИОФ РАН
Коссый И.А.	доктор физико-математических наук, ИОФ РАН
Красильников А.В.	доктор физико-математических наук, Проектный Центр ИТЭР
Кузнецов А.П.	доктор физико-математических наук, НИЯУ МИФИ
Лебедев Ю.А.	доктор физико-математических наук, ИНХС РАН
Мещеряков А.И.	кандидат физико-математических наук, ИОФ РАН
Мирнов С.В.	доктор физико-математических наук, ТРИНИТИ
Пастухов В.П.	доктор физико-математических наук, НИЦ «Курчатовский институт»
Романников А.Н.	доктор физико-математических наук, ТРИНИТИ
Сон Э.Е.	академик РАН, ОИВТ РАН
Окс Е.	профессор, Обернский университет, Оберн, Алабама, США
Дж. Онгена	академик Королевской академия наук Бельгии, Брюссель
Фогель Н.	профессор, Технический университет, Кемниц, Германия

Организационный комитет

Иванов В.А.	кандидат физико-математических наук, ИОФ РАН, председатель
Гришина И.А.	кандидат физико-математических наук, ИОФ РАН, секретарь
Васильков Д.Г.	кандидат физико-математических наук, ИОФ РАН, зам. председателя
Воронова Е.В.	научный сотрудник, ИОФ РАН
Гаспарян Ю.М.	кандидат физико-математических наук, НИЯУ МИФИ
Камолова Т.И.	кандидат технических наук, НТЦ ПЛАЗМАИОФАН
Нагаева М.Л.	кандидат физико-математических наук, НТЦ ПЛАЗМАИОФАН
Сатунин С.Н.	научный сотрудник, ИОФ РАН
Шевченко А.А.	ведущий инженер, НИЯУ МИФИ

International Advisory Board

Sergei Bulanov – ELI-Beamlines, Institute of Physics CAS, Prague, Czech Republic
Eric Esarey – Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, USA
Tetsuya Kawachi – QST, Japan
Sergei Krasheninnikov – University of California in San Diego, California, USA
Francesco Pegoraro – Universita' di Pisa, Italy
Boris Sharkov – Facility for Antiproton and Ion Research GmbH, Darmstadt, Germany
Arie Zigler – Hebrew University, Jerusalem, Israel
Andrey Smolyakov - University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada

СОДЕРЖАНИЕ

сборника тезисов докладов XLVIII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС

Разделы, авторы и названия докладов	Страницы
ОБЗОРНЫЕ ДОКЛАДЫ	29-43
Сон Э.Е. (ОИВТ РАН, г. Москва, Россия) ПАМЯТИ ВЛАДИМИРА ЕВГЕНЬЕВИЧА ФОРТОВА 23.01.1946–20.11.2020	29
Гаспарян Ю.М. (НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия) ПАМЯТИ ВАЛЕРИЯ АЛЕКСАНДРОВИЧА КУРНАЕВА 21.12.1942—23.11.2020	30
Кутеев Б.В. (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) ПАМЯТИ ВЯЧЕСЛАВА СЕРГЕЕВИЧА СТРЕЛКОВА 13.08.1933—19.07.2020	31
¹ Красильников А.В., ^{1,2} Коновалов С.В., ^{1,3} Бондарчук Э.Н., ^{1,3} Мазуль И.В., ^{1,3} Родин И.Ю., ^{1,3} Минеев А.Б., ^{1,3} Кузьмин Е.Г., ^{1,3} Кавин А.А., ^{1,3} Карпов Д.А., ^{1,2} Леонов В.М., ^{1,4} Хайрутдинов Р.Р., ^{1,2} Кукушкин А.С. (¹ ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР, г. Москва, Россия; ² НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ³ АО НИИЭФА им. Д.Ф. Ефремова, г. Санкт-Петербург, Россия; ⁴ АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, г. Троицк, Россия) ТОКАМАК С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ (TRT): КОНЦЕПЦИЯ, МИССИЯ, ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ОЖИДАЕМЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	32
Мирнов С.В. (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, г. Троицк, Россия) СРЫВЫ В КЛАССИЧЕСКИХ «КРУГЛЫХ» ТОКАМАКАХ	33
Онгена Дж. (Лаборатория физики плазмы, Королевская Военная академия, г. Брюссель, Бельгия) ПОДГОТОВКА ТОКАМАКА ЛЕТ К ДЕЙТЕРИЙ-ТРИТИЕВОЙ КАМПАНИИ 2021 ГОДА: ПЛАНЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОЖИДАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ	34
Иванов А.А. (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия) НЕЙТРОННЫЙ ИСТОЧНИК ДЛЯ БОРНЕЙТРОНОЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ И ДРУГИХ ПРИМЕНЕНИЙ	35
¹ Ананьев С.С., ^{1,2} Кутеев Б.В. (¹ НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ² НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия) ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ И ОБРАЩЕНИЯ С ДЕЙТЕРИЙ-ТРИТИЕВЫМ ТОПЛИВОМ В ТЕРМОЯДЕРНОМ/ГИБРИДНОМ РЕАКТОРЕ	36
<u>Дьяченко В.В.</u> и коллектив токамака Глобус-М2 (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт- Петербург, Россия) ГЕНЕРАЦИЯ ТОКА ВОЛНАМИ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА В ТРАДИЦИОННЫХ И СФЕРИЧЕСКИХ ТОКАМАКАХ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ	37
Лебедев С.В., Абдуллина Г.И., Аскинази Л.Г., Белокуров А.А., Жубр Н.А., Корнев В.А., Крикунов С.В., Мельник А.Д., Разуменко Д.В., Смирнов А.И., Тукачинский А.С., Чернышев Ф.В., Шевелев А.Е. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия) ИЗЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА В МЕГАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ	38
¹ Сергеев В.Ю., ^{2,3} Кутеев Б.В. (¹ СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия;	39

²НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ³НИЯУ МИФИ,
г. Москва, Россия)

СМЯГЧЕНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ СРЫВА В ТОКАМАКАХ-РЕАКТОРАХ

Хомкин А.Л., Шумихин А.С. (ОИВТ РАН, г. Москва, Россия) 40
СВЕРХКРИТИЧЕСКИЙ ФЛЮИД ПЛАЗМЫ ПАРОВ МЕТАЛЛОВ, ИНЕРТНЫХ
ГАЗОВ И ЭКСИТОНОВ

Левашев П.Р. (ОИВТ РАН, г. Москва, Россия) 41
ПЕРВОПРИНЦИПНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ И
ТРАНСПОРТНЫХ СВОЙСТВ НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ МЕТАЛЛОВ

¹Анашкин И.О., ¹Кирнева Н.А., ¹Левин И.В., ¹Леонов В.М., ¹Лутченко А.В., 42
¹Ноткин Г.Е., ¹Рой И.Н., ¹Соколов М.М., ¹Сушков А.В., ¹Хвостенко П.П.,
¹Чудновский А.Н., ²Бондарчук Э.Н., ³Романников А.Н. (¹НИЦ «Курчатовский
институт», г. Москва, Россия; ²АО НИИЭФА им. Д.Ф. Ефремова, г. Санкт-
Петербург, Россия, ³АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, г. Троицк, Россия)
СТАТУС ТОКАМАКА Т-15МД

¹Гусев В.К., ¹Сахаров Н.В., ¹Минаев В.Б., ¹Петров Ю.В., ¹Варфоломеев В.И., 43
¹Бахарев Н.Н., ²Багрянский П.А., ¹Брунков П.Н., ^{1,3}Буланин В.В., ¹Воронин А.В.,
²Давыденко В.И., ¹Дьяченко В.В., ⁴Жилин Е.Г., ⁵Кавин А.А., ¹Киселев Е.О.,
¹Коновалов А.Н., ¹Корнев В.А., ¹Курские Г.С., ¹Мельник А.Д., ⁵Минеев А.Б.,
¹Миронов М.И., ¹Мирошников И.В., ¹Новохатский А.Н., ¹Ошуев К.Ю., ¹Патров М.И.,
³Петров А.В., ³Пономаренко А.М., ³Рожанский В.А., ³Сениченков И.Ю.,
²Соломахин А.Л., ¹Тельнова А.Ю., ¹Токарев В.А., ¹Толстяков С.Ю., ¹Хромов Н.А.,
¹Чернышев Ф.В., ¹Щеголев П.Б., ²Шиховцев И.В., ^{1,3}Яшин А.Ю., ¹Тюхменева Е.А.,
¹Балаченков И.М., ¹Горяинов В.Ю., ¹Скрекель О.М., ¹Корепанов П.А., ³Векшина Е.А.,
¹Шулятьев К.Д., ¹Митранкова М.М., ¹Жильцов Н.С. (¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
Санкт-Петербург, Россия; ²ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; ³СПБПУ,
г. Санкт-Петербург, Россия; ⁴ООО Иоффе Фьюжн Текноложис, г. Санкт-
Петербург, Россия; ⁵АО НИИЭФА им. Д.Ф. Ефремова, г. Санкт-Петербург,
Россия)
ГЛОБУС-М2: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ПЛАНЫ НАУЧНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

**ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ «МАГНИТНОЕ УДЕРЖАНИЕ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ»**

47-107

Днестровский Ю.Н., Данилов А.В., Днестровский А.Ю., Лысенко С.Е., 47
Мельников А.В., Немец А.Р., Нурғалиев М.Р., Субботин Г.Ф., Соловьев Н.А.,
Сушков А.В., ¹Сычугов Д.Ю., Черкасов С.В. (НИЦ «Курчатовский институт»,
г. Москва, Россия; ¹МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия)
ТРАНСПОРТНЫЕ МОДЕЛИ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ НА ВТОРОЙ ЭЛЕКТРОННО-
ЦИКЛОТРОННОЙ ГАРМОНИКЕ В ТОКАМАКАХ И СТЕЛЛАТОРАХ

¹Горбунов А.В., ²Мухин Е.Е., ²Курские Г.С., ²Толстяков С.Ю., ¹Летунов А.Ю., 48
¹Лисица В.С., ¹Левашова М.Г., ¹Вуколов К.Ю. (¹НИЦ «Курчатовский институт»,
г. Москва, Россия; ²ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия)
ДИАГНОСТИКА ВОДОРОДА В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКОВ НА ОСНОВЕ
ЛАЗЕРНОГО ИНДУЦИРОВАННОГО ТУШЕНИЯ

Васина Я.А., Пришвицын А.С., Джурик А.С., Отрощенко В.Г., Лазарев В.Б., 49
Мирнов С.В. (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Троицк, г. Москва, Россия)
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАХВАТА ЛИТИЯ МНОГОСЛОЙНЫМ КОЛЛЕКТОРОМ НА
ОСНОВЕ КПС НА ТОКАМАКЕ Т-11М

- ¹Ананьев С.С., ¹Днестровский А.Ю., ^{1,2}Кукушкин А.С. (¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия) 50
 СОВМЕСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОПЛИВНЫХ ПОТОКОВ В ПЛАЗМЕ И В СИСТЕМАХ ИНЖЕКЦИИ И ОТКАЧКИ ДЕМО-ТИН
- Иванов Б.В., Ананьев С.С. (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) 51
 АНАЛИЗ УРОВНЯ ГОТОВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ТРИТИЕВОГО ЦИКЛА В РОССИИ ДЛЯ ГИБРИДНОГО РЕАКТОРА ДЕМО-ТИН
- Христо М.С., Беклемишев А.Д. (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; НГУ, г. Новосибирск, Россия) 52
 ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ РАВНОВЕСИЯ ДИАМАГНИТНОГО ПУЗЫРЯ В ОТКРЫТОЙ ЛОВУШКЕ
- ¹Судников А.В., ¹Беклемишев А.Д., ¹Иванов И.А., ¹Инжеваткина А.А., ^{1,2}Ларичкин М.В., ^{1,2}Ломов К.А., ¹Поступаев В.В., ¹Скляр В.Ф., ^{1,2}Устюжанин В.О. (¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; НГУ, г. Новосибирск, Россия) 53
 ИССЛЕДОВАНИЕ ВИНТОВОГО УДЕРЖАНИЯ В ЛИНЕЙНОЙ ЛОВУШКЕ СМОЛА
- ¹Багрянский П.А., ^{1,2}Лизунов А.А., ^{1,2}Максимов В.В., ^{1,2}Мейстер А.К., ¹Савкин В.Я., ¹Сковородин Д.И., ^{1,2}Солдаткина Е.И., ^{1,2}Соломахин А.Л., ^{1,2}Федоренков Э.А., ¹Яковлев Д.В. (¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; ²НГУ, г. Новосибирск, Россия) 54
 ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПРОДОЛЬНОГО УДЕРЖАНИЯ ЭНЕРГИИ В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ЛОВУШКЕ
- Бахтин В.П., Еськов А.Г., Житлухин А.М., Кочнев Д.М., Умрихин Н.М. (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Троицк, г. Москва, Россия) 55
 ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕСС УСКОРЕНИЯ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНОГО КОАКСИАЛЬНОГО УСКОРИТЕЛЯ
- ¹Крупин В.А., ^{1,3}Кудашев И.С., ¹Нургалиев М.Р., ^{1,4}Земцов И.А., ¹Немец А.Р., ¹Днестровский А.Ю., ¹Сарычев Д.В., ¹Соловьев Н.А., ¹Рыжаков Д.В., ¹Сергеев Д.С., ¹Мялтон Т.Б., ¹Тугаринов С.Н., ²Науменко Н.Н. (¹НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия; ²Институт физики НАН РБ, г. Минск, Республика Беларусь; ³НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия; ⁴МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия) 56
 ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ЯДЕР ПРИМЕСЕЙ И РАБОЧЕГО ГАЗА В РЕЖИМАХ С ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННЫМ РЕЗОНАНСНЫМ НАГРЕВОМ НА ТОКАМАКЕ Т-10
- Клищенко А.В., Ананьев С.С., Длугач Е.Д. (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) 57
 АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПАССИВНОГО СНИЖЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ИНЖЕКТОРОВ НЕЙТРАЛЬНОГО ПУЧКА ДЕМО-ТИН
- Ананьев С.С., Панасенков А.А., Длугач Е.Д., Кутеев Б.В. (¹НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия) 58
 АНАЛИЗ СХЕМЫ И ПАРАМЕТРЫ ИНЖЕКТОРА БЫСТРЫХ АТОМОВ ДЛЯ ТОКАМАКА ТИН-СТ
- ^{1,2}Горяинов В.Ю., ¹Воронин А.В., ¹Забродский В.В., ¹Курские Г.С. (¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия; ²СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия) 59
 ФИЛЬТРОВЫЙ СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

- ¹Ахметов Т.Д., ¹Багрянский П.А., ^{1,3}Зубарев П.В., ¹Иваненко С.В., ^{1,2}Иванов А.А., 60
¹Квашнин А.Н., ¹Коробейникова О.А., ^{1,2}Лизунов А.А., ¹Моисеев Д.В.,
^{1,2}Мурахтин С.В., ¹Пурьга Е.А., ^{1,2}Солдаткина Е.И., ¹Черноштанов И.С. (¹ИЯФ
СО РАН, г. Новосибирск, Россия; ²НГУ, г. Новосибирск, Россия; ³НГТУ,
г. Новосибирск, Россия)
УСТАНОВКА КОТ. БЛИЖАЙШИЕ ПЛАНЫ
- Суслин С.В., Демидов Д.Н., Ананьев С.С. (¹НИЦ «Курчатовский Институт», 61
г. Москва, Россия)
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТА И НАКОПЛЕНИЯ
ВОДОРОДА В МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МЕМБРАНАХ В
УСЛОВИЯХ ПОВРЕЖДАЮЩЕГО НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ
- ¹Жильцов Н.С., ¹Александров С.Е., ¹Баженов А.Н., ¹Варфоломеев В.И., ¹Гусев В.К., 62
¹Киселёв Е.О., ¹Коваль А.Н., ¹Курские Г.С., ¹Лукоянова А.В., ¹Минаев В.Б.,
¹Мухин Е.Е., ¹Новохацкий А.Н., ¹Патров М.И., ¹Петров Ю.В., ¹Сахаров Н.В.,
¹Сениченков В.А., ^{1,2}Соловей В.А., ¹Ткаченко Е.Е., ¹Толстяков С.Ю.,
²Чернаков П.В. (¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия;
²АО СпектралТех, г. Санкт-Петербург, Россия)
РЕКОНСТРУКЦИЯ ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЙЯНИЯ НА
ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2
- Ткаченко Е.Е., Курские Г.С., Жильцов Н.С., Воронин А.В., Горяинов В.Ю., 63
Мухин Е.Е., Толстяков С.Ю., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., Минаев В.Б.,
Новохацкий А.Н., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Киселёв Е.О.,
Чернаков Ал.П. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия)
ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОНОВ В ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2 ПО ДАННЫМ
ДИАГНОСТИК ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЙЯНИЯ И МЯГКОГО
РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
- ¹Инжеваткина А.А., ¹Судников А.В., ¹Бурдаков А.В., ¹Иванов И.А., ¹Поступаев В.В., 64
²Устюжанин В.О., ²Ломов К.А. (¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; ²НГУ,
г. Новосибирск, Россия)
ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ОТ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В
ОТКРЫТОЙ ВИНТОВОЙ ЛОВУШКЕ СМОЛА
- ^{1,2}Устюжанин В.О., ²Иванов И.А., ²Судников А.В., ²Инжеваткина А.А., ¹Ломов К.А. 65
(¹НГУ, г. Новосибирск, Россия; ²ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия)
ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАЗМЫ В ОТКРЫТОЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ С
ГЕЛИКОИДАЛЬНЫМ ПОЛЕМ СМОЛА
- Скрекель О.М., Бахарев Н.Н., Гусев В.К., Жильцов Н.С., Ильясова М.В., Киселев Е.О., 66
Корнев В.А., Курские Г.С., Мельник А.Д., Минаев В.Б., Мирошников И.В.,
Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Тельнова А.Ю., Толстяков С.Ю.,
Тюхменева Е.А., Хилькевич Е.М., Чернышев Ф.В., Чугунов И.Н., Шевелев А.Е.,
Щёголев П.Б. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия)
МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА ИЗ ПЛАЗМЫ СФЕРИЧЕСКОГО
ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2 В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С НЕЙТРАЛЬНОЙ
ИНЖЕКЦИЕЙ
- Пинженин Е.И. (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия) 67
ЭМИССИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА УСТАНОВКЕ ГДЛ
В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ НАГРЕВОМ
- Бруль А.В., Амиров В.Х., Дейчули П.П., Давыденко В.И., Иванов А.А., 68
Капитонов В.А., Сорокин А.В., Ступишин Н.В. (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск,

Россия)

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ЭМИССИОННОГО ОТВЕРСТИЯ И СТРУКТУРЫ
УСКОРЯЮЩЕЙ ЯЧЕЙКИ НА ФОРМИРОВАНИЯ МОЩНОГО АТОМАРНОГО
ПУЧКА ДЛЯ НАГРЕВА И СТАБИЛИЗАЦИИ ПЛАЗМЫ

Баркалов К.Е., Анашкин И.О., Баркалов Е.Е., Грибов А.А., Королёв В.Ф., 69
Никулин В.А., Панасенков А.А., Петров В.С. (НИЦ «Курчатовский институт»,
г. Москва, Россия)

СИСТЕМА ИНЖЕКЦИИ ДЛЯ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА T15-МД

^{1,2}Асмедьянов Н.Р., ¹Колесников Е.Ю. (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; 70
¹НГУ, г. Новосибирск, Россия)

ИСТОЧНИК ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ
ИНЖЕКЦИИ ПЛАЗМЫ В ГДЛ

Токарев В.А., Гусев В.К., Хромов Н.А., Воронин А.В., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., 71
Новохацкий А.Н., Минаев В.Б., Варфоломеев В.И., Балаченков И.М., Тельнова А.Ю.,
Щеголев П.Б., Бахарев Н.Н., Курские Г.С., Киселев Е.О., Патров М.И.,
Тюхменева Е.А., Толстяков С.Ю. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ СКРЕЙП-СЛОЯ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2 С
ПОМОЩЬЮ ИК-КАМЕРЫ

¹Горбун М.С., ¹Мельников А.В., ²Сычугов Д.Ю. (¹НИЦ «Курчатовский 72
институт», г. Москва, Россия; ²Факультет вычислительной математики и
кибернетики МГУ, г. Москва, Россия)

РАСЧЁТ МАГНИТНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ
ТРЕУГОЛЬНОСТЬЮ ДЛЯ ТОКАМАКА T-15МД

¹Тюхменева Е.А., ¹Бахарев Н.Н., ¹Варфоломеев В.И., ¹Гусев В.К., ¹Жильцов Н.С., 73
¹Забродский В.В., ¹Киселев Е.О., ¹Курские Г.С., ¹Минаев В.Б., ¹Мирошников И.В.,
¹Петров Ю.В., ¹Сахаров Н.В., ²Соловей В.А., ¹Тельнова А.Ю., ¹Толстяков С.Ю.,
¹Щеголев П.Б. (¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия; ²ПИЯФ им.
Б.П. Константинова, г. Гатчина, Россия)

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ОПТИЧЕСКИХ ДИАГНОСТИК ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2

^{1,2,3}Саврухин П.В., ^{1,2}Шестаков Е.А., ¹Храменков А.В., ³Лисовой П., ³Прохоров И. 74
(¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²ЧУ «ИТЭР центр»,
г. Москва, Россия; ³НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия)

ДИАГНОСТИКА ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА
ТОКАМАКЕ T-15МД

Мещеряков А.И., Вафин И.Ю., Гришина И.А. (ИОФ РАН, г. Москва, Россия) 75
САМОСОГЛАСОВАННЫЕ ПРОФИЛИ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И
ДАВЛЕНИЯ В РЕЖИМЕ ЭЦР НАГРЕВА ПЛАЗМЫ НА СТЕЛЛАТОРЕ L-2M

Мещеряков А.И., Вафин И.Ю., Гришина И.А. (ИОФ РАН, г. Москва, Россия) 76
ПОИСК «РЕНТГЕНОВСКОЙ ЯМЫ» В РЕЖИМАХ ОМИЧЕСКОГО И ЭЦР
НАГРЕВА ПЛАЗМЫ В СТЕЛЛАТОРЕ L-2M

Балашов А.Ю., Белов А.М., Семенов П.С., Сушков А.В., Степин А.В. 77
(НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия)
ИЗМЕРЕНИЯ МГД АКТИВНОСТИ ПЛАЗМЫ ВЕРСИИ 2020 НА
УСТАНОВКЕ T-11M

Степин А.В., Балашов А.Ю., Белов А.М., Игонькина Г.Б., Семенов П.С., 78
Соколов М.М., Сушков А.В., Хайрутдинов Э.Н. (НИЦ «Курчатовский институт»,
г. Москва, Россия)

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ АБСОЛЮТНОЙ КАЛИБРОВКИ МАГНИТНЫХ ЗОНДОВ ТОКАМАКА Т-15МД

- Борщеговский А.А. (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) 79
 ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ПЛАЗМЕННОГО ШНУРА ПРИ НАЛИЧИИ ВНЕШНЕГО ИСТОЧНИКА (ОН, ЕСРН) (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА УСТАНОВКЕ ТОКАМАК Т-10)
- ¹Пименов И.С., ¹Борщеговский А.А., ¹Рой И.Н., ¹Неудачин С.В., ²Попов Л.Г., ²Агапова М.В., ²Бельнова Л.М. (¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²ЗАО НПП «ГИКОМ», г. Нижний Новгород, Россия) 80
 ПЕРВЫЙ ЭТАП РАЗВИТИЯ ГИРОТРОННОГО КОМПЛЕКСА И СИСТЕМЫ ВВОДА СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ЭЦРН НА УСТАНОВКЕ ТОКАМАК Т-15МД
- ¹Саранча Г.А., ²Свобода В., ^{2,3}Штокель Я., ^{1,3}Мельников А.В. (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ¹МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия; ²Чешский технический университет, г. Прага, Чешская Республика; ³НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия) 81
 СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОДОРОДНЫХ И ГЕЛИЕВЫХ РАЗРЯДОВ В МАЛОМ ТОКАМАКЕ GOLEM
- ¹Хабанов Ф.О., ¹Мельников А.В., ¹Елисеев Л.Г., ¹Драбинский М.А., ²Харчев Н.К., ³Минаев В.Б. (¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²ИОФ РАН, г. Москва, Россия; ³ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия) 82
 ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ ПУЧКОМ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ДЛЯ ТОКАМАКОВ Т-15МД И ГЛОБУС-М2
- ^{1,2}Вадимов Н.А., ^{1,2}Драбинский М.А., ^{1,2,3}Мельников А.В., ^{1,2}Саранча Г.А. (¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия; ³НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия) 83
 ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ ПУЧКОМ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ТОКАМАКА Т-15МД
- ¹Крохалев О.Д., ^{1,2}Мельников А.В. (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ¹МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия; ²НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия) 84
 ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГАМ С ШИРОКОПОЛОСНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТЬЮ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА Т-10
- ^{1,2}Сергеев Н.С., ^{1,2}Мельников А.В., ¹Грашин С.А., ¹Шелухин Д.А. (¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия) 85
 СВОЙСТВА ДАЛЬНИХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ ФЛУКТУАЦИЙ ПЛОТНОСТИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА Т-10
- Иванов Б.В., Ананьев С.С. (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) 86
 РАСЧЕТ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА ПРОДУКТОВ ВАКУУМНОЙ ОТКАЧКИ ТОКАМАКА, СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ
- ¹Драбинский М.А., ¹Елисеев Л.Г., ¹Хабанов Ф.О., ¹Мельников А.В., ²Харчев Н.К. (¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²ИОФ РАН, г. Москва, Россия) 87
 ЭВОЛЮЦИЯ РАДИАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАМ И КВАЗИКОГЕРНЕТНОЙ МОДЫ В РЕЖИМАХ С ОМИЧЕСКИМ И МОЩНЫМ ЭЦР-НАГРЕВОМ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА Т-10

- Дейчули П.П., Вахрушев Р.В., Иванов А.А., Орешонок В.В., Ращенко В.В., Колмогоров В.В., Колмогоров А.В., Ступишин Н.В. (*ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия*) 88
 МОДЕРНИЗАЦИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО АТОМАРНОГО ИНЖЕКТОРА ДЛЯ ТОКАМАКА ST-40¹
- ¹Дейчули П., ¹Бруль А., ¹Давыденко В., ¹Иванов А., ²Осин Д., ³Magee R. (*¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; ²Tokatamak Energy Ltd., Abingdon, UK; ³Tri Alpha Energy Ltd, Foothill Ranch, CA, USA*) 89
 ИЗМЕРЕНИЕ СООТНОШЕНИЯ ИЗОТОПОВ И МОЛЕКУЛЯРНЫХ ФРАКЦИЙ В СМЕШАННОМ ВОДОРОДНО-ДЕЙТЕРИЕВОМ АТОМАРНОМ ПУЧКЕ
- Арсенин В.В. (*НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия*) 90
 О КРУПНОМАСШТАБНЫХ МГД-ДВИЖЕНИЯХ В ПЛАЗМЕННОМ ШНУРЕ, ПОРОЖДАЕМЫХ ЛОКАЛИЗОВАННОЙ ДРЕЙФОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТЬЮ
- ^{1,2}Балаченков И.М., ²Буланин В.В., ¹Гусев В.К., ^{1,2}Жильцов Н.С., ^{1,2}Киселёв Е.О., ¹Курские Г.С., ¹Минаев В.Б., ¹Патров М.И., ²Петров А.В., ¹Петров Ю.В., ²Пономаренко А.М., ¹Сахаров Н.В., ²Яшин А.Ю. (*¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия; ²СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия*) 91
 ОБНАРУЖЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ АЛЬФВЕНОВСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ОМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ И РЕЖИМАХ С НИЖНЕГИБРИДНЫМ НАГРЕВОМ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2
- ¹Курские Г.С., ¹Солоха В.В., ²Яшин А.Ю. (*¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия; ²СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия*) 92
 ДВУХЖИДКОСТНЫЕ МГД СИМУЛЯЦИИ ПИЛИНГ-БАЛЛОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2
- Курские Г.С. (*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия*) 93
 ПРИМЕНЕНИЕ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ
- Субботин Г.Ф., Шелухин Д.А., Вершков В.А. (*НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия*) 94
 ВОЗМОЖНОСТИ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ НА УСТАНОВКЕ T15-МД
- ^{1,2}Будаев В.П., ¹Дедов А.В., ¹Федорович С.Д., ¹Карпов А.В., ^{1,2}Мартыненко Ю.В., ¹Губкин М.К., ¹Лукашевский М.В., ¹Комов А.Т., ¹Захаренков А.В., ¹Варава А.Н., ¹Лубенченко А.В., ¹Слива А.П., ¹Марченков А.Ю., ¹Васильев Г.Б., ¹Чан Куанг В., ¹Рогозин К.А., ¹Коньков А.А., ¹Журавлев К.В., ¹Штелинг В.С., ¹Тупотилов И.А. (*¹НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия; ²НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия*) 95
 ИСПЫТАНИЯ ОХЛАЖДАЕМЫХ МАКЕТОВ ВОЛЬФРАМОВЫХ МОДУЛЕЙ ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ ОБЛИЦОВКИ ДИВЕРТОРА КОМБИНИРОВАННЫМ ОБЛУЧЕНИЕМ МОЩНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ И СТАЦИОНАРНЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ
- ¹Яшин А.Ю., ¹Буланин В.В., ¹Петров А.В., ¹Пономаренко А.М., ²Гусев В.К., ²Курские Г.С., ²Минаев В.Б., ²Патров М.И., ²Петров Ю.В., ²Сахаров Н.В. (*¹СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия; ²ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия*) 96
 ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2 МЕТОДОМ ДОППЛЕРОВСКОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ
- ^{1,3}Бурдаков А.В., ^{1,2}Иванов И.А., ¹Инжеваткина А.А., ^{1,2}Поступаев В.В., ¹Ровенских А.Ф., ^{1,2}Скляр В.Ф., ^{1,2}Сковородин Д.И., ^{1,2}Судников А.В., ²Устюжанин В.О. (*¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; ²НГУ, г. Новосибирск,*) 97

Россия; ³НГТУ, г. Новосибирск, Россия)

СВЧ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ ПЛАЗМЫ НА УСТАНОВКЕ "СМОЛА"

Сковородин Д.И. (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия) 98
 МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕЙТРАЛЬНОГО ГАЗА НА ПОТЕНЦИАЛ
 В РАСШИРИТЕЛЕ ОТКРЫТОЙ ЛОВУШКИ

Гладуш Г.Г., Родионов Н.Б., Артемьев К.К., Виноградова А.В., Родионов Д.С. 99
 (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, г. Троицк, Россия)
 МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ БЛАНКЕТА ДЛЯ РЕАКТОРА СИНТЕЗ-
 ДЕЛЕНИЕ НА ОСНОВЕ ТОКАМАКА

Родионов Н.Б., Ильин К.И., Романников А.Н., Дрягин С.Ю. (АО «ГНЦ РФ
 ТРИНИТИ», г. Москва, г. Троицк, Россия) 100
 СОЗДАНИЕ ИНФРАСТРУКТУРЫ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТОКАМАКОВ
 С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ НА БАЗЕ АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»

Длугач Е.Д., Кутеев Б.В. (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) 101
 ТОРМОЖЕНИЕ НЕЙТРАЛЬНОГО ПУЧКА И ГЕНЕРАЦИЯ ТОКА С
 ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ВTR

Воробьев Г.М., Ганин С.А., Ефимов Н.Е., Крат С.А., Курнаев В.А., 102
 Пришвицын А.С. (НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия)
 ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ СОЗДАНИЯ ВИХРЕВОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ
 ТОКАМАКА MERIST-0

Булгадарян Д.Г., Виницкий Е.А., Воробьев Г.М., Ефимов Н.Е., Крат С.А., 103
Курнаев В.А., Пришвицын А.С. (НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия)
 ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ ВИНТОВОГО ТОРОИДАЛЬНОГО
 СОЛЕНОИДА ТОКАМАКА MERIST-0

^{1,2}Васильков Д.Г., ¹Гребенщиков С.Е., ¹Гришина И.А., ¹Мещеряков А.И., 104
^{1,2}Петрова М.Н., ¹Харчев Н.К. (¹ИОФ РАН, г. Москва, Россия, ²МГТУ им.
 Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия)
 СПОНТАННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ ПЕРЕХОДЫ ПРИ ПРЕДЕЛЬНЫХ
 МОЩНОСТЯХ ЭЦР-НАГРЕВА ПЛАЗМЫ В СТЕЛЛАРАТОРЕ L-2M

¹Дремин М.М., ²Новоходская Е.О., ²Капралов В.Г., ²Богданов А.М., ²Кривошеев А.Н., 105
¹Крылов С.В., ²Соловьев К.В., ¹Трубников А.С. (¹НИЦ «Курчатовский институт»,
 г. Москва, Россия, ²СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия,)
 МАССИВНАЯ ГАЗОВАЯ ИНЖЕКЦИЯ В ТОКАМАКИ T-10 И T-15MD

Капралов В.Г., Кривошеев А.Н., Богданов А.М., Новоходская О.Е., Соловьев К.В. 106
 (СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия)
 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА С ПРИМЕНЕНИЕМ
 НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Капралов В.Г., Богданов А.М., Новоходская О.Е., Соловьев К.В., Кривошеев А.Н. 107
 (СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия)
 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДСКАЗАНИЯ СРЫВА В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА С
 ПРИМЕНЕНИЕМ СВЁРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ «ИНЕРЦИАЛЬНЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ»

Демченко Н.Н. (ФИАН, г. Москва, Россия) 111-132
 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
 С УЧЕТОМ РЕЗОНАНСНОГО МЕХАНИЗМА И ГЕНЕРАЦИИ БЫСТРЫХ
 ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАЗМЕ С РАЗМЕРОМ, ВОЗНИКАЮЩИМ ПРИ 111

ЗАЖИГАНИИ ТЕРМОЯДЕРНОЙ МИШЕНИ

¹Вергунова Г.А., ¹Гуськов С.Ю., ²Зарецкий Н.П., ³Змитренко Н.В., ^{1,3}Кучугов П.А., 112
¹Яхин Р.А. (¹ФИАН, г. Москва, Россия; ²НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ³ИПМ РАН, г. Москва, Россия)

УДАРНЫЕ ВОЛНЫ С ГИГАБАРНЫМ УРОВНЕМ ДАВЛЕНИЯ,
 ИНИЦИИРУЕМЫЕ ПОТОКОМ ЛАЗЕРНО-УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Фролов А.А. (ФИАН, г. Москва, Россия) 113
 ИЗЛУЧЕНИЕ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ВОЛН ПРИ НАКЛОННОМ ПАДЕНИИ
 ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА НА ГРАНИЦУ РАЗРЕЖЕННОЙ ПЛАЗМЫ

Пономарев И.В., Долголева Г.В. (МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия) 114
 КУМУЛЯЦИИ ЭНЕРГИИ В ТРЕХКАСКАДНОЙ СЛОИСТОЙ СИСТЕМЕ

Ананьев С.С., Суслин С.В. (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) 115
 МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЛАЗМЫ В УСТАНОВКАХ С
 ПЛАЗМЕННЫМ ФОКУСОМ

¹Елисеев С.И., ^{2,3}Тимшина М.В., ⁴Самохвалов А.А., ⁵Жао Й.-П., ^{2,3}Бурцев В.А. 116
 (¹Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия; ²ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия; ³ООО «Лаборатория им. В.А. Бурцева», г. Санкт-Петербург, Россия; ⁴Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия; ⁵Национальная лаборатория лазерных технологий, Харбинский политехнический университет, г. Харбин, Китай)
 ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ВЛИЯНИЯ ПРЕДИОНИЗАЦИИ НА
 ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛАЗЕРОВ

Александрова И.В., Корешева Е.Р., Кошелев Е.Л., Никитенко А.И., Тимашева Т.П. 117
 (ФИАН, г. Москва, Россия)
 ВТСП НАПРАВЛЯЮЩАЯ ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ТРАНСПОРТА
 КРИОГЕННЫХ МИШЕНЕЙ С ПОМОЩЬЮ МАГНИТНОГО НОСИТЕЛЯ

¹Змитренко Н.В., ^{1,2}Кучугов П.А. (¹ИПМ РАН, г. Москва, Россия, 118
²ФИАН, г. Москва, Россия)
 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ
 НЕУСТОЙЧИВОСТИ КЕЛЬВИНА-ГЕЛЬМГОЛЬЦА В ЛАЗЕРНОМ
 ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Кастильо А.Х., Милантьев В.П. (РУДН, г. Москва, Россия) 119
 ОБ УСЛОВИЯХ ИНЖЕКЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ УСКОРЕНИИ ЛАЗЕРНЫМ
 ГАУССОВЫМ ПУЧКОМ

¹Пастухов А.В., ²Даванков В.А., ¹Акунец А.А., ¹Борисенко Н.Г., ¹Кувшинов И.Р., 120
¹Писарева Е.А., ¹Громов А.И. (¹ФИАН, г. Москва, Россия; ²ИНЭОС РАН, г. Москва, Россия)
 МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МИКРОКАПСУЛ-ОБОЛОЧЕК ДЛЯ
 ЛАЗЕРНЫХ МИШЕНЕЙ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

Гаранин С.Ф., Долинский В.Ю., Макеев Н.Г., Мамышев В.И., Маслов В.В. 121
 (РФЯЦ – ВНИИЭФ, г. Саров, Россия)
 МГД-МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СФЕРИЧЕСКИХ
 КАМЕРАХ С ПЛАЗМЕННЫМ ФОКУСОМ С УЧЕТОМ ГЕНЕРАЦИИ
 НЕЙТРОНОВ

Баронова Е.О., Вихрев В.В. (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) 122
 ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА ИНТЕНСИВНОСТИ ЛИНИЙ Ar XVII
 И Ar XVIII, ЭМИТИРОВАННЫХ ПИНЧЕВОЙ ПЛАЗМОЙ

- Вихрев В.В., ¹Фролов А.Ю. (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; 123
¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия)
 О МЕХАНИЗМАХ ГЕНЕРАЦИИ НЕЙТРОНОВ В Z-ПИНЧАХ
- Дороготовцев В.М. (ФИАН, г. Москва, Россия) 124
 ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛИМЕРНЫХ
 КАПСУЛ ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНЫХ МИШЕНЕЙ
- Громов А.И., Акунец А.А., Борисенко Н.Г., Пастухов А.А., Перваков К.С., 125
 Писарева Е.А., Толоконников С.М. (ФИАН, г. Москва, Россия)
 ТОНКИЙ СЛОЙ ИЗ НАНОПОРОШКОВ ИЗБРАННЫХ МЕТАЛЛОВ ДЛЯ
 МИШЕНЕЙ ИТС, ПОЛУЧЕНИЕ И МОНИТОРИНГ
- Тимшина М.В., Калинин Н.В., Елисеев И., Бурцев В.А. 126
 ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ РОЛИ ЖЕСТКОГО ИОНИЗАТОРА В ПОВЫШЕНИИ
 ЭФФЕКТИВНОСТИ НАКАЧКИ АКТИВНОЙ СРЕДЫ КОМПАКТНЫХ ЛАЗЕРОВ
 ЭУФ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА
- Вергунова Г.А., Гуськов С.Ю., Яхин Р.А. (ФИАН, г. Москва, Россия) 127
 ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ НАГРЕВА
 РЕНТГЕНОВСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ КАПСУЛ НЕПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА
 ИХ СЖАТИЕ И ГОРЕНИЕ
- Ильичев И. В., ^{2,3}Калашников И.Ю., ⁴Додин А.В., ¹Крауз В.И., ^{1,2,3}Чечеткин В.М. 128
 (¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²ИПМ РАН, г. Москва,
 Россия; ³ИАП РАН, г. Москва, Россия; ⁴ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия)
 ВЛИЯНИЕ ВАКУУМНОГО СЛЕДА НА КОЛЛИМАЦИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ И
 АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ДЖЕТОВ
- Харрасов А.М., ²Митрофанов К.Н., ¹Ананьев С.С., ¹Ильичев И.В., ¹Крауз В.И., 129
¹Мялтон В.В., ^{3,4}Бескин В.С. (¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия;
²АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, г. Троицк, Россия; ³ФИАН, г. Москва,
 Россия; ⁴МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия)
 ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ АЗИМУТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ОСЕВОГО
 ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА НА УСТАНОВКЕ ПФ-3
- ^{1,2}Бочкарев С.Г., ^{1,3}Гожев Д.А., ^{1,2}Брантов А.В., ^{1,2}Быченков В.Ю. (¹ФИАН, 130
 г. Москва, Россия; ²ВНИИА им. Н.Л. Духова, г. Москва, Россия; ³Международный
 учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия)
 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТРУКТУРИРОВАННЫХ МИШЕНЕЙ, ОБЛУЧАЕМЫХ
 УЛЬТРАКОРОТКИМ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ, ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ
 НЕЙТРОНОВ
- ¹Александров В.В., ¹Браницкий А.В., ²Болдарев А.С., ²Вичев И.Ю., 131
²Гасилов В.А., ¹Грабовский Е.В., ¹Грицук А.Н., ²Грушин А.С., ¹Митрофанов К.Н.,
²Ольховская О.Г., ²Сасоров П.В., ¹Шишлов А.О. (¹АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»,
 г. Троицк, г. Москва, Россия, ²ИПМ РАН, г. Москва, Россия)
 ИЗУЧЕНИЕ УСЛОВИЙ, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ
 СТАБИЛЬНОСТИ СЖАТИЯ ИЗЛУЧАЮЩЕГО Z-ПИНЧА ПРИ ТОКОВОЙ
 ИМПЛОЗИИ 2-Х КАСКАДНОЙ ВЛОЖЕННОЙ СБОРКИ И ОДИНОЧНОЙ
 СБОРКИ ИЗ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВОЛОКОН
- ¹Красильников А.В., ¹Родионов Н.Б., ¹Мещанинов С.А., ¹Амосов В.Н., 132
¹Артемьев К.К., ²Базулин И.А. (¹ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР»,
 г. Москва, Россия; ²НИУ МЭИ, г. Москва, Россия)
 ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЙ СПЕКТРОМЕТР ИМПУЛЬСНЫХ КОРПУСКУЛЯРНЫХ
 ПОТОКОВ НА ОСНОВЕ АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО
 ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ	
«ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ»	
<p>Апфельбаум Е.М. (<i>ОИВТ РАН, г. Москва, Россия</i>) РАСЧЁТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ГАЛЛИЯ</p>	135
<p>Шпатаковская Г.В. (<i>ИППМ РАН, г. Москва, Россия</i>) ЗАКОНОМЕРНОСТИ В ПОРЯДКЕ ЗАПОЛНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ОБОЛОЧЕК В ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛАХ</p>	136
<p>^{1,2}Мартынова И.А., ^{1,2}Иосилевский И.Л. (¹<i>ОИВТ РАН, г. Москва, Россия;</i> ²<i>МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Московская обл., Россия</i>) АВТОМОДЕЛЬНОСТЬ НЕЛИНЕЙНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ В АСИММЕТРИЧНОЙ КОМПЛЕКСНОЙ ПЛАЗМЕ</p>	137
<p>Дзалиева Е.С., Карасев В.Ю., Новиков Л.А., Павлов С.И., Тарасов С.В., Яницын Д.В. (<i>Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия</i>) ОБЪЕМНЫЕ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫЕ СТРУКТУРЫ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ В СИЛЬНОМ ОДНОРОДНОМ И НЕОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ</p>	138
<p>Лебедев Ю.А., Татаринцов А.В., Эпштейн И.Л., Титов А.Ю. (<i>ИНХС РАН, г. Москва, Россия</i>) МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЧ РАЗРЯДА В ВОДЕ</p>	139
<p>¹Лизякин Г.Д., ¹Антонов Н.Н., ¹Усманов Р.А., ^{1,2}Мельников А.Д., ¹Тимирханов Р.А., ¹Ворона Н.А., ^{1,2}Смирнов В.С., ^{1,2}Ойлер А.П., ¹Кисленко С.А., ¹Гавриков А.В., ¹Смирнов В.П. (¹<i>ОИВТ РАН, г. Москва, Россия;</i> ²<i>МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия</i>) МАСС-СЕПАРАЦИЯ СМЕСИ Ag + Pb В СКРЕЩЕННЫХ E × B ПОЛЯХ В БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ</p>	140
<p>Кузьмин Е.И., Маслаков И.Д., Чесноков А.В., Шиховцев И.В. (<i>ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия</i>) ГЕЛИКОННЫЙ ИСТОЧНИК ПЛАЗМЫ С НЕОДНОРОДНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ</p>	141
<p>^{1,2}Майстренко Д.А., ¹Шагайда А.А., ^{1,2}Ловцов А.С. (¹<i>ИППМ РАН, г. Москва, Россия;</i> ²<i>МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия</i>) РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ НОВОГО ЗОНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУИ ЭРД</p>	142
<p>Франк А.Г., Сатунин С.Н. (<i>ИОФ РАН, г. Москва, Россия</i>) ТОКИ ОБРАТНОГО НАПРАВЛЕНИЯ В ТОКОВЫХ СЛОЯХ: ПРИЧИНЫ И СЛЕДСТВИЯ</p>	143
<p>Лебедев Ю.А., Крашевская Г.В., Батукаев Т.С. (<i>ИНХС РАН, г. Москва, Россия</i>) ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ЗАЖИГАНИЯ СВЧ-РАЗРЯДА В ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДАХ</p>	144
<p>Иосилевский И.Л. (<i>ОИВТ РАН, г. Москва, Россия, МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия</i>) ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОПЛАЗМЕННОГО СОСТОЯНИЯ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ («ВАКУУМНОМ») ПРЕДЕЛЕ</p>	145
<p>Медведев А.Э. (<i>ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия</i>) ЛОКАЛЬНЫЙ БАЛАНС ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ГАЗОРАЗРЯДНОЙ</p>	146

ПЛАЗМЕ: ИСТОРИЯ ВОПРОСА

- Векленко Б.А. (*ОИВТ РАН, г. Москва, Россия*) 147
 СВЯЗАННЫЕ СОСТОЯНИЯ ФОТОННЫХ ПАР КАК СЛЕДСТВИЕ ПРОЦЕССОВ
 КОГЕРЕНТНОГО СПОНТАННОГО И КОГЕРЕНТНОГО ВЫНУЖДЕННОГО
 ИЗЛУЧЕНИЙ
- Балмашнов А.А., Бутко Н.Б., Калашников А.В., Степин В.П., Степина С.П.,
 Умнов А.М. (*РУДН, г. Москва, Россия*) 148
 ПАРАМЕТРЫ ЭЦР-ПЛАЗМЫ, ФОРМИРУЕМЫЕ ПРОДОЛЬНОМ СВЧ-
 ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ И ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕОДНОРОДНЫМ МАГНИТНОМ
 ПОЛЯМИ
- Савельев В.В. (*ИПМ РАН, г. Москва, Россия*) 149
 НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ В ХОЛЛОВСКОЙ МАГНИТНОЙ ГИДРОДИНАМИКЕ
- Дудник Ю.Д., Кузнецов В.Е., Сафронов А.А., Ширяев В.Н., Васильева О.Б.
 (*ИЭЭ РАН, г. Санкт-Петербург, Россия*) 150
 ПЛАЗМЕННОЕ ПОЛУЧЕНИЕ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ
- ¹Гавриков М.Б., ¹Таюрский А.А. (*¹ИПМ РАН, г. Москва, Россия*) 151
 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАГНИТНОГО ТОРНАДО В СОЛНЕЧНОЙ
 ПЛАЗМЕ
- Милантьев В.П. (*РУДН, г. Москва, Россия*) 152
 ЗАХВАТ ЭЛЕКТРОНОВ В РЕЖИМ СИНХРОННОГО УСКОРЕНИЯ
 В КОМБИНИРОВАННОЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ
- Абрамов И.С., Господчиков Е.Д., Шалашов А.Г. (*ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия*) 153
 РАЗРЯД, ПОДДЕРЖИВАЕМЫЙ ИМПУЛЬСОМ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА НА
 СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ, КАК ИСТОЧНИК ЭКСТРЕМАЛЬНОГО
 УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
- Аблесимов В.Е., Пашарина О.Ю. (*РФЯЦ – ВНИИЭФ, г. Саров, Россия*) 154
 РЕГИСТРАЦИЯ DD-НЕЙТРОНОВ ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА
 СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫМИ ДЕТЕКТОРАМИ В ЗАМКНУТОМ ПРОСТРАНСТВЕ
 – МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА
- ¹Казиев А.В., ^{1,2}Колодко Д.В., ¹Агейченков Д.Г., ^{1,3}Сергеев Н.С., ¹Харьков М.М.
 (*¹НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия; ²ФирЭ РАН, г. Фрязино, Россия;*
³НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) 155
 СОПОСТАВЛЕНИЕ КОРПУСКУЛЯРНОЙ И ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИК
 В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ РАЗРЯДЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ В ИНЕРТНЫХ
 ГАЗАХ
- ¹Казиев А.В., ^{1,2}Колодко Д.В., ¹Конагуру Р., ^{1,3}Сергеев Н.С., ¹Агейченков Д.Г.
 (*¹НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия; ²ФирЭ РАН, г. Фрязино, Россия;*
³НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) 156
 ДИАГНОСТИКА ПОТОКОВ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ
 В ПРОЦЕССАХ РЕАКЦИОННОГО МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ
- Андреев В.В., Новицкий А.А., Умнов А.М. (*РУДН, г. Москва, Россия*) 157
 ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЕ И ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В ПЛАЗМЕ
 С ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ЭЛЕКТРОННЫМ ВИХРЕМ УДЕРЖИВАЕМОЙ
 В ПРОБКОТРОНЕ
- Шахатов В.А. (*ИНХС РАН, г. Москва, Россия*) 158

РАЗРАБОТКА САМОСОГЛАСОВАННОЙ СТОЛКНОВИТЕЛЬНО-ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ ДИССОЦИАЦИИ МОЛЕКУЛЫ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ	
¹ Голубева А.В., ¹ Хрипунов Б.И., ¹ Бобырь Н.П., ¹ Преснякова Н.Н., ² Чернов В.М. (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ² АО ВНИИНМ им. А.А. Бочвара, г. Москва, Россия)	159
СЕЛЕКТИВНОЕ РАСПЫЛЕНИЕ НИЗКОАКТИВИРУЕМОЙ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ ЭК-181 (РУСФЕР)	
^{1,2,3} Марусов Н.А., ^{1,3} Сорокина Е.А., ³ Кирий П.А. (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ² МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия; ³ РУДН, г. Москва, Россия)	160
ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ВОЛН НА КОЛЛЕКТИВНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В СКРЕЩЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ	
<u>Калашников А.В., Шевцов Е.А.</u> (РУДН, г. Москва, Россия)	161
ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОГО СВЧ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПАРАМЕТРЫ ПОТОКА ПЛАЗМЫ БЕЗЭЛЕКТРОДНОГО ИНЖЕКТОРА	
^{1,2} Сергеев Н.С., ² Казиев А.В., ^{2,3} Колодко Д.В. (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ² НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия; ³ ФИРЭ РАН, г. Фрязино, Россия)	162
ИЗМЕРЕНИЕ ИОННЫХ ПОТОКОВ НА ПОДЛОЖКУ ПРИ ОСАЖДЕНИИ W И WO ₃ В МАГНЕТРОННОМ РАЗРЯДЕ	
¹ Рогозин К.А., ² Соколов М.Н., ¹ Федорович С.Д., ¹ Квасков В.С., ¹ Коньков А.А. (НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия; ² ЯрГУ им. Демидова, г. Ярославль, Россия)	163
ИСТОЧНИК НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ДЕЗИНФЕКЦИИ БЫТОВЫХ И МЕДИЦИНСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	
¹ Юров В.Ю., ^{1,2} Ральченко В.Г., ¹ Мартыанов А.К., ^{1,2} Антонова И.А., ¹ Седов В.С., ¹ Шевченко М.Ю., ¹ Большаков А.П. (ИОФ РАН, г. Москва, Россия; ² НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия)	164
ОПТИЧЕСКАЯ ЭМИССИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЧ-ПЛАЗМЫ В СМЕСЯХ МЕТАН-ВОДОРОД-СИЛАН В ПРОЦЕССЕ ОСАЖДЕНИЯ ПЛЕНОК SiC И КОМПОЗИТОВ SiC-АЛМАЗ	
<u>Кирий Н.П., Воронова Е.В.</u> (ИОФ РАН, г. Москва, Россия)	165
ГЕНЕРАЦИЯ СВЕРХТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ В ТОКОВЫХ СЛОЯХ, ФОРМИРУЕМЫХ ПРИ РАЗРЯДЕ В КРИПТОНЕ	
<u>Жуков В.И., Карфидов Д.М.</u> (ИОФ РАН, г. Москва, Россия)	166
РАЗВИТИЕ САМОСОГЛАСОВАННОГО СВЧ РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЕ В ПОЛЕ ОТКРЫТОГО РЕЗОНАТОРА	
Артемьев К.В., Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., <u>Борзосеков В.Д.</u> , Давыдов А.М., Колик Л.В., Кончечков Е.М., Косый И.А., Моряков И.В., Петров А.Е., Сарксян К.А., Степахин В.Д., Харчев Н.К. (ИОФ РАН, г. Москва, Россия)	167
МАКРОСКОПИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОВОЛНОВОГО ПОДПОРОГОВОГО РАЗРЯДА В ГАЗАХ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ	
ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ	
«ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛАЗМЕННЫХ И ЛУЧЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»	171-198
Змиевская Г.И. (ИПМ РАН, г. Москва, Россия)	171
ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ: СВЯЗЬ С ФОНОНИКОЙ	

- ¹Шавелкина М.Б., ¹Иванов П.П., ¹Кавыршин Д.И., ¹Амиров Р.Х., ¹Бочаров А.Н., 172
²Шавелкин М.А. (¹ОИВТ РАН, г. Москва, Россия, ²НИУ МЭИ, г. Москва, Россия)
 МНОГОКАНАЛЬНОСТЬ СИНТЕЗА УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР В
 НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ
- ¹Медведев А.Э., ²Емельянов А.А., ²Юдин И.Б., ²Плотников М.Ю., ²Тимошенко Н.И., 173
³Окотруб А.В. (¹ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, ²Институт теплофизики
 СО РАН, г. Новосибирск, Россия, ³Институт неорганической химии СО РАН, г.
 Новосибирск, Россия)
 АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ АЗОТА ПРИ СИНТЕЗЕ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПЛЁНОК С
 РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ АКТИВАЦИИ ГАЗА
- ¹Двинин С.А., ³Кодирзода З.А., ³Синкевич О.А., ²Солихов Д.К. (¹МГУ им. 174
 М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, ²ТНУ, Душанбе, Таджикистан, ³НИУ МЭИ,
 г. Москва, Россия)
 ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ИНТЕГРАЛЬНЫЕ
 МОДЕЛИ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЕМКОСТНОГО РАЗРЯДА С
 ЭЛЕКТРОДАМИ БОЛЬШОЙ ПЛОЩАДИ
- Тимофеев А.В., Чеботарев Р.С. (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, 175
 Россия)
 ОБ ИЦР-НАГРЕВЕ ПЛАЗМЫ ПО МЕТОДУ МАГНИТНОГО БЕРЕГА
- Знаменская И.А., Татаренкова Д.И., Кули-заде Т.А. (МГУ им. М.В. Ломоносова, 176
 г. Москва, Россия)
 ЭВОЛЮЦИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕЧЕНИЯ ЗАТУХАЮЩИХ
 ПЛАЗМЕННЫХ КАНАЛОВ ПРИ ЭФФЕКТЕ ВЫТЕСНЕНИЯ
- ¹Кисон В.Э., ¹Мустафаев А.С., ²Сухомлинов В.С. (¹Санкт-Петербургский горный 177
 университет, г. Санкт-Петербург, Россия, ²Санкт-Петербургский
 государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия)
 ВЫБОР РАБОЧЕГО ГАЗА ПЛАЗМОТРОНА ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ
 ПРОИЗВОДСТВА СВЕРХЧИСТОГО БЕЛОГО КОРУНДА
- ¹Попова А.Н., ²Сухомлинов В.С., ¹Мустафаев А.С. (¹Санкт-Петербургский 178
 горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, ²Санкт-Петербургский
 государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия)
 РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ
 ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ
 АТОМНО-ЭМИССИОННЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ НА ПРИМЕРЕ
 ИССЛЕДОВАНИЯ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ
- Иванов И.Е. (ИОФ РАН, г. Москва, Россия) 179
 ШИРОКОПОЛОСНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ПЛАЗМЕННЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ
 ИСТОЧНИКОВ
- Стрелков П.С., Иванов И.Е., Диас Михайлова Д.Е. (ИОФ РАН, г. Москва, Россия) 180
 СПЕКТРЫ ПЛАЗМЕННОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО СВЧ УСИЛИТЕЛЯ
 МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО СИГНАЛА
- ^{1,2}Аржанников А.В., ^{1,2}Калинин П.В., ¹Макаров М.А., ^{1,2}Попов С.С., 181
^{1,2}Самцов Д.А., ^{1,2}Сандалов Е.С., ^{1,2}Синицкий С.Л. (¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск,
 Россия, ²НГУ, г. Новосибирск, Россия)
 ИЗМЕНЕНИЯ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ
 КИЛОАМПЕРНОГО РЭП ПРИ НАКАЧКЕ КОЛЕБАНИЙ В ЗАМАГНИЧЕННОЙ
 ПЛАЗМЕ
- ^{1,2}Аржанников А.В., ¹Макаров М.А., ^{1,2}Калинин П.В., ^{1,2}Касатов А.А., ¹Куклин К.Н., 182

- ^{1,2}Попов С.С., ^{1,2}Самцов Д.А., ^{1,2}Сандалов Е.С., ^{1,2}Синицкий С.Л. (¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, ²НГУ, г. Новосибирск, Россия) 183
 ИЗМЕРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ ВО ВРЕМЯ РЕЛАКСАЦИИ В НЕЙ КИЛОАМПЕРНОГО РЭП ПРИ РАЗЛИЧНЫХ НАЧАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЯХ ЗАМАГНИЧЕННОГО ПЛАЗМЕННОГО СТОЛБА
- ^{1,2}Аржанников А.В., ^{1,2}Калинин П.В., ^{1,2}Касатов А.А., ¹Куклин К.Н., ¹Макаров М.А., ^{1,2}Попов С.С., ¹Ровенских А.Ф., ^{1,2}Самцов Д.А., ^{1,2}Сандалов Е.С., ^{1,2}Синицкий С.Л., ^{1,2}Степанов В.Д., ^{1,2}Глинский В.В., ^{1,2}Тимофеев И.В. (¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; ²НГУ, г. Новосибирск, Россия) 184
 ДИНАМИКА СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ПОТОКА ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ РЕЛАКСАЦИИ РЭП В ПЛАЗМЕННОМ СТОЛБЕ В УСЛОВИЯХ РАЗЛИЧНОЙ ГРАНИЦЫ НА ВЫХОДЕ ПУЧКА ИЗ ПЛАЗМЫ
- ^{1,3,4}Казаков Е.Д., ¹Калинин Ю.Г., ¹Крутиков Д.И., ¹Курило А.А., ²Милехин Ю.М., ¹Орлов М.Ю., ²Садовничий Д.Н., ¹Стрижаков М.Г., ²Шереметьев К.Ю. (¹НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия, ²ФГУП "ФЦДТ "Союз", г. Дзержинский, Россия; ³НИУ "МЭИ", г. Москва, Россия; ⁴МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия) 184
 ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ СФЕРОПЛАСТИКА НА ОСНОВЕ БУТАДИЕН-НИТРИЛЬНОГО КАУЧУКА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА
- ¹Топорков Д.А., ¹Гаврилов В.В., ¹Житлухин А.М., ²Карлыханов Н.Г., ¹Костюшин В.А., ²Матвеев Ю.И., ¹Позняк И.М. (¹АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Троицк, г. Москва, Россия, ²РФЯЦ – ВНИИЭФ, г. Саров, Россия) 185
 ДИНАМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЩНОГО ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА С ГАЗОВОЙ СТРУЕЙ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ
- ¹Строкин Н.А., ¹Казанцев А.В., ²Бардаков В.М., ¹Тхе Тханг Нгуен, ¹Ригин А.В. (¹ИРНИТУ, г. Иркутск, Россия, ²Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия) 186
 ГЕНЕРАЦИЯ ИОНОВ В МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ПЛАЗМЕ УСКОРИТЕЛЯ С ЗАМКНУТЫМ ДРЕЙФОМ ЭЛЕКТРОНОВ
- ¹Пискарев И.М., ²Аристова Н.А., ³Иванова И.П. (¹НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, ²Уральский федеральный университет, Нижнетагильский технологический институт, г. Нижний Тагил, Россия, ³ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия) 187
 СРАВНЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА И ИЗЛУЧЕНИЯ ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА НА ВОДНЫЕ РАСТВОРЫ
- Глинов А.П., Головин А.П., Козлов П.В. (НИИ механики МГУ, г. Москва, Россия) 188
 ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ИНИЦИИРОВАНИЯ И ГАШЕНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ СИЛЬНОТОЧНЫХ РАЗРЯДОВ
- Войтешонок В.С., Егорова Е.К., Туркин А.В., Шлойдо А.И. (ИПМ РАН, г. Москва, Россия) 189
 ГЕНЕРАТОРЫ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА ОСНОВЕ ОТКРЫТОГО РАЗРЯДА С УБЕГАНИЕМ ЭЛЕКТРОНОВ С ПРОДУВОМ ГАЗА ЧЕРЕЗ РАЗРЯДНЫЙ КАНАЛ
- Белозеров О.С., Бакшаев Ю.Л., Хромов С.А., Данько С.А. (НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия) 190
 МЕХАНИЗМ УСКОРЕНИЯ ИОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ НА ГЕНЕРАТОРЕ РЭП "КАТРАН"

- Мурсенкова И.В., Уланов П.Ю., Кузнецов А.Ю., Ляо Ю. (*МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*) 191
 ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ НАНОСЕКУНДНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СКОЛЬЗЯЩЕГО РАЗРЯДА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА
- ^{1,2,3}Казаков Е.Д., ¹Бобырь Н.П., ¹Крутиков Д.И., ¹Курило А.А., ¹Орлов М.Ю., ¹Спицын А.В., ¹Стрижаков М.Г., ¹Шашков А.Ю. (¹*НИИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²НИУ "МЭИ", г. Москва, Россия; ³МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия*) 192
 ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ МОЩНОГО ИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА МАТЕРИАЛЫ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ПЛАЗМЕННЫХ УСТАНОВОК
- ^{1,2,3}Казаков Е.Д., ¹Калинин Ю.Г., Курило А.А., Крутиков Д.И., Орлов М.Ю., ^{1,3}Смирнова А.Р., ¹Стрижаков М.Г. (¹*НИИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²НИУ "МЭИ", г. Москва, Россия; ³МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия*) 193
 ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ В ПРОЗРАЧНЫХ ПОЛИМЕРАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В РЕЖИМАХ С НИЗКОЙ ЭНЕРГЕТИКОЙ
- ¹Двинин С.А., ²Солихов Д.К., ²Хобилов Д.У. (¹*МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия; ²Таджикский национальный университет, г. Душанбе, Таджикистан*) 194
 ОСОБЕННОСТИ ВРМБ В НЕОДНОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ ПРИ ДВУМЕРНОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ВОЛНЫ НАКАЧКИ
- ¹Артемьев К.В., ¹Давыдов А.М., ^{2,3}Казанцев С.Ю. (¹*ИОФ РАН, г. Москва, Россия, ²Московский политехнический университет, г. Москва, Россия, ³МТУСИ, г. Москва, Россия*) 195
 МИКРОВОЛНОВЫЙ ФАКЕЛ КАК СПОСОБ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ КАТОДОВ
- Анпилов А.М., Бархударов Э.М., Косый И.А., Моряков И.В. (*ИОФ РАН, г. Москва, Россия*) 196
 ВОЗМОЖНОСТЬ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОКРИСТАЛЛОВ ОКСИДА МЕДИ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОФОРЕЗА В КОЛЛОИДНОМ РАСТВОРЕ УГЛЕРОДА В ЭТАНОЛЕ
- Иванов В.А., Коньжев М.Е., Камолова Т.И., Дорофеев А.А. (*ИОФ РАН, г. Москва, Россия*) 197
 СВЕЧЕНИЕ МИКРОПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА НА ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА, ПОКРЫТОГО ТОНКОЙ СПЛОШНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛЕНКОЙ, ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ТОКЕ РАЗРЯДА 50 А
- А.А. Летунов, Н.Н. Скворцова, В.Д. Степахин, А.В. Князев, Е.В. Воронова, В.П. Логвиненко, В.Д. Малахов, Е.М. Кончечков, В.Д. Борзосекон (*ИОФ РАН, г. Москва, Россия*) 198
 СПЕКТРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА РАЗРЯДОВ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ИМПУЛЬСАМИ МОЩНОГО ГИРОТРОНА В МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЯХ

**ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ
 «ПРОЕКТ ИТЭР: ШАГ В ЭНЕРГЕТИКУ БУДУЩЕГО»**

201-239

- ¹Обудовский С.Ю., ¹Кормилицын Т.М., ¹Ковалев А.О., ¹Портнов Д.В., ¹Воробьев В.А., ¹Кащук Ю.А., ¹Степанов С.Б., ²Гавриленко Д.Е., ²Иванцовский М.В., ²Бурдаков А.В. (¹*ЧУ ГК Росатом «Проектный центр*

- ИТЭР», г. Москва, Россия; ²ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия)*
РАЗРАБОТКА ДИАГНОСТИКИ ИТЭР «ДИВЕРТОРНЫЙ МОНИТОР НЕЙТРОННОГО ПОТОКА»
- Немцев Г.Е., Родионов Р.Н., Хафизов Р.Р., Кумпилов Д.А., Ревякин П.А., Мещанинов С.А., Голачев В.М. (*ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия*) 202
РАЗРАБОТКА ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИТЭР ВЕРТИКАЛЬНАЯ НЕЙТРОННАЯ КАМЕРА В 2020 ГОДУ
- ^{1,2}Шошин А.А., ^{1,3}Бурдаков А.В., ¹Иванцовский М.В., ^{1,2}Полосаткин С.В., ^{1,2}Суляев Ю.С., ^{1,3}Семенов А.М., ^{1,2}Таскаев С.Ю. (*¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, ²НГУ, г. Новосибирск, Россия, ³НГТУ, г. Новосибирск, Россия*) 203
ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕ ЭКВАТОРИАЛЬНОГО ПОРТА №11 ИТЭР И ТЕСТЫ КЕРАМИКИ КАРБИДА БОРА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПОРТОВ
- Семенов И.Б., Голачев В.М., Ларионов А.С., Лазарева С.Г., Миронова Е.Ю., Миронов А.Ю., Нагорный Н.В., Портоне С.С., Семенов О.И., Звонарева А.А. (*ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия*) 204
СТАТУС СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИТЭР
- Ковалев А.О., Родионов Р.Н., Кумпилов Д.А., Обудовский С.Ю., Портнов Д.В., Кашук Ю.А. (*ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия*) 205
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ИКД ДМНП К СПЕКТРУ НЕЙТРОНОВ ИТЭР ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ИЗОТОПНОЙ ЧИСТОТЕ УРАНА-238
- Гаспарян Ю.М., Булгадарян Д.Г., Синельников Д.Н., Ефимов Н.Е., Ефимов В.С., Крат С.А., Попова М.А., Вовченко Е.Д., ¹Дмитриев А.М., ¹Елец Д.И., ¹Мухин Е.Е., ¹Раздобарин А.Г., Минаев В.Б., Новохацкий А.Н., Сахаров Н.В., Варфоломеев В.И. (*НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия, ¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе г. Санкт-Петербург, Россия*) 206
ЛАЗЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА НАКОПЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА НА СТЕНКАХ ДЛЯ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2
- Афонин К.Ю. (*АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Троицк, г. Москва, Россия; МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия, УТС-центр, г. Москва, Россия*) 207
ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЛИНЕЙНОГО ИНТЕГРАЛА НЕМОНОТОННОГО ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ
- ^{1,2}Павлова Г.С., ²Серов С.В., ²Тугаринов С.Н., ³von Hellermann M. (*¹МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия, ²ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия, ³ITER Organization, Cadarache, France*) 208
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ГАЛО ДЛЯ АКТИВНОЙ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ НА УСТАНОВКЕ ИТЭР
- Родионов Р.Н., Кумпилов Д.А., Немцев Г.Е. (*ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия,*) 209
ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ ИСТОЧНИКА DD И DT НЕЙТРОНОВ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕЙТРОННОЙ КАМЕРЫ ИТЭР
- ¹Куличенко А.А., ^{1,2}Кукушкин А.Б. (*¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия*) 210
АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НЕЛОКАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА ПО РЕФЛЕКТОМЕТРИИ
- ^{1,2}Летунов А.Ю., ^{1,2}Лисица В.С., ¹Горбунов А.В., ¹Левашова М.Г. (*¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия*) 211

УНИВЕРСАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ФОРМЫ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ
В ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЕ

¹Неверов В.С., ²Ромазанов Ю., ³Питтс Р.А., ^{1,4}Хуснутдинов Р.И., ⁵Карр М., 212

¹Алексеев А.Г., ¹Андреев Е.Н., ³Де Бок М., ²Бородин Д., ²Брезинсек С.,
¹Горшков А.В., ²Ексаева А., ²Киршнер А., ¹Козлов А.М., ^{1,4}Кукушкин А.Б.,
⁶Ловелл Дж., ⁵Микенс А., ¹Морозов А.А., ³Вещев Е. (¹НИИЦ "Курчатовский
институт", г. Москва, Россия; ²Forschungszentrum Jülich, Jülich, Germany,
³ITER Organization, Cadarache, France, ⁴НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия,
⁵Luffy AI Ltd., Culham Science Centre, Culham, UK, ⁶Oak Ridge National Laboratory,
Oak Ridge, USA)

ТОМОГРАФИЧЕСКАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ТРЁХМЕРНОГО ПРОФИЛЯ
СВЕТИМОСТИ БЕРИЛЛИЯ В ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЕ ИТЭР С УЧЁТОМ
ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА ОТ ПЕРВОЙ СТЕНКИ

^{1,2}Хуснутдинов Р.И., ^{1,2}Кукушкин А.Б., ²Неверов В.С. (¹НИЯУ «МИФИ», 213

г. Москва, Россия, ²НИИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия)
ОБОБЩЕНИЕ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НА ДВУМЕРНОЕ
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО СКОРОСТЯМ АТОМОВ ПРИ РЕЦИКЛИНГЕ
ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В ТОКАМАКЕ

¹Сдвиженский П.А., ¹Левашова М.Г., ^{1,2}Кукушкин А.Б., ^{1,2}Лисица В.С., 214

¹Неверов В.С., ³Ромазанов Ю.А., ⁴Серов С.В., ⁵Толстихина И.Ю.,
⁴Тугаринов С.Н. (¹НИИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия;
²НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия, ³Forschungszentrum Jülich, Institut für
Energie und Klimaforschung–Plasmaphysik, Partner of the Trilateral Euregio
Cluster, Jülich, Germany, ⁴ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР»,
г. Москва, Россия, ФИАН, г. Москва, Россия)

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ ПАССИВНОЙ ПЕРЕЗАРЯДКИ
ВОДОРОДОПОДОБНЫХ ИОНОВ БЕРИЛЛИЯ ДЛЯ АКТИВНОЙ
СПЕКТРОСКОПИИ В ТОКАМАКЕ ИТЭР

Скопинцев Д.А., Хованский А.В. (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Троицк, 215

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ МНОГОКАНАЛЬНОЙ БОЛОМЕТРИИ НА ТОКАМАКЕ
T-11M

¹Шабашов А.Ю., ²De Bock M., ¹Серов С.В., ¹Тугаринов С.Н. (¹ЧУ ГК Росатом 216

«Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия, ²ITER Organization, Cadarache,
France)
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИАГНОСТИКИ «АКТИВНАЯ
СПЕКТРОСКОПИЯ ИТЭР» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ
ТРАССИРОВКИ ЛУЧЕЙ

Черкез Д.И., Степанов Н.О., Ананьев С.С., Спицын А.В. (НИИЦ «Курчатовский 217

институт», г. Москва, Россия)
УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ С
МАТЕРИАЛАМИ НА ОСНОВЕ ВЧ-ИСТОЧНИКА ГЕЛИКОННОГО ТИПА

¹Минашин П.В., ^{1,2}Хайрутдинов Р.Р., ^{1,3}Кукушкин А.Б., ¹Лукаш В.Э. (¹НИИЦ 218

«Курчатовский институт», г. Москва, Россия; АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г.
Троицк, г. Москва, Россия, ³НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия)
ВЛИЯНИЕ КОНВЕРСИИ МОД ПРИ ОТРАЖЕНИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ СТЕНОК
НА МНОГОПРОХОДНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ ВНЕШНЕГО ЭЦ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА
НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗРЯДА В ИТЭР

^{2,3}Афонин А.Ю., ¹Петров В.Г. (¹АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Троицк, г. Москва, 219

Россия; ²УТС-центр, г. Москва, Россия, ³МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия)

РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ МАКЕТА РЕФРАКТОМЕТРА НА Т-11 М

- Демура А.В., Леонтьев Д.С., Лисица В.С., Шурыгин В.А. 220
 (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия)
 РАДИАЦИОННЫЕ ПОТЕРИ БЫСТРЫХ ТЯЖЕЛЫХ ЧАСТИЦ
 В ТЕРМОЯДЕРНОЙ ПЛАЗМЕ
- ^{1,2}Кормилицын Т.М., ¹Родионов Р.Н., ^{1,2}Панкратенко А.В., ¹Обудовский С.Ю., 221
^{1,2}Кашук Ю.А. (¹ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия;
²МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия)
 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ D-D НЕЙТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА
 ДЛЯ ЦЕЛЕЙ КАЛИБРОВКИ НЕЙТРОННЫХ ДИАГНОСТИК ИТЭР
- ^{1,2}Петров В.Г., ^{1,2,3}Афонин А.Ю., ^{1,2,3}Афонин К.Ю. (¹АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», 222
 г. Москва, Россия; ²УТС-центр, г. Москва, Россия, ³МФТИ (НИУ),
 г. Долгопрудный, Россия)
 АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЕФРАКЦИИ НА ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В
 РЕФРАКТОМЕТРИИ
- ^{1,2}Панкратенко А.В., ^{1,2}Кормилицын Т.М., ¹Обудовский С.Ю., ¹Джурик А.С., 223
^{1,2}Кашук Ю.А. (¹ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва,
 Россия; ²МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия)
 АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК КРИСТАЛЛА LACL3 ДЛЯ ЦЕЛЕЙ НЕЙТРОННОЙ
 ДИАГНОСТИКИ ДЕЙТЕРИЕВОЙ ПЛАЗМЫ
- Кумпилов Д.А., Родионов Р.Н., Кофанова Е.Д., Немцев Г.Е. (ЧУ ГК Росатом 224
 «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия)
 НЕЙТРОННЫЙ АНАЛИЗ КОМПОНЕНТОВ ДИАГНОСТИКИ ИТЭР
 ВЕРТИКАЛЬНАЯ НЕЙТРОННАЯ КАМЕРА
- ¹Семенов Е.В., ¹Портоне С.С., ¹Семенов И.Б., ¹Семенов О.И., ²Кирилин А.Е., 225
²Соловьева Л.А., ²Куркина И.В. (¹ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР»,
 г. Москва, Россия, ²ЧУ «Цифрум», г. Москва, Россия)
 ПРОТОТИП ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЫ ПО УПРАВЛЕНИЮ ЗНАНИЯМИ В
 ОБЛАСТИ УТС НА ОСНОВЕ ПРОЕКТА ИТЭР
- Нагорный Н.В., Малютин А.Ю., Немцев Г.Е., Портоне С.С., Миронова Е.Ю., 226
 Миронов А.Ю., Звонарева А.А., Журавлев М.К. (ЧУ ГК Росатом «Проектный
 центр ИТЭР», г. Москва, Россия)
 РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И СБОРА ДАННЫХ
 ДИАГНОСТИКИ ИТЭР ВЕРТИКАЛЬНАЯ НЕЙТРОННАЯ КАМЕРА
- ¹Миронов А.Ю., ¹Звонарева А.А., ¹Портоне С.С., ¹Миронова Е.Ю., ¹Семенов И.Б., 227
¹Нагорный Н.В., ²Толоконский А.О. (¹ЧУ ГК Росатом «Проектный центр
 ИТЭР», г. Москва, Россия, ²НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия)
 ТИПОВАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ИТЭР КАК
 ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ
- Николаев А.И., Воробьев В.А., Кашук Ю.А., Обудовский С.Ю., Нагорный Н.В., 228
 Миронов А.Ю., Портоне С.С., Звонарева А.А. (ЧУ ГК Росатом «Проектный
 центр ИТЭР», г. Москва, Россия)
 АППАРАТУРА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО УСИЛЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ ДЛЯ
 КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ИОНИЗАЦИОННЫХ КАМЕР ДЕЛЕНИЯ
 ДИАГНОСТИКИ ДМНП
- Гужев Д.И., Журавлёв М.К., Немцев Г.Е., Миронова Е.Ю., Нагорный Н.В., 229
 Николаев А.И., Пищулина П.А. (ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР»,
 г. Москва, Россия)
 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА

- Звонарева А.А., Портоне С.С., Миронова Е.Ю., Семенов И.Б., Нагорный Н.В., 230
 Миронов А.Ю., ¹Толоконский А.О (ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия)
- АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ К СИСТЕМАМ СБОРА ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ В ИТЕР КАК ОСНОВА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВИРТУАЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ
- ^{1,2}Бобырь Н.П., ¹Иванов Б.В., ²Аникин А.С., ²Букин А.Н., ²Забилова Н.Е. 231
¹Медников А.А., ³Игнащенко А.П., ¹Спицын А.В. (¹НИИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, ²АО ВНИИНМ им. А.А. Бочваря, г. Москва, Россия, ³НИУ МЭИ, г. Москва, Россия)
- ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РАДИОЛЮМИНОГРАФИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НАКОПЛЕНИЯ ТРИТИЯ В ДЕФЕКТАХ СТРУКТУРЫ ВОЛЬФРАМА
- ¹Бобырь Н.П., ²Ефимов В.С., ¹Козлов Д.А., ¹Ананьев С.С. (¹НИИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, ²НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия) 232
- ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИМЕСИ ТАНТАЛА НА НАКОПЛЕНИЕ ДЕЙТЕРИЯ В СПЛАВЕ W-Ta
- ¹Воробьев В.А., ¹Джурик А.С., ¹Обудовский С.Ю., ¹Кашук Ю.А., ²Мартазов Е.С., 233
²Парышкин Ю.А., ²Селяев Н.А., ²Федоров В.А., ³Булавин М.В., ³Куликов С.Н. (¹ЧУ ГК Росатом «ИТЭР-Центр», г. Москва, Россия, ²НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия, ³ОИЯИ, г. Дубна, Россия)
- ИСПЫТАНИЯ ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ ДИАГНОСТИКИ ИТЕР «ДИВЕРТОРНЫЙ МОНИТОР НЕЙТРОННОГО ПОТОКА» В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
- ^{1,2}Будаев В.П., ¹Дедов А.В., ^{1,2}Саврухин П.В., ¹Федорович С.Д., ¹Комов А.Т., 234
¹Карпов А.В., ^{1,2}Мартыненко Ю.В., ¹Иванов Д.П., ¹Губкин М.К., ¹Лазукин А.В., ¹Лукашевский М.В. (¹НИУ МЭИ, г. Москва, Россия, ²НИИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия)
- КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ УЧЕБНО-ДЕМОНСТРАЦИОННОГО СТЕНДА ТОКАМАК С ДИВЕРТОРОМ В НИУ «МЭИ»
- ¹Красильников А.В., ¹Родионов Н.Б., ²Большаков А.П., ²Ральченко В.Г., 235
³Варгапетов С.К., ³Сизов Ю.Е., ¹Мещанинов С.А., ¹Трапезников А.Г., ¹Родионова В.П., ¹Амосов В.Н. (¹ЧУ ГК Росатом «ИТЭР-Центр», г. Москва, Россия, ²ИОФ РАН, г. Москва, Россия, ³АО «Оптосистемы», г. Москва, Россия)
- СИНТЕЗ CVD-АЛМАЗА ЭЛЕКТРОННОГО КАЧЕСТВА ДЛЯ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ ПРИБОРОВ И ДЕТЕКТОРОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ
- ¹Гавриленко Д.Е., ^{1,4}Бурдаков А.В., ¹Иванцовский М.В., ²Кашук Ю.А., 236
²Обудовский С.Ю., ¹Стешов А.Г., ¹Шиянков С.В., ^{1,3}Шошин А.А. (¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, ²ЧУ ГК Росатом «ИТЭР-Центр», г. Москва, Россия, ³НГУ, г. Новосибирск, Россия, ⁴НГТУ, г. Новосибирск, Россия)
- ПРОИЗВОДСТВО МАКЕТА И ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ДМНП
- Длугач Е.Д., Панасенков А.А. (НИИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) 237
- ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОДА VTR ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ИНЖЕКТОРОВ ИТЕР
- Фридрихсен Д.С., Кормилицын Т.М., Обудовский С.Ю., Ковалев А.О., 238

Кащук Ю.А. (ЧУ ГК Росатом «ИТЭР-Центр», г. Москва, Россия)

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТА ОСЛАБЛЕНИЯ ПОТОКА
БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ КОНСТРУКЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ ИТЭР**

¹Шестаков Е.А., ²Алексеев А.Г., ²Асадулин Г.М., ²Вуколов Д.К., ²Горшков А.В., 239

²Драпико Е.А., ²Капустин Ю.М., ²Качкин А.Г., ²Орловский И.И., ²Рогов А.В.

(¹ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия,

²АНО Координационный центр «Управляемый термоядерный синтез –
международные проекты», г. Москва, Россия)

**СТАТУС РАБОТ ПО ДИАГНОСТИКЕ СПЕКТРОСОКПИЯ ВОДОРОДНЫХ
ЛИНИЙ ИТЭР**

СПИСОК АВТОРОВ

240-246

ОБЗОРНЫЕ ДОКЛАДЫ

REVIEWS

ПАМЯТИ ВЛАДИМИРА ЕВГЕНЬЕВИЧА ФОРТОВА 23.01.1946–20.11.2020

Э.Е. Сон

ОИВТ РАН, г. Москва, Россия

29 ноября 2020 года скоропостижно ушел из жизни выдающийся физик Владимир Евгеньевич Фортвов. Относился к особой плеяде ученых - физиков, обладающих широким научным кругозором. Владимир Евгеньевич родился в г. Ногинске, в 16 лет поступил в Московский физико-технический институт, на третьем курсе начал заниматься научной работой в Исследовательском Центре им. М.В. Келдыша. В 1967 году, на год раньше срока, защитил дипломную работу по неидеальной плазме и получил диплом с отличием. В том же году поступил в аспирантуру МФТИ, и досрочно защитил кандидатскую диссертацию в 1970 г. по неидеальной плазме.



С 1971 г. В.Е.Фортвов продолжил исследования в Институте проблем химической физики (ИПХФ). В 1976 г. начал работу в Институт высоких температур АН СССР (ныне Объединенный институт высоких температур РАН), оставаясь заведующим лабораторией в ИПХФ, где был проведен ряд уникальных экспериментов по свойствам плотной плазмы. В 1977 г. он защитил докторскую диссертацию «Исследование неидеальной плазмы динамическими методами». Важные результаты, полученные во взрывных экспериментах со сверхпредельными параметрами, позволили В.Е. Фортвову стать руководителем таких исследований в ВНИИЭФ (г. Саров), КБ «Вымпел».

С 1987 г. В.Е.Фортвов член-корреспондент АН СССР, а с 1991 г. в 45 лет - академик. В 1992 г. В.Е. Фортвов создал Научно-исследовательский центр теплофизики импульсных воздействий, специализирующийся на исследованиях по воздействию на вещества концентрированных потоков энергии.

Фортвов В.Е. обладал выдающимися организаторскими способностями: В 1993-1995 гг. он председатель РФФИ, 1996-1998 гг. - министр науки и технологий РФ, в 2007-2018 гг. директор ОИВТ, 2013-2017 годах – президент РАН.

Владимир Евгеньевич – лауреат Государственной премии СССР, Государственной премии РФ, четырех премий Правительства, полный кавалер Ордена «За заслуги перед Отечеством» и других государственных наград.

Владимир Евгеньевич был действительным членом Европейской академии наук, Американского физического общества, Международной академии астронавтики, Американской национальной инженерной академии, членом Германского научного общества им. М.Планка, членом Шведской королевской академии инженерных наук, вице-президентом Международного союза высоких давлений и технологий, членом Европейской Академии искусств и науки, председателем Комиссии Российской Федерации по делам Юнеско.

Академик Фортвов В.Е. – лауреат Международной премии «Глобальная энергия», Международных премий П. Бриджмена (США), шведской Королевской Академии наук им. Х. Альфвена, премий А. Эйнштейна и Дж. Дювалье.

В.Е. Фортвов организовал на борту Международной космической станции российско-германский успешный эксперимент "Плазменный кристалл".

Владимир Евгеньевич Фортвов человек огромного мужества, он участвовал в экстремальных экспедициях на Северный и Южный полюсы, на полярную антарктическую станцию «Восток», на дно озера Байкал и озера Леман (Швейцария). Он был мастером спорта по баскетболу и парусному спорту, на яхте он пересек Атлантический океан и обошел мыс Горн и мыс Доброй надежды. Фортвов В.Е. ликвидатор аварии на Чернобыльской АЭС, а также участник испытательного похода на атомном подводном крейсере.

Жизнь Владимира Евгеньевича Фортвова вызывает восхищение, он останется в нашей истории как выдающийся ученый, государственный деятель и мужественный человек.

ПАМЯТИ ВАЛЕРИЯ АЛЕКСАНДРОВИЧА КУРНАЕВА 21.12.1942—23.11.2020

Гаспарян Ю.М.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва,
Россия, e-mail: YMGasparyan@mephi.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.001



23 ноября 2020 на 78-м году жизни ушел из жизни замечательный физик и человек, заведующий кафедрой физики плазмы НИЯУ МИФИ Валерий Александрович Курнаев

После окончания Московского инженерно-физического института (МИФИ) в 1966 году, Валерий Александрович остался в родном институте и в 1990 году возглавил кафедру физики плазмы, сделав ее одним из ведущих центров подготовки высококвалифицированных специалистов в области управляемого термоядерного синтеза и взаимодействия плазмы с поверхностью.

В течение всей своей научной карьеры Валерий Александрович активно занимался проблемой управляемого термоядерного синтеза. Его первые работы по рассеянию легких ионов (H, He), включая уникальные эксперименты по

взаимодействию ионов с шероховатыми поверхностями носили пионерский характер. Позже Валерий Александрович со свойственным ему энтузиазмом руководил работами по взаимодействию плазмы со стенкой, диагностике плазмы и плазменным технологиям, получившими международное признание. Помимо своей научной уникальности эти работы стали мощным инструментом вовлечения в научное творчество молодых мифистов, которые сейчас активно и успешно работают во всех ведущих термоядерных центрах России и по всему миру.

Валерий Александрович обладал невероятной трудоспособностью и огромной энергетикой, которую отмечали все, кому довелось с ним работать и общаться. Он принимал активное участие в разработке национальной термоядерной программы, представлял Россию в экспертной группе DivSol международной программы ИТРА по физике токамаков организовывал многочисленные конференции и научные школы для молодых ребят, где с лекциями выступали ведущие ученые со всех континентов. Валерий Александрович разработал целый ряд лекционных курсов, написал 14 учебных и популярных книг, более 20 человек защитили кандидатские диссертации под его руководством и более 70 человек получили дипломы специалистов и магистров.

Деятельность Валерия Александровича получила высокую оценку на государственном уровне. Ему присвоены звания Заслуженного работника высшего профессионального образования России и Почетного работника атомной науки и промышленности России. Он является лауреатом премии Правительства Российской Федерации.

Замечательной чертой Валерия Александровича было его теплое отношение к коллегам и студентам. Любой мог обратиться к Валерию Александровичу в сложной жизненной ситуации, и он всегда стремился помочь, считая для себя это делом первостепенной важности. Это был человек с большим сердцем и открытой душой.

Светлая память о Валерии Александровиче Курнаеве навсегда останется в наших сердцах.

ПАМЯТИ ВЯЧЕСЛАВА СЕРГЕЕВИЧА СТРЕЛКОВА

13.08.1933—19.07.2020

Кутеев Б.В.

НИЦ “Курчатовский институт”, Kuteev_BV@nrcki.ru



DOI: 10.34854/ICSPAF.2021.48.1.002

19 июля 2020 г. скончался Вячеслав Сергеевич Стрелков, доктор физ.-мат. наук, профессор, Лауреат государственных премий СССР, Заслуженный работник атомной промышленности, член редакционной коллегии журнала «Вопросы атомной науки и техники - серия Термоядерный синтез».

Вся жизнь В.С. Стрелкова прошла в научной среде. Его отец Сергей Павлович Стрелков – известный физик в области прикладной аэродинамики, сотрудник ЦАГИ, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, профессор МГУ им. М.В. Ломоносова.

После окончания МГУ им. М.В. Ломоносова в 1957 г. В.С. Стрелков поступил в Курчатовский институт, где начал работать под руководством замечательных ученых И.Н. Головина и Н.А. Явлинского. Его

научная деятельность связана с пионерскими экспериментами на термоядерных установках «токамак»: ТМП, Т-1, Т-2. Он принадлежал к числу ближайших учеников-соратников академика Л.А. Арцимовича.

В 1962 г. В.С. Стрелков становится заместителем начальника сектора токамаков, а с 1973 г. начальником сектора и остается им до 1995 года, когда он уже заместитель директора Института ядерного синтеза. В последние годы жизни Вячеслав Сергеевич был Советником Директора Центра (с 2005 г.), затем - Советником Президента Центра.

В.С. Стрелков сочетал организационную деятельность с научной работой. Он впервые в мире наблюдал образование в токамаке пучка ускоренных электронов и провел первые измерения рентгеновского излучения, первым экспериментально исследовал равновесие замагниченной тороидальной плазмы. С его участием был проведен эпохальный советско-британский эксперимент по лазерному зондированию плазмы, подтвердивший достижение температуры электронов кэВ-ного уровня, после которого токамаки получили международное признание. Под его руководством были построены токамаки Т-3, Т-4, Т-10 и Т-15 – первая в мире установка со сверхпроводниками Ni_3Sn . Он широко известен в мировом термоядерном сообществе, участвовал в международных проектах ИНТОР и ИТЭР. Работа В.С. Стрелкова отмечена двумя Государственными премиями СССР — за циклы работ «Получение и исследование высокотемпературной термоядерной плазмы на установках "Токамак“» (1971) и «Корпускулярная диагностика высокотемпературной плазмы» (1981).

Многие годы В.С. Стрелков руководил «Семинаром Т» и НТС отдела Т-10, являлся членом Научно-технического совета НТС-6 Госкорпорации Росатом. Свой богатый опыт физика-экспериментатора Вячеслав Сергеевич передавал научной молодежи. Он всегда с большим интересом и доброжелательно относился к работам молодых ученых, много лет руководил научными школами в Курчатовском институте, преподавал на физическом факультете МГУ, был одним из ключевых профессоров кафедры Физики плазмы НИЯУ МИФИ.

Светлая память о Вячеславе Сергеевиче Стрелкове навсегда сохранится в наших сердцах.

ТОКАМАК С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ (TRT): КОНЦЕПЦИЯ, МИССИЯ, ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ОЖИДАЕМЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

¹Красильников А.В., ^{1,2}Коновалов С.В., ^{1,3}Бондарчук Э.Н., ^{1,3}Мазуль И.В.,
^{1,3}Родин И.Ю., ^{1,3}Минеев А.Б., ^{1,3}Кузьмин Е.Г., ^{1,3}Кавин А.А., ^{1,3}Карпов Д.А.,
^{1,2}Леонов В.М., ^{1,4}Хайрутдинов Р.Р., ^{1,2}Кукушкин А.С.

¹ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

³АО НИИЭФА им. Д.Ф. Ефремова, г. Санкт-Петербург, Россия

⁴АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Троицк, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.003

Впечатляющий прогресс в развитии высокотемпературных сверхпроводников REBCO произошедший в последние годы обеспечивает возможность проектирования квазистационарного Токамака с Реакторными Технологиями (TRT) с высоким полем ($B_0 = 8T$). Высокое магнитное поле обеспечивает достижение горения ($Q > 2$) плазмы токамака при существенно более компактных размерах реактора ($R = 2.15$ м, $a = 0.57$ м) и соответственно при более низкой его стоимости. TRT будет работать в квазистационарных (100 – 150с) режимах с водородной, гелиевой и дейтериевой плазмой при плотностях $n_e = 2 \cdot 10^{20}$ м⁻³ и с короткими ($t < 10$ с) разрядами с трейс-третиевой плазмой при $Q > 2$.

TRT разрабатывается как полномасштабный прототип будущего чистого термоядерного реактора и термоядерного источника нейтронов для гибридного синтез-деление реактора. Миссиями TRT являются: разработка и интегрирование в одной установке ключевых технологий термоядерного реактора включая: электромагнитную систему из высокотемпературных сверхпроводников, способную работать при сверхвысоких магнитных полях, металлические и литиевые жидкометаллические первую стенку и продвинутый дивертор, инжекторы нейтральных атомов с энергией до 1 МэВ и мощность в десятки МВт, гиротроны мощностью порядка 1 МВт с частотой излучения 260 ГГц, систему ионно-циклотронного нагрева мощностью в несколько МВт с частотой излучения 60-80 МГц, систему генерации стационарного неиндуктивного тока, тритиевый комплекс, экспериментальные модули blankets для наработки трития, технологии удалённого управления плазмой, совместимые с реактором диагностики, разработка и исследования разрядов квазистационарной плазмы, разработка и исследования режимов горения термоядерной плазмы с сильным доминированием нагрева плазмы альфа-частицами во время трейс-третиевых экспериментов.

Концептуальный проект основных компонентов TRT и ожидаемые характеристики его работы были разработаны и будут представлены в докладе.

СРЫВЫ В КЛАССИЧЕСКИХ «КРУГЛЫХ» ТОКАМАКАХ

Мирнов С.В.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Троицк, г. Москва, Россия, e-mail: sergeimirnov@yandex.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.004

Цель обзора – собрать воедино хорошо известные [1, 2] и мало известные факты, касающиеся природы возникновения и развития крупномасштабных срывов в токамаках. Предмет обсуждения ограничен в основном срывами в классических «круглых» токамаках, где к настоящему времени наиболее систематизирован основной объем экспериментальной информации, накопленной в этой области за последние 50 лет. Такое ограничение позволяет максимально сосредоточиться на физике срывов, временно отвлекаясь от технических вопросов, связанных с развитием срывов в конкретных магнитных конфигурациях, в частности, в D-образных и компактных торах. В обзоре будут освещены следующие вопросы:

1. Срыв, как препятствие на пути создания токамака – реактора.
2. Феноменология срыва глазами внешнего наблюдателя.
3. Диагностика срывов.
4. Феноменология «малых» и «больших» срывов.
5. Крупномасштабная внешняя и внутренняя МГД – активности в срывах.
6. Турбулентность в срывах.
7. Примеси в срывах.
8. Эволюция физических представлений о природе больших и малых срывов.
9. Срывы в D-образных токамаках, компактных торах и стеллараторах с током.
10. Возможные пути устранения влияния срывов на работу токамака-реактора.

Работа выполнена при поддержке ГК «Росатом» по контракту от 13.09.2019 № 313/1694-Д.

Литература

- [1]. ITER Physics Expert Group on Disruptions, Plasma Control, and MHD, ITER Physics Basis Editors, Nuclear Fusion **39**, 2251 (1999).
- [2]. S.V. Mirnov, «Magnetic Islands and Current Filamentation in Tokamaks» Plasma Physics Reports, 2019, Vol. 45, No. 2, pp. 87–107. *published in Fizika Plazmy, 2019, Vol. 45, No. 2, pp. 99–119.*

ПОДГОТОВКА ТОКАМАКА JET К ДЕЙТЕРИЙ-ТРИТИЕВОЙ КАМПАНИИ 2021 ГОДА: ПЛАНЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОЖИДАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Онгена Дж.

Лаборатория физики плазмы, Королевская военная академия, г. Брюссель, Бельгия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.005

Демонстрация работы токамака JET в режимах с выходной термоядерной мощностью $P_{\text{fus}} = 15$ МВт при длительности 5 с является одной из главных целей запланированной на 2021 год дейтерий-тритиевой кампании (DTE2). Столь высокая эффективность производства нейтронов в D-T плазме в квазистационарных условиях еще не достигалась в истории исследований в области управляемого термоядерного синтеза (УТС). На данный момент JET является единственной установкой УТС с магнитным удержанием плазмы, которая имеет тритиевый цикл и возможность проводить эксперименты с D-T плазмой.

Запланированная кампания DTE2 станет вершиной технологического прогресса и кульминацией исследований на токамаке JET с ITER-подобной стенкой за последние десять лет. В процессе ее подготовки мощность NBI нагрева была увеличена до 32 МВт, разработаны улучшенные методы диагностики плазмы, проведена технологическая и процедурная подготовка для обеспечения безопасной циркуляции трития в будущих экспериментах и т.д. Важным элементом подготовки DTE2 кампании было исследование изотопных эффектов и разработка высокопроизводительных сценариев работы JET в дейтериевой (DD), а затем и тритиевой (TT) плазме (начало 2021 г.). В 2020 г. было достигнуто существенное увеличение производительности сценариев работы JET при проведении исследований в дейтериевой плазме. Пиковый выход нейтронов для 'baseline' сценария составил $4.2 \times 10^{16} \text{ c}^{-1}$. Данный результат был получен при использовании пеллет (для контроля частоты ELMs) и при низком уровне газонапуска дейтерия (для улучшения качества удержания плазмы). Для 'hybrid' сценария в дейтериевой плазме был достигнут пиковый выход нейтронов на уровне $4.8 \times 10^{16} \text{ c}^{-1}$. 'Hybrid' сценарий требует дальнейшей оптимизации, чтобы его можно было использовать в квазистационарных условиях: необходима разработка методов контроля частоты ELMs и предотвращения развития МГД неустойчивостей. Экстраполяция экспериментальных результатов и моделирование сценариев работы JET во время DTE2 кампании (при различных предположениях о свойствах пьедестала в D-T плазме и с учетом изотопных эффектов) предсказывают возможность достижения мощности выхода $P_{\text{fus (D-T)}} = 11-16$ МВт.

Доклад завершается кратким обзором текущего состояния исследований и подготовки к будущим исследованиям на токамаке JT-60SA и стеллараторе Wendelstein 7-X.

НЕЙТРОННЫЙ ИСТОЧНИК ДЛЯ БОРНЕЙТРОНОЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ И ДРУГИХ ПРИМЕНЕНИЙ

Иванов А.А.

ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.006

В Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера совместно с фирмой Три Альфа Технолоджиз, США разработан специализированный источник нейтронов, который необходим для клинических испытаний бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей. Для проведения терапии больному вводится препарат, содержащий бор 10. В результате происходит накопление бора преимущественно в поврежденных клетках, после чего пациент проходит сеанс облучения эпитепловыми нейтронами. В результате захвата нейтрона ядром бора происходит ядерная реакция, с выделением энергии преимущественно в поврежденной клетке, что приводит к ее гибели. Разработанный источник нейтронов пригоден для проведения клинических испытаний в условиях госпиталя. Первый нейтронный источник будет установлен в г. Сямынь, Китай. Помимо применения в медицине, действующий в ИЯФ прототип нейтронного источника также успешно используется для изучения активации конструкционных материалов термоядерных установок быстрыми нейтронами, а также для других применений.

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ И ОБРАЩЕНИЯ С ДЕЙТЕРИЙ-ТРИТИЕВЫМ ТОПЛИВОМ В ТЕРМОЯДЕРНОМ/ГИБРИДНОМ РЕАКТОРЕ

¹Ананьев С.С., ^{1,2}Кутеев Б.В.

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: Ananyev_SS@nrcki.ru

²НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICSPAF.2021.48.1.007

Термоядерные реакторы и гибридные системы синтез-деление (ГССД) [1, 2], использующие в работе изотопы водорода в качестве основного топлива, представляются перспективными при производстве электроэнергии, наработке делящихся нуклидов для реакторов деления, а также фундаментальных и прикладных исследований, использующих интенсивные нейтронные потоки [3]. Их работа потребует организации в таких установках топливного цикла, обеспечивающего горение термоядерной плазмы изотопами водорода, а также переработку топливной смеси и воспроизводство трития. Сегодня прототипы системы топливного цикла термоядерных установок были созданы как в России, так и за рубежом. Примером отечественного проекта может служить тритиевый завод токамака ТСП (АО «ТРИНИТИ»), а также тритиевый комплекс длительной инжекции тритиевых топливных таблеток в ВНИИЭФ [4].

Были созданы и успешно эксплуатировались тритиевые системы на токамаках TFTR (США), и JET (Англия), которые применяли разные подходы при работе с тритием. Опыт эксплуатации этих установок может быть полезен при создании будущих термоядерных реакторов. Усилия мирового сообщества в последние годы были направлены на проектирование топливного цикла токамака ИТЭР, который планирует начать эксперименты с дейтерий-тритиевой плазмой в 2034 году. Возможности расширенного воспроизводства трития в ГССД также обсуждаются. Гибридная установка будет способна воспроизводить топливо как для собственной работы, так и для внешних потребителей. В ГССД за счет существенного увеличения коэффициента производства трития на один термоядерный нейтрон возможно производство топлива для первой загрузки термоядерных реакторов. В рассматриваемых установках архитектура топливных систем будет иметь свою специфику при общей идеологии. Стационарные условия эксплуатации потребуют оптимизации топливных систем и технологий, повышения эффективности переработки топливной смеси и максимального снижения количества трития в топливном цикле.

В докладе приводится обзор различных концепций топливного цикла термоядерных установок, обсуждаемых международным сообществом последние 30 лет. Обсуждаются методы моделирования топливных потоков и количества трития в установках, применяемых их разработчиками. Приводятся результаты анализа кандидатных технологий, которые могут быть использованы при проектировании базовых систем топливного цикла термоядерной установки [5].

Работа поддержана Национальным исследовательским центром «Курчатовский институт» (28.09.2020 № 1934а).

Литература

- [1]. B.V. Kuteev et al, E.A. Azizov, P.N. Alexeev, V.V. Ignatiev, S.A. Subbotin and V.F. Tsibulskiy, Nucl. Fusion 55 (2015) 073035 (8pp), doi:10.1088/0029-5515/55/7/073035
- [2]. B.V. Kuteev, P.R. Goncharov, Fusion Science and Technology, volume 76, 2020-issue 7, p 836-847. <https://doi.org/10.1080/15361055.2020.1817701>
- [3]. B. V. Kuteev, P. R. Goncharov, V. Yu. Sergeev, and V. I. Khripunov, Plasma physics reports Vol. 36, No. 4, 2010
- [4]. Б.В. Кутеев, ЖТФ 1999 том 69, вып. 9. 04;12

ГЕНЕРАЦИЯ ТОКА ВОЛНАМИ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА В ТРАДИЦИОННЫХ И СФЕРИЧЕСКИХ ТОКАМАКАХ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Дьяченко В.В. и коллектив токамака Глобус-М2

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.008

В докладе рассматривается механизм создания тока с помощью электромагнитных волн промежуточного частотного диапазона, а также особенности распространения и возбуждения медленных (нижнегибридных) и быстрых (геликонов) волн в плазме как традиционных, так и сферических токамаков. Формулируются требования к аппаратуре и рассматриваются технические решения, применяемые при создании современных СВЧ антенн для плазменного эксперимента. Обсуждаются основные особенности экспериментов, расчетных моделей и достижения, полученные в экспериментах по генерации тока на традиционных токамаках Tore Supra, East и других. Приводятся и обсуждаются первые результаты экспериментов по нижнегибридной генерации тока на сферическом токамаке Глобус-М2 при полоидальном и тороидальном замедлении вводимых СВЧ волн, в которых величина замещаемого тока достигала 50%

ИЗЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА В МЕГАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

Лебедев С.В., Абдуллина Г.И., Аскинази Л.Г., Белокуров А.А., Жубр Н.А.,
Корнев В.А., Крикунов С.В., Мельник А.Д., Разуменко Д.В., Смирнов А.И.,
Тукачинский А.С., Чернышев Ф.В., Шевелев А.Е.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: sergei.lebedev@mail.ioffe.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.009

Излучение в диапазоне частот 1-100 МГц обусловлено наличием в плазме токамаков замагниченных ионов. При индукции магнитного поля 1-5 Тл и плотности плазмы 10^{19} - 10^{20} м⁻³ в этом диапазоне оказываются альфвеновские волны (АВ) и ионное циклотронное излучение (ИЦИ). Наблюдение АВ и ИЦИ позволяет анализировать состав плазмы и поведение энергичных ионов. В большинстве случаев излучение в мегагерцовом диапазоне частот не является тепловым, а обусловлено развитием неустойчивостей в присутствии энергичных частиц. Анализ этого излучения дает возможность исследования физики возбуждения плазменных неустойчивостей. Практическое значение исследования генерации мегагерцового излучения состоит в том, что сильные магнитные возмущения, являясь потенциальным каналом потерь альфа-частиц, представляют опасность для достижения самоподдерживающейся реакции синтеза в термоядерном реакторе и, следовательно, нуждаются в разработке методов, препятствующих их развитию.

Наряду с кратким обзором характерных неустойчивостей, приводящих к возникновению МГц излучения, в докладе представлены результаты исследования АВ и ИЦИ на токамаке ТУМАН-3М. В частности, представлены результаты экспериментов по идентификации типа альфвеновских волн, возникающих в плазме с различными сортами рабочего газа (протий, дейтерий, гелий). Эти эксперименты показали, что частота регистрируемых зондами колебаний меняется пропорционально альфвеновской скорости, $\propto V_T/(A_i n_i)^{0,5}$. На основании полученных данных был сделан вывод о том, что наблюдаемые АВ являются глобальной альфвеновской модой (GAE), область возбуждения которой находится в центральной части сечения токамака.

В токамаке ТУМАН-3М ИЦИ обнаружено как при омическом, так и при инжекционном нагреве плазмы. Омическое ИЦИ характеризуется значительным числом наблюдаемых гармоник – порядка 10-ти в дейтериевой плазме, а также наличием зависимости частоты от расположения зонда – регистрируемая частота первой гармоники близка к частоте ионного циклотронного резонанса вблизи зонда – частоты на зондах, расположенных со сторон слабого и сильного магнитного поля, отличаются более, чем в 2 раза. Эта особенность указывает на локальный характер генерации омического ИЦИ. В отличие от омического ИЦИ ионное циклотронное излучение, наблюдаемое при инжекционном нагреве в токамаке ТУМАН-3М, (NBI ИЦИ) имеет одинаковую частоту первой гармоники на всех зондах, независимо от их расположения и возникает в центральной области плазмы. Амплитуда регистрируемых гармоник быстро спадает с номером, в результате чего доступными для наблюдения остаются в лучшем случае первые 4 гармоники. В докладе представлены модели генерации омического и NBI ионного циклотронного излучения.

Особый интерес представляет диагностический потенциал МГц излучения плазмы. В докладе представлены результаты экспериментов по измерению изотопного состава плазмы по спектрам альфвеновских волн и по ионному циклотронному излучению, наблюдаемому в отсутствие энергичных ионов. Измерения отношения амплитуд основных гармоник ИЦИ в плазме, состоящей из смеси изотопов водорода может служить методом определения изотопного отношения в перспективных установках УТС

СМЯГЧЕНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ СРЫВА В ТОКАМАКАХ-РЕАКТОРАХ¹Сергеев В.Ю., ^{2,3}Кутеев Б.В.¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: V.Sergeev@spbstu.ru²НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия³НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.010

Технология смягчения срыва тока разряда остается ключевым вопросом безопасной и надежной работы устройств в будущих крупных токамаках, включая ИТЭР [1]. В современных установках предложено и экспериментально апробировано несколько подходов, демонстрирующих возможности инъекции массивных газов, гранул, пыли и жидкости в предотвращение наиболее опасного механизма лавины убегающих электронов. Физика лавины определяется очень высоким электрическим полем, генерируемым в токамаке на заключительном этапе теплового срыва, что обеспечивает генерацию убегающих электронов. Было показано, что эффективным инструментом для убегающей лавины является быстрый рост плотности плазмы с помощью упомянутых выше методов вплоть до так называемой плотности Розенблюта [2]. Этот рост плотности, который в 100~1000 раз превышает значения рабочей плотности плазмы до срыва, должен быть обеспечен в течение интервала времени ≈ 10 мс. Такое количество инжестируемого вещества в диапазоне килограммов негативно воздействует на внутрикамерные технологические системы и требует длительного времени восстановления устройств токамака в созданных условиях. В докладе представлен обзор современных технологий смягчения последствий срыва и новый подход к этой проблеме. Подход направлен на борьбу с зародышами лавины убегающих электронов сразу после теплового срыва, но не использует инъекцию в вакуумную камеру токамака большого количества вещества.

Мишень используется для сбора зародышей во время пролета плазмы токамака в течении миллисекундного интервала времени. Материал мишени может быть из списка материалов (W, C, Be), обращенных к плазме. Очистка от зародышей способна задержать развитие лавины убегающих электронов и значительно уменьшить их ток. Оптимальный сценарий для этой технологии включает следующие этапы: контроль устойчивости плазмы и включение рельсовой пушки (ускорителя мишени) в конце стадии теплового срыва; ускорение и инъекция мишени в плазму для сбора зародышей; захват инжестированной мишени в коллекторе, расположенного внутри бланкетной зоны токамака.

Моделирование взаимодействия мишени с плазмой для основного режима работы плазмы (ВРР) ИТЭР [3] показывает, что при инъекции со стороны низкого поля в экваториальной плоскости ИТЭР вдоль направления большого радиуса ожидаются следующие эффекты [4]. W-мишень обеспечит сбор зародышей с энергиями до 25 MeV. Ток зародышей около 5 кА вызывает ток убегающих электронов через 0.5 с. Уменьшение этого источника мишенью в 100 раз снизит ток убегающих электронов 1.5 МА. Температура поверхности мишени не превысит 5830 К, соответствующую температуре сублимации вольфрама. Рельсотрон длиной 0.6 м позволит ускорить 80 г мишень до 800 м/с в течении 1.6 мс с током 1 МА в магнитном поле ИТЭР 5 Т. Оптимизация вариантов инъекции мишени, достоинства и недостатки этого подхода обсуждаются в докладе вместе со следующими необходимыми этапами НИОКР.

Литература

- [1]. Lehnen M., Maruyama S. 23 March 2018 *ITER Technical Report* 18-002
- [2]. Sokolov Yu.A. 1979 *JETP Lett.* **29** 244
- [3]. Rosenbluth M.N., Putvinski S.V. 1997 *Nuclear Fusion* **37** 1355
- [4]. Kuteev B.V., Sergeev V.Yu. IAEA TM on Plasma Disruptions and their mitigation, 2020

СВЕРХКРИТИЧЕСКИЙ ФЛЮИД ПЛАЗМЫ ПАРОВ МЕТАЛЛОВ, ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ И ЭКСИТОНОВ

Хомкин А.Л., Шумихин А.С.

Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.011

Рассмотрены переходы пар-жидкость и диэлектрик-металл, а также процесс металлизации – экспоненциальный рост проводимости при сжатии в парах металлов. Исследован механизм «холодной» ионизации на основе выдвинутой гипотезы о существовании электронного желе – зачатка зоны проводимости в газовой фазе. Предложена серия физических моделей, которые объединяет способ описания взаимодействия атомов как когезионное, коллективное, вызванное наличием электронного желе. Рассчитаны параметры критических точек и бинодали большинства металлов периодической таблицы, включая щелочные металлы, водород и экситоны. Установлены полезные связи твердотельных характеристик металлов и параметров критических точек. Проведено сравнение теоретических расчетов и результатов эксперимента для уравнений состояния паров металлов и проводимости в критических точках, на бинодали, а также на околокритических изотермах с учетом процессов «холодной» и термической ионизации. Предложена модель «скачкообразной» металлизации инертных газов при сжатии, близкая по природе переходу Мотта. Сделано заключение, что пары металлов в окрестности критической точки являются газообразным металлом из-за наличия процесса «холодной» ионизации и не являются диэлектрическим состоянием. Вместо перехода металл-диэлектрик точнее говорить о существовании перехода: жидкий металл – газообразный металл и о процессе «холодной» металлизации при сжатии.

ПЕРВОПРИНЦИПНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ И ТРАНСПОРТНЫХ СВОЙСТВ НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ МЕТАЛЛОВ

Левашов П.Р.

Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия,

e-mail: pasha@iht.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.012

Неидеальная плазма возникает во многих задачах современной физики, в том числе в существующих и перспективных энергоустановках, при воздействии мощных потоков электромагнитного излучения на вещество, в сильноточных устройствах, в астрофизике, геофизике, металлургии и т.п. В частности, при описании физических свойств жидких металлов и электролитов эти системы необходимо рассматривать как плазму с сильным межчастичным взаимодействием. Плотная плазма металлов, кроме того, обладает и сильновырожденной электронной подсистемой, что чрезвычайно затрудняет адекватный теоретический анализ. Неудивительно, что до недавнего времени существовали лишь весьма грубые качественные модели для расчетов термодинамических и транспортных свойств неидеальной плазмы. Появление классических атомистических методов моделирования, таких как метод Монте-Карло и молекулярной динамики, значительно улучшило ситуацию с описанием классических моделей плазмы, в частности, однокомпонентной плазмы [1] и полностью ионизованной двухкомпонентной плазмы [2]. Тем не менее, для вырожденных систем классические подходы неприменимы даже на качественном уровне.

В докладе будет приведен обзор так называемых первопринципных методов расчета термодинамических, транспортных и оптических свойств сильнонеидеальной вырожденной плазмы, то есть подходов, в которых не используется эмпирическая информация, за исключением заряда и массы ядер составляющих вещество элементов, а также фундаментальных физических констант. Будут рассмотрены квазиклассические подходы, такие как метод Томаса-Ферми с различными поправками, модели среднего атома [3], метод Монте-Карло с интегралами по траекториям [4], метод функционала плотности и метод квантовой молекулярной динамики [5]. Результаты моделирования будут сравниваться с ударно-волновыми экспериментальными данными, с экспериментами для жидких металлов; кроме того, будут приведены примеры первопринципных оценок критических параметров металлов. Для первопринципных расчетов транспортных и оптических свойств будут привлекаться кинетические модели в приближении времени релаксации, модель Займана, формула Кубо-Гринвуда и преобразование Крамерса-Кронига. Результаты будут сравниваться с экспериментальными данными статических и динамических экспериментов. Анализ различных методов показывает, что современные подходы, основанные на методе квантовой молекулярной динамики и формуле Кубо-Гринвуда, позволяют в рамках одной модели с хорошей точностью рассчитывать весь комплекс теплофизических свойств неидеальной вырожденной плазмы. Это, в свою очередь, дает возможность построения широкодиапазонных аппроксимационных моделей нового поколения, необходимых для непрерывного моделирования задач воздействия мощных потоков энергии на металлы. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 20-42-04421.

Литература

- [1]. Hansen J. P. *Physical Review A*, 1973, V. 8, P. 3096
- [2]. Hansen J. P., McDonald I. R. *Physical Review A*, 1981, T. 23, C. 2041
- [3]. Никифоров А. Ф., Новиков В. Г., Уваров В. Б. *Квантово-статистические модели высокотемпературной плазмы и методы расчета росселандовых пробегов и уравнений состояния*. М.: Физматлит, 2000
- [4]. Ebeling W., Fortov V. E., Filinov V. *Quantum Statistics of Dense Gases and Nonideal Plasmas*. Springer International Publishing, 2017
- [5]. Martin R. M. *Electronic structure: basic theory and practical methods*. Cambridge university press, 2020

СТАТУС ТОКАМАКА Т-15МД

¹Анашкин И.О., ¹Кирнева Н.А., ¹Левин И.В., ¹Леонов В.М., ¹Лутченко А.В.,
¹Ноткин Г.Е., ¹Рой И.Н., ¹Соколов М.М., ¹Сушков А.В., ¹Хвостенко П.П.,
¹Чудновский А.Н., ²Бондарчук Э.Н., ³Романников А.Н.

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

²АО НИИЭФА им. Д.Ф. Ефремова, г. Санкт-Петербург, Россия

³АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Троицк, г. Москва, Россия, e-mail: liner@triniti.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.013

В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» завершается подготовка к физическому пуску установки токамак Т-15МД и технологических систем. Токамак Т-15МД имеет следующие параметры: $R = 1.48$ м, $a = 0.67$ м, $B = 2.0$ Т, $I_{pl} = 2.0$ МА. Токамак Т-15МД представляет компактную установку с дивертором, не имеющую аналогов в мире по параметрам: тороидальное поле 2 Тл при аспектном отношении 2.2 [1]. Электромагнитная система способна поддерживать без перегрева более 60°C ток плазмы в диапазоне 2 МА ÷ 250 кА в течение 4 ÷ 400 секунд [2]. Поддержание тока плазмы может быть обеспечено как инжекцией пучков быстрых атомов, так и электромагнитными волнами.

В 2020 г. завершена реконструкция подстанции № 745 (110/10 кВ) и двух подстанций 10/1 кВ. Установлено 24 новых трансформатора различной мощности, обеспечивающих работу токамака с импульсной нагрузкой до 300 МВА. Двадцать новых тиристорных преобразователей, изготовленных в Чешской Республике, для систем электропитания обмотки тороидального поля и трех-секционного индуктора были установлены на штатное место и испытаны на эквивалентную нагрузку. Точность установки катушек тороидального поля и эффективность полоидальных катушек были измерены с помощью электронного пучка в аргоне при величинах тороидального магнитного поля в диапазоне 300÷500 Гс. Были проведены предварительные испытания систем омического прогрева вакуумной камеры и тлеющего разряда. Работа технологического оборудования систем высоковакуумной откачки, электропитания систем прогрева и тлеющего разряда во время кондиционирования стенок вакуумной камеры осуществлялась штатной системой управления.

Эксперименты по получению и исследованию плазменного режима будут начаты в середине 2021 г. Для облегчения пробоя будет использован гиротрон с частотой 82.6 ГГц (вторая гармоника для магнитного поля 1.5 Т). Плазменные исследования будут проводиться с помощью современного диагностического комплекса.

В 2022-2024 гг. установка будет оборудована системой дополнительного нагрева плазмы и поддержания тока в квазистационарных разрядах с длительностью импульса до сотен секунд при уровне вводимой в плазму мощности не менее 15 МВт.

Литература

- [1]. Khvostenko P.P. et al. Tokamak T-15MD - two years before the physical start-up // Fusion Engineering and Design, Volume 146, Part A, September 2019, pp. 1108–1112
- [2]. Хвостенко П.П. и др. РАСЧЕТЫ УСТАВОК В СХЕМАХ ЗАЩИТ И БЛОКИРОВОК СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ОБМОТОК И ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПЛАЗМЕННЫХ РАЗРЯДОВ В ТОКАМАКЕ Т-15МД // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2020, том 43, вып. 3, с. 60-70

ГЛОБУС-М2:**ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ПЛАНЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

¹Гусев В.К., ¹Сахаров Н.В., ¹Минаев В.Б., ¹Петров Ю.В., ¹Варфоломеев В.И., ¹Бахарев Н.Н., ²Багрянский П.А., ¹Брунков П.Н., ^{1,3}Буланин В.В., ¹Воронин А.В., ²Давыденко В.И., ¹Дьяченко В.В., ⁴Жилин Е.Г., ⁵Кавин А.А., ¹Киселев Е.О., ¹Коновалов А.Н., ¹Корнев В.А., ¹Курские Г.С., ¹Мельник А.Д., ⁵Минеев А.Б., ¹Миронов М.И., ¹Мирошников И.В., ¹Новохацкий А.Н., ¹Ошуев К.Ю., ¹Патров М.И., ³Петров А.В., ³Пономаренко А.М., ³Рожанский В.А., ³Сениченков И.Ю., ²Соломахин А.Л., ¹Тельнова А.Ю., ¹Токарев В.А., ¹Толстяков С.Ю., ¹Хромов Н.А., ¹Чернышев Ф.В., ¹Щеголев П.Б., ²Шиховцев И.В., ^{1,3}Яшин А.Ю., ¹Тюхменева Е.А., ¹Балаченков И.М., ¹Горяинов В.Ю., ¹Скрекель О.М., ¹Корепанов П.А., ³Векшина Е.А., ¹Шулятьев К.Д., ¹Митранкова М.М., ¹Жильцов Н.С.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия

²ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

³Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

⁴ООО Иоффе Фьюжн Текноложис, г. Санкт-Петербург, Россия

⁵АО НИИЭФА им. Д.Ф. Ефремова, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.014

В докладе представлены результаты экспериментальных кампаний предыдущих трех лет работы. Эксперименты проводились в дейтериевой плазме при инъекции дейтериевого пучка с энергией 28 кэВ. При росте магнитного поля до 0.8 Тл и тока плазмы до 0.4 МА зарегистрировано повышение энергозапаса и времени жизни энергии плазмы до 3-х раз. Данные экспериментов расширяют скейлинг, полученный ранее на токамаках NSTX (USA), MAST(UK) и Глобус-М (Россия), на область более высоких магнитных полей сферических токамаков. При росте тока плазмы и магнитного поля фиксировалось заметное увеличение нейтронного выхода. В экспериментах при максимальных значениях магнитного поля и тока наблюдался рост тройного произведения $nT\tau_e$ на порядок величины по сравнению с разрядами при низких полях и переход плазмы в бесстолкновительный режим с параметром столкновительности $\nu^* \ll 1$. Обсуждаются причины улучшения термоизоляции плазмы и приводятся данные моделирования переноса тепла и частиц в базовых разрядах.

Приводятся результаты изучения структуры альфвеновских мод и их влияния на удержание быстрых частиц. Установленная зависимость потерь быстрых ионов от амплитуды тороидальных альфвеновских мод демонстрирует уменьшение потерь с ростом поля и тока. Описывается диагностическое применение анализа спектров альфвеновских неустойчивостей.

Представлены результаты исследования пограничного слоя плазмы диверторной конфигурации с помощью ленгмюровских зондов. Проведено предсказательное моделирование пристеночной плазмы кодом SOLPS-ITER, продемонстрировавшее наличие радиальных токов в обдирочном слое, которые имеют неоклассическую природу.

Впервые на сферическом токамаке удалось заместить часть индукционного тока разряда током, увлекаемым ВЧ волнами промежуточного диапазона частот (2.45 ГГц), замедленными в тороидальном направлении.

Обсуждаются планы дальнейших исследований: повышение поля и тока до проектных значений (1.0 Тл и 0.5 МА) и мощности нейтральной инъекции до 2 МВт; повышение мощности системы нижнегибридного ввода тока; применение нового диагностического оборудования, в т.ч. многочастотного доплеровского рефлектометра, сканирующей системы нейтральных анализаторов, импульсно-периодического лазера томсоновского рассеяния, дисперсионного интерферометра, многоканальной активной спектроскопии перезарядки и др.

Работа выполнена по плану ГЗ Минобрнауки на УНУ "Сферический токамак Глобус-М", входящей в состав ФЦКП ФТИ "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях", (id: RFMEFI62119X0021).

**СЕКЦИЯ
«МАГНИТНОЕ УДЕРЖАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ
ПЛАЗМЫ»**

**SECTION
«MAGNETIC CONFINEMENT OF HIGH - TEMPERATURE
PLASMAS»**

ТРАНСПОРТНЫЕ МОДЕЛИ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ НА ВТОРОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОЙ ГАРМОНИКЕ В ТОКАМАКАХ И СТЕЛЛАТОРАХ

¹Днестровский Ю.Н., ¹Данилов А.В., ¹Днестровский А.Ю., ¹Лысенко С.Е.,
¹Мельников А.В., ¹Немец А.Р., ¹Нургалиев М.Р., ¹Субботин Г.Ф., ¹Соловьев Н.А.,
¹Сушков А.В., ²Сычугов Д.Ю., ¹Черкасов С.В.

¹НИЦ “Курчатовский институт”, г. Москва, Россия, e-mail: Dnestrovskiy_YN@nrcki.ru
²МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, e-mail: sychugov@cs.msu.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.015

Из экспериментов на токамаке T-10 с нагревом на первой и второй ЭЦ-гармониках найден критерий полного поглощения микроволн [1] и построены транспортные модели (Стандартная для полного поглощения и Глобальная для частичного поглощения), использующие канонические профили ионной T_i и электронной T_e температур. Из анализа профильной базы данных T-10 найдены коэффициенты переноса, дающие минимальные среднеквадратичные отклонения расчетных профилей T_e и T_i от экспериментальных. Введено понятие эквивалентных разрядов, для которых перенос энергии в токамаках и стеллараторах аналогичен. Построены два эквивалентных разряда для стелларатора W7-X [2] и строящегося токамака T-15МД [3], для которых с помощью Стандартной модели рассчитан перенос в широком диапазоне плотностей. На рис. 1 приведены зависимости максимальных значений T_e и T_i от средней плотности плазмы \bar{n} . Треугольники – это экспериментальные значения температуры в W7-X, кружки – расчеты температуры по Стандартной модели. На рис. 2 показаны расчетные (T-15МД, сплошные линии) и экспериментальные (W7-X, пунктир) профили температур T_e и T_i для разряда с центральным ЭЦ-нагревом при $n = 3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Эквивалентными могут быть и разряды из разных токамаков. В частности, для токамаков с разными большими радиусами показано, что температура электронов в эквивалентных разрядах различается на 1 – 2%, а температура ионов – на 10 – 12%. Наконец, объединенная (Стандартная + Глобальная) транспортная модель использована для предсказания переноса энергии в различных режимах токамака T-15МД.

Работа поддержана РФФИ, грант 20-07-00391 и РНФ, проект 19-12-00312.

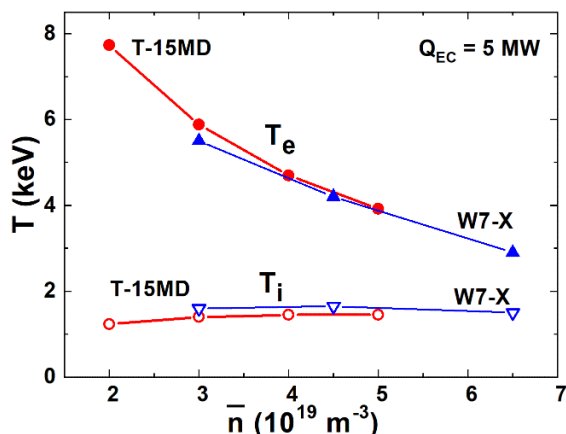


Рис. 1. Центральная электронная T_e и ионная температура T_i как функция плотности в эквивалентных разрядах с ЭЦ-нагревом в T-15МД и W7-X.

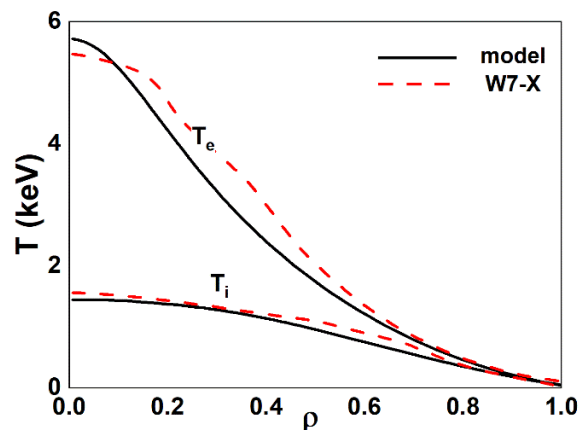


Рис. 2. Расчетные (T15МД) и экспериментальные (W-7X) профили электронной T_e и ионной T_i температур, центральный ЭЦ-нагрев, $Q_{EC} = 5 \text{ МВт}$.

Литература

- [1]. Днестровский Ю.Н., и др. Физика плазмы 2020, Т. 46 С. 387
- [2]. Bozhenkov S.A., et al. 61st Ann. Meeting APS Division Plasma Physics V. 64, YP10.00058
- [3]. Khvostenko P.P., et al. Fusion Eng. Design 2019, V. 146, Part A, P. 1108

ДИАГНОСТИКА ВОДОРОДА В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКОВ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНОГО ИНДУЦИРОВАННОГО ТУШЕНИЯ

¹Горбунов А.В., ²Мухин Е.Е., ²Курскиев Г.С., ²Толстяков С.Ю., ¹Летунов А.Ю.,
¹Лисица В.С., ¹Левашова М.Г., ¹Вуколов К.Ю.

¹НИЦ “Курчатовский институт”, г. Москва, Россия, e-mail: alexeygor@mail.ru,

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: e.mukhin@mail.ioffe.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.016

Методику лазерного индуцированного тушения (ЛИТ) [1 – 3] предлагается использовать для диагностики атомарного водорода (дейтерия, трития) в плазме токамаков и стеллараторов. ЛИТ объединяет преимущества лазерной индуцированной флуоресценции (ЛИФ) [4, 5] и фотоионизации (ЛИИ) [6, 7], применяемых для измерений концентрации водорода: чувствительность ЛИТ сопоставима с лазерной флуоресценцией, а за счёт разницы между длинами волн возбуждения и регистрации, также как в ЛИИ, удаётся легко избавиться от паразитной лазерной засветки.

ЛИТ основан на эффекте частичного уменьшения светимости наиболее интенсивной линии водорода в видимом диапазоне H_α (656,3 нм, переход $n = 3 \rightarrow 2$) за счёт лазерного возбуждения в одной из спектральных линий пашеновской серии. Лазерная накачка на переходе $n = 3 \rightarrow n_{Up}$ (где $n_{Up} \geq 4$) уменьшает населённость на $n = 3$ группе уровней, а пропорционально населённости, падает и светимость линии H_α . Регистрируя амплитуду сигнала тушения, можно рассчитать локальную концентрацию атомов водорода с помощью столкновительно-излучательной модели (СИМ).

В первых тестовых ЛИТ экспериментах в плазме токамака Глобус-М применялся 100 Гц импульсный лазер на основе оптического параметрического генератора (ОПГ) [3], возбуждалась линия водорода 1005 нм ($n = 3 \rightarrow 7$). Тестовые эксперименты подтвердили возможность реализации диагностики в условиях токамака.

Расчёты в СИМ показывают, что для насыщения сигналов тушения при возбуждения линии 1875 нм ($n = 3 \rightarrow 4$) требуется минимальная спектральная мощность лазерного излучения ($P_{Sat} < 1$ Вт/см²пм), по сравнению с другими линиями пашеновской серии. Низкая мощность лазера, необходимая для наблюдения эффекта тушения, позволила применить модулированный во времени тулиевый волоконный лазер с длиной волны генерации 1875,1 нм (с возможностью перестройки в диапазоне 1873 - 1877 нм) и пиковой мощностью 5 Вт. Первые результаты экспериментов с новым лазером получены в омических разрядах при лазерном зондировании пристеночной плазмы в экваториальном сечении около центрального столба. Минимальная измеренная концентрация атомов в стационарной стадии разрядов составила $n_a \approx 10^{15}$ м⁻³ при усреднении сигналов за 10 мс. В случае большей концентрации атомов в области измерения $n_a > 10^{16}$ м⁻³ достаточно было усреднения по 1,0 - 2,5 мс.

В докладе представлены основы ЛИТ методики измерений, рассмотрены особенности применения диагностики в плазме токамаков. Представлены результаты измерений концентрации атомов водорода в пристеночной плазме токамака Глобус-М.

Литература

- [1]. А.В. Горбунов и др., Конференция ДВП-17, 2017, с. 81-83
- [2]. A. Gorbunov et al., Fusion Eng. Des., 2017, 123, pp. 695-698
- [3]. E. Mukhin et al., Nucl. Fusion, 2019, 59, 086052
- [4]. G. Razdobarin et al., Nucl. Fusion, 1979, 19, 1439
- [5]. T. Kubach et al., 31st EPS Conference on Plasma Phys., ECA 28G, P-4.138 (2004)
- [6]. V. Gladushchak, Nucl. Fusion, 1995, 35, 1385
- [7]. M. Kantor, JINST, 2012, 7, C02017

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАХВАТА ЛИТИЯ МНОГОСЛОЙНЫМ КОЛЛЕКТОРОМ НА ОСНОВЕ КПС НА ТОКАМАКЕ Т-11М

Васина Я.А., Пришвицын А.С., Джурик А.С., Отрощенко В.Г., Лазарев В.Б.,
Мирнов С.В.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Троицк, г. Москва, Россия, e-mail: ian.vasina@yandex.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.017

Анализ данных, полученных на различных токамаках [1], показал, что одним из основных препятствий на пути к созданию квазистационарного токамака – прототипа промышленного реактора - является ограничение длительности его рабочего импульса из-за накопления внутри камеры токамака продуктов эрозии ее элементов, обращённых к плазме. С целью преодоления этого препятствия ранее была предложена концепция замкнутого литиевого контура, основными элементами которого являются эмиттеры и коллекторы лития [1]. В рамках этой концепции литий, как продукт эрозии первой стенки токамака, должен собираться коллекторами с последующим удалением из камеры токамака.

На токамаке Т-11М ведутся эксперименты по исследованию характера взаимодействия потоков частиц и энергии, приходящих на внутрикамерные элементы токамака. В работе представлены результаты исследования эффективности захвата лития коллектором продольного типа (под углом к тороидальному магнитному полю), изготовленным на основе капиллярной пористой системы (КПС), образованной разным количеством захватывающих слоев нержавеющей сетки (0, 2 и 4) с ячейкой 30 мкм [2].

Коллектор экспонировался в серии разрядов токамака. Основным источником лития являлся вертикальный КПС литиевый лимитер. После окончания серии коллектор вынимался из камеры токамака, сетка разрезалась на отдельные элементы для получения распределения лития вдоль и по глубине поверхности коллектора. Количество лития на каждой из частей сетки определялось методом пламенного анализа [3]. Главным проектом современной России в сфере УТС является создаваемый в НИЦ КИ токамак Т-15МД. Эксперименты проведены в поддержку этого проекта в рамках договора на выполнение НИОКР № 313/1694-Д с АО "Наука и инновации".

Литература

- [1]. S. Mirnov, Tokamak evolution and view to future, Nucl. Fusion. 59 (2018). doi:10.1088/1741-4326/aee92.
- [2]. V.A. Evtikhin, et al., Plasma Phys. Control. Fus. 44 (2002) 95
- [3]. Мирнов С.В., Джигайло Н.Т., Щербак А.Н. Физико - химический метод определения абсолютного количества лития в плёнках на диагностических мишенях // Вопросы атомной науки и техники. Серия термоядерный синтез. 2018. Libk. 41, № 1. Стр. 53–56

СОВМЕСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОПЛИВНЫХ ПОТОКОВ В ПЛАЗМЕ И В СИСТЕМАХ ИНЖЕКЦИИ И ОТКАЧКИ ДЕМО-ТИН

¹Ананьев С.С., ¹Днестровский А.Ю., ^{1,2}Кукушкин А.С.

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: Ananyev_SS@nrcki.ru

²НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.018

Для расчётов потоков топливных изотопов для термоядерного источника нейтронов ДЕМО-ТИН [1] применяется модель топливного цикла FC-FNS [2], использующая совместное моделирование [3] газовых, твердотельных и плазменных потоков в областях основной и диверторной плазмы при инжекции примеси неона в диверторы [4]. Рассмотрен подход к моделированию основной плазмы с учетом различного времени удержания частиц от источников топлива. Модифицирован код FC-FNS для полного соответствия архитектуре, выбранной при анализе кандидатных технологий топливного цикла (ТЦ) [5] ДЕМО-ТИН. Модель дополнена новым сценарием газоснабжения системы нагревных инжекторов для возможности осуществлять инжекцию $D^0 + T^0$ нейтрального пучка с замкнутым газовым циклом. Проведено моделирование потоков в ТЦ, подобраны параметры топливной инжекции для обеспечения заданных условий в основной и диверторной плазме для различных сценариев изотопного состава нагревных инжекторов. Найден рабочий диапазон для изотопного состава в диверторной плазме, при котором обеспечивается требуемая доля трития в основной плазме. Найденны закономерности, позволяющие производить инжекцию пеллет для борьбы с локализованными краевыми модами при различном изотопном составе в диверторе без негативного воздействия на параметры основной плазмы. Показано, что для обеспечения доли трития в основной плазме 50% требуется поддерживать параметры диверторной плазмы с заданной долей трития: от 47% до 53% для $D^0 + T^0$ – нагревного пучка и от 54% до 60% для D^0 – пучка. В зависимости от выбранного рабочего значения доли трития в плазме дивертора выбирается возможная (допустимая) частота (поток) инжекции пеллет D_2 со стороны слабого магнитного поля (от 5 Гц до 110 Гц). Получено значение общего содержания трития на установке от 850 до 1150 г.

Работа частично поддержана Российским научным фондом (№ 18-72-10162).

Литература

- [1]. B.V. Kuteev, Yu.S. Shpanskiy, and DEMO-FNS project team, Nucl. Fusion, 59, 076014 (2019); <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab14a8>
- [2]. S.S. Ananyev, A.V. Spitsyn, and B.V. Kuteev, Fusion Eng. Des., 138, 289 (2019), <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.12.003>
- [3]. A.Yu. Dnestrovskiy et al., Nucl. Fusion, 59, 096053 (2019); <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab3075>
- [4]. S.S. Ananyev, A.Yu. Dnestrovskij, A.S. Kukushkin, A.V. Spitsyn, B.V. Kuteev, Fusion Engineering and Design 155 (2020) 111562, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111562>
- [5]. S.S. Ananyev, B.V. Ivanov, B.V. Kuteev, Fusion Engineering and Design 161 (2020) 111940, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111940>

АНАЛИЗ УРОВНЯ ГОТОВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ТРИТИЕВОГО ЦИКЛА В РОССИИ ДЛЯ ГИБРИДНОГО РЕАКТОРА ДЕМО-ТИН

Иванов Б.В., Ананьев С.С.

НИИ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия, e-mail: kapjicohh@gmail.com

DOI: 10.34854/ICSPAF.2021.48.1.019

Одной из основных систем, обеспечивающих работу термоядерного или гибридного реактора является тритиево-дейтериевый топливный цикл (ТЦ). В рамках программы развития термоядерных и гибридных технологий в РФ разрабатывается проект ДЕМО-ТИН, направленный на отработку гибридных технологий и их интеграцию [1]. Особенности реактора на базе токамака являются стационарный режим работы, $Q \sim 1$ и blanket с делящимися веществами – именно эти факторы в значительной степени определяют конфигурацию и основные технологии ТЦ [2].

В данной работе проведено сравнение степени готовности выбранных ранее кандидатных технологий тритий-дейтериевого ТЦ [2] в РФ и в мире. Проект ДЕМО-ТИН предусматривает использование отработанных решений [1, 3], в том числе тритиевых технологий, некоторые из которых входят в перечень двойного назначения и не могут быть импортированы из других стран. Технологии обращения с тритием и другими изотопами водорода в России применяют в различных областях, что облегчает задачу их использования в ТЦ ДЕМО-ТИН, однако, до настоящего времени системный подход для оценки степени их готовности для применения в термоядерных установках не был проведен.

Для оценки уровня готовности технологий авторами используется методология Technology readiness level (TRL). В узком смысле, методология TRL позволяет оценить готовность отдельной технологии для использования в конкретном устройстве или технической системе, в широком - для выполнения целей научной или технологической программы. Этот же подход позволяет формально оценить технологические разрывы, планировать необходимые исследования и инвестиции, определить возможные риски. Методология TRL получила широкое распространение и в последнее время активно применяется в научной сфере - в частности, она была использована для оценки готовности технологий в термоядерной сфере: для промышленного термоядерного реактора [4]; для топливного цикла реактора ДЕМО [5]; для диагностик плазмы [6]. В этих работах продемонстрирована эффективность методологии TRL для оценки различных термоядерных технологий и для планирования исследовательских программ.

Показано, что технологий, которые будут использованы в ТЦ ДЕМО-ТИН, отработаны в РФ и используются в других направлениях промышленности и науки. Отсутствие специализированной стендовой базы для отработки технологий применительно к ТЦ ТЯР или гибридных систем, позволяет нам оценить их готовность на уровне TRL 2 – 5. Это в целом соответствует уровню технологий в мире для большинства технологий тритиевого ТЦ. Для дальнейшего развития и повышения уровня готовности необходима отработка технологий в операционных условиях.

Работа поддержана НИИ «Курчатовский институт» (28.09.2020 № 1934а).

Литература

- [1]. B. V. Kuteev, E. A. Azizov, et al., Nucl. Fusion, vol. 55, no. 7, p. 073035, Jul. 2015
- [2]. S. S. Ananyev, B. V. Ivanov, and B. V. Kuteev, Fusion Eng. Des., vol. 161, no. December 2019, p. 111940, 2020
- [3]. B. V. Kuteev and Y. S. Shpanskiy, Nucl. Fusion, vol. 57, no. 7, p. 076039, Jul. 2017
- [4]. M. S. Tillack et al., Fusion Sci. Technol., vol. 56, no. 2, pp. 949–956, 2009
- [5]. Y. N. Hörstensmeyer, B. Butler, C. Day, and F. Franza, Fusion Eng. Des., vol. 136, no. January, pp. 314–318, 2018
- [6]. F. P. Orsitto et al., Nucl. Fusion, vol. 56, no. 2, 2016

ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ РАВНОВЕСИЯ ДИАМАГНИТНОГО ПУЗЫРЯ В ОТКРЫТОЙ ЛОВУШКЕ

Христо М.С., Беклемишев А.Д.

ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, khristo.mikhail@gmail.com,
Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.020

Режим диамагнитного удержания (диамагнитный “пузырь”) [1] призван значительно увеличить время удержания плазмы в открытых осесимметричных ловушках газодинамического типа (ГДЛ). Идея заключается в том, чтобы в центральной области ловушки сформировать “пузырь” плазмы высокого давления с $\beta = 8\pi p / B_v^2 \sim 1$. Внутри пузыря магнитное поле близко к нулю, поскольку практически полностью вытеснено плазмой. Оценки показывают, что это приводит к значительному увеличению пробочного отношения и эффективному улучшению удержания.

Прежде была построена одномерная МГД модель равновесия пузыря в цилиндрическом приближении для случая изотропной плазмы и постоянной температуры [1]. Далее, в работе [2] данная модель была обобщена на двумерный случай и стала учитывать эффекты непараксиальности, связанные с натяжением силовых линий. Тем не менее, внутри пузыря магнитное поле близко к нулю, а значит гидродинамическое приближение может нарушаться, требуется учет кинетических эффектов. В работе [3] представлена полностью кинетическая модель равновесия пузыря с изотропной в поперечной плоскости функцией распределения. Динамика отдельных частиц в диамагнитной ловушке рассматривается в работе [4]. Также ведутся работы по полному компьютерному моделированию диамагнитного пузыря [5 - 7].

Настоящая работа посвящена созданию гибридной модели равновесия диамагнитного пузыря в осесимметричной открытой ловушке в цилиндрическом приближении. Мы предполагаем, что плазма состоит из двух компонент: (1) горячие ионы, высокоэнергичные частицы, которые мы описываем в рамках кинетической теории; (2) холодная равновесная фоновая плазма, для описания которой используется МГД. В результате численного моделирования получены равновесные решения типа диамагнитного пузыря в широком диапазоне параметров, в частности, рассчитаны равновесия плазмы в ГДМЛ [8] в режиме диамагнитного удержания.

Литература

- [1]. Beklemishev, A. D. (2016). Diamagnetic “bubble” equilibria in linear traps. *Physics of Plasmas*, 23(8), 082506
- [2]. Khristo, M. S., & Beklemishev, A. D. (2019). High-Pressure Limit of Equilibrium in Axisymmetric Open Traps. *Plasma and Fusion Research*, 14, 2403007–2403007
- [3]. Kotelnikov, I. (2020). On the structure of the boundary layer in a Beklemishev diamagnetic bubble. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 62(7), 075002
- [4]. Chernoshtanov, I. (2020). *Collisionless particle dynamic in an axi-symmetric diamagnetic trap*. Retrieved from <http://arxiv.org/abs/2002.03535>
- [5]. Dudnikova, G. I., Chernykh, I. G., Chernoshtanov, I. S., & Vshivkov, V. A. (2019). Computer simulation of diamagnetic regime in open magnetic trap. *Journal of Physics: Conference Series*, 1336, 012013
- [6]. Boronina, M. A., Chernykh, I. G., Genrikh, E. A., & Vshivkov, V. A. (2019). Parallel Realization of the Hybrid Model Code for Numerical Simulation of Plasma Dynamics. *Journal of Physics: Conference Series*, 1336, 012017
- [7]. Vshivkov, V. A., Boronina, M. A., Genrikh, E. A., Dudnikova, G. I., Vshivkova, L. V., & Sudakov, A. M. (2019). *Journal of Physics: Conference Series*, 1336, 012020

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИНТОВОГО УДЕРЖАНИЯ В ЛИНЕЙНОЙ ЛОВУШКЕ СМОЛА

¹Судников А.В., ¹Беклемишев А.Д., ¹Иванов И.А., ¹Инжеваткина А.А.,
^{1,2}Ларичкин М.В., ^{1,2}Ломов К.А., ¹Поступаев В.В., ¹Скляр В.Ф., ^{1,2}Устюжанин В.О.

¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, e-mail: A.V.Sudnikov@inp.nsk.su

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

DOI: 10.34854/ISPAF.2021.48.1.021

Дорожная карта развития линейных ловушек для магнитного удержания термоядерной плазмы, предложенная в ИЯФ СО РАН, предусматривает создание стационарной установки газодинамического типа и формирование научного задела по методам улучшенного продольного удержания. Одним из новых методов подавления продольных потерь является динамическое многопробочное удержание вращающейся плазмы в магнитном поле с геликоидальной симметрией [1]. Теоретически предсказана экспоненциальная зависимость эффективности подавления потерь от длины участка с винтовым полем, приводящая к существенному повышению эффективного пробочного отношения в открытой ловушке [2].

Проверка данной концепции проводится на установке СМОЛА в ИЯФ СО РАН [3]. Основной частью установки является уединённая винтовая пробка, содержащая 12 периодов винтового поля. Соотношение винтовой и продольной компонент магнитного поля в винтовой секции может быть произвольно изменено. Вращение плазмы задаётся за счёт создания контролируемого профиля радиального электрического поля. Система создания радиального электрического поля схожа с системой вихревого удержания плазмы в ГДЛ и может быть также использована для стабилизации плазменного шнура. Плазма запирается между указанной «уединённой пробкой» и источником плазмы, расположенном в локальном максимуме поля. Эффективность предложенной концепции может быть определена по изменению параметров плазмы вдоль винтовой секции в различных режимах магнитного и электрического поля. В проект заложены следующие параметры плазмы: плотность до $n_i \sim 10^{19} \text{ м}^{-3}$, ведущее магнитное поле в винтовой секции $B_{\max} = 0.1 - 0.3 \text{ Т}$, радиальное электрическое поле до $E_r \sim 100 \text{ В/см}$, радиус плазмы $r \sim 5 \text{ см}$, период винтового поля 18 см, среднее по сечению пробочное отношение в транспортной секции $R_{\text{mean}} \leq 2$.

Ранее была показана принципиальная возможность подавления потока плазмы винтовой магнитной пробкой и соответствие экспериментальных скейлингов теоретическим оценкам при ведущем магнитном поле $B_{\max} \approx 0.7 \text{ Т}$ в области малых пробочных отношений ($R_{\text{mean}} < 1.5$) и низкой скорости вращения плазмы [4, 5]. В докладе также приведены результаты экспериментов по подавлению продольного потока плазмы при среднем по сечению пробочном отношении $R_{\text{mean}} > 1.5$ и скорости вращения плазмы на периферии, близкой к ионно-звуковой.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 18-72-10080).

Литература

- [1]. A. D. Beklemishev. Helicoidal System for Axial Plasma Pumping in Linear Traps // Fusion Science and Technology, V.63, N.1T, May 2013. P.355
- [2]. A.D. Beklemishev. Radial and axial transport in trap sections with helical corrugation // AIP Conf. Proc. 1771 (2016) 040006, doi: 10.1063/1.4964191
- [3]. A. V. Sudnikov et al. SMOLA device for helical mirror concept exploration // Fusion Engineering and Design 122C (2017) pp. 86-93, doi: 10.1016/j.fusengdes.2017.09.005
- [4]. A. V. Sudnikov et al. First Experimental Campaign on SMOLA Helical mirror // Plasma and Fusion Research 14 (2019), 2402023
- [5]. A. V. Sudnikov, et al. Preliminary experimental scaling of the helical mirror confinement effectiveness// J. of Plasma Physics, 86(5), 2020, 905860515

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПРОДОЛЬНОГО УДЕРЖАНИЯ ЭНЕРГИИ В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ЛОВУШКЕ

¹Багрянский П.А., ^{1,2}Лизунов А.А., ^{1,2}Максимов В.В., ^{1,2}Мейстер А.К., ¹Савкин В.Я.,
¹Сковородин Д.И., ^{1,2}Солдаткина Е.И., ^{1,2}Соломахин А.Л., ^{1,2}Федоренков Э.А.,
¹Яковлев Д.В.

¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.022

В Институте Ядерной Физики СО РАН ведется экспериментальное и теоретическое изучение физики удержания плазмы в открытой магнитной ловушке ГДЛ [1]. Такие системы на сегодняшний день являются перспективными в смысле создания мощных источников нейтронов и даже термоядерных реакторов на их основе. Это связано с гораздо более простой по сравнению с токамаками конструкцией, за счет чего цена нейтрона (или киловатт-часа энергии) может быть существенно снижена. Однако для реализации такого проекта необходимо изучить все аспекты удержания плазмы в открытой магнитной системе, построить необходимые теоретические и математические модели, которые позволят описать поведение плазмы с термоядерными параметрами.

Важнейшим аспектом работы в этом направлении является изучение механизмов продольного удержания частиц и энергии в открытой ловушке, так как знание о величине потерь энергии из такой системы является ключевым при обосновании возможности ее использования в будущем. В прежних работах были измерены величины скачка потенциала в дебаевском слое вблизи плазмоприемника и средней энергии электронов в расширителе [2], а также величины энергии, выносимой из ловушки одной электрон-ионной парой [3]. Следующим шагом стало измерение перепада электростатического потенциала между центром ловушки и приемником плазмы по данным томографической системы, регистрирующей уширенную линию излучения Na в расширителе установки ГДЛ. Все эти параметры дают представление об общей картине продольного удержания в открытой ловушке. Также проведены эксперименты по изучению влияния формы приемника плазмы на ее удержание в ГДЛ. Результаты этих экспериментов будут представлены в докладе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 18-72-10084 от 31.07.2018.

Литература

- [1]. P.A. Bagryansky, et.al. Phys. Rev. Lett. 114, 205001 (2015)
- [2]. E. Soldatkina, et.al. Phys. Plasmas 24 022505 (2017)
- [3]. E. Soldatkina, et.al. Nucl. Fusion 60 086009 (2020)

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕСС УСКОРЕНИЯ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНОГО КООКСИАЛЬНОГО УСКОРИТЕЛЯ

Бахтин В.П., Еськов А.Г., Житлухин А.М., Кочнев Д.М., Умрихин Н.М.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, г. Троицк, Россия, e-mail: dimich17@triniti.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.023

Импульсные плазменные ускорители [1] применяются в таких направлениях, как создание источника нейтронов и источника рентгеновского излучения, упрочнение материалов, создание электрореактивного двигателя.

Для транспортировки плазменного потока после выхода из ускорителя обычно используется плазмопровод в виде цилиндрической вакуумной камеры. Одним из способов снижения потерь энергии плазмы на стенку камеры может являться замагничивание плазмы путем введения в плазмопровод и межэлектродный зазор ускорителя продольного магнитного поля. Кроме того, введение продольного магнитного поля в ускорительный канал может выступать в качестве дополнительного механизма управления режимом работы ускорителя и, как следствие, выходными параметрами плазменного потока.

В рамках данной работы было проведено исследование влияния квазистационарного продольного магнитного поля на динамику мощных плазменных потоков в каналах импульсных плазменных ускорителей. В проводимых экспериментах в качестве плазмообразующего газа использовался водород. Индукция магнитного поля в ускорителе и плазмопроводе варьировалась от эксперимента к эксперименту в пределах от 0 до 2,4 Тл. При этом поля в канале ускорителя и в плазмопроводе могли варьироваться независимо.

При помощи магнитного зонда, расположенного в межэлектродном зазоре ускорителя, проведены измерения радиальных распределений продольного и азимутального магнитного поля при движении плазменного сгустка в канале ускорителя.

Измерения, проведенные при помощи магнитного зонда, установленного на оси плазмопровода на расстоянии 1 метр от торца ускорителя, показали, что наличие квазистационарного продольного магнитного поля в ускорителе приводит к увеличению степени замагниченности плазмы.

Проведено скоростное фотографирование межэлектродного промежутка со стороны выходного торца ускорителя в свете линий примесного газа (азота), напускаемого в локальную область межэлектродного зазора. По скорости перемещения области свечения была определена скорость вращения плазмы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-29-21007 и № 18-29-21013.

Литература

- [1]. Васильев В.И., Житлухин А.М., Соловьева В.Г., Скворцов Ю.В., Умрихин Н.М., ВАНТ, 1977, вып. 1, с. 19—24

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ЯДЕР ПРИМЕСЕЙ И РАБОЧЕГО ГАЗА В РЕЖИМАХ С ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННЫМ РЕЗОНАНСНЫМ НАГРЕВОМ НА ТОКАМАКЕ T-10

¹Крупин В.А., ^{1,3}Кудашев И.С., ¹Нургалиев М.Р., ^{1,4}Земцов И.А., ¹Немец А.Р.,
¹Днестровский А.Ю., ¹Сарычев Д.В., ¹Соловьев Н.А., ¹Рыжаков Д.В., ¹Сергеев Д.С.,
¹Мялтон Т.Б., ¹Тугаринов С.Н., ²Науменко Н.Н.

¹НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия, e-mail: iskudashev@gmail.com

²Институт физики НАН РБ, г. Минск, Республика Беларусь

³НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия

⁴МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.024

Наличие примесей в термоядерной плазме создает одну из основных проблем термоядерной энергетики. Накопление легких примесей в центре плазменного шнура приводит к разбавлению концентрации ионов рабочего газа, что снижает эффективность работы термоядерного реактора. Помимо этого примеси могут в значительной степени влиять на эффективность всех видов нагрева плазмы, на процессы переноса и устойчивости плазменного шнура.

Проблема переноса примесей изучается более 40 лет на различных токамаках, в различных режимах (L-, H-, I-моды) и с различными способами нагрева плазмы (омическим, пучками нейтралов и с помощью ЭЦР, ИЦР и LH излучений).

Цель настоящей работы состоит в определении степени влияния электронно-циклотронного резонансного нагрева (ЭЦРН) на перенос ядер примеси углерода (C^{6+}) и ионов рабочего газа (D^+). Работа основывается на результатах экспериментов на токамаке T-10, проведенных в период с 2015 по 2018 гг. Для выбранных разрядов с различной конфигурацией ЭЦР-нагрева была проведена обработка экспериментальных данных с последующим моделированием переноса C^{6+} и D^+ при помощи кодов ASTRA и STRANL. Концентрация и температура ионов C^{6+} и D^+ измерялась при помощи CXRS-диагностики. Измерения электронной температуры проводились с помощью измерений ЭЦ излучения плазмы на 2-ой гармонике и спектра излучения плазмы в области мягкого рентгена. Плотность электронов измерялась с помощью 16-канального интерферометра.

В работе получено, что при введении нецентрального ЭЦРН происходит аккумуляция ядер C^{6+} в центре шнура с накоплением их абсолютной концентрации в разряде. Одновременно с этим происходит уплощение профиля плотности ионов рабочего газа D^+ и удаление их из центра шнура. В результате нецентральный ЭЦР нагрев должен приводить к усилению негативного эффекта разбавления D^+ в условиях токамака-реактора. При введении центрального ЭЦРН на фоне эффекта *pump-out* (ухудшение удержания электронов) происходит и определенное ухудшение удержания углерода. При этом удаление ионов D^+ из плазмы при ЭЦР нагреве проявляется либо явно, либо оказывается в определенной степени замаскировано процессом возврата дейтерия в разряд ("*pump-in*") в случае высокого насыщения стенок вакуумной камеры дейтерием.

Эксперименты, проведенные в литиезованной плазме T-10 с низким уровнем возврата дейтерия в разряд при ЭЦР нагреве, позволили обнаружить, что ухудшение удержания ионов D^+ при центральном ЭЦРН вследствие "*pump-out*" эффекта существенно превышает соответствующее ухудшение удержания ядер C^{6+} . В результате при центральном ЭЦР нагреве наблюдается абсолютное уменьшение в центре шнура концентрации ионов рабочего газа D^+ , которое сопровождается еще и заметным усилением разбавления концентрации D^+ ядрами легких примесей. При нецентральном ЭЦР нагреве, помимо ухудшения удержания ионов D^+ и возникновения "*pump-out*" выброса дейтронов из плазмы, резко усиливается процесс разбавления ионов D^+ ядрами легких примесей в центральных областях шнура.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПАССИВНОГО СНИЖЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ИНЖЕКТОРОВ НЕЙТРАЛЬНОГО ПУЧКА ДЕМО-ТИН

Клищенко А.В., Ананьев С.С., Длугач Е.Д.

НИИ Курчатовский институт, г. Москва, Россия, e-mail: kliand@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.025

Работа термоядерного источника нейтронов (ТИН) в стационарном режиме потребует нагрева плазмы и поддержания тока в ней с помощью инъекции пучков быстрых атомов. В проекте ДЕМО-ТИН [1] предполагается использование шести инжекторов, обеспечивающих мощность дополнительного нагрева до 30 МВт при энергии атомов 500 кэВ. В качестве прототипа для инжектора ДЕМО-ТИН может служить инжектор, детально разработанный для проекта ИТЭР, с сохранением компоновки инжектора, но изменениями отдельных компонентов - что вызвано отличием энергии и мощности пучка [2]. Внутри этих компонентов есть очень строгие ограничения на величину магнитного поля (плотность потока должна быть ниже некоторого значения вдоль пути движения ионов и ещё ниже в области нейтрализации) [3]. Для достижения этих характеристик в среде с высоким рассеянным полем из-за магнитной системы установки, включающей катушки полоидального и тороидального поля, центральный соленоид и непосредственно плазму, предусматривается дополнительная экранировка инжекторов. На данном этапе мы ожидаем, что предлагаемая конструкция позволит получить требуемые значения магнитного поля только путем пассивной экранировки инжектора(-ов) за счет корпуса, выполненного из ферромагнитного материала с высоким значением магнитной проницаемости.

Электромагнитный анализ эффективности такого экрана был выполнен с помощью 3D-моделирования с использованием кода ANSYS. Для этого была создана расчетная конечноэлементная модель ДЕМО-ТИН, включающая в себя вакуумный объем, в котором расположена вся электромагнитная система, включая ток в плазме, и один из 6 нагревных инжекторов. Были рассчитаны величины компонент магнитного поля на оси инъекции без экранирования области инжектора. Было показано, что вертикальная компонента поля B_z в области инжектора является максимальной и находится в диапазоне 300 Гс на входе (со стороны тора) до 150 Гс в другом конце не экранированного корпуса. Были рассмотрены варианты однослойного экранирования с применением различных материалов, и многослойных: двух-, трех- и четырехслойного с различной толщиной слоев и вакуумных зазоров между ними. Путем выбора оптимальных толщин слоев и вакуумных промежутков было получено подавление величины проекции вектора магнитной индукции на плоскости, перпендикулярные направлению пучка, до допустимых значений в области компонентов инжектора. Эти результаты будут использованы в дальнейшем при инженерном проектировании корпуса инжектора и атомпровода.

Работа поддержана Национальным исследовательским центром «Курчатовский институт» (28.09.2020 № 1934а).

Литература

- [1]. Y. S. Shpanskiy, “Progress in the design of the DEMO-FNS hybrid facility,” Nucl. Fusion, vol. 59, no. 7, p. 076014, Jul. 2019
- [2]. S.S. Ananyev, E.D. Dlugach, A.I. Krylov, A. A. Panasenkov and B. V. Kuteev, Concept of Plasma Heating and Current Drive Neutral Beam System for Fusion Neutron Source DEMO-FNS — Physics of Atomic Nuclei, 2019, Vol. 82, No. 7, pp. 981–990, DOI: 10.1134/S1063778819070020
- [3]. С.С. Ананьев, Е.Д. Длугач, Б.В. Кутеев, А.А. Панасенков, Моделирование и оптимизация системы нейтральной инъекции для проекта термоядерного источника нейтронов ДЕМО-ТИН — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 3, DOI: 10.21517/0202-3822-2018-41-3-57-79

АНАЛИЗ СХЕМЫ И ПАРАМЕТРЫ ИНЖЕКТОРА БЫСТРЫХ АТОМОВ ДЛЯ ТОКАМАКА ТИН-СТ

Ананьев С.С., Панасенков А.А., Длугач Е.Д., Кутеев Б.В.

НИИЦ Курчатовский институт, г. Москва, Россия, e-mail: Ananyev_SS@nrcki.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.026

Работа посвящена выбору схемы и параметрам инжектора быстрых атомов дейтерия для системы нейтральной инжекции токамака ТИН-СТ [1]. Энергия быстрых атомов является важным параметром, определяющим эффективность генерации тока в плазме токамака и нейтронный выход. Как показано в [2], в диапазоне 100 ÷ 200 кэВ с ростом энергии доля нейтронов, полученных на D-T реакции в тепловом компоненте плазмы, уменьшается, однако полный нейтронный выход растёт, что обеспечивается ростом интенсивности D-T реакции при взаимодействии пучок-плазма. С ростом энергии пучка наблюдается также заметный рост эффективности генерации тока.

Приведенный диапазон энергий является переходным для выбора схемы инжектора либо на основе источников положительных ионов (ПИ), либо отрицательных (ОИ), поскольку эффективность нейтрализации ПИ в этой области энергий быстро падает с увеличением энергии, а для ОИ она остаётся на уровне около 60%. В пользу схемы с ОИ работает также тот факт, что средняя угловая расходимость пучка с ОИ примерно в два раза меньше, чем в источниках ПИ. С другой стороны, эмиссионная плотность тока ионов в источниках ПИ практически на порядок превышает плотность тока в источниках ОИ, инжекторы с ПИ более компактны и технология их отработана на многих установках. В данной работе проведен анализ схем инжекторов для ТИН-СТ и выбран вариант с использованием источников ПИ с энергиями ионов дейтерия до 140 кэВ. Конкретные значения энергий будут определяться режимами работы и параметрами плазмы токамака.

Рассмотрен вариант инжекторного модуля с мощностью вводимого в плазму пучка атомов дейтерия до 3.5 МВт. Определены геометрия и параметры ионного источника (ИИ) с током пучка ионов дейтерия до 80 А и геометрия компонентов пучкового тракта от выходного электрода ИИ до входного окна в камеру токамака. Рассчитаны энерговыделения от пучка на компонентах и условия их охлаждения. Определены газовые условия в инжекторе и оценены потери нейтрального пучка вследствие ре-ионизации атомов на фоновом газе.

Работа поддержана Национальным исследовательским центром «Курчатовский институт» (28.09.2020 № 1934а).

Литература

- [1]. Kuteev BV et al, 2011 Steady state operation in compact tokamaks with copper coils Nucl. Fusion 51 073013
- [2]. А.Ю. Днестровский, А.А. Голиков, Б.В. Кутеев и др. Исследование стационарного режима работы нейтронного источника на основе токамака. ВАНТ, Сер. Термоядерный Синтез 2010, вып. 4

ФИЛЬТРОВЫЙ СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

^{1,2}Горяинов В.Ю., ¹Воронин А.В., ¹Забродский В.В., ¹Курский Г.С.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: vgoryainov@mail.ioffe.ru

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ISPAF.2021.48.1.027

Аппаратура для регистрации температуры является одной из самых востребованных при изучении поведения лабораторной плазмы. В настоящей работе представлено техническое решение фильтрового спектрометра, позволяющего определять температуру электронной компоненты плазмы по ее излучению в рентгеновской области.

На сферическом токамаке Глобус-М2 для измерения электронной компоненты плазмы применяли две взаимно друг друга дополняющие диагностики – томсоновское рассеяние луча лазера во время его взаимодействия с плазмой и фильтровая спектрометрия мягкого рентгеновского излучения. С помощью лазера проводилась дискретная во времени регистрация температуры в 10 пространственных областях плазменного шнура от 5 до 20 раз в течение разряда токамака. Высокая стоимость и ограниченный срок работы лазера не позволяли постоянно использовать эту диагностику. Фильтровая спектрометрия обеспечивала непрерывное измерение температуры в течение всего импульса тока и могла применяться в качестве мониторинга в течение всей экспериментальной кампании.

Спектрометр состоял из четырех фотодетекторов, бериллиевых фильтров, коллиматоров и стабилизированного источника питания. Все элементы прибора были смонтированы на стандартном фланце ДУ80 на стороне, обращенной в вакуумную камеру токамака. Фотодетекторы были изготовлены по технологии SPD-8UVN и оснащены интегрированными усилителями [1]. Главная особенность фотодетекторов состояла в их высокой чувствительности и временном разрешении $\sim 1 \mu\text{s}$, позволяющем регистрировать быстрые процессы в плазме токамака. Бериллиевые фильтры были изготовлены в ИММиТ при СПбПУ Петра Великого и обладали повышенными значениями прочности и однородности [2, 3]. Толщины фольг, установленных на четырех фотодетекторах, составляли 15, 27, 50 и 80 мкм. Спектральные характеристики фильтров формировали с помощью базы данных [4]. Разработан алгоритм вычисления зависимости температуры от времени по измеренным сигналам рентгеновского излучения. Полученные результаты сравнивались с результатами диагностики томсоновского рассеяния, также установленной на токамаке. Измеренные температуры согласуются с температурами, полученными различными методами.

Разработка фильтрового спектрометра была поддержана в рамках госконтракта ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Эксперименты проведены на УНУ «Сферический токамак Глобус-М», входящей в состав ФЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях» (уникальный идентификатор проекта RFMEFI62119X0021).

Литература

- [1]. <http://technoexan.ru/en/products/sildet.php>
- [2]. Mishin V.V., Shishov I.A., Minchena A. 2018 *Materials Physics and Mechanics*, 38 (1), pp. 40-47. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0>
- [3]. Mishin V.V., Shishov I.A., Stolyarov O.N., Kasatkin I.A., Glukhov P.A. 2020 *Materialia*, 11, 100726
- [4]. www.physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html

УСТАНОВКА КОТ. БЛИЖАЙШИЕ ПЛАНЫ

¹Ахметов Т.Д., ¹Багрянский П.А., ^{1,3}Зубарев П.В., ¹Иваненко С.В., ^{1,2}Иванов А.А.,
¹Квашнин А.Н., ¹Коробейникова О.А., ^{1,2}Лизунов А.А., ¹Моисеев Д.В.,
^{1,2}Мурахтин С.В., ¹Пурьга Е.А., ^{1,2}Солдаткина Е.И., ¹Черноштанов И.С.

¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.028

На установке КОТ (Компактный Осесимметричный Тороид) в ИЯФ СО РАН готовятся эксперименты, в которых будет изучено удержание плазмы с большим относительным давлением β в осесимметричном пробкотроне малого объема. Горячая плазма в ловушке будет создаваться в результате мощной атомарной инъекции в струю стартовой плазмы от газоразрядного источника, расположенного за магнитной пробкой. Захваченные быстрые ионы сформируют компактную тороидальную конфигурацию с большим азимутальным током. Планируется реализовать диамагнитное удержание плазмы и обращение ведущего магнитного поля этим током ионов в плазме. Успех эксперимента зависит от параметров стартовой плазмы в пробкотроне. Ожидается получение в центральной ячейке установки МГД-устойчивой плазмы плотностью 10^{13} см^{-3} , энергией ионов до 200 эВ и температурой электронов около 50 эВ.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТА И НАКОПЛЕНИЯ ВОДОРОДА В МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МЕМБРАНАХ В УСЛОВИЯХ ПОВРЕЖДАЮЩЕГО НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Суслин С.В., Демидов Д.Н., Ананьев С.С.

НИЦ “Курчатовский институт”, г. Москва, Россия, e-mail: Suslin_SV@nrcki.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.029

В докладе описано дальнейшее развитие расчетного кода [1] для моделирования влияния радиационной повреждаемости металлов (а именно образования радиационных вакансий) на кинетические характеристики водорода — эффективный коэффициент диффузии, поток через стенку вакуумной камеры и его накопление в материале для термоядерных и гибридных (синтез-деление) реакторов на основе токамака [напр. 2]. Модель была дополнена для учета изотопного эффекта, учета наличия дислокаций и границ зерен в металлической мембране, а также учета границ между материалами в случае многослойных металлических мембран. Был проведен расчет проникающего потока водорода (для различных изотопов) и его накопления в конструкционных и обращенных к плазме материалах в условиях, характерных для термоядерных и гибридных (синтез-деление) реакторов на основе токамака. На текущем этапе были использованы приближения для моделирования материалов и их комбинаций: хром-циркониевая бронза моделировалась чистой медью, стали моделировались ОЦК-фазой железа. Также моделировался вольфрам, который является кандидатным материалом для обращенных к плазме элементов.

В работе показано, что различные изотопы водорода одинаково удерживаются ловушками в металле в случае гармонического приближения для определения коэффициентов диффузии изотопов. В Fe в температурной области $T < 600$ К наблюдается резкое повышение концентрации удерживаемого в ловушках водорода, а при $T < 350$ К она превышает концентрацию свободного водорода. Данная особенность объясняется накоплением вакансий под действием повреждающего нейтронного облучения при низких температурах, а также снижением возможности водорода покинуть ловушку вследствие низкой температуры. В области $T > 1100$ К в W концентрация удерживаемого водорода на 6 – 7 порядков меньше концентрации свободного водорода, что объясняется высокой энергией образования вакансии в W, по сравнению с Fe и Cu, а также активным процессом диссоциации комплексов типа «вакансия-атом водорода». В промежуточной области температур $T \in [1000\text{К}, 1100\text{К}]$ в Cu наблюдается заметное повышение концентрации удерживаемого водорода по сравнению с W. В этом слое до 1% водорода находится в связанном с вакансиями состоянии. Такое повышение концентрации удерживаемого водорода происходит вследствие низкой энергии образования вакансии в меди (что создаёт большое количество ловушек для водорода при наличии повреждающего нейтронного облучения), а также относительно высокой энергии связи комплексов «вакансия-атом водорода».

Были получены оценки характерных проникающих потоков водорода через различные внутрикамерные элементы установки и оценено накопление изотопов водорода в них для условий установки ДЕМО-ТИН [2]. Работа частично поддержана Российским научным фондом (№ 18-72-10162).

Литература

- [1]. Ананьев С.С., Демидов Д.Н., Суслин С.В. «Транспорт водорода и его накопление в вакансиях в процессе повреждающего нейтронного облучения в ОЦК-металлах Fe и W» // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2020, Т. 43, вып. 2, С. 13-24 DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-2-13-24
- [2]. B.V. Kuteev, E.A. Azizov, P.N. Alexeev, V.V. Ignatiev, S.A. Subbotin and V.F. Tsibulskiy «Development of DEMO-FNS tokamak for fusion and hybrid technologies» // Nucl. Fusion 55 (2015) 073035 (8pp) doi:10.1088/0029-5515/55/7/073035

РЕКОНСТРУКЦИЯ ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЙНИЯ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

¹Жильцов Н.С., ¹Александров С.Е., ¹Баженов А.Н., ¹Варфоломеев В.И., ¹Гусев В.К.,
¹Киселёв Е.О., ¹Коваль А.Н., ¹Курские Г.С., ¹Лукоянова А.В., ¹Минаев В.Б.,
¹Мухин Е.Е., ¹Новохацкий А.Н., ¹Патров М.И., ¹Петров Ю.В., ¹Сахаров Н.В.,
¹Сениченков В.А., ^{1,2}Соловей В.А., ¹Ткаченко Е.Е., ¹Толстяков С.Ю., ²Чернаков П.В.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: nisovru@gmail.com

²АО СпектралТех, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.030

Диагностика томсоновского рассеяния (ТР) – один из важнейших инструментов изучения высокотемпературной плазмы, предоставляющий хорошо локализованные значения температуры и концентрации электронов. На динамику пространственного распределения кинетических параметров плазмы опираются при исследовании нагрева и удержания плазмы в магнитной ловушке, а также используют данную информацию в качестве сигнала обратной связи для управления разрядом.

Для токамака Глобус-М2 разработана и создана новая система экваториальной диагностики ТР. В основе метода ТР лежит зондирование плазмы лазерным импульсом, соответственно, от параметров источника излучения во многом зависят возможности диагностики. В новой системе используется Nd:YAG лазер с длиной волны 1064 нм. Частота следования импульсов составляет 330 Гц при энергии каждого импульса ≤ 3 Дж и длительности 10 нс.

Рассеянное излучение собирается телецентрическим объективом, при этом наблюдаемые углы рассеяния лежат в пределах от 118° в центральной части токамака до 137° на периферии. Изображение области наблюдения проецируется на торцы оптоволоконных сборок. Конструкция объектива предусматривает установку до 18 независимых сборок, каждая из которых может заключать в себе несколько оптоволоконных жгутов. Размеры области наблюдения поперёк силовых линий составляют 11 мм для центральной части токамака и 21 мм (10,5 мм для двух жгутовой сборки) для пристеночной. Область обзора объектива одновременно покрывает пространство по нормализованному малому радиусу (r/a) от 0,45 со стороны сильного поля до 0,9 со стороны слабого.

Каждый оптоволоконный жгут передаёт излучение на один из полихроматоров. На данный момент диагностика укомплектована 10-ю 6-ти канальными фильтровыми полихроматорами. Детекторами служат лавинные фотодиоды, усиленные выходные сигналы которых регистрируются внешним 12 бит 3,2 Гвыб./с оцифровщиком на основе массива переключаемых конденсаторов (CAEN V1743 на базе микросхем SAMLONG).

В докладе приводится описание нового диагностического комплекса томсоновского рассеяния на токамаке Глобус-М2. Анализируется чувствительность, точность измерения и диапазон рабочих параметров диагностического комплекса по результатам первых измерений динамики пространственных распределений температуры и концентрации электронов на токамаке Глобус-М2.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект No 17-72-20076).

ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОНОВ В ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2 ПО ДАННЫМ ДИАГНОСТИК ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ И МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.

Ткаченко Е.Е., Курские Г.С., Жильцов Н.С., Воронин А.В., Горяинов В.Ю., Мухин Е.Е., Толстяков С.Ю., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., Минаев В.Б., Новохацкий А.Н., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Киселёв Е.О., Чернаков Ал.П.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: erina.tkachenko@yandex.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.031

Важной частью исследования высокотемпературной плазмы является определение температуры электронов (T_e) в экспериментах на токамаке. Для этой цели в сферических токамаках можно использовать как диагностику Томсоновского рассеяния, так и диагностику интенсивности мягкого рентгеновского излучения. Первая диагностика дает точные локальные измерения температуры и плотности электронов, но ее временное разрешение ограничено частотой следования зондирующих импульсов лазера и их количеством. Таким образом, с ее помощью нельзя исследовать быстрые, зависящие от времени процессы. С другой стороны, диагностика мягкого рентгена обладает высоким временным разрешением, поэтому с ее помощью можно получить эволюцию T_e во время всего эксперимента.

Однако есть сложности в определении T_e с помощью обработки данных об интенсивности мягкого рентгеновского излучения. Регистрируемый из плазмы сигнал включает в себя непрерывное тормозное, рекомбинационное излучение и линейчатое излучение примесей. Только первые два несут информацию о T_e , поэтому, когда в сигналы попадает линейчатое излучение, по ним становится затруднительно определять температуру. С помощью металлических фильтров и естественного ограничения спектральной чувствительности детектора отсекают область спектра, в которой преобладает линейчатое излучение примесей, однако часть линейчатого излучения все же попадает в область детектирования. Исследования показывают, что влиянием излучения примесей нельзя пренебречь [1]. Это значительно усложняет задачу оценки температуры, заставляя учитывать процессы перемещения примесей в плазме.

Чтобы избежать сложного моделирования, можно использовать методы машинного обучения (МО) для обработки сигналов мягкого рентгена. В таком случае локальные результаты диагностики Томсоновского рассеяния можно использовать в качестве меток для МО с учителем, поэтому применимы данные с каким угодно временным разрешением. Кроме того, такой способ обработки дает возможность использовать данные других диагностик, предоставляющих информацию о примесях или источниках нагрева плазмы. Таким образом, с помощью уже обученного алгоритма МО можно получить с хорошей точностью временной ход температуры электронов в эксперименте на токамаке.

В данной работе приводится результат применения машинного обучения для оценки электронной температуры с помощью совместного действия двух диагностик. Показано, что использование МО позволяет существенно улучшить точность определения T_e по сравнению с традиционным методом обработки интенсивности мягкого рентгеновского излучения в различных спектральных диапазонах [2] без учета влияния примесей на токамаке Глобус-М2.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект No 17-72-20076).

Литература

- [1]. S. von Goeler et al., 1995 Nucl. Fusion 15 301
- [2]. Delgado-Aparicio L F et al., 2007 J. Appl. Phys. 102 073304

ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ОТ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В ОТКРЫТОЙ ВИНТОВОЙ ЛОВУШКЕ СМОЛА

¹Инжеваткина А.А., ¹Судников А.В., ¹Бурдаков А.В., ¹Иванов И.А., ¹Поступаев В.В.,
²Устюжанин В.О., ²Ломов К.А.

¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, e-mail: anna.inzhevatkina@gmail.com

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.032

Для подавления потока плазмы из открытых ловушек была предложена концепция удержания вращающейся плазмы в винтовом магнитном поле [1], для демонстрации которой в ИЯФ СО РАН была построена установка СМОЛА [2]. Последние результаты [3] показывают соответствие теоретических предположение и полученных экспериментальных зависимостей.

В концепции винтового удержания одним из основополагающих моментов является нахождение рычагов управления скоростью вращения плазмы в открытой ловушке с винтовыми секциями. Работающая в штатном режиме оптическая диагностика на основе спектрометра с высоким пространственным разрешением [4] позволяет регистрировать скорость плазмы при каждом изменении параметров системы. На данный момент скорость вращения плазмы регистрируется как во входном, так и в выходном расширителях установки СМОЛА спектрометрами с высоким пространственным разрешением на основе МДР-12 и МДР-23 соответственно. Спектральные приборы установлены с противоположных сторон относительно плазменного шнура. При таком расположении полученные радиальные профили скорости плазмы доказывают правильность работы такой спектрометрической системы, так как спектрометрами наблюдается красное и синее смещение спектральной линии.

Изменение конструкции плазменной пушки и нахождение режима работы установки с наименьшими колебаниями плазменного тока привело к увеличению скорости вращения плазмы втрое. Были проведены эксперименты, направленные на получение зависимостей скорости плазмы от напряжения между анодом и катодом плазменной пушки, магнитной конфигурацией, а также от плотности плазмы и электронной температуры. Наблюдается, что на входе скорость вращения практически неизменна $\sim 1.2 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$. Предполагается, что данная скорость может быть ограничена какой-либо неустойчивостью, частота которой совпадает с полученной нами. На выходе же наблюдаются более четкие зависимости скорости вращения $\sim 0.8 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$ от параметров плазмы.

Помимо этого, в докладе будет представлен прототип зонда Маха, адаптированного под параметры нашей системы, который установлен в винтовой секции установки СМОЛА для регистрации продольной скорости движения плазмы.

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект 18-72-10080).

Литература

- [1]. A.D. Beklemishev. Helicoidal System for Axial Plasma Pumping in Linear Traps // Fusion Science and Technology, V. 63, N.1T, May 2013. P. 355
- [2]. A.V. Sudnikov et al. Preliminary experimental scaling of the helical mirror confinement effectiveness // Journal of Plasma Physics, 86(5), 905860515.
doi:10.1017/S0022377820001245
- [3]. A.V. Sudnikov et al. SMOLA device for helical mirror concept exploration // Fusion Engineering and Design 122C (2017) pp. 86-93, doi: 10.1016/j.fusengdes.2017.09.005
- [4]. A.A. Inzhevatkina et al. Doppler spectroscopy system for the plasma velocity measurement in SMOLA Helical Mirror // Plasma and Fusion Research, 14(Specialissue1) (2019).
doi: 10.1585/pfr.14.2402020

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАЗМЫ В ОТКРЫТОЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ С ГЕЛИКОИДАЛЬНЫМ ПОЛЕМ СМОЛА

^{1,2}Устюжанин В.О., ²Иванов И.А., ²Судников А.В., ²Инжеваткина А.А., ¹Ломов К.А.

¹Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск,
e-mail: vikust9623@gmail.com

²ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

DOI: 10.34854/ISPAF.2021.48.1.033

Ключевой проблемой удержания плазмы в линейных открытых системах является низкое энергетическое время жизни плазмы, вызванное продольными потерями частиц и энергии. Для решения данной проблемы была предложена концепция винтового удержания плазмы, основанная на многопробочном удержании с движущимися магнитными пробками в системе отсчета плазмы [1, 2]. Концепция теоретически предсказывает экспоненциальную зависимость эффективности подавления потерь от длины участка с винтовым полем [1]. Для проверки данной концепции в ИЯФ СО РАН была создана установка СМОЛА (Спиральная магнитная открытая ловушка), состоящая из входного расширителя с источником плазмы, транспортной секции с прямым и винтовым соленоидами для удержания или ускорения плазменного потока в зависимости от направления вращения плазмы, и выходного расширителя с радиально сегментированным плазмopриёмником [2]. В экспериментах на данной установке была показана принципиальная работоспособность указанного метода удержания [3].

Важным вопросом, решение которого определяет экспериментальное подтверждение работоспособности идеи винтового удержания, является выбор оптимального устойчивого режима формирования плазмы в установке. Генерация плазменного потока в установке СМОЛА осуществляется с помощью аксиально - симметричного источника плазмы, с термоэмиссионным катодом из LaV₆ и полым медным анодом. В связи с поставленным вопросом, необходимо исследовать зависимости параметров формируемой плазмы (ток плазменного разряда, плотность плазмы, её температура и электрический потенциал, а также газовый баланс в плазме) от внешних экспериментальных условий (напряжение анод – катод, количество подаваемого газа и величина катодной магнитной изоляции).

Для исследования стабильного режима формирования плазмы в установке СМОЛА была проведена серия экспериментов. Использующийся в экспериментах диагностический комплекс включает в себя зондовые и оптические диагностики. С помощью системы зондов (ленгмюровские зонды, зонд Маха, магнитные зонды) измеряются такие параметры как плотность, температура и электрический потенциал плазмы. Оптическая диагностика (спектрометр с высоким пространственным разрешением) даёт информацию о вращении плазмы.

В докладе представлены зависимости потока плазмы, её плотности, электрического потенциала, тока разряда и других параметров разрядной системы от начальных экспериментальных значений плазменного источника.

Литература

- [1]. A.D. Beklemishev. Helicoidal System for Axial Plasma Pumping in Linear Traps // Fusion Science and Technology, V.63, N.1T, May 2013. P. 355
- [2]. A.V. Sudnikov et al. SMOLA device for helical mirror concept exploration // Fusion Engineering and Design 122C (2017) pp. 86-93, DOI: 10.1016/j.fusengdes.2017.09.005.
- [3]. A.V. Sudnikov, et al., Preliminary experimental scaling of the helical mirror confinement effectiveness, J. Plasma Phys. **86**, (2020), doi: 10.1017/S0022377820001245

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА ИЗ ПЛАЗМЫ СФЕРИЧЕСКОГО ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2 В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С НЕЙТРАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИЕЙ

Скрекель О.М., Бахарев Н.Н., Гусев В.К., Жильцов Н.С., Ильясова М.В., Киселев Е.О., Корнев В.А., Курские Г.С., Мельник А.Д., Минаев В.Б., Мирошников И.В., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Тельнова А.Ю., Толстяков С.Ю., Тюхменева Е.А., Хилькевич Е.М., Чернышев Ф.В., Чугунов И.Н., Шевелев А.Е., Щёголев П.Б.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: fosa97@gmail.com

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.034

Реконструкция компактного сферического токамака Глобус-М2 [1], произведённая в 2018 году, включает в себя модернизацию электромагнитной системы (увеличение тока плазмы до 0.5 МА, тороидального магнитного поля до 1 Тл). Она позволила существенно повысить параметры плазмы и улучшить удержание быстрых частиц, возникающих при ионизации высокоэнергетических атомов, инжектированных пучком. Быстрые ионы взаимодействуют с ионами основной плазмы и друг с другом, что приводит к рождению нейтронов за счет реакции ядерного синтеза. Следствием улучшенного удержания стал рост полного нейтронного потока [2].

В настоящее время измерения нейтронных потоков на установке Глобус-М2 проводятся при помощи двух коронных счетчиков с полиэтиленовым замедлителем и нейтронного спектрометра. В качестве источника быстрых частиц выступает инжектор высокоэнергетических атомов водорода или дейтерия мощностью до 1 МВт с энергией частиц от 18 до 30 кэВ. Также готовится к запуску второй инжектор, обеспечивающий инжекцию водорода или дейтерия с энергией 20 – 50 кэВ мощностью до 1 МВт. Моделирование поведения быстрых ионов проводится при помощи кода NUBEAM [3], который использует реконструкцию магнитной конфигурации плазмы, выполненную при помощи кода EFIT [4], а также сведения об основных параметрах плазмы: значение ионной температуры, измеряемое при помощи анализатора атомов перезарядки или активной спектроскопической диагностики; пространственное распределение концентрации электронов, измеряемое при помощи диагностики томсоновского рассеяния; эффективный заряд плазмы, полученный на основании измерений тормозного излучения. Результатом работы кода NUBEAM является функция распределения быстрых частиц – один из ключевых входных параметров реализованного алгоритма, который вычисляет пространственную функцию источника нейтронов. После её вычисления проводится моделирование генерации нейтронной эмиссии методом Монте-Карло с целью определения потока нейтронов на детектор с учетом реальной геометрии эксперимента. Результаты моделирования сравниваются с данными, полученными в эксперименте. Также в работе рассматривается влияние тороидальных альфеновских мод на нейтронный выход токамака Глобус-М2.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-12-01177-П). В работе использованы экспериментальные данные, полученные на УНУ «Сферический токамак Глобус-М», входящей в состав федерального центра коллективного пользования «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях» (уникальный идентификатор RFMEFI62119X0021).

Литература

- [1]. Gusev V.K. et al. Nucl. Fusion 53 (2013) 093013
- [2]. Бахарев Н.Н. и др. ФИЗИКА ПЛАЗМЫ. 2020. Т. 46. В. 7. С. 1–10
- [3]. Pankin A., et al. 2004 Comput. Phys. Commun. 159 157
- [4]. Lao L.L. et al. Nucl. Fusion 25 (1985) 1611

ЭМИССИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА УСТАНОВКЕ ГДЛ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ НАГРЕВОМ

Пинженин Е.И.

ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, e-mail: e.i.pinzhenin@inp.nsk.su

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.035

На установке Газодинамическая ловушка (ГДЛ) проводятся эксперименты по дополнительному нагреву плазмы с помощью инъекции СВЧ излучения. В докладе представлены данные по регистрации рентгеновского излучения в этих экспериментах.

В качестве регистраторов использовались детекторы на основе сцинтилляторов и ФЭУ. Детекторы расположены за пределами вакуумной камеры ГДЛ и чувствительны к быстрым нейтронам и рентгеновским (гамма) квантам. Детекторы работают в потоковом режиме и регистрируют временную эволюцию интенсивности эмиссии рентгеновского излучения. Дополнительно в работе используется спектрометр нейтронов и гамма квантов на основе стильбена. Такой детектор позволяет оценить энергию рентгеновского излучения.

Получено, что в экспериментах с дополнительным СВЧ нагревом на ГДЛ (в некоторых режимах) формируется популяция перегретых электронов с энергией от 100 кэВ до 500 кэВ. При взаимодействии таких электронов с лимитерами и плазмоприемниками возникают мощные вспышки рентгеновского излучения, временная эволюция которых изучалась в рамках представленной работы.

На установке ГДЛ была проведена серия экспериментов по созданию мишенной плазмы с помощью инъекции электронного пучка с энергией 25 кэВ в газ. В результате формируется плазма с концентрацией $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и температурой 20 эВ, достаточной для захвата мощных атомарных пучков. В таких экспериментах так же формируется популяция перегретых электронов с энергией более 100 кэВ. Такие электроны попадают на поверхности лимитеров и плазмоприемников и генерируют вспышки рентгеновского излучения. С помощью спектрометра на основе стильбенового сцинтиллятора была измерена временная эволюция спектра такого излучения.

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ЭМИССИОННОГО ОТВЕРСТИЯ И СТРУКТУРЫ УСКОРЯЮЩЕЙ ЯЧЕЙКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ МОЩНОГО АТОМАРНОГО ПУЧКА ДЛЯ НАГРЕВА И СТАБИЛИЗАЦИИ ПЛАЗМЫ

Бруль А.В., Амиров В.Х., Дейчули П.П., Давыденко В.И., Иванов А.А.,
Капитонов В.А., Сорокин А.В., Ступишин Н.В.

ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, e-mail: brul999@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.036

Инжекторы мощных пучков быстрых атомов водорода широко применяется для нагрева и стабилизации плазмы в установках с магнитным удержанием [1], в обзоре [2] приведен многолетний опыт ИЯФ СО РАН в создании мощных атомарных инжекторов на основе положительных и отрицательных ионов. Данный доклад посвящён исследованию влиянию геометрии эмиссионного отверстия и структуры ускоряющей ячейки на формирования мощного атомарного пучка в многоапертурных ионно-оптических системах (ИОС). Дизайн ИОС обуславливается многими факторами, такими как параметры пучка, применяемый тип источника плазмы и доступными технологиями изготовления. Геометрия первого (“плазменный”) электрода оказывает наибольшее влияние на угловые характеристики пучка [3]. Были проведены оптимизация и модернизация геометрий плазменных электродов в элементарной ускоряющей ячейке для различных ИОС, чтобы усовершенствовать характеристики пучков и упрощения изготовления электродов. Геометрии ускоряющей ячейки анализировались с помощью численных моделирований и были испытаны в экспериментах. Результаты этих исследований успешно реализованы в разработках мощных атомарных инжекторов последних лет (например, [4]).

Литература

- [1]. H. Gota, M.W. Binderbauer, T. Tajima, S. Putvinski et.al. Achievement of field-reversed configuration plasma sustainment via 10 MW neutral-beam injection on the C-2U device. Nucl. Fusion 57 (2017) 116021
- [2]. Ю.И. Бельченко, В.И. Давыденко, П.П. Дейчули, И.С. Емелев, А.А. Иванов, В.В. Колмогоров, С.Г. Константинов, А.А. Краснов, С.С. Попов, А.Л. Санин, А.В. Сорокин, Н.В. Ступишин, И.В. Шиховцев, А.В. Колмогоров, М.Г. Атлуханов, Г.Ф. Абдрашитов, А.Н. Драничников, В.А. Капитонов, А.А. Кондаков. Исследование по физике и технике ионных и атомарных пучков в ИЯФ СО РАН. УФН, т.188, №6, с.595-650, 2018
- [3]. A. V. Sorokin, T. D. Akhmetov, A. V. Brul, V. I. Davydenko, A. A. Ivanov, A. N. Karpushov, V. V. Mishagin, and I. V. Shikhovtsev Update of ion-optical system of neutral beam of Tokamak à Configuration Variable, Review of Scientific Instruments 91, 013323 (2020)
- [4]. P. Deichuli, V. Davydenko, A. Ivanov, S. Korepanov, V. Mishagin, A. Smirnov, A. Sorokin, and N. Stupishin Low energy, high power hydrogen neutral beam for plasma heating, Review of Scientific Instruments 86, 113509 (2015)

СИСТЕМА ИНЖЕКЦИИ ДЛЯ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА T15-МД

Баркалов К.Е., Анашкин И.О., Баркалов Е.Е., Грибов А.А., Королёв В.Ф.,
Никулин В.А., Панасенков А.А., Петров В.С.

НИИ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: Barkalov_KE@nrcki.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.037

В докладе представлена система инжекционного нагрева (СИН) плазмы создаваемого токамака T15-МД, предназначенная для ввода пучков атомов водорода с энергией до 75 кэВ при максимальной суммарной мощности не менее 6 МВт. На первом этапе длительность импульса должна быть до 30 с, на втором предполагается удлинение импульса до 400 с (стационарный режим). СИН включает в себя три инжектора нейтральных атомов, каждый из которых оснащён двумя источниками ионов, компонентами внутри вакуумной камеры, такими как газовый нейтрализатор, отклоняющий остаточные ионы магнит, приёмник ионов, раздвижной приёмник атомов для диагностики пучка, крио-конденсационный насос, а так же соединяющим инжектор с камерой токамака атомопроводом с внутренним охлаждаемым лайнером. Работа инжектора обеспечивается системами низковольтного и высоковольтного электропитания с защитой ионных источников от пробоев, электропитания вспомогательного оборудования, системой напуска рабочего газа, устройствами водяного охлаждения ионных источников и компонентов тракта пучка, системой управления. С учётом перехода в практически стационарный режим все компоненты тракта, системы и устройства модернизируются для обеспечения новых требований. Ионный источник (ИИ) СТИС-1С [1] состоит из медной газоразрядной камеры (ГРК), обеспечивающей равномерную плотность тока ионов водорода на эмиссионной поверхности площадью $12 \times 35 \text{ см}^2$ на уровне $0,3 \text{ А/см}^2$ [2], и изоляторного узла с многоцелевой трёхэлектродной охлаждаемой ионно-оптической системой, который необходимо модернизировать для работы с напряжением до 75 кВ при ионном токе до 50 А. Рассмотрена экранировка участка тракта ионного пучка от ГРК до выхода из нейтрализатора от рассеянных магнитных полей токамака, которые могут достигать значения 150 Гс. Эффективность нейтрализации ионного пучка из ИИ, содержащего помимо протонов молекулярные ионы, составляет порядка 50%, следовательно, после нейтрализации и диссоциации молекулярных ионов в пучке имеются компоненты атомов и остаточных ионов с энергиями E , $E/2$ и $E/3$. Рассмотрены требования к стабилизации высоковольтных напряжений на двух источниках инжектора и величины отклоняющего ионы магнитного поля для обеспечения полного перехвата на приёмнике всех компонентов ионов. Проведены расчёты эффективности транспортировки пучка до входа в камеру токамака и нагрузок на компоненты тракта как от основного пучка, так и от ионов, образующихся по тракту при ре-ионизации атомов на фоновом газе, и от атомов, получающихся при перезарядке остаточных ионов при их движении в отклоняющем магните. Наиболее нагруженными являются V-образные приёмники атомов и остаточных ионов, которые должны принимать пучки мощностью до 2,5 МВт в стационарном режиме при максимальной плотности мощности до 15 МВт/м^2 на панели. Рассмотрены условия охлаждения всех компонентов.

Литература

- [1]. А.Г. Барсуков, А.И. Крылов, А.Ю. Маркелов, А.А. Панасенков, В.А. Смирнов, Г.Н. Тилинин. «Разработка и экспериментальное исследование квазистационарного ионного источника СТИС-1», XL Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, 2013 г, сборник тезисов.
- [2] Баркалов К.Е., Баркалов Е.Е., Панасенков А.А. «Измерение параметров плазмы в ГРК СТИС-1С», XLVI Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, 2019г., сборник тезисов докладов, с. 193

ИСТОЧНИК ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ИНЖЕКЦИИ ПЛАЗМЫ В ГДЛ.

^{1,2}Асмедьянов Н.Р., ¹Колесников Е.Ю.

¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.038

Для эффективной работы осесимметричных открытых ловушек с популяцией горячих ионов (с энергией ~ 10 кэВ), таких как Газодинамическая ловушка (ГДЛ) и планируемая на ее основе ГДМЛ, требуется поддержание популяции относительно холодной мишенной плазмы (с энергией \sim несколько сотен эВ). Без мишенной плазмы в ГДЛ происходит развитие кинетических неустойчивостей [1], а также невозможно поддерживать электрический контакт с электродами системы подавления МГД неустойчивостей необходимый для работы этой системы [2]. Так как удержание мишенной плазмы происходит в сильностолкновительном режиме, то конус потерь в фазовом пространстве для мишенной плазмы всегда заполнен и мишенная плазма покидает ловушку за время порядка газодинамического. Таким образом, без достаточной подпитки популяции мишенной плазмы веществом в открытых ловушках невозможно стационарное удержание плазмы с термоядерными параметрами.

В данной работе рассмотрен источник плазменной струи для поперечной инжекции плазмы в открытую ловушку. Для проникновения плазмы в ловушку при инжекции перпендикулярно силовыми линиям магнитного поля давление струи плазмы должно быть порядка давления магнитного поля ловушки. Это накладывает требования на минимальную удельную энергию плазменной струи.

Струя плазмы создается и ускоряется с помощью пушки Маршалла. Такой метод хорошо зарекомендовал себя на токамаках [3], а также был опробован на открытых ловушках [4].

В ходе разработки источника он был несколько раз модифицирован. В данной работе представлены результаты измерения параметров плазменной струи из источника со следующими изменениями относительно предыдущей версии:

- 1) Радиальная инжекция газа, что позволило ускорить темп напуска газа
- 2) Керамический изолятор находится дальше от места напуска газа и закрыт от плазмы внешним электродом.

Литература

- [1]. I. A. Kotelnikov, I. S Chernoshtanov, V. V. Prikhodko. Electrostatic instabilities in a mirror trap revisited. *Physics of Plasmas* v. 24, p. 122512 (2017). DOI: 10.1063/1.5013059
- [2]. A. D. Beklemishev, P. A. Bagryansky, M. S. Chaschin & E. I. Soldatkina, (2010) Vortex Confinement of Plasmas in Symmetric Mirror Traps, *Fusion Science and Technology*, 57:4, 351-360, DOI: 10.13182/FST10-A9497
- [3]. Abramova K B, Voronin A V, Gusev V K et al. (2005) Injection of high-density plasma into the Globus-M spherical tokamak. *Plasma Phys Reports* 31:721–729
- [4]. T. Asai et al 2017 *Nucl. Fusion* 57 076018

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ СКРЕЙП-СЛОЯ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2 С ПОМОЩЬЮ ИК-КАМЕРЫ

Токарев В.А., Гусев В.К., Хромов Н.А., Воронин А.В., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Новохацкий А.Н., Минаев В.Б., Варфоломеев В.И., Балаченков И.М., Тельнова А.Ю., Щеголев П.Б., Бахарев Н.Н., Курский Г.С., Киселев Е.О., Патров М.И., Тюхменева Е.А., Толстяков С.Ю.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: Valentin.Tokarev@mail.ioffe.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.039

В установках с магнитным удержанием типа токамак процессы, протекающие в скрейп-слое (SOL – Scrape-off Layer) и на границе плазмы играют важную роль для достижения стационарных условий зажигания [1], а также влияют на глобальные свойства удержания. В частности, тепловые потоки на стенку и диверторные пластины являются одним из основных ограничений достижения энергонапряженных режимов работы.

В настоящее время исследование потока тепла идущего на диверторные пластины производится на многих токамаках и основными инструментами таких исследований являются инфракрасные камеры (ик-камеры) [2]. Подобные устройства позволяют измерять эволюцию температуры на поверхности диверторных пластин, что даёт возможность вычислить плотность теплового потока, а также определить такой важный параметр как «ширина» SOL (λ_q), то есть характерное расстояние на котором плотность теплового потока спадает в e раз.

Глобус-М2 представляет собой сферический токамак [3] с открытым дивертором, большим радиусом $R = 0,36$ м, малым радиусом $a = 0,24$ м, током по плазме I_p до 0,5 МА и тороидальным магнитным полем в районе геометрического центра плазмы B_T до 1 Тл.

В работе использовалась ик-камера с детектором 640×512 пикселей, спектральный диапазон 2 – 5 мкм, и частотой кадров до 220 Гц в полнокадровом режиме. Ик-камера располагалась на верхнем куполе вакуумной камеры на расстоянии 1,3 м от нижних диверторных пластин, для обеспечения прохождения излучения в требуемом диапазоне использовалось окно из сапфира.

В работе приведены результаты измерений температуры и оценки теплового потока в области пересечения диверторных пластин внешней ногой сепаратрисы (strike point), а также ширина скрейп-слоя при различном плазменном токе.

Эксперименты проведены на УНУ «Сферический токамак ГлобусМ», входящей в состав ФЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях» (уникальный идентификатор проекта RFMEFI62119X0021).

Литература

- [1]. Stangby P.C. The Plasma Boundary of Magnetic Fusion Devices. – Bristol: Publishing Ltd, 2000. – 703 p. (Plasma Physics Series)
- [2]. Lee H.H. et al Nuc. Mat. and E. 12 (2017) 541-547
- [3]. V.B. Minaev et al J. Phys.: Conf. Ser. 1094 012001

РАСЧЁТ МАГНИТНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ТРЕУГОЛЬНОСТЬЮ ДЛЯ ТОКАМАКА Т-15МД

¹Горбун М.С., ¹Мельников А.В., ²Сычугов Д.Ю.

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

²МГУ им. М.В. Ломоносова, факультет ВМК, г. Москва, Россия, e-mail: ctc@cs.msu.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.040

Большинство современных токамаков, включая создаваемый токамак-реактор ИТЭР, имеют диверторную магнитную конфигурацию и D-образную форму плазменного шнура. Типичные значения вытянутости сечения плазмы $\epsilon = 1.8 - 2.5$ и треугольности $\delta = 0.2 - 0.4$.

В 1997 на токамаке TCV был впервые получен разряд с отрицательной треугольностью, характеризующийся некоторым улучшением удержания [1]. В 2019 году на установках TCV и DIII-D были получены режимы со значительным улучшением удержания плазмы в разрядах с отрицательной треугольностью по сравнению с подобными режимами, имеющими положительную треугольность [2,3]. Известно, что поперечный перенос энергии и частиц в токамаке аномален и связан с турбулентными процессами. Причины и механизмы влияния отрицательной треугольности на турбулентность плазмы, приводящие к улучшению удержания, на данный момент не изучены и являются актуальной проблемой современных исследований в области магнитного удержания плазмы.

В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» ведется подготовка к пуску токамака Т-15МД, базовая однонулевая диверторная конфигурация которого будет иметь малый радиус $a = 0,67$ м; $\epsilon = 1,75$; $\delta = 0,317$ [4]. Расчеты показали, что эта установка обладает достаточной гибкостью, возможностью изменять положение X-точки сепаратрисы, точек пересечения сепаратрисы с дивертором [5] и объем плазмы [6]. Важной частью научной программы

Т-15МД является исследование стационарных и переменных электрических полей (зональных течений и ГАМ) и их влияние на турбулентность и перенос плазмы [7].

Вопрос возможности создания на Т-15МД конфигураций с отрицательной треугольностью при помощи имеющейся системы катушек полоидального поля представляет интерес для научной программы установки и является целью данной работы.

Исследование влияния токов в катушках полоидального поля на форму сечения плазмы в Т-15МД с помощью расчетов стационарных магнитных конфигураций по коду ТОКАМЕQ [8] показало возможность получения конфигураций с различными значениями отрицательной треугольности. Были найдены пары конфигураций, идентичные по основным геометрическим параметрам (объем, малый радиус, вытянутость и др.) и равной по модулю треугольностью, но различающиеся по ее знаку. На основе оценок предельного нагрева полоидальных катушек [9] была оценена возможная длительность разряда для найденных пар конфигураций.

Дальнейшие исследования направлены на анализ устойчивости найденных конфигураций.

Работа поддержана РФФ, проект №19-12-00312, а также РФФИ, проект № 20-07-00391.

Литература

- [1]. Moret J.M. et al. Phys. Rev. Lett. 1997. V. 79 (11), P. 2057–2060
- [2]. Rubio R. et al. Nucl. Fusion 2019, V. 127 (1), P. 69–73
- [3]. Austin M.E. et al. Phys. Rev. Lett. 2019. V. 122 (11), 115001
- [4]. Андреев В.Ф. и др. Вант Сер. Термоядерный Синтез 2014. V. 37 (3), P. 48–55
- [5]. М.С. Горбун и др. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез 2019, Т. 42 (4), С. 45-51
- [6]. М.С. Горбун и др. Прикладная математика и информатика, Т. 64 принято в печать
- [7]. Melnikov A. V. et al. Fusion Eng. Des. 2015. V. 96–97. P. 306–310
- [8]. Сычугов Д.Ю. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез 2008, Т.31 (4), С. 85-89
- [9]. Хвостенко П.П. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез 2020, Т. 43 (3), С. 60-70

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ОПТИЧЕСКИХ ДИАГНОСТИК ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2

¹Тюхменева Е.А., ¹Бахарев Н.Н., ¹Варфоломеев В.И., ¹Гусев В.К., ¹Жильцов Н.С.,
¹Забродский В.В., ¹Киселев Е.О., ¹Курский Г.С., ¹Минаев В.Б., ¹Мирошников И.В.,
¹Петров Ю.В., ¹Сахаров Н.В., ²Соловей В.А., ¹Тельнова А.Ю., ¹Толстяков С.Ю.,
¹Щеголев П.Б.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: tuxmeneva@gmail.com

²Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова, г. Гатчина, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.041

На модернизированной установке Глобус-М2 тороидальное магнитное поле может достигать 1 Т, а ток по плазме - 0.5 МА. Процессы переноса в сферических токамаках в таких условиях ранее не изучались. Для составления картины переноса примесей на токамаке Глобус-М2 создается единый диагностический комплекс, который будет включать в себя модернизированную диагностику радиационных потерь P_{rad} , эффективного заряда плазмы Z_{eff} , новую диагностику температуры электронов T_e , а также спектроскопическую диагностику.

В настоящее время Z_{eff} на установке определяется по интенсивности тормозного излучения вдоль всего одной хорды наблюдения [1]. Модернизация диагностики предполагает расширение набора хорд и спектральных промежутков регистрации тормозного излучения. Существующая диагностика P_{rad} [2] имеет ряд недостатков, сильно ограничивающих изучение неустойчивостей, и нуждается в доработке. На основе двух массивов 3x24 SPD фотодиодов [3] создается комплекс измерения двумерных распределений T_e и P_{rad} . Отличие от старой системы измерения P_{rad} состоит в том, что хорды наблюдения будут лежать в одном полоидальном сечении, что позволит сократить количество каналов системы сбора данных, а также применить более точный и простой метод восстановления. T_e будет определяться по отношению мощностей излучения в области мягкого рентгеновского спектра, проходящего через бериллиевые фильтры разной толщины. Спектроскопическая диагностика, состоящая из обзорного спектрометра и дискретных монохроматоров, регистрирующих отдельные спектральные линии основных примесных элементов в плазме токамака Глобус-М2 (углерод, кислород, гелий, азот, бор, медь, железо), уже частично запущена на установке. Обзорный спектрометр Avantes Avaspec-2048 регистрирует излучение из плазмы в широком диапазоне длин волн 200-1100 нм каждые 20 мс и позволяет определять примесный состав плазмы на разных стадиях разряда. Для всех описанных диагностик будет применяться единый комплекс сбора данных на 176 каналов. Шестнадцатиразрядный АЦП позволит записывать сигналы с частотой до 500 кГц на протяжении всего времени разряда на установке Глобус-М2.

Разработка диагностики P_{rad} и T_e и спектроскопической диагностики выполнено при поддержке РФФИ, проект № 20-32-90183. Эксперименты проведены на УНУ «Сферический токамак Глобус-М», входящей в состав ФЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях» (уникальный идентификатор проекта RFMEFI62119X0021).

Литература

- [1]. E. A. Tuxmeneva et al 2019 Plasma Sci. Technol. 21 105104
- [2]. A. D. Sladkomedova et al 2018 Review of Scientific Instruments 89 083509
- [3]. A.P. Artyomov et al 2015 Instrum Exp Tech 58, 102–106

ДИАГНОСТИКА ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТОКАМАКЕ T-15МД

^{1,2,3}Саврухин П.В., ^{1,2}Шестаков Е.А., ¹Храменков А.В., ³Лисовой П., ³Прохоров И.

¹НИИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: psavrukhin@bk.ru

²ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

³Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия,

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.042

Диагностика жесткого ($E \sim 0.1 - 10$ МэВ) и надтеплого ($E \sim 10 - 150$ кэВ) рентгеновского излучения является одной из основных методик исследования пространственной и временной эволюции пучков ускоренных электронов в токамаке. Измерение спектральных характеристик пучков надтепловых электронов позволяет также оценить эффективность неиндукционного поддержания тока в квазистационарных режимах разряда. Особый интерес представляет собой исследование быстропеременных возмущений излучения на начальной стадии разряда и в момент срыва плазмы.

В докладе приводится обзор диагностик, используемых на токамаке T-15МД для регистрации быстропеременных возмущений надтеплого и жесткого рентгеновского излучения (временное разрешение до $0.1 - 10$ мс). Комплекс состоит из многоканальной системы регистрации надтеплого рентгеновского излучения в потоковом режиме на основе CdTe детекторов Eurograd с трубчатыми коллиматорами, многоканальной системы спектрометрических CdTe детекторов Eurograd с интегрированными усилителями и двухканальных спектрометров на основе сцинтилляционных детекторов из бромида лантана LaBr₃ ($D38.1 \times 38.1$ мм). Локальные распределения интенсивности рентгеновского излучения (с пространственным разрешением до $3 - 5$ см) определяются с использованием методики томографической реконструкции на основе модифицированного метода Кормака [1]. Для восстановления спектральных характеристик излучения используется система численного спектрометрического анализа экспериментальных данных.

Детекторы CdTe располагаются в блоках детектирования, объединенных с системой предварительного усиления и фильтрации сигналов. Блоки детектирования размещаются в защитных цилиндрических экранах с тефлоновой изоляцией. Перед детектором располагается входное окно из бериллиевой фольги толщиной 25 мкм, ограничивающей регистрацию потоков мягкого рентгеновского излучения. Сигнал с детектора обрабатывается с помощью системы усиления сигналов с дистанционным управлением, состоящей из собственно усилителей и блока питания. Оперативное тестирование детекторов обеспечивается модулем генерации импульсов, расположенным в корпусе блока усилителей. Для снижения уровня наводок используется источник бесперебойного питания с блоком управления, обеспечивающим отключение от внешней сети во время импульса токамака

Приводится проект расположения диагностик на установке токамак T-15МД, результаты расчета системы подвижных трубчатых коллиматоров, а также результаты тестирования и калибровки детекторов и программ обработки данных на лабораторном стенде с использованием рентгеновской трубки и калиброванного набора источников излучения.

Работа выполнена при содействии Росатом.

Литература

- [1]. П. В. Саврухин, Е. А. Шестаков, А. В. Храменков; Физика плазмы, Т. 44, № 12, 2018, с. 951

САМОСОГЛАСОВАННЫЕ ПРОФИЛИ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ В РЕЖИМЕ ЭЦР НАГРЕВА ПЛАЗМЫ НА СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М

Мещеряков А.И., Вафин И.Ю., Гришина И.А.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: meshch@fpl.gpi.ru DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.043

В последние годы накоплено много данных, касающихся процессов самоорганизации плазмы, удерживаемой в тороидальных магнитных ловушках [1, 2]. Самоорганизация плазмы означает, что в процессе удержания плазмы радиальные профили плазменных параметров имеют тенденцию релаксировать в направлении от первоначальных профилей, возникающих в результате внешнего воздействия, к каноническим профилям. Каноническими профилями называют самосогласованные профили параметров плазмы, форма которых меняется лишь незначительно при изменении параметров плазмы в достаточно широких пределах. Процессы самоорганизации плазмы наблюдаются как в токамаках, так и в стеллараторах [2].

В данной работе проанализированы профили электронной температуры, построенные по данным многохордовой диагностики мягкого рентгеновского излучения, а также профили давления электронной компоненты плазмы в режиме центрального ЭЦР нагрева на стеллараторе Л-2М. Рабочие разряды отличались плотностью плазмы ($1.5 < n_e < 2.8 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$) и уровнем вводимой в плазму СВЧ мощности ($190 < P_{\text{ECRH}} < 600 \text{ кВт}$). Показано, что в указанном диапазоне плотностей плазмы при изменении мощности нагрева в диапазоне $190 < P_{\text{ECRH}} < 250 \text{ кВт}$ профили электронной температуры являются самосогласованными и имеют одинаковую острую форму, т.е. температура спадает от центра к краю плазмы. При мощности нагрева свыше 250 кВт происходит изменение формы профилей температуры, они становятся плоскими в центральной части плазменного шнура. Причиной этого является изменение формы профилей электронной плотности и последующая смена механизма поглощения СВЧ излучения [3]. За счет эффекта «density pump out» формируются провальные профили электронной плотности, и в плазме возникают области с обратным градиентом плотности. В этих областях происходят процессы распада необыкновенной волны, приводящие в конечном итоге к появлению электронных бернштейновских волн, которые и поглощаются в областях с обратным градиентом плотности. Происходит изменение профиля поглощаемой мощности, а профиль температуры формируется под воздействием этого профиля поглощаемой мощности.

В работе также вычислены профили давления плазмы по данным измеренных профилей электронной температуры и плотности плазмы. Показано, что при небольших мощностях ЭЦР нагрева $190 < P_{\text{ECRH}} < 250 \text{ кВт}$, когда в плазме формируются острые профили температуры и не сильно провальные профили плотности, профиль давления электронной компоненты имеет форму, которая хорошо аппроксимируется каноническим профилем давления, вычисленным для стеллараторов [2]. Таким образом, в этом диапазоне мощностей ЭЦР нагрева профили давления плазмы являются самосогласованными.

Литература

- [1]. K.A. Razumova, V.F. Andreev, L.G. Eliseev, A.Ya. Kislov, R.J. La Haye, S.E. Lysenko, A.V. Melnikov, G.E. Notkin, Yu.D. Pavlov, and M.Yu. Kantor // Nucl. Fusion, 2011, V.51, 083024
- [2]. Ю.Н. Днестровский. Самоорганизация горячей плазмы. – М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2013, 172 с
- [3]. А.И. Мещеряков, И.Ю. Вафин, И.А. Гришина, Профили электронной температуры в условиях центрального ЭЦР нагрева плазмы в стеллараторе Л-2М // Физика плазмы, 2021, V.47, №1, DOI: 10.31857/S0367292120120057

ПОИСК «РЕНТГЕНОВСКОЙ ЯМЫ» В РЕЖИМАХ ОМИЧЕСКОГО И ЭЦР НАГРЕВА ПЛАЗМЫ В СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М

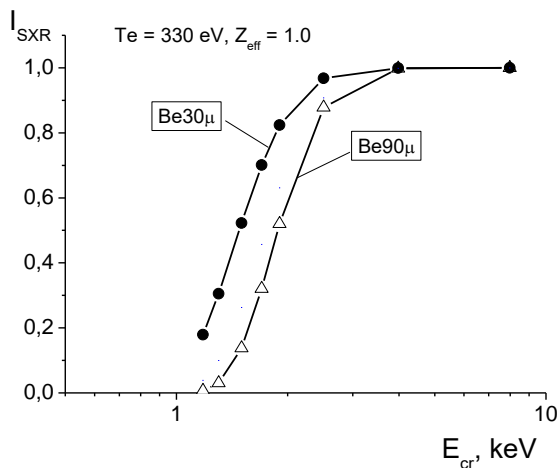
Мещеряков А.И., Гришина И.А., Вафин И.Ю.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: meshch@fpl.gpi.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.044

Явление аномально сильного поглощения интенсивности мягкого рентгеновского (SXR) излучения плазменного шнура в токамаках (Т-4, Т-3М, Т-11М) при его прохождении через бериллиевые фольги толщиной 90 мкм и более, получило название «рентгеновской ямы» [1]. Оно проявляется в условиях сравнительно низкой электронной температуры плазмы, порядка 200 – 400 эВ, и низкой электронной плотности плазмы $n_e \sim 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и ниже. В работе [1] для объяснения этого явления выдвинута гипотеза об «обеднении» максвелловского распределения в пространстве электронных скоростей в области энергий электронов, превышающих тепловую в 3 – 5 раз.

В данной работе предпринята попытка экспериментально обнаружить «рентгеновскую яму», непосредственно измеряя спектр мягкого рентгеновского излучения в режимах омического и ЭЦР нагрева плазмы в стеллараторе Л-2М. Для того, чтобы оценить, в какой области спектра следует искать падение интенсивности рентгеновского излучения, было



выполнено моделирование прохождения тормозного излучения плазмы с максвелловским спектром, обедненным электронами с энергией выше некоторой энергии E_{cr} , через бериллиевые фольги толщиной 30 и 90 мкм (см. рис). Из сравнения результатов моделирования с рисунком в [1] видно, что в плазме с плотностью $n_e \sim 1.2 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ «рентгеновскую яму» в SXR спектре следует искать в области энергий $\sim (5 - 7) T_e$ и выше. В режимах омического нагрева плазмы, когда $T_e = 250 - 350 \text{ эВ}$ и $n_e = (0.8 - 1.5) \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, сколь-нибудь заметного падения интенсивности излучения в этой области SXR спектров обнаружено не было. Напротив, как

правило, в области энергий порядка 7 – 10 температур начинается отклонение SXR спектра от максвелловского в сторону увеличения интенсивности излучения, по причине ускорения электронов в продольном электрическом поле. В режиме ЭЦР нагрева плазмы, «рентгеновская яма» также не была обнаружена.

Литература

- [1]. Мирнов С.В. «Парадокс «рентгеновской ямы» как индикатор параллельного электронного переноса», 47 Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, 16-20 марта 2020, Сборник тезисов докладов, с. 38

ИЗМЕРЕНИЯ МГД АКТИВНОСТИ ПЛАЗМЫ ВЕРСИИ 2020 НА УСТАНОВКЕ Т-11М

Балашов А.Ю., Белов А.М., Семенов П.С., Сушков А.В., Степин А.В.

НИИЦ “Курчатовский институт”, г. Москва, Россия,
e-mail: sasha-balashov-2012@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.045

Магнитные измерения – базовая диагностическая система токамака, одной из задач которой является регистрация МГД активности плазмы. Такие измерения выполняются с помощью магнитных зондов, представляющие собой однослойные или многослойные индукционные катушки [1].

Установка Т-11М (АО “ГНЦ РФ ТРИНИТИ”, Россия) [2] является круглым токамаком со следующими основными параметрами: $R = 70$ см, $a = 20$ см, $I_p = 180$ кА, $B_T = 1,2$ Тл. Магнитные зонды Мирнова, сделанные и смонтированные на Т-11М более 20 лет назад подлежат замене, в связи с изменениями характеристик каркаса этих зондов. А именно, из-за длительного нахождения в условиях высоких температур внутри вакуумной камеры токамака, тefлоновая трубка, представляющая собой каркас, потеряла свою пластичность и стала хрупкой. При демонтаже магнитных зондов с целью проверки их состояния, материал трубки раскрошился.

Особенностью зондов Мирнова является одновременно их простота и эффективность. Представлена конструкция новых зондов версии 2020, методика их калибровки, а также результаты калибровки.

Система МГД-зондов имеет две линейки. Линейки располагаются в двух полоидальных сечениях камеры, угол между которыми в тороидальном направлении составляет 8° . В рамках одного сечения, расстояние между зондами одинаково. Кроме того, зонды обеих линеек друг относительно друга находятся при одинаковых полоидальных углах. Каждая линейка зондов помещается в тонкостенную металлическую защитную трубку толщиной 0,3 мм, повторяющую форму круглого сечения камеры. Так как защитные трубки открыты на атмосферу, то замена старой системы измерения МГД активности плазмы на новую осуществляется без демонтажа элементов камеры токамака Т-11М.

Калибровка магнитных зондов проводилась на калибровочном стенде, основным элементом которого являются катушки Гельмгольца, создающие однородное магнитное поле, внутри которого располагаются эталонная катушка и калибруемый датчик. Для удобства хранения и использования полученных результатов калибровки магнитных зондов создана база данных МГД диагностики.

Литература

- [1]. A.V. Sushkov, A.M. Belov, G.B. Igonkina et al. Design of inductive sensors and data acquisition system for diagnostics of magnetohydrodynamic instabilities on the T-15MD tokamak. *Fusion Engineering and Design*, 2019, **146**, p.383-387
- [2]. Уникальные научные установки / ТРИНИТИ Росатом. url: <https://www.trinit.ru/services/unikalnye-nauchnye-ustanovki/energokompleks-tsp/>

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ АБСОЛЮТНОЙ КАЛИБРОВКИ МАГНИТНЫХ ЗОНДОВ ТОКАМАКА Т-15МД

Степин А.В., Балашов А.Ю., Белов А.М., Игонькина Г.Б., Семенов П.С.,
Соколов М.М., Сушков А.В., Хайрутдинов Э.Н.

НИЦ “Курчатовский институт”, г. Москва, Россия, e-mail: steopin.andrei.@yandex.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.046

В настоящее время в НИЦ “Курчатовский институт” осуществляется подготовка к физическому пуску установки токамак Т-15МД ($R = 1.48$ м, $a = 0.67$ м, $k = 0.3 \div 0.4$, $I_p = 2$ МА, $B_t = 2$ Тл, $t_{разр} = 30$ с) [1]. Система электромагнитной диагностики Т-15МД является неотъемлемой частью вакуумной камеры (ВК) Т-15МД и насчитывает более двухсот индуктивных датчиков (магнитных зондов) различной чувствительности и с разными геометрическими параметрами для измерения как усреднённых, так и локальных значений магнитных полей. Часть этих датчиков задействована в системе управления в реальном времени положением и формой плазменного шнура.

В докладе рассмотрены локальные магнитные зонды ($49 \times 42 \times 23$ мм³), которые представляют собой: двухкомпонентные датчики (ДФ), регистрирующие нормальную и полоидальную компоненты магнитного поля; и однокомпонентные датчики, регистрирующие полоидальную компоненту, которые расположены как вдоль полоидального обхода ВК (МГДП), так и вдоль тороидального обхода ВК (МГДТ) [2]. Схема расположения зондов в ВК Т-15МД приведена на Рис. 1. ДФ представлены одной линейкой из 39 шт., МГДП – двумя линейками (по 39 шт. в каждой) и МГДТ – одной линейкой (44 шт.). Все датчики располагаются внутри вакуумной камеры. Датчики линейки МГДТ устанавливаются вдоль всего тороидального обхода вакуумной камеры токамака на её внешнем обводе, а датчики ДФ и МГДП расположены примерно равномерно вдоль полоидального обхода ВК.

Для проведения абсолютной калибровки чувствительности магнитных зондов создан специальный стенд, основу которого составляют катушки Гельмгольца, внутри которых создаётся однородное магнитное поле, в котором располагаются эталонный датчик вместе с калибруемым датчиком. Каждый из зондов откалиброван с погрешностью не более 0.1%. Результаты калибровки показали, что усреднённые значения NS составляют ~ 160 см² для зондов, измеряющих нормальную компоненту поля, и ~ 120 см² для зондов, измеряющих полоидальную компоненту магнитного поля. Для удобства хранения и использования результатов калибровки была создана база данных.

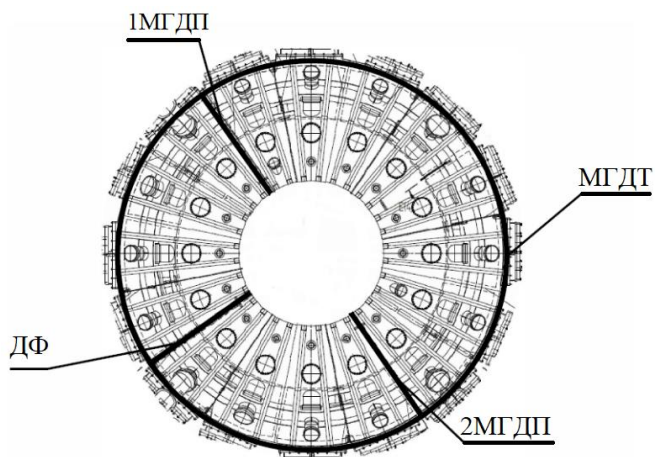


Рис. 1. Схема расположения однокомпонентных и двухкомпонентных магнитных зондов в Т-15МД (вид сверху).

Литература

- [1]. П.П. Хвостенко, И.О. Анашкин, Э.Н. Бондарчук и др. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2019, **42**, вып. 1

ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ПЛАЗМЕННОГО ШНУРА ПРИ НАЛИЧИИ ВНЕШНЕГО ИСТОЧНИКА (ОН, ЕСRH) (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА УСТАНОВКЕ ТОКАМАК Т-10)

Борщеговский А.А.

НИЦ “Курчатовский институт”, г. Москва, Россия, e-mail: Borschegovsky@yandex.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.047

Основная доля экспериментов по ЭЦР-нагреву плазмы, проводимых на установке токамак Т-10 в последние годы, осуществлялась на 2^{ой} гармонике ЭЦР в X-моду при наклонном вводе со стороны слабого магнитного поля сфокусированного СВЧ излучения под тороидальным углом $\sim 20^\circ$. Суммарная вводимая мощность от двух гиротронов составляла величину ~ 1.5 МВт при максимальной плотности мощности в сечении каждого СВЧ пучка ~ 0.42 МВт/см² и ~ 0.32 МВт/см². В ходе экспериментов было замечено что, в условиях центрального нагрева при противоположной инжекции СВЧ мощности (co+contr), спектр мягкого рентгена (PNA data) существенно отличается от спектра, измеренного при инжекции в одном направлении (co+co) – (ECCD-эксперимент) (рис. 1). При этом температура, измеренная по 2 гармонике ЕСЕ, имела практически одно и то же значение. Предварительные результаты этих экспериментов были представлены на конференции: “ЕС-20 Workshop” [1].

На основании статистического подхода, в квазистационарной стадии разряда, центральная область плазмы рассматривается как макроскопическая система частиц, находящаяся в состоянии статистического равновесия, состоящая из двух подсистем, различающихся продольным направлением движения электронов. На примере двух импульсов: (co+co#73117 и co+contr#73111) получены функции распределения электронов по абсолютным скоростям (рис.2). Показано, что при co+contr инжекции энергосодержание в области нагрева возрастает за счет продольных скоростей на величину $\sim 30\%$ относительно $3/2T_{ECE}$.

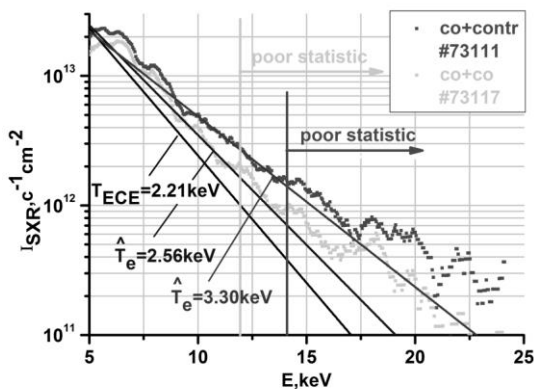


Рис. 1. Усреднённые спектры (PNA data).

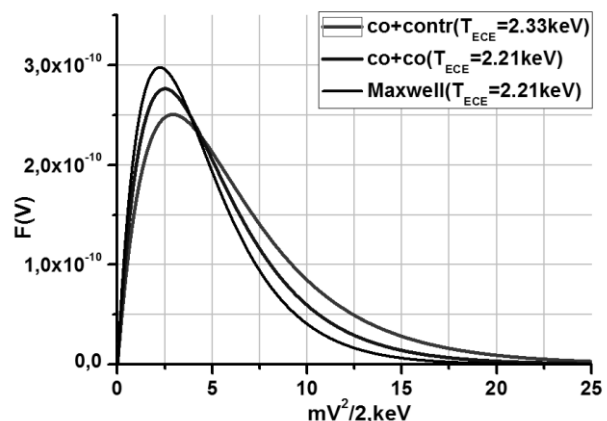


Рис. 2. Функции распределения по скоростям в зависимости от энергии.

Литература

- [1]. A. Borschegovskiy, S. Neudatchin, I. Pimenov, V. Trukhin, M. Dremin, A. Kislov, Yu. Pavlov, “Optimization of HF-injection at the 2nd harmonic of ECRH on T-10 tokamak in order to obtain high energy content in plasma”, EPJ Web of Conferences **203**, 02004 (2019)

ПЕРВЫЙ ЭТАП РАЗВИТИЯ ГИРОТРОННОГО КОМПЛЕКСА И СИСТЕМЫ ВВОДА СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ЭЦРН НА УСТАНОВКЕ ТОКАМАК Т-15МД

¹Пименов И.С., ¹Борщеговский А.А., ¹Рой И.Н., ¹Неудачин С.В., ²Попов Л.Г.,
²Агапова М.В., ²Бельнова Л.М.

¹НИЦ “Курчатовский институт”, г. Москва, Россия, e-mail: pimenowigor@mail.ru

²ЗАО НПП «ГИКОМ», г. Нижний Новгород, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.048

В текущий период времени в НИЦ «КИ» идёт подготовительная стадия работ к физическому пуску установки токамак Т-15МД [1]. Одним из первых этапов этой подготовки является строительство гиротронного комплекса и изготовление системы ввода СВЧ-излучения, которая будет установлена в одном из экваториальных патрубков токамака.

Для Т-15МД в своё время компанией ГИКОМ был разработан и сконструирован гиротрон на рабочей частоте 82,6 ГГц (1,5 Тл) [2], основной задачей которого является пробой рабочего газа в токамаке на второй гармонике необыкновенной волны для развития плазменного разряда. Выходная мощность гиротрона составляет 1 МВт при максимальной длительности импульса 30 с. СВЧ излучение в форме гауссового пучка доставляется в виде моды HE₁₁ по вакуумированному гофрированному волноводу длиной 35 м до фланца установки Т-15МД.

С этой целью будет использована система ввода СВЧ-излучения, аналогичная системе, применявшейся на установке токамак Т-10 [3-5]. Данная конструкция позволяет отклонять пучок, как в тороидальном, так и в полоидальном направлениях в заданных пределах и получать сфокусированное излучение с радиусом в перетяжке ~ 11 мм на уровне мощности е-1 с плотностью мощности в центре ~ 0,20-0,25 МВт/см². Электротехническая система Т-15МД позволяет поднять поле в процессе разряда (за несколько сотен мс с 1.3 до 1.5 Тл) [5]. В этом случае пробой происходит с внутренней стороны тора.

На следующем этапе работы Т-15МД с вытянутой плазмой и дивертором планируется использование восьми гиротронов, мощность излучения которых будет вводиться в вакуумную камеру токамака через два экваториальных патрубка. Для решения этой задачи в настоящее время проводится разработка комплексной системы СВЧ-ввода, рассчитанной под пучки от четырёх гиротронов. Чтобы избежать сильного рефракционного эффекта при работе с высокой плотностью плазмы, из-за относительно низкой частоты гиротрона, пучок должен быть сфокусирован. В настоящее время рассматривается несколько модификаций системы ввода СВЧ-излучения. Некоторые из них представлены в настоящем докладе.

Работа выполнена при поддержке госкорпорации РОСАТОМ

Литература

- [1]. Хвостенко П.П., Анашкин И.О., и др.– ВАНТ. Сер. Терм. синтез, 2019, т. 42, вып. 1, с. 15
- [2]. Кирнева Н.А., Кислов Д.А., Рой И.Н.– ВАНТ. Сер. Терм. синтез, 2020, т. 43, вып. 1, с. 64
- [3]. N.A. Kirneva et al, 34th EPS Conference on Plasma Phys. Warsaw, 2-6 July 2007 ECA Vol. 31F, P-1.164 (2007)
- [4]. A.A. Borshegovskiy et al, EPJ Web of Conferences 32, 02004 (2012)
- [5]. Пименов И.С., Белоусов В.И. и др. – Сборник тезисов докладов XLVII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, 16-20 марта 2020г., с. 88

СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОДОРОДНЫХ И ГЕЛИЕВЫХ РАЗРЯДОВ В МАЛОМ ТОКАМАКЕ GOLEM

^{1,2}Саранча Г.А., ^{1,3}Свобода В., ^{1,3,4}Штокель Я., ^{1,2,4}Мельников А.В.

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (НИУ), г. Долгопрудный, Россия

³Чешский технический университет, г. Прага, Чешская Республика

⁴НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.049

Для исследования термоядерной плазмы с параметрами, приближающимися к параметрам будущего реактора, строятся всё большие по размерам установки, требующие больших финансовых и трудовых ресурсов, а главное – времени. Вполне может сложиться ситуация, когда в начале работы крупной установки на ней уже не будет ни одного проектировавшего её человека. Поэтому необходимо вести непрерывную подготовку кадров. Это проще делать на токамаках малых размеров [1], таких как МИФИСТ [2], Глобус-М2 [3] или GOLEM [4].

В докладе представлены результаты дистанционных экспериментов, проведённых при помощи виртуальной пультовой на токамаке GOLEM в мае 2020 года студентами НИЯУ МИФИ и НИУ МФТИ при поддержке Факультета технической и ядерной физики Чешского технического университета. Показано, что при одинаковых начальных параметрах разряда (давление газа, ток плазмы и магнитное поле), эволюция плазмы в водороде и в гелии сильно различается. Были исследованы основные закономерности плазменного разряда (связь электронной температуры и тока плазмы; длительности разряда и тока плазмы и т.д.), а

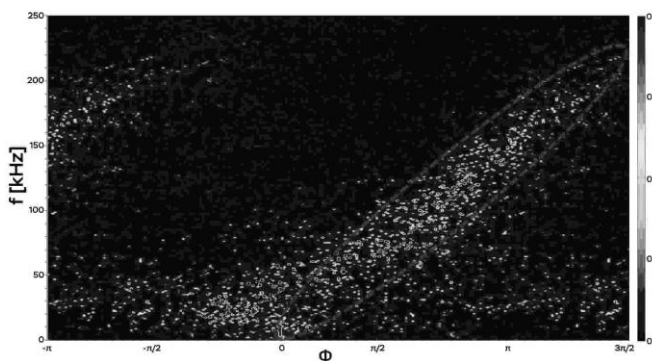


Рис. 1. Двумерный спектр магнитных колебаний $S(k, f)$ в гелиевом разряде

также характеристики плазменной турбулентности. Показано наличие дальних корреляций между низкочастотными (<50 кГц) электростатическими и магнитными колебаниями, а также существование широкополосных (<250 кГц) магнитных колебаний, разрешимых по частоте f и волновому вектору k (рис. 1) в гелиевой плазме.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 19-12-00312.

Литература

- [1]. M.P. Gryaznevich et al, Contribution of Joint Experiments on Small Tokamaks in the framework of IAEA Coordinated Research Projects to mainstream Fusion Research // Plasma Sci. Technol., 2020, **22** 055102
- [2]. В.А. Курнаев и др. Статус разработки токамака МИФИСТ // Вестник Национального Исследовательского Ядерного Университета МИФИ, 2019, №6, стр. 491-497
- [3]. Н.Н. Бахарев и др. Результаты первых экспериментов на токамаке Глобус-М2 // Физика плазмы, 2020, **7**, стр. 579-587
- [4]. O. Grover et al. Remote operation of the GOLEM tokamak for Fusion Education // Fusion Eng. Des., 2016, **112**, 1038–1044

ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ ПУЧКОМ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ДЛЯ ТОКАМАКОВ Т-15МД И ГЛОБУС-М2

¹Хабанов Ф.О., ¹Мельников А.В., ¹Елисеев Л.Г., ¹Драбинский М.А.,
²Харчев Н.К., ³Минаев В.Б.

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

²Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия

³ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.050

Зондирование плазмы пучком тяжелых ионов (Heavy Ion Beam Probe - НИБР) – многоцелевой метод диагностики плазмы в установках с магнитным удержанием, позволяющий измерять электрический потенциал и характеристики турбулентности плазмы [1, 2].

Диагностика НИБР успешно использовалась на токамаках с круглым сечением плазмы и большим аспектным отношением ($A = R/a$, где R и a – большой и малый радиусы), таких как ТМ-4, ТЕХТ, ЈРТII-U, Т-10, а также на стеллараторах LHD, CHS, TJ-II. Ранее был проведен анализ применимости НИБР на токамаках с D-образным сечением плазмы: Compass-D, Глобус [3], TCV [4], MAST [5], который указал на особенности НИБР для токамаков с малым аспектным отношением.

Изучение электрических полей в плазме и их влияния на процессы переноса тепла и частиц поперек удерживающего магнитного поля является актуальной задачей, поэтому на новых токамаках с D-образным сечением плазмы планируется установка диагностики НИБР. Это крупнейший в России токамак Т-15МД, строящийся в НИЦ «Курчатовский институт» ($R = 1,48$ м, $a = 0,67$ м, $A = 2,2$, тороидальное магнитное поле на оси $B_{\text{тор}} \leq 2$ Тл, ток плазмы $I_{\text{pl}} \leq 2$ МА) [6, 7], и сферический токамак Глобус-М2, недавно введенный в эксплуатацию после модернизации магнитной системы в ФТИ им. А.Ф. Иоффе ($R = 0,36$ м, $a = 0,24$ м, $A = 1,5$, $B_{\text{тор}} \leq 1$ Тл, $I_{\text{pl}} \leq 0,5$ МА) [8]. Разработка диагностики НИБР требует предварительных расчетов траекторий зондирующих частиц в сложном трехмерном магнитном поле токамака. В расчетах необходимо учитывать все компоненты магнитного поля: тороидальное поле, поле тока плазмы и поле управляющих витков, используемых для задания формы плазмы.

В работе описаны метод решения уравнений движения зондирующих ионов в магнитном поле токамаков Т-15МД [9] и Глобус-М2, оптимизация схем зондирования, а также расчет расположения областей измерения и детекторных сеток. По результатам расчетов были выбраны оптимальные расположения ионопроводов на установках и определены области в плазме, в которых возможно проведение измерений.

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект 19-12-00312.

Литература

- [1]. Dnestrovskij Yu. et al. IEEE Trans. Plasma Sci. 1994, V. 22 (4), P. 310-331
- [2]. Melnikov A.V. et al. Nucl. Fusion 2017, V. 57 (6), P. 115001
- [3]. Melnikov A.V. et al. Rev. Sci. Instrum. 1997, V. 68 (1), P. 316-319
- [4]. Siegrist M. R. et al. Proc. 21st IEEE/NPS Symposium on Fusion Engineering SOFE, 26–29 September 2005, Knoxville, TN, USA
- [5]. Melnikov A. V., Perfilov S. V. and Sharapov S. E. Proc. 37th EPS Conference on Plasma Physics, 21–25 June 2010, Dublin, Ireland, ECA Vol. 34A, P5.120
- [6]. Хвостенко П.П. и др. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез 2019, Т. 42 (1), С. 15-38
- [7]. Melnikov A.V. et al. Fusion Engineering and Design 2015, V. 96–97, P. 306–310
- [8]. Minaev V.B. et al. Nucl. Fusion 2017, V. 57 (6), P. 066047
- [9]. Ilin A.M., Khabanov P.O., Melnikov A.V. J. Phys.: Con. Ser. 2019, V. 1383, P. 012006

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ ПУЧКОМ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ТОКАМАКА Т-15МД

^{1,2}Вадимов Н.А., ^{1,2}Драбинский М.А., ^{1,2,3}Мельников А.В., ^{1,2}Саранча Г.А.

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия,

²Московский физико-технический институт (НИУ), г. Долгопрудный, Россия,

³НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.051

Зондирование плазмы пучком тяжелых ионов (ЗПТИ) является уникальным прямым методом измерения потенциала в горячей области плазмы токамаков и стеллараторов. Помимо локальных измерений потенциала с высоким временным разрешением, ЗПТИ позволяет одновременно измерять локальные колебания плотности электронов и поля тока плазмы [1]. ЗПТИ использовалась для исследования плазмы токамака Т-10 и активно применяется в исследованиях на стеллараторе ТЖ-II [2]. ЗПТИ является частью диагностического комплекса крупнейшего в России токамака Т-15МД, ($R = 1.5$ м, $a = 0.67$ м, $B_t = 2$ Т, $I_{pl} = 2$ МА) подготавливаемого к физическому пуску в НИЦ «Курчатовский институт» [3]. По предварительным оценкам, длина пути пучка через плазму Т-15МД

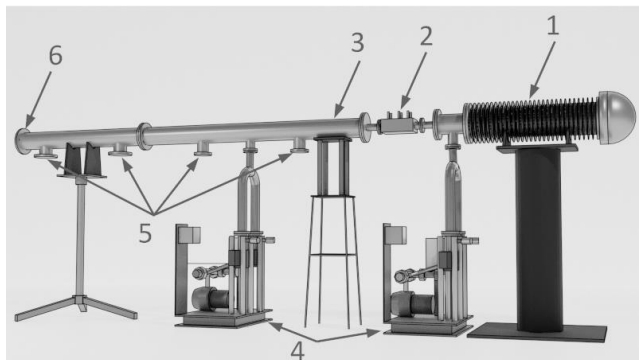


Рис. 2: испытательный стенд: инжектор - 1; ионопровод - 2; пролётная камера - 3; система вакуумной откачки - 4; патрубки для проволоочные датчиков пучка - 5; цилиндр Фарадея - 6

составит 1.0 – 1.5 м [4]. В условиях высокой плотности плазмы это приведет к сильному затуханию пучка, поэтому для работы ЗПТИ при высокой плотности плазмы необходим пучок с током ≥ 200 мкА и фокусным расстоянием ~ 3 м [5]. В докладе описаны принцип работы и конструкция стенда для получения и испытания стационарных длиннофокусных пучков высокой интенсивности (рис. 1). Стенд позволит изучать свойства термоионных эмиттеров и ионно-оптической системы: интенсивность пучка, его диаметр, пространственное распределение тока в пучке и фокусное расстояние. В дальнейшем стенд может быть использован для калибровки энергетического анализатора.

Работа выполнена при поддержке РФФ, проект 19-12-00312.

Литература

- [1]. A.V. Melnikov et al. Heavy ion beam probing – diagnostics to study potential and turbulence in toroidal plasmas // Nucl. Fusion 2017, **57**, 072004
- [2]. A.V. Melnikov Electric Potential in Toroidal Plasmas // Springer Nature Switzerland AG 2019, 240 pp, ISBN 978-3-030-03480-1
- [3]. A.V. Melnikov et al. Physical Program and Conceptual Design of the Diagnostics of the T-15 Upgrade Tokamak // Fusion Engineering and Design, 2015, **96–97**, 306–310
- [4]. M.A. Drabinskiy et al. Conceptual design of the heavy ion beam probe diagnostic for the T-15MD tokamak // J. Inst., 2019, **14** (11), C11027
- [5]. N.A. Vadimov et al. The high voltage test bench for heavy ion beam probe diagnostics on the T-15MD tokamak // Probl. Atom. Sci. Techn. Ser. Plasma Physics, (26), **6** (130), 2020, 200-203

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГАМ С ШИРОКОПОЛОСНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТЬЮ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА Т-10

^{1,2}Крохалев О.Д., ^{1,2,3}Мельников А.В.

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (НИУ), г. Долгопрудный, Россия

³НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.052

Геодезические акустические моды (ГАМ) – высокочастотная ветвь зональных потоков – рассматриваются как механизм саморегуляции турбулентности в тороидальной плазме [1]. Исследование частотной структуры ГАМ и её взаимодействия с широкополосной турбулентностью важно для понимания физических механизмов аномального турбулентного переноса энергии и частиц [2]. Недавно было показано, что ГАМ состоит из трёх частотных пиков: основного и двух его спутников, низко- и высокочастотного [3]. В работе исследовано взаимодействие ГАМ с широкополосной турбулентностью с помощью бикогерентного анализа данных диагностики пучком тяжелых ионов [4]. Статистически значимая величина квадратичного коэффициента бикогерентности

$$b_{x,y,z}^2(f_1, f_2) = \frac{|\langle \Phi_x(f_1)\Phi_y(f_2)\Phi_z^*(f_1+f_2) \rangle|^2}{\langle |\Phi_x(f_1)\Phi_y(f_2)|^2 \rangle \langle |\Phi_z(f_1+f_2)|^2 \rangle} \quad (1)$$

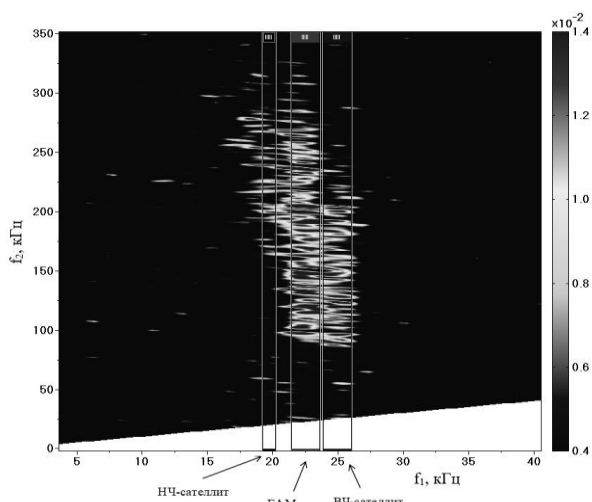


Рисунок 1 - Кросс-бикогерентность
 $b_{\phi, I_t, I_t}^2(f_1, f_2)$, №72287

указывает на наличие трёхволнового взаимодействия между колебаниями на частотах f_1 , f_2 и $f_1 + f_2$. В формуле (1) $\Phi_x(f)$ – Фурье-образ сигнала x , $\Phi_x^*(f)$ – его комплексно-сопряжённая величина. На рисунке 1 приведен квадратичный коэффициент бикогерентности для сигналов потенциала ϕ и плотности плазмы (полного тока пучка I_{tot}) в импульсе с низкой плотностью ($n_e \approx 0.7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$).

В работе показано, что каждый из трех пиков ГАМ взаимодействует с широкополосной турбулентностью по трехволновому механизму. Взаимодействие имеет тонкую структуру: каждому из трёх пиков соответствует индивидуальный диапазон частот f_2 . Основной пик ГАМ

взаимодействует с широким частотным интервалом турбулентности, НЧ-спутник взаимодействует с высокочастотной его частью, ВЧ-спутник – с низкочастотной его частью.

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект 19-12-00312.

Литература

- [1]. Fujisawa A. et al, Experimental progress on zonal flow physics in toroidal plasmas, Nuclear Fusion 2007 **47** (10) S718-S726
- [2]. Melnikov A.V. et al. Study of interactions between GAMs and broadband turbulence in the T-10 tokamak // Nuclear Fusion 2017, **57** (6) 115001
- [3]. Крохалев О.Д., Мельников А.В. ГАМ в плазме токамака Т-10: частотная структура и взаимодействие с широкополосной турбулентностью. Направлено в «Письма в ЖЭТФ»
- [4]. Melnikov A.V. et al. Heavy ion beam probing – diagnostics to study potential and turbulence in toroidal plasmas // Nuclear Fusion 2017 **57** (6) 072004

СВОЙСТВА ДАЛЬНИХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ ФЛУКТУАЦИЙ ПЛОТНОСТИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА T-10

^{1,2}Сергеев Н.С., ^{1,2}Мельников А.В., ¹Грашин С.А., ¹Шелухин Д.А.

¹НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия, e-mail: nickbebeskis@gmail.com

²НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.053

Исследования турбулентности плазмы в токамаке показывают наличие различных типов флуктуаций плазмы: SLF (stochastic low frequency, $\sim 0 - 20$ кГц), BB (broadband $\sim 0 - 300$ кГц), QCM (quasi-coherent mode, $\sim 50 - 150$ кГц), GAM (geodesic-acoustic mode, ~ 20 кГц) [1]. Вместе с ними в спектре флуктуаций могут существовать МГД тиринг-моды с частотой ~ 7 кГц. Связь между этими колебаниями и свойствами аномального переноса до сих пор остаётся открытым вопросом [2].

На токамаке T-10 ($R = 1.5$ м, $a = 0.3$ м) было показано существование QCM моды колебаний как в горячей, так и в пристеночной плазме [3]. Оценка турбулентного потока частиц на частотах GAM и QCM мод колебаний показала, что QCM мода способна вносить существенный вклад в суммарный турбулентный поток частиц из плазмы [4].

Дальние пространственные корреляции были исследованы в омических разрядах T-10 ($B_t = 2.2$ Тл, $I_{p1} = 220$ кА, $n_e \sim 1-2 \times 10^{19}$ м⁻³). Колебания электронной плотности и электрического потенциала на стороне слабого магнитного поля в центральной области плазменного шнура измерялись с помощью зондирования пучком тяжёлых ионов (Heavy Ion Beam Probe, НИБР), а в периферийной плазме с помощью многоштырьковых зондов Ленгмюра (Multipin Langmuir Probe, MLP). Колебания плотности на стороне сильного магнитного поля были измерены методом корреляционной рефлектометрии (correlation reflectometry, CR).

В работе представлены измерения амплитуд колебаний QCM, GAM, МГД тиринг-моды, проанализированы их зависимости от электронной плотности n_e и температуры T_e . Проведён анализ спектров мощности колебаний ионного тока насыщения и плавающего потенциала MLP при переходе из области SOL в основную плазму. При переходе наблюдается значительное изменение характера спектров электростатической турбулентности. Наличие статистически значимого уровня когерентности между сигналами электрических потенциалов НИБР и MLP на частотах QCM, GAM и МГД тиринг-моды указывает на глобальный характер этих мод колебаний. Обнаружено наличие магнитной компоненты QCM моды.

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект № 19-12-00312.

Литература

- [1]. V.A. Vershkov et al. Summary of experimental core turbulence characteristics in ohmic and electron cyclotron resonance heated discharges in T-10 tokamak plasmas // Nucl. Fusion 2005 **45** (10) S203-S226
- [2]. V.A. Vershkov et al. Density fluctuations as an intrinsic mechanism of pressure profile formation // Nucl. Fusion 2015 **55** 063014
- [3]. M. A. Drabinskiy et al. Radial structure of quasi-coherent mode in ohmic plasma of the T-10 tokamak // Journal of Physics: Conference Series **1383** (2019) 012004
- [4]. L.G. Eliseev et al. Measurement of geodesic acoustic modes and the turbulent particle flux in the T-10 tokamak plasmas // Journal of Physics: Conference Series, Conf. Series **907** (2017) 012002

РАСЧЕТ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА ПРОДУКТОВ ВАКУУМНОЙ ОТКАЧКИ ТОКАМАКА, СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

Иванов Б.В., Ананьев С.С.

НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия, *karjicohh@gmail.com*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.054

Для моделирования и разработки тритий-дейтериевого топливного цикла (ТЦ) гибридного реактора на основе токамака ДЕМО-ТИН используется созданный в НИЦ «Курчатовский институт» расчетный код FC-FNS [1]. Модель ТЦ развивают в соответствии с изменениями и совершенствованием проекта ДЕМО-ТИН. В текущем состоянии код FC-FNS позволяет осуществлять согласованные расчеты потоков топливных изотопов и их накопления во всех системах ТЦ. Результаты проводимого моделирования необходимы для анализа, выбора и обоснования технологий для применения в топливном цикле реактора ДЕМО-ТИН.

В рамках работ по модернизации кода FC-FNS планируется расширить номенклатуру рассматриваемых компонентов. Для этого был создан модуль расчёта компонентного состава продуктов вакуумной откачки токамака. Это позволит рассчитать состав потока газов в системах топливного цикла установки ДЕМО-ТИН с учетом примесей (O_2 , N_2 , CO_2 и др.) и водородсодержащих соединений (H_2O , CH_4 , NH_3 и др.), в том числе изотопов водорода (H_2 , HD, D_2 , DT, T_2) и других молекул. В дальнейшем все расчетные модули кода будут дополнены алгоритмами расчета молекулярных соединений и переведены на новую программную платформу. Это упростит интеграцию отдельных модулей систем в ТЦ, а также обеспечит более удобный интерфейс для пользователей.

Для расчётов была применена статистически-равновероятностная модель образования химических соединений на основе компонентного состава инжектируемых в плазму газов, примесных соединений, поступающих в плазму и систему откачки, а также в процессе натекания атмосферных газов. Результаты расчетов были сопоставлены с данными экспериментальных работ на токамаках JET [2] и JT-60 [3] и расчётами, проведенными для ITER [4]. В результате этого сопоставления было показано, что компонентный состав «выхлопа» токамаков JET и JT-60 (экспериментальные измерения) и ITER (расчетные значения) отличается от равновероятностного на величину до нескольких десятков процентов. Для соответствия экспериментальным данным необходим подбор поправочных коэффициентов, а также величин потоков натекания атмосферных и примесных газов. Такая процедура нормировки выполняется в настоящее время и будет продолжена в процессе проведения экспериментов на токамаке T-15МД и специализированных стендах для отработки технологий ТЦ. Полученный алгоритм планируется использовать для анализа влияния состава инжектируемых, примесных и атмосферных газов на работу систем тритий-дейтериевого топливного цикла установки ДЕМО-ТИН, а также на накопления трития в них.

Работа поддержана НИЦ «Курчатовский институт» (28.09.2020 № 1934а).

Литература

- [1] S.S. Ananyev, A.V. Spitsyn, and B.V. Kuteev, "Electronic model «FC-FNS» of the fusion neutron source DEMO-FNS fuel cycle and modeling hydrogen isotopes flows and inventories in fueling systems," *Fusion Eng. Des.*, vol. 138, no. December 2018, pp. 289–293, Jan. 2019
- [2] S. Grünhagen Romanelli et al., "Gas analyses of the first complete JET cryopump regeneration with ITER-like wall," *Phys. Scr.*, vol. T159, no. May 2013, p. 014068, 2014.
- [3] Y. Kobayashi et al., "Analysis of exhaust gas in JT-60U tokamak operation," *Proc. - Symp. Fusion Eng.*, vol. 00, no. C, pp. 1–4, 2005
- [4] R.J.H. Pearce et al., "Gas species, their evolution and segregation through the ITER vacuum systems," *Vacuum*, vol. 86, no. 11, pp. 1725–1730, 2012.

ЭВОЛЮЦИЯ РАДИАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАМ И КВАЗИКОГЕРЕНТНОЙ МОДЫ В РЕЖИМАХ С ОМИЧЕСКИМ И МОЩНЫМ ЭЦР-НАГРЕВОМ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА Т-10

¹Драбинский М.А., ¹Елисеев Л.Г., ¹Хабанов Ф.О., ¹Мельников А.В., ²Харчев Н.К.

¹НИИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

²Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.055

В современной физике высокотемпературной плазмы сохраняется разрыв между теоретически предсказанными и измеренными в эксперименте потоками тепла и частиц из плазмы на стенку. Несовпадение между теорией и экспериментом говорит о неполноте физической картины, описываемой современной теорией. На настоящий момент причиной возникновения аномально высоких потоков – по сравнению с теоретически предсказанными – считается мелкомасштабная плазменная турбулентность. На токамаке Т-10 было показано, что большая часть турбулентного потока частиц в омической фазе разряда индуцируется квазикогерентной (КК) модой [1].

Явлением, влияющим на величину потоков, являются зональные течения [2]. Высокочастотной ветвью зональных течений является геодезическая акустическая мода (ГАМ) и её сателлит. Было установлено, что ГАМ и сателлит взаимодействуют с широкополосной турбулентностью в широком интервале частот до 250 кГц и выше [3].

Для создания физически полной теории, способной предсказать величину потоков тепла и частиц из плазмы на стенку необходимо детальное экспериментальное изучение свойств мелкомасштабной турбулентности и зональных течений, в том числе их радиальных характеристик в плазме с различными типами нагрева и уровнями вкладываемой мощности.

Такую работу позволяет провести диагностический комплекс зондирования плазмы пучком тяжёлых ионов (ЗПТИ, Heavy Ion Beam Probe – НИБР). ЗПТИ является уникальным инструментом, позволяющим одновременно и независимо измерять среднее значение электрического потенциала плазмы, его колебания, а также колебания плотности плазмы и полоидального магнитного поля. С помощью ЗПТИ также возможно восстанавливать плотность плазмы [4]. Авторами были проведены работы по изучению радиальных характеристик ГАМ [5] и КК моды [6] в омической плазме токамака Т-10. В данной работе детальное внимание уделяется эволюции радиальных характеристик ГАМ и КК моды в ЭЦР-плазме Т-10.

Установлены как общие для омической и ЭЦР-плазмы свойства ГАМ и КК моды, так и свойства, проявляющиеся только при высоком уровне вкладываемой в плазму мощности дополнительного нагрева. В частности, ГАМ и её сателлит становятся неразличимыми по частоте при высокой мощности СВЧ-нагрева $P_{\text{СВЧ}} > 1,7$ МВт и низкой плотности плазмы $n_e < 1.0 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Средняя частота квазикогерентной моды в центральных областях плазмы, $r < 15$ см, в режимах с мощным СВЧ-нагревом уменьшается с 70-80 кГц вплоть до 20 – 30 кГц. Такое значительное уменьшение частоты КК моды, по всей видимости, связано с изменением электрического поля при вводе в плазму большой СВЧ-мощности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 19-12-00312.

Литература

- [1]. L.G. Eliseev et al Plasma Fusion Research. 2018 V. 13 3402106 (4p)
- [2]. A. Fujisawa et al Nucl. Fusion 47 2007 S718–S726
- [3]. A.V. Melnikov et al 2017 Nucl. Fusion 57 115001
- [4]. Ph.O. Khabanov et al 2019 JINST 14 C09033
- [5]. A.V. Melnikov et al Plasma Fusion Research. 2018 V. 13 3402109 (4p)
- [6]. M.A. Drabinskiy et al 2019 J. Phys.: Conf. Ser. 1383 012004

МОДЕРНИЗАЦИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО АТОМАРНОГО ИНЖЕКТОРА ДЛЯ ТОКАМАКА ST-40

Дейчули П.П., Вахрушев Р.В., Иванов А.А., Орешонок В.В., Ращенко В.В.,
Колмогоров В.В., Колмогоров А.В., Ступишин Н.В.

ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, e-mail: pdeichuli@yandex.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.056

В 2020 г проведена модернизация атомарного инжектора RUDI для диагностики плазмы [1], спроектированного в ИЯФ им. Будкера, и был осуществлен его физический запуск на токамаке ST-40 (Tokamak Energy Ltd., Абингдон, Великобритания). Инжектор позволяет проводить измерения ионной температуры, поля скоростей вращения плазмы, магнитного поля и др. параметры плазмы токамака.

Исходный вариант инжектора более 10 лет использовался для диагностики плазмы на токамаке TEXTOR. Основные параметры инжектора – энергия 50 кэВ, извлеченный ионный ток до 3 А, длительность до 8 секунд, 4-электродная ионно-оптическая система (ИОС) с фокусным расстоянием 4 м, источник плазмы с горячим катодом из LaB₆.

В ходе глубокой модернизации были сделаны следующие изменения:

- В дугоразрядном источнике плазмы инжектора применен генератор плазмы с холодным катодом [2], более надежный и гораздо более простой в эксплуатации (хотя он проигрывает по допустимой длительности импульса).
- Для питания вытягивающего электрода ИОС вместо традиционного резистивного делителя использована схема с отводом от регулируемой ячейки секционированной высоковольтной системы питания. Такая схема питания резко повысила стабильности потенциала фокусирующей сетки ИОС и практически устранила типичную для 4-электродных ИОС опасность перемыкания первого зазора в режимах с предельно низкой расходимостью пучка. Кроме того, в такой схеме устраняются затраты тока в/питания на делитель, и, соответственно, возрастает ток пучка.
- Модифицирована система питания дугового разряда для генератора плазмы с холодным катодом, для стабильной инициации дуги применена схема слаботочного перенапряжения. Применена схема со стабилизацией нижнего и верхнего уровня тока разряда, повысившая стабильность режима с модуляцией пучка.
- Все системы питания перепроектированы на работу от емкостных накопителей на современных суперконденсаторах, с энергоемкостью достаточной для 2-секундного рабочего импульса инжектора. Это полностью устраняет мощные импульсные нагрузки на местную электросеть.
- Криогенная система с заливкой гелия заменена на более простую в эксплуатации систему с криокулерными головками.
- Разработана новая система управления инжектором с использованием аппаратной платформы в составе промышленного компьютера с модулями ввода-вывода National Instruments. Программное обеспечение выполнено в среде LabVIEW.

Литература

- [1]. A.Listopad, et al. Use of the focusing multi-slit ion optical system at RUSSIAN Diagnostic Injector (RUDI). Rev. Sci. Instrum. 83, 02B707 (2012); DOI: 10.1063/1.3669794
- [2]. Stupishin N.V., Deichuli P.P., Ivanov A.A. et al. Multi-Second Neutral Beam Injector (60kV, 6A) for Plasma Diagnostics in the Upgraded T-15 Device. AIP Conference Proceedings vol. 1771, 50012, 2016

ИЗМЕРЕНИЕ СООТНОШЕНИЯ ИЗОТОПОВ И МОЛЕКУЛЯРНЫХ ФРАКЦИЙ В СМЕШАННОМ ВОДОРОДНО-ДЕЙТЕРИЕВОМ АТОМАРНОМ ПУЧКЕ

¹Дейчули П., Бруль А., ¹Давыденко В., ¹Иванов А., ²Осин Д., ³Magee R.

¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

²Tokamak Energy Ltd., Abingdon, OX14 4SD, United Kingdom.

³Tri Alpha Energy Ltd, 92610, Foothill Ranch, CA, USA

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.057

Инжекция мощных атомарных пучков широко используется в экспериментах по управляемому термоядерному синтезу для нагрева плазмы и поддержания тока. В некоторых случаях представляет большой интерес инжекция пучков из смеси дейтерия и водорода [1].

В данной работе описаны эксперименты по получению мощного атомарного пучка из смеси водорода и дейтерия с произвольным заданным соотношением изотопов. Прямое измерение содержания каждого изотопа в смешанном атомарном пучке является достаточно сложной задачей. Поэтому очень заманчиво выглядит измерение содержания изотопов простым бесконтактным методом доплеровской спектроскопии пучка. В данной работе анализируются такие возможности и обсуждаются результаты соответствующих экспериментов с мощным водородно-дейтериевым пучком.

В пучке ионного источника, работающего на смеси изотопов, наряду с ионами водорода H^+ , H_2^+ , H_3^+ , H_2O^+ и дейтерия D^+ , D_2^+ , D_3^+ , D_2O^+ , возможно наличие гибридных ионов HD^+ , H_2D^+ , HD_2^+ и HDO^+ . Соответственно, после нейтрализации и диссоциации молекулярных ионов в газовой мишени инжектора, что как правило имеет место в практике получения атомарных пучков для целей УТС, излучении пучка представляет собой набор доплеровски сдвинутых линий $(H,D)_\alpha$ групп частиц с разными скоростями. Кроме того, линии дейтерия имеют дополнительный изотопный сдвиг, который для пары H_α - D_α составляет около 1.72\AA .

В первичном ионном пучке присутствуют 12 сортов ионов, которым в наблюдаемой области спектра соответствуют вообще говоря 16 линий излучения. Показано, можно свести спектр к 12 вполне разрешимым линиям – по 6 линий в водородной и дейтериевой частях спектра. Разделить пики тяжелой примеси легче при наблюдении “вдогонку”, когда изотопный сдвиг и доплеровское смещение суммируются. Это вполне удастся даже для пучка низкой энергии (15 кэВ).

При анализе полученных спектров использовалась процедура вычисления содержания молекулярных фракций в пучке, сходная со стандартной, см, например, [2]. Учитывалось наличие новых линий из-за вклада новых сортов ионов и были введены соответствующие коэффициенты пересчета. Кроме фракций пучка с энергиями E , $E/2$, $E/3$, $E/18$ для водорода и E , $E/2$, $E/3$, $E/10$ для дейтерия, нужно учесть еще фракции $E/4$, $E/5$ и $(E/18+E/19)$ для водородной части спектра и фракции $2E/3$, $2E/5$ и $(2E/19+E/10)$ для дейтериевой части.

Особый интерес в спектре смешанного пучка представляют линии излучения водорода половинной энергии и дейтерия полной энергии. Для этих линий сечения процессов, определяющих их интенсивность, одинаковы, и нет вклада от процессов с участием гибридных ионов, причем, одинаковом доплеровском сдвиге эти линии разрешимы, благодаря изотопному сдвигу. Это дает возможность измерять соотношение изотопов в исходном пучке, если известны составы моно-изотопных пучков. Результаты измерений соотношения изотопов сравниваются с измерениями по выходу нейтронов DD-реакции.

Литература

- [1]. Рютов Д.Д.– частное сообщение.
 [2]. Uhlemann R., Hemsworth R.S., Wang G., and Euringer H. // Rev. Sci. Instrum. 1993. V. 64, P. 974. doi: 10.1063/1.1144100

О КРУПНОМАСШТАБНЫХ МГД-ДВИЖЕНИЯХ В ПЛАЗМЕННОМ ШНУРЕ, ПОРОЖДАЕМЫХ ЛОКАЛИЗОВАННОЙ ДРЕЙФОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТЬЮ

Арсенин В.В.

НИИ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия, e-mail: Arsenin_VV@nrcki.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.058

Доклад посвящен колебаниям длинного тонкого шнура плазмы конечной проводимости. Используется цилиндрическая модель с $B_z \gg B_\theta$, $\beta = 8\pi p / B^2 \ll 1$. Рассматриваются винтовые возмущения $\propto g(r) \exp(im\vartheta - ik_z z - i\omega t)$, $|m| > 1$, $|k_z| a \ll 1$, a – радиус шнура. При высокой проводимости вдоль магнитного поля, когда $|(\omega a / c)^2 \eta| \gg 1$, $\eta = 4\pi\sigma_{\parallel} / \omega$ – продольная компонента диэлектрического тензора, крупномасштабное $a\partial / \partial r \sim 1$ движение близко к идеальной МГД всюду, кроме окрестности поверхности (если таковая имеется) $r = r_s$, на которой компонента $k_{\parallel} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{B} / B$ волнового вектора обращается в нуль. В таком движении вектор-потенциал равен $\approx \tilde{A}_z \mathbf{e}_z$, он создается токами \tilde{j}_z . Считается, что профили невозмущенных величин такие, что при рассматриваемых m и k_z идеальная во всем объеме плазмы неустойчивость и тиринг-неустойчивость отсутствуют. Вместе с тем предполагается, что в тонком слое около $r = r_0$ локализована мелкомасштабная $|(\omega / k_r c)^2 \eta| \ll 1$ "электростатическая" неустойчивость дрейфового типа; здесь k_r – характерное радиальное волновое число. Если в этой моде присутствуют токи \tilde{j}_z , они могут вызвать нарастающее во времени вынужденное крупномасштабное возмущение с той же винтовостью. В работе прослежено возникновение крупномасштабного МГД-возмущения в случае, когда мелкомасштабная мода обязана градиенту ионной температуры [1, 2].

Литература

- [1]. Кадомцев Б.Б., Погуце О.П., Вопросы теории плазмы. Вып. 7 / Под ред. М.А. Леонтовича. М.: Атомиздат, 1967. С. 209
- [2]. Миямото К. Основы физики плазмы и управляемого синтеза. М.: Физматлит, 2007

ОБНАРУЖЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ АЛЬФВЕНОВСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ОМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ И РЕЖИМАХ С НИЖНЕГИБРИДНЫМ НАГРЕВОМ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

^{1,2}Балаченков И.М., ²Буланин В.В., ¹Гусев В.К., ^{1,2}Жильцов Н.С., ^{1,2}Киселёв Е.О.,
¹Курский Г.С., ¹Минаев В.Б., ¹Патров М.И., ²Петров А.В., ¹Петров Ю.В.,
²Пономаренко А.М., ¹Сахаров Н.В., ²Яшин А.Ю.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: balachenkov@mail.ioffe.ru

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.059

В экспериментах по нагреву плазмы волнами нижегибридного диапазона частот, а также в омических разрядах с низкой плотностью при помощи зондов Мирнова были зарегистрированы колебания магнитного поля на частотах в диапазоне от 800 kHz до 1.8 MHz, что значительно превосходит частоты тороидальных альфвеновских мод (ТАЕ) [1] и альфвеновских каскадов [2], которые регистрировались на токамаке Глобус-М2 ранее. Кроме того, амплитуда этих колебаний оказалась значительно меньше по сравнению с амплитудой ТАЕ, что с одной стороны говорит о их слабом влиянии на устойчивость разряда, а с другой, затрудняет их наблюдение. При этом, обнаруженная неустойчивость однозначно имеет альфвеновскую природу, так как частота колебаний хорошо коррелирует со скейлингом для альфвеновской частоты. Обнаруженные колебания возникают в виде коротких вспышек, совпадающих по времени с моментами срыва пилообразных колебаний на сигнале мягкого рентгена, и в целом схожи по своим свойствам с колебаниями, наблюдавшимися ранее на установках MAST [3], COMPASS [4], а также ТУМАН-3М [5]. Наблюдение этой неустойчивости стало возможным благодаря увеличению частоты оцифровки системы сбора магнитных измерений, а увеличение числа магнитных зондов в тороидальном массиве позволило разрешить пространственную структуру колебаний в тороидальном направлении.

В качестве наиболее вероятного механизма возбуждения обнаруженных колебаний рассматривается резонанс альфвеновской моды с пучком высокоэнергичных убегающих электронов. Об этом в частности свидетельствует то, что колебания появляются в омическом режиме с низкой плотностью, когда создаются условия для перехода электронов в режим убегания, а другие надтепловые частицы в плазме отсутствуют. В этой работе обсуждается возможность применения моделей резонансного взаимодействия надтепловых электронов с альфвеновской модой на частоте прецессии орбиты электронов, предложенных в работах [6] и [7] к условиям эксперимента на токамаке Глобус-М2. Для определения локализации обнаруженных высокочастотных колебаний планируется применить имеющуюся на токамаке Глобус-М2 диагностику доплеровского обратного рассеяния [8].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-12-01177-П).

Литература

- [1]. Петров Ю.В. и др., Физика Плазмы, 2019, том 45, № 8, с. 675–684
- [2]. Balachenkov I. M. et al, Tech. Phys. Lett. 46, 1157 – 1161 (2020)
- [3]. McClements K. G. et al, Nucl. Fusion 42, 1155 (2002)
- [4]. Markovic T. et al, 44th EPS Conference on Plasma Physics, P.5.140 (2017)
- [5]. Tukachinsky A. S. et al, Tech. Phys. Lett. 42, 1167 – 1169 (2016)
- [6]. Chu N. et al, Nucl. Fusion 58, 104004 (2018)
- [7]. Wang J. et al, Nucl. Fusion 60, 112012 (2020)
- [8]. Bulanin V.V. et al, Tech. Phys. Lett. 45, 1107 – 1110 (2019)

ДВУХЖИДКОСТНЫЕ МГД СИМУЛЯЦИИ ПИЛИНГ-БАЛЛОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

¹Курские Г.С., ¹Солоха В.В., ²Яшин А.Ю.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: vladimir.soloha@gmail.com

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.060

На сферическом токамаке Глобус-М2 [1] в текущий момент создаётся синтетическая диагностика доплеровской рефлектометрии [2]. Одной из задач синтетической диагностики является анализ филаментарных структур, образующихся при возбуждении пилинг-баллонной неустойчивости при работе в режиме улучшенного удержания. Предыдущие исследования показали, что симуляции развития пилинг-баллонной неустойчивости в приближении одножидкостной МГД, позволяют оценить распределение возмущения газокINETического давления, однако, отношение возмущений концентрации и температуры электронов и ионов остаётся неизвестным [3].

В данной работе описываются результаты двухжидкостного моделирования краевой плазмы токамака Глобус-М2 в конфигурации с одной нижней X-точкой. Симуляции проводились с помощью трёхмерного МГД кода реализованного с помощью фреймворка BOU++ [4]. Использование системы уравнений двухжидкостной МГД позволяет получить распределение возмущения концентрации электронов без предположений о стационарном профиле температуры. Полученное двухмерное возмущение концентрации в дальнейшем будет использовано для реализации синтетической диагностики.

Экспериментальные значения используемые для симуляций: ток плазмы I_p до 500 кА и тороидальное магнитное поле B_t до 1 Тл. Большой радиус камеры Глобус-М2 $R = 0.36$ м и малый радиус $a = 0.24$ м. В качестве начальных условий использовалась форма профилей концентрации электронов и температуры из данных диагностики томсоновского рассеяния (ТР) [5, 6]. С их помощью данных ТР был выполнен анализ устойчивости пилинг-баллонной моды для условий омического и дополнительного нагрева плазмы.

Предварительные результаты показывают, что для краевой плазмы токамака Глобус-М2 симуляции двухжидкостной системой уравнений МГД в линейном приближении предсказывают меньшие инкременты неустойчивости в экваториальной плоскости, чем симуляции одножидкостной системой уравнений МГД.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 18-72-10028. Эксперименты проведены на УНУ "Сферический токамак Глобус-М", входящей в состав ФЦКП "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях" (уникальный идентификатор проекта RFMEFI62119X0021).

Литература

- [1]. Minaev V.B. et al, 2017, Nucl. Fusion, 57 066047
- [2]. Bulanin, V.V. et al, 2011, Tech. Phys. Lett. 37, 340–343
- [3]. Solokha V. et al, 2018 J. Phys.: Conf. Ser., 1094, 012002
- [4]. Dudson B. et al, 2009, Computer Physics Communications, 180, 1467–1480
- [5]. Tolstyakov S. et al, 2006, Technical Physics, Vol. 51, No. 7, pp. 846–852
- [6]. Kurskiev G. et al, 2020, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, 963

ПРИМЕНЕНИЕ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЙНИЯ.

Курский Г.С.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: gleb.kurskiy@gmail.com

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.061

Диагностика томсоновского рассеяния лазерного излучения является надежным способом измерения локальных значений температуры и концентрации электронов в плазме токамаков и стеллараторов. Для регистрации сигналов рассеяния в системах, использующих фильтровые полихроматоры все большую популярность, приобретает подход, предполагающий запись подробной временной формы сигналов рассеяния θ, θ . Этот метод имеет ряд достоинств, к основным из которых относится удобство настройки и отладки системы, возможность разделение сигналов паразитно-рассеянного излучения и полезного сигнала рассеяния из плазмы, идентификация природы наблюдаемого сигнала (рассеяние на пылевых частицах, наводка). Возможность использования различных алгоритмов обработки записанных временных форм сигналов позволяет оптимизировать точность определения числа зарегистрированных фотоэлектронов и сделать достоверную оценку погрешности измерения θ, θ . При такой реализации системы формируется достаточно большой поток данных: диагностика, в которой реализован сбор света с 10 пространственных точек за 1 секунду будет формировать порядка 18000 страниц, содержащих 1024 временных отсчета. И здесь в полной мере поднимается вопрос о создании робастных методов, которые позволят обрабатывать большие массивы данных диагностики с целью предоставления достоверных результатов о температуре и плотности плазмы в режиме реального времени.

В докладе обсуждается возможность расчета интенсивности сигналов томсоновского рассеяния и оценка их погрешности с помощью нейронной сети, обученной на синтетических данных. Приводится сравнение точности с традиционными методами обработки, а также сравнение полученных значений температуры разными методами в плазменном эксперименте на токамака Глобус-М2.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект No 17-72-20076).

Литература

- [1]. G.S. Kurskiy, A.I.P. Chernakov, V.A. Solovey et al. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 963 (2020) 163734
- [2]. Е.А. Пурьга, С.В. Иваненко, А.А. Лизунов, и др. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 2, стр. 77-88
- [3]. N.S. Zhiltsov, G.S. Kurskiy, E.E. Mukhin et al. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 976 (2020) 164289
- [4]. J.H. Lee et al 2017 JINST 12 C12035 <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/12/C12035>

ВОЗМОЖНОСТИ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ НА УСТАНОВКЕ T-15МД

Субботин Г.Ф., Шелухин Д.А., Вершков В.А.

НИЦ “Курчатовский институт”, г. Москва, Россия, e-mail: subbotingf@gmail.com

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.062

Опыт исследования транспортных процессов в высокотемпературной плазме токамаков показывает, что недиффузионный перенос и турбулентность играют большую роль в переносе частиц и тепла в разряде. Для исследования турбулентных процессов в плазме применяются различные диагностики: зондирование плазмы пучком тяжелых ионов, активная рекомбинационная спектроскопия, рефлектометрия, зонды Ленгмюра и др. Рефлектометрия является активной диагностикой, использующей отражение от плазмы зондирующего сигнала в СВЧ диапазоне. Электромагнитная волна заданной частоты отражается от слоя плазмы, положение которого зависит от локальных значений электронной плотности, температуры и магнитного поля. Анализ отраженного сигнала позволяет судить о параметрах плазмы. Основной вклад в сигнал вносят возмущения в области плазмы вблизи критического слоя, что позволяет проводить измерения с высоким пространственным и временным разрешением. Современные СВЧ генераторы позволяют с высокой скоростью менять частоту зондирующего сигнала. Это дает возможность изменять частоту во время разряда и проводить измерения в различных областях плазменного шнура в течении одного разряда. Ранее были реализованы системы быстрого сканирования, которые позволяют проводить измерения профиля электронной плотности плазмы.

На установке T-15МД предполагается использование как рефлектометрической диагностики на постоянной частоте, так и системы с изменяемой частотой зондирующего сигнала во время разряда. Для определения оптимальных параметров планируемой системы, были произведены оценки положений области отражения сигнала диагностики для обыкновенной и необыкновенной волны в режиме с магнитными полями 1, 1.5 и 2 Т. Анализ показал, что при проведении измерений на обыкновенной волне основном рабочем режиме установки (2Т) доступной оказывается часть шнура со стороны высокого магнитного поля и часть градиентной области со стороны низкого магнитного поля. При этом существует область со стороны слабого магнитного поля, недоступная для наблюдения из-за наличия резонанса на электронной циклотронной частоте. Следует отметить, что проводить измерения со стороны слабого магнитного поля на обыкновенной волне в этой области будет возможно при условии, что ослабление сигнала за счет поглощения в электронно-циклотронном резонансе будет не велико. При использовании нижней отсечки необыкновенной волны для наблюдения доступна большая часть плазменного шнура. Так же при более низких значениях магнитного поля возможно проведение измерений с использованием верхней отсечки необыкновенной волны.

Предполагается использование 4 блоков антенн (3 со стороны низкого магнитного поля и 1 со стороны высокого магнитного поля), что позволит проводить как корреляционные измерения параметров турбулентности, так и измерения с быстрой перестройкой зондирующей частоты в нескольких измерительных диапазонах для измерения профиля электронной плотности. С использованием оборудования применявшегося ранее на установке T-10, систем управления и СВЧ генераторов возможно проводить измерения в диапазоне от 9 до 60 ГГц. В качестве одной из перспективных возможностей рефлектометрии на T15 можно так же рассматривать медленный сканирующий режим для определения спектров флуктуаций электронной плотности плазмы на различных радиальных позициях за короткий промежуток времени (десятки миллисекунд). Для этого в систему сбора данных включены 16-и битные АЦП с полосой 10 МГц.

ИСПЫТАНИЯ ОХЛАЖДАЕМЫХ МАКЕТОВ ВОЛЬФРАМОВЫХ МОДУЛЕЙ ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ ОБЛИЦОВКИ ДИВЕРТОРА КОМБИНИРОВАННЫМ ОБЛУЧЕНИЕМ МОЩНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ И СТАЦИОНАРНЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ

^{1,2}Будаев В.П., ¹Дедов А.В., ¹Федорович С.Д., ¹Карпов А.В., ^{1,2}Мартыненко Ю.В.,
¹Губкин М.К., ¹Лукашевский М.В., ¹Комов А.Т., ¹Захаренков А.В., ¹Варава А.Н.,
¹Лубенченко А.В., ¹Слива А.П., ¹Марченков А.Ю., ¹Васильев Г.Б., ¹Чан Куанг В.,
¹Рогозин К.А., ¹Коньков А.А., ¹Журавлев К.В., ¹Штелинг В.С., ¹Тупотилов И.А.

¹*Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия,
e-mail: budaev@mail.ru ,*

²*НИЦ “Курчатовский институт”, г. Москва, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.063

Для целей сооружения термоядерного реактора-токамака необходимо проводить исследования эрозии и эффектов взаимодействия плазма-стенка при стационарной мощной плазменно-пучковой нагрузке на компоненты теплозащитной облицовки камеры [1]. В работе проведены комбинированные испытания опытных макетов вольфрамовых модулей теплозащитной облицовки дивертора в стационарных плазменных потоках в условиях интенсивного дугообразования. Охлаждаемые опытные макеты изготовлены из вольфрамовых модулей с медной подложкой с водяным охлаждением. Комбинированные пучково-плазменные испытания опытных макетов вольфрамовых модулей теплозащитной облицовки дивертора проводились мощными электронными пучками в электронно-лучевой установке и затем стационарными плазменными потоками в плазменной установке ПЛМ [2]. На электронно-лучевой установке вольфрамовые модули облучались термоциклическими нагрузками до 50 МВт/м², аналогичными нагрузкам ЭЛМов в крупномасштабном токамаке. Эти модули затем облучались стационарной плазмой в плазменной установке ПЛМ с нагрузками до 1 МВт/м² в течение нескольких часов. После таких комбинированных испытаний проведен анализ повреждений поверхности опытных макетов вольфрамовых модулей методами оптической и электронной микроскопии, рентгеновской спектроскопии, определены характеристики эрозии и рекристаллизации вольфрамовой поверхности. Для генерации дуг на поверхности опытных макетов вольфрамовых модулей теплозащитной облицовки дивертора крупномасштабного токамака разработана система на основе мощного лазерного комплекса, тестирование этого стенда в плазменной установке ПЛМ показало возможность его использования для исследования эффектов плазменного экранирования поверхности в условиях интенсивного дугообразования. Проведены испытания системы охлаждения опытных макетов вольфрамовых модулей теплозащитной облицовки дивертора для испытаний в плазменной установке ПЛМ стационарными плазменными нагрузками. Плазменные и пучковые испытания выполнены при поддержке ГК «РОСАТОМ» проект 223 ЕОТП-УТП 774/158-Д, анализ стохастической кластеризации поверхности проведен при поддержке гранта РФФ 17-19-01469, оценки радиационных эффектов проведены при поддержке гранта РФФИ 19-29-02020.

Литература

- [1]. Будаев В.П. ВАНТ, сер. Термоядерный синтез. – 2015. – Т. 38. – № 4. – С. 5
[2]. Будаев В.П. и др. ВАНТ сер. Термоядерный синтез. – 2017. – Т. 40. – № 3. – С. 35

ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2 МЕТОДОМ ДОПЛЕРОВСКОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

¹Яшин А.Ю., ¹Буланин В.В., ¹Петров А.В., ¹Пономаренко А.М., ²Гусев В.К.,
²Курский Г.С., ²Минаев В.Б., ²Патров М.И., ²Петров Ю.В., ²Сахаров Н.В.

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: alex_yashin@list.ru

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.064

На сферическом токамаке Глобус-М2 [1] с использованием диагностики доплеровского обратного рассеяния [2] были проведены первые исследования временных зависимостей спектров турбулентности при переходе в режим улучшенного удержания. Для проведения исследований использовались два многочастотных доплеровских рефлектометра: четырёхчастотный рефлектометр с частотами зондирования 20, 29, 39 и 48 ГГц и шестичастотный с частотами 50, 55, 60, 65, 70, 75 ГГц. Зондирующая волна направлялась в плазму под углом θ к поверхности равного коэффициента преломления на границе плазмы с поляризацией, направленной вдоль магнитного поля (О-мода). Мощность рассеянного излучения пропорциональна в борновском приближении интенсивности рассеивающих флуктуаций плотности, что позволяет, в принципе, измерять амплитуду мелкомасштабных турбулентных колебаний плазмы. Многочастотное зондирование плазмы позволило определять параметры турбулентности для широкого диапазона радиусов и при существенно различающихся плазменных параметрах.

Исследование спектральных характеристик турбулентности плазмы при переходе к режиму улучшенного удержания проводилось на новом токамаке Глобус-М2. Магнитная конфигурация токамака с большим радиусом $R = 0.35$ м, малым радиусом $a = 0.22$ м и вытянутостью $k = 1.9$ имела одну Х-точку. Ионный тороидальный дрейф был направлен в сторону Х-точки. Дополнительный нагрев осуществлялся пучком нейтрального дейтерия в дейтериевую плазму. Исследования проводились в режимах с L-H переходом при следующих параметрах разряда: тороидальное магнитное поле $B_T = 0.7$ Тл, ток плазмы $I_p = 270 - 290$ кА, плотность плазмы $\langle n_e \rangle = (3 - 7) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Мощность пучка составляла 0.7 - 0.8 МВт при энергии атомов 28 кэВ. В разрядах с подобными параметрами в H-моде было зарегистрировано увеличение энергетического времени жизни более чем в три раза по сравнению временем жизни в токамаке Глобус-М при магнитном поле 0.4 Т при одинаковых параметрах пучка с той же геометрией вакуумной камеры [3].

Было зарегистрировано и исследовано подавление мелкомасштабной турбулентности плазмы. Получены сведения об эволюции спектров турбулентности. Важно, что эти сведения, полученные для различных областей разряда, указывают на периферийный характер подавления турбулентности.

Настоящая работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере науки по проекту №0784-2020-0020 с использованием Федерального центра коллективного пользования "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях" (проект RFMEFI62119X0021), включающего Уникальную научную установку "Сферический токамак Глобус-М".

Литература

- [1]. Minaev V.B. et al 2017 Nucl. Fusion 57 066047
- [2]. Bulanin V.V. et al 2011 Tech. Phys. Lett. 37 340–343
- [3]. Kurskiv G.S. et al 2019 Nucl. Fusion 59 066032

СВЧ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ ПЛАЗМЫ НА УСТАНОВКЕ "СМОЛА"

^{1,3}Бурдаков А.В., ^{1,2}Иванов И.А., ¹Инжеваткина А.А., ^{1,2}Поступаев В.В.,
¹Ровенских А.Ф., ^{1,2}Скляр В.Ф., ^{1,2}Сковородин Д.И., ^{1,2}Судников А.В.,
²Устюжанин В.О.

¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.065

Одной из важных задач для развития концепции управляемого термоядерного синтеза на основе открытых систем является снижение продольных потерь частиц в системе. В рамках решения данной задачи, а последнее время, предлагается множество подходов: многопробочное удержание, диамагнитное удержание, а также уменьшение потока вещества с использованием винтового магнитного поля. Следует отметить, что в настоящий момент времени экспериментально проверено только многопробочное удержание в импульсном режиме для системы с сильно-анизотропной функцией распределения электронов. Для решения задач по диамагнитному удержанию в ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск) создаётся установка КОТ (Компактный Осесимметричный Торонд). Исследования по винтовому удержанию проводятся на установке СМОЛА (Спиральная Магнитная Открытая Ловушка).

Магнитная система установки СМОЛА состоит из трёх частей: входного и выходного пробкотронов, а также секции с винтовым магнитным полем. Для создания плазмы на установке используется плазменная пушка, которая создаёт непрерывный плазменный столб по всей длине системы (с одной стороны плазма опирается на катод пушки, с другой — на плазмприёмник). Пушка и плазмприёмник располагаются во входном и выходном пробкотронах соответственно. Конструкция плазмприёмника является секционированной, с возможностью внешнего изменения электрического потенциала плазмы в системе.

Типичные параметры эксперимента: величина ведущего магнитного поля $B_z \approx 500$ Гс, глубина модуляции магнитного поля $R \sim 1$, плотность плазмы $n_e \approx 10^{13}$ см⁻³, величина радиального электрического поля $E_r \leq 50$ В / см, длительность инжекции $\tau \approx 500$ мс.

Для получения информации о плотности плазмы на установке используется несколько независимых диагностик, в том числе зондовые измерения и интерферометрия. Интерферометрическая схема выполнена по типу Маха-Цендера. В качестве источника зондирующего излучения выступает лампа обратной волны с рабочей частотой ~ 40 ГГц. Приёмником излучения является диод с барьером Шоттки, имеющий временное разрешение ~ 20 нс, с итоговым соотношением сигнал/шум в системе $\sim 10^3$. Ключевой модельной характеристикой для восстановления значения плотности в системе является определение формы профиля плотности вдоль измерительной хорды. Данная информация опосредованно получается исходя из распределения свечения плазменного шнура в оптическом диапазоне (свечение связано с возбуждёнными атомами рабочего вещества).

Итоговая чувствительность системы позволяет регистрировать плотность $\sim 5 \cdot 10^{11}$ см⁻³ (при гауссовском профиле плотности, шириной 10 см).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕЙТРАЛЬНОГО ГАЗА НА ПОТЕНЦИАЛ В РАСШИРИТЕЛЕ ОТКРЫТОЙ ЛОВУШКИ

Сковородин Д.И.

ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, e-mail: d.i.skovorodin@inp.nsk.su

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.066

Открытые магнитные ловушки для удержания плазмы с аксиальной симметрией являются одним из кандидатов для создания термоядерной системы, например источника нейтронов для материаловедческих целей [1]. Время жизни плазмы в открытых ловушках определяется продольными потерями тепла и частиц. Обычно плазма в открытой ловушке положительно заряжается так, чтобы поддерживать амбиполярность продольных потерь электронов и ионов. Потенциальный барьер, который удерживает горячие электроны распределен от центральной области ловушки вплоть до стенки, поэтому режим течения плазмы расширителе за пробкой влияет на удержание энергии в ловушке.

В предыдущих работах [4 – 6] для того, чтобы определить характер профиля потенциала за пробкой ловушки анализировалась динамика электронов в этой области. При этом вариации скорости потока ионов за пробкой для простоты не учитывались. Тем не менее, очевидно, что изменение скорости потока ионов, а, следовательно, и профиля плотности плазмы вдоль силовой линии приводит к изменению распределения потенциала и величины дебаевского скачка. В данной работе рассматривается влияние следующих эффектов: ускорение ионного потока электрическим полем и его торможение за счет перезарядки на остаточном газе.

В работе представлены результаты численного моделирования. Показано, что величины потенциала плазмы в расширителе и дебаевского скачка на поверхности приемника плазмы чрезвычайно чувствительны к вариациям скорости ионного потока. Учет ускорения ионов в расширителе амбиполярным полем приводит к существенному уменьшению величины скачка. Этот эффект благоприятен с точки зрения удержания энергии в ловушке, так как уменьшение электрического поля на стенке способствует уменьшению влияния вторичной электронной эмиссии. С другой стороны, скорость ионного потока может существенно уменьшаться из-за взаимодействия плазмы с нейтральным газом. В качестве примера такого процесса рассмотрена перезарядка ионов на нейтральном водороде. Показано, что перезарядка даже незначительной части потока ионов приводит к резкому увеличению дебаевского скачка на поверхности приемника плазмы.

Литература

- [1]. A.A. Ivanov, V.V. Prikhodko, *Plasma Phys. Control. Fusion*, 55, 1 (2013)
- [2]. Конкашбаев И.К., Ландман И.С., Улинич Ф.Р.// *ЖЭТФ*. 1978. Т. 74. Вып. 3. С. 956
- [3]. Мирнов В.В., Рютов Д.Д.// *Итоги науки и техники: физика плазмы*. 1988. Т. 8. С. 77
- [4]. Konkashbaev I.K., Landman I.S., Ulinich F.R.// *JETP*. 1978. V. 47. P. 501
- [5]. Ryutov D.D., *Fus. Sci. and Tech.*, 2005. V. 47. P. 148
- [6]. Skovorodin D.I., Beklemishev A.D.// *AIP Conf. Proc.* 2016. V.1771. P.030029

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ БЛАНКЕТА ДЛЯ РЕАКТОРА СИНТЕЗ-ДЕЛЕНИЕ НА ОСНОВЕ ТОКАМАКА

Гладуш Г.Г., Родионов Н.Б., Артемьев К.К., Виноградова А.В., Родионов Д.С.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Троицк, г. Москва, Россия, e-mail: gladush@triniti.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.067

В работе показано [1], что при раздельном дуальном размещении актинида (урана) и лития в blankets с теплоносителем-свинцом (уран в части модуля, ближней к плазме, а литий – в дальней от плазмы), существенно возрастает число делений (в 1,5 раза) и захватов (в 3,5 раз) нейтронов ураном на один поглощенный быстрый нейтрон от синтеза по сравнению с ТВЭЛ-конструкцией blankets. Планируется изготовить макет такого blankets и экспериментально исследовать работоспособность конструкции, ее параметры относительно прокачки свинца-теплоносителя и жидкого лития-производителя трития. В данной работе разработаны две конструкции blankets, создана конструкторская документация и изготовлены макеты из пластика на 3D-принтере.

На рисунке 1 (а) представлен макет с максимальным количеством входных и выходных трубок теплоносителя. Как видно из рисунка, blankets разделен плоскостью (стенкой) на две части. В части, где расположены входные и выходные трубки теплоносителя находится литий, а с противоположной стороны от стенки уран. Трубки, подводящие и отводящие жидкие металлы к задней стенке blankets, проходят через вакуумную камеру токамака внутри blankets. В blankets, также, расположены трубки с теплоносителем свинцом. На рисунке 1 (б) представлен blankets с минимальным количеством трубок, подводящих и отводящих жидкие металлы к blankets. В этом случае конструкция отличается только количеством входных трубок теплоносителя свинца.

С учетом опыта разработанных макетов будет разработана конструкторская и технологическая документация и создан модуль blankets из металла (титан, сталь) для экспериментальных испытаний на работоспособность.

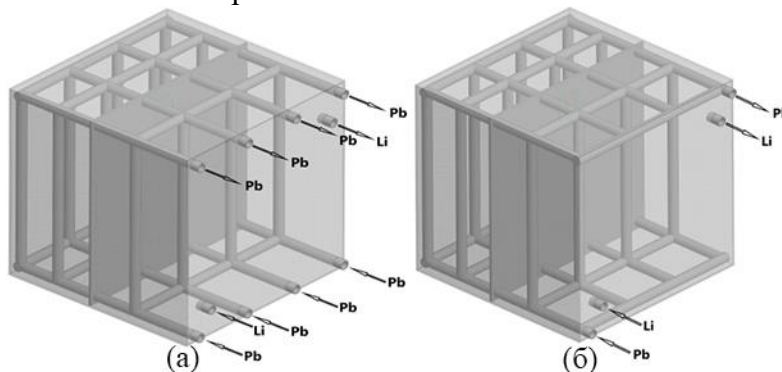


Рис. 1. (а) Макет blankets с максимальным количеством входных и выходных трубок теплоносителя; (б) Макет blankets с минимальным количеством входных и выходных трубок теплоносителя.

Работа выполнена в рамках реализации государственного контракта № Н.4с.241.09.20.1096 от 22 июня 2020 г.

Литература

- [1]. Мирнов С.В., Гладуш Г.Г., Гостев А.А., Лопаткин А.В., Лукаевич И.Б., Люблинский И.Е., ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2019, том 42, вып. 2, стр. 23-30.

СОЗДАНИЕ ИНФРАСТРУКТУРЫ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТОКАМАКОВ С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ НА БАЗЕ АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»

Родионов Н.Б., Ильин К.И., Романников А.Н., Дрягин С.Ю.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Троицк, г. Москва, Россия, e-mail: rodionovnb@gmail.com

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.068

Проведены работы по научно-техническому обоснованию систем для проекта реконструкции термоядерного комплекса ТСП на базе токамака типа «Игнитор». Разработаны технические требования к системам:

- энергетики и энергоснабжения;
- вакуумной;
- магнитной;
- водяного охлаждения;
- криогенному комплексу;
- дополнительного нагрева и пусковых диагностик.

Разработаны элементы тритиевого цикла в обеспечение работы токамака типа «Игнитор» в условиях наработки трития в DD реакции и возможных режимов с введением контролируемых доз трития из систем газонапуска (разработка технологических схем и спецификаций, сведения о потребляемых ресурсах, описание технологического процесса). Выполнено экспериментальное обоснование детритизации технологических газовых потоков тритиевого цикла. Проведено расчетно-теоретическое обоснование коэффициента воспроизводства трития и наработки ядерного топлива в тест модуле blankets.

Полученные в работе результаты направлены на создание инфраструктуры испытательного комплекса для перспективных токамаков с большим радиусом около 2 м и их элементов. Следующими этапами в рамках проекта реконструкции будут работы по созданию систем проектирования и специализируемых стендов, разработка методик экспериментальной верификации систем и подсистем инфраструктуры, обеспечивающей функционирование токамаков и участие в работах по выполнению эскизного и конструкторского проектирования.

Проект, наряду с созданным токамаком Т-15МД, станет вторым центром исследований по программе УТС, объединяющим научный и технический потенциал различных коллективов страны, обеспечивающих широкий спектр исследований, а также обеспечат подготовку кадров для эксплуатации токамака ИТЭР и будущих российских токамаков.



Рисунок 1. Инфраструктура токамака типа «Игнитор»

Работа выполнена в рамках реализации государственного контракта № Н.4с.241.09.20.1096 от 22 июня 2020 г.

ТОРМОЖЕНИЕ НЕЙТРАЛЬНОГО ПУЧКА И ГЕНЕРАЦИЯ ТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ВTR

Длугач Е.Д., Кутеев Б.В.

НИЦ “Курчатовский институт”, г. Москва, Россия, e-mail: edlougach@gmail.com

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.069

Инжекция нейтральных пучков (NBI) обеспечивает максимальную эффективность генерации тока среди всех систем нагрева и поддержания тока (CD). Для достижения оптимальных режимов работы плазмы и максимального эффекта от инъекции пучков при заданной мощности необходимо согласовать энергию атомов и геометрию прицеливания (координаты тангенциальной точки и наклон оси пучка) с магнитной конфигурацией плазмы, а также с профилями ее температуры и плотности. На распределение выделения быстрых ионов в плазме сильно влияют размер и форма пучка (в пространстве и по углу), особенно если пучок не является тонким в сравнении с поперечным сечением плазмы. Размеры пучка и его внутренняя структура задают профили генерации тока, поскольку мгновенный ток быстрых ионов и результирующий ток от пучка зависят от объемного распределения точек ионизации в плазме и от направления скоростей ионов по отношению к магнитному полю.

Возможности управлять профилем тока в плазме пучками атомов, в частности при их внеосевой инъекции, интересны с точки зрения стационарной работы термоядерных источников нейтронов (ТИН). Быстрые атомы могут обеспечить нагрев плазмы, подпитку топливом, безындукционную генерацию тока и возможность управления профилем тока в плазме ТИН, как правило, более компактных по сравнению с классическими токамаками. Для генерации нейтронов наиболее привлекательны реакции синтеза при замедлении ионов в плазме. Термоядерный *синтез на пучке* будет основным источником нейтронов в токамаках ТИН, поскольку реакции на высокоэнергетических «хвостах» вносят наибольший вклад в скорость генерации нейтронов. Это предъявляет особые требования к функции распределения быстрых частиц, а именно к относительной доле горячих ионов в спектре.

Код ВTR (*Beam Transmission with Re-ionization*), который много лет используется для проектирования и анализа нейтральных инжекторов [1], использован для расчета захвата инжектируемого пучка в плазме, его ионизации и термализации быстрых ионов. Магнитная конфигурация плазмы и кинетические профили задаются аналитически; предполагается, что инжектируемый пучок не вносит возмущение в плазменную мишень. Благодаря высокой статистике моделей ВTR, проникновение пучка в плазму и распределение ионов в объеме и по скоростям моделируются с высокой точностью. С применением классических аналитических формул для замедления ионов в плазме [2] рассчитываются функции распределения быстрых ионов по энергии и сравниваются для различных параметров пучково-плазменной системы. Получены радиальные профили тока от пучка, сделаны оценки скорости пучкового синтеза и общего выхода нейтронов. Анализ объемного распределения ионизации пучка и эффективности генерации тока подтверждает исходное предположение о чувствительности тока к размерам и форме пучка и к геометрии прицеливания. При фиксированной энергии атомов общая эффективность генерации тока различается в широких пределах, влияя на оптимальное *окно параметров* системы. Другим важным результатом данного подхода является тот факт, что внеосевая инъекция в целом *менее эффективна* с точки зрения генерации тока, чем инъекция вдоль оси плазмы. Наконец, для внеосевой инъекции наблюдается более *сильная зависимость* результирующего тока от малых изменений входных параметров, чем для осевой.

Работа поддержана НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия.

Литература

- [1]. E.D. Dlugach, ВTR webpage (2010), URL: <https://sites.google.com/site/btrcode/>
 [2]. J.Wesson, *Tokamaks*, 4th Edition, Oxford: Oxford University Press, 2011

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ СОЗДАНИЯ ВИХРЕВОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТОКАМАКА MERHIST-0

Воробьёв Г.М., Ганин С.А., Ефимов Н.Е., Крат С.А., Курнаев В.А., Пришвицын А.С.

НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия, e-mail: stas.ganin.97@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.070

Применение центрального индуктора для создания вихревого магнитного поля и создания плазменного шнура с текущим по нему током – основной принцип генерации плазмы в токамаках. При создании вихревого магнитного поля при помощи индуктора внутри разрядной камеры в области горения разряда образуется вертикальное магнитное поле, которое необходимо компенсировать, для чего в современных установках используются управляющие катушки полоидального поля, которые создают вертикальные поля, компенсирующие поле от индуктора. Управление независимыми полоидальными управляющими катушками требует сложной и дорогостоящей системы управления, датчиков магнитного поля, системы контроля индуктора.

В условиях малой учебной установки – учебно-демонстрационного токамака MERHIST-0 было предложено и реализовано альтернативное решение проблем компенсации вертикального магнитного поля индуктора. Ряд катушек полоидального поля были подключены последовательно в электрическую цепь индуктора таким образом, что их поля компенсировали бы вертикальное поле от индуктора в области ожидаемого горения плазмы. За счёт последовательного соединения элементов цепи индуктор-катушки, суммарно названной трансформаторной системой токамака, возможно было отказаться от сложной и дорогой системы питания и управления независимыми катушками.

Для обеспечения компенсации вертикального поля конфигурация трансформаторных катушек, а именно их положение, количество, количество витков в каждой из катушек были рассчитаны таким образом, что суммарное вертикальное магнитное поле от них и индуктора в области горения разряда было бы минимальным.

Из-за сложной геометрии разрядной камеры, влияющей на пространственно-временное распределение магнитного поля, создаваемого трансформаторной системой внутри камеры, полное численное решение задачи оптимизации трансформаторной системы представлялось слишком ресурсозатратным. По этой причине были проведены экспериментальные работы по оптимизации количества витков в трансформаторных катушках. Для этого проводились экспериментальные измерения пространственно-временного распределения магнитного поля внутри разрядной камеры для различного количества витков в трансформаторных катушках, варьирующихся относительно оптимальных значений для расчёта в нулевом приближении стационарного магнитного поля без разрядной камеры.

В работе представлены расчётные и экспериментальные результаты оптимизации системы создания вихревого магнитного поля. Показаны оптимальные конфигурации трансформаторной системы для нескольких типов оптимизации распределения магнитного поля в разрядной камере.

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ ВИНТОВОГО ТОРОИДАЛЬНОГО СОЛЕНоиДА ТОКАМАКА MERHIST-0

Булгадарян Д.Г., Виницкий Е.А., Воробьёв Г.М., Ефимов Н.Е., Крат С.А.,
Курнаев В.А., Пришвицын А.С.

НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия, e-mail: egor.vinitsky@gmail.com

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.071

Для токамака MERHIST-0 предложена винтовая конфигурация соленоида тороидального магнитного поля. Конфигурация магнитного поля, создаваемого таким соленоидом, позволяет уменьшить рассеянные поля токоподводов, упростить электрическую схему по сравнению с использованием отдельных тороидальных катушек и гарантирует согласованную работу каждого сегмента соленоида. Для такой тороидальной катушки требуется обеспечить компенсацию полоидального магнитного поля внутри камеры, которое возникает в результате наклона витков тороидальной обмотки.

Возможным методом такой компенсации является оптимизация геометрии витков соленоида, а именно распределения угла наклона витков соленоида по их длине. Помимо компенсации рассеянных полей, задача выбора формы геометрии катушек связана также с уменьшением сил, опрокидывающих моментом, действующих на них.

В представленной работе проводилась оптимизация геометрии витков винтового тороидального соленоида токамака MERHIST-0. Геометрия оптимизировалась итерационным методом. На нулевом шаге форма полоидального сечения рассчитывалась, исходя из классического решения для геометрии безмоментных катушек [1], считая геометрию соленоида идеально проводящей тороидальной поверхностью с током, текущим в полоидальном направлении. Для нахождения распределения угла наклона витков по их длине, в ток, протекающий по тороидальной поверхности соленоида с полоидальным сечением, соответствующим условию безмоментности, вводилась тороидальная координата тока, пропорциональная наклону катушки, и находилось такое распределение тороидального тока по полоидальному сечению, которое не создавало бы внутри тороидальной поверхности рассеянного поля [2]. На первом и последующих шагах, форма полоидального сечения находилась, исходя из распределения тока по тороидальной поверхности, полученной на предыдущем шаге моделирования, а распределение тока по длине витка исходя из уточнённой формы полоидального сечения [3].

На основе решений, полученных для идеальной тороидальной поверхности, была спроектирована геометрия винтового тороидального соленоида с учётом ограничений, вносимых геометрией разрядной камеры MERHIST-0. Путём моделирования в программном пакете COMSOL было оценено влияние отклонения геометрии соленоида от идеально проводящей тороидальной поверхности на величину и распределение рассеянных полей в области ожидаемого горения разряда в токамаке. Были определены ожидаемые величины и пространственные распределения соотношений поперечного и тороидального магнитных полей в токамаке и гофрировки тороидального поля.

Литература

- [1]. Шафранов В.Д. // ЖТФ, 1972.т.42, с. 1785
- [2]. Захаров Л.Е. // ЖТФ, 1975, т. 45, с. 1049
- [3]. А.Н. Левицкий, О.В. Федоров, С.В. Цаун, К.Г. Шаховец, П.Н Юшманов – Разработка системы тороидального магнитного поля в сферическом токамаке GLOBUS. Препринт ИАЭ-546/7, 1992

СПОНТАННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ ПЕРЕХОДЫ ПРИ ПРЕДЕЛЬНЫХ МОЩНОСТЯХ ЭЦР-НАГРЕВА ПЛАЗМЫ В СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М

^{1,2}Васильков Д.Г., ¹Гребенщиков С.Е., ¹Гришина И.А., ¹Мещеряков А.И.,
^{1,2}Петрова М.Н., ¹Харчев Н.К.

¹*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: lhdld81@mail.ru*

²*МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.072

Рассматриваются процессы, происходящие в бестоковой плазме стелларатора Л-2М, создаваемой с помощью электронно-циклотронного резонансного нагрева немодулированным импульсом СВЧ с мощностью от 0,3 до 1 МВт [1], что составляет от 1 до $3 \cdot 10^{-13}$ Вт на частицу.

При превышении пороговой мощности ЭЦР-нагрева (~ 200 кВт) в разрядах начинают появляться спонтанные переходные процессы, которые могут быть описаны в рамках магнитогидродинамических пилинг-мод [2]. При дальнейшем увеличении мощности нагрева до 400-500 кВт переходы сопровождаются ростом плотности и энергии плазмы, а также всплесками излучения в оптическом и рентгеновском диапазонах, а также падением температуры. Максимальный скачкообразный рост энергии и плотности отмечен в импульсе непосредственно после боронизации стенок вакуумной камеры. Обнаружено, что рост плотности и энергии, как и охлаждение плазмы связано с увеличением её взаимодействия со стенками камеры.

При дальнейшем увеличении мощности нагрева разряд носит нестационарный характер, вследствие чего при мощностях порядка 1 МВт возникла необходимость введения в плазму графитовой диафрагмы. В подобном режиме основные параметры плазмы стабилизировались, но существенно уменьшилась энергия плазмы; нестационарные процессы наблюдаются на сигналах излучения в оптическом и рентгеновском диапазонах, а также на сигнале электрического потенциала на диафрагме. Существенным является то, что основная тепловая нагрузка приходится на узкий винтообразный участок присепаратрисной области стеной вакуумной камеры, площадью около $0,3 \text{ м}^2$, на которой плотность нагрузки достигает

$1,5 \text{ МВт/м}^2$ При данных мощностях нагрева на присепаратрисном винтовом участке вакуумной камеры и на близких к плазме элементах установки развиваются униполярные микродуги. Ранее также наблюдались высокочастотные возмущения плотности в краевой области плазмы, по-видимому связанные с возникновением на стенках вакуумной камеры дуговых разрядов [3].

Энергия плазмы при высоких мощностях нагрева соответствует скейлингу Л-2М [4] в импульсах до переходов или без переходов, после же них энергия и энергетическое время жизни снижаются на 5-15 % по сравнению со скейлингом. При мощности нагрева 500 кВт возможно получить переходы, при которых, несмотря на существенное охлаждение плазмы из-за кратковременного поступления примесей, за счет роста средней плотности в 1,5 раза удалось получить в динамике прирост энергии на 25%.

Литература

- [1]. Kharchev N.K., Batanov G.M., Berezhetskii M.S. et al. Plasma and Fusion Research. 2011. V. 6. 2402142
- [2]. Shchepetov S.V., Kholnov Yu.V., Fedyanin O.I. et al. Plasma Phys. Control. Fusion. 2008. V. 50. 045001
- [3]. Батанов Г.М., Борзосеков В.Д., Колик Л.В. и др. Физика плазмы. 2020. Т. 46. С. 867
- [4]. Федянин О.И., Акулина Д.К., Батанов Г.М. и др. Физика плазмы. 2007. Т. 33. С.880

МАССИВНАЯ ГАЗОВАЯ ИНЖЕКЦИЯ В ТОКАМАКИ Т-10 И Т-15МД

¹Дремин М.М., ²Новоходская Е.О., ²Капралов В.Г., ²Богданов А.М., ²Кривошеев А.Н.,
¹Крылов С.В., ²Соловьёв К.В., ¹Трубников А.С.

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: Dremin_MM@nrcki.ru

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: v.kapralov@spbstu.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.073

Массивная газовая инжекция является одним из направлений исследования срывов плазменного разряда и пучков убегающих электронов. Такая инжекция пригодна как для инициирования срыва и формирования пучков убегающих электронов, так и их предотвращения или смягчения срыва и подавления пучков убегающих электронов [1].

Эксперименты по массивной газовой инжекции проводились на токамаке Т-10 с помощью как стационарного, так и подвижного газовых клапанов [2]. Еще одной техникой, которая была использована в экспериментах на токамаке Т-10, являлся инжектор топливных макрочастиц с системой хордовой инжекции [3, 4].

Результаты экспериментов на токамаке Т-10 показали, что приближение подвижного клапана к границе плазменного шнура приводит к более интенсивным тепловому и токовому срывам. В токовом срыве присутствует зависимость скорости спада тока от положения клапана. Была обнаружена возможность перевода токового срыва из медленного в быстрый с помощью массивной газовой инжекции во время срыва. На основании этих экспериментов была предложена и конфигурации техники для газовой инжекции в токамак Т-15МД.

Особенностью комплекса инжекции на токамаке Т-15МД будет его расположении в одном сечении, что позволит расположить часть вспомогательной и регистрирующей аппаратуры в этом же сечении для обеспечения различных вариантов инжекции. В отличие от токамака Т-10, подвижный клапан на токамаке Т-15МД планируется к установке в верхний вертикальный порт. Наличие модуля газоподготовки обеспечит проведение экспериментов со смесями газов. Запуск токамака в диверторном режиме позволит проводить исследования по газовой инжекции в область дивертора и Х-точки с целью формирования режимов с отрывом.

Возможности комплекса инжекции на токамаке Т-15МД позволят изучать сценарии оптимального гашения плазмы, включая предотвращение формирования и подавление сформировавшихся пучков убегающих электронов.

Моделирование прошедших экспериментов на токамаке Т-10 и предстоящих на токамаке Т-15МД выполнено с помощью кода АСТРА [5]. В моделировании использована возможность добавления в код до трех вариантов примеси. За счет подбора источников примеси и коэффициентов переноса моделируется развитие теплового срыва.

Авторы благодарят коллективы установок Т-10 и Т-15МД за предоставленные данные и поддержку.

Литература

- [1]. Dremin M M et al., Problems of Atomic Science and Tech., Ser. Th. Fusion, 2012 , 4, 58
- [2]. Kapralov V.G. et al., Journal of Physics: Conf. Series, 2017, 907, 1, 012010.
- [3]. Ryzhakov D.V. et al. Journal of Physics: Conference Series 2017. T. 907. № 1. 012004
- [4]. Egorov S.M. et al. "Proc 13 Int Conf Plasma Phys Controlled Nucl Fusion Res" 1991, 599
- [5]. Pereversev G.V. and Yushmanov P.N., Preprint IPP 5/98, 2002

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Капралов В.Г., Кривошеев А.Н., Богданов А.М., Новоходская О.Е., Соловьёв К.В.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: v.kapralov@spbstu.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.074

Современные плазменные установки предъявляют все более высокие требования к системам управления плазмой [1]. Следует отметить дополнительные сложности в управлении крупными реакторными установками связанные с меньшим количеством доступных диагностик как из-за более прикладного характера систем, подобных ТИН, так и высоких нейтронных нагрузок, которые выдерживают не все диагностики, применяемые на исследовательских установках. Другой проблемой является уменьшение отношения мощности активных систем управления, например, дополнительного нагрева плазмы, к запасенной энергии в плазменной установке, что требует более раннего реагирования системы управления, если возникает угроза отклонения параметров разряда от заданного режима.

В докладе рассматриваются варианты расчета транспортных коэффициентов в режиме реального времени. Решение обратной задачи для уравнений переноса заменяется на их аппроксимацию с помощью нейронной сети. В общем случае это приводит к снижению точности решения, но существенно сокращает время расчета, делая доступным его применение в режиме реального времени и включение его результатов в контур управления установкой. Наряду с непосредственно измеряемыми параметрами, становится возможным в управлении установкой использовать и расчетные величины, например, коэффициенты переноса.

Другим направлением применения нейронных сетей в исследовании процессов переноса является их использование в моделировании [2]. Моделирование с применением мелкочаеистых сеток и неявных методов решения уравнений требует существенно большего процессорного времени, чем решение с помощью нейронной сети. Поэтому нейронные сети могут обеспечить предварительный перебор и поиск вариантов моделирования в полном объеме, что существенно ускоряет получение результатов.

Нейронными сетями не исчерпываются возможности применения машинного обучения в изучении процессов переноса. В докладе также рассматривается применение символьной регрессии, основанной на эволюционных алгоритмах. Символьная регрессия позволяет подобрать функциональный вид скейлингов для моделирования, как на основании экспериментальных данных, так и по результатам решения обратной задачи для уравнений переноса.

Настоящая работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере науки по проекту №0784-2020-0020 с использованием ФЦКП "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях" (проект RFMEFI62119X0021), включающего УНУ "Сферический токамак Глобус-М".

Литература

- [1]. Dremin M.M. et al., Problems of Atomic Science and Tech., Ser. Th. Fusion, 2012, **4**, 58
- [2]. Kapralov V.G. et al., Journal of Physics: Conf. Series, 2017, **907**, 1, 012027

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДСКАЗАНИЯ СРЫВА В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА С ПРИМЕНЕНИЕМ СВЁРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Капралов В.Г., Богданов А.М., Новоходская О.Е., Соловьев К.В., Кривошеев А.Н.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: v.kapralov@spbstu.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.075

В докладе представлено развитие следящей системы для управления гашением плазменного разряда. Для запуска системы предотвращения и смягчения срыва необходимо предсказать его приближение с достаточным упреждением [1, 2]. Для этого необходимо в течение всего разряда вырабатывать сигнал вероятности срыва через определенный временной промежуток и при превышении порогового значения вероятности формировать триггер запуска системы гашения плазменного разряда.

В настоящее время ведется разработка системы массивной газовой инжекции с подвижным клапаном, для активации которого требуется время около 4 мс. Это требует предсказания срыва плазмы с упреждением не менее 5 мс.

Первый подготовительный этап включает отбор измеряемых сигналов и расчетных величин, которые будут использоваться в реальном времени для вычисления вероятности срыва через заданное время [3, 4]. Сначала определяются доступные для измерения в реальном времени сигналы установки и расчетные параметры. Затем выполняется корреляционный анализ с тем, чтобы выявить сильно коррелирующие величины и оставить в формируемом наборе только одну из них.

Следующий этап включает выбор топологии нейронной сети. В докладе предлагается многослойная архитектура, состоящая из двух свёрточных по времени слоев и последующим персептроном. Предложенная топология одновременно обеспечивает сжатие информации и подавление рассогласований на входных слоях.

После выбора набора сигналов и топологии нейронной сети выполняется формирование набора обучающих примеров. По обучающим примерам происходит настройка параметров сети и ее весовых коэффициентов. Обучение занимает длительное время, но во время применения нейронной сети результат можно получать в режиме реального времени. Для дополнительного ускорения вычислений применяются алгоритмы с усеченным временем вычислений.

Разработанный программный комплекс состоит из нескольких блоков. Один блок подготавливает обучающие примеры по архивным данным. Другой блок реализует собственно нейронную сеть описанной топологии. Третий блок обеспечивает обучение и верификацию нейронной сети.

В итоге предложена методика применения сверточной нейронной сети для решения задачи предсказания срыва плазменного разряда. Кроме того, формируемый сигнал вероятности срыва можно использовать и для других целей, например, формирования сигналов готовности для другого оборудования или управления его положением для защиты от тепловых или ионизирующих излучений

Настоящая работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере науки по проекту №0784-2020-0020 с использованием ФЦКП "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях" (проект RFMEFI62119X0021), включающего УНУ "Сферический токамак Глобус-М".

Литература

- [1]. Kapralov V.G. et al., Journal of Physics: Conf. Series, 2017, **907**, 1, 012010
- [2]. Dremine M M et al., Problems of Atomic Science and Tech., Ser. Th. Fusion, 2012, **4**, 58
- [3]. Kapralov V.G. et al., Journal of Physics: Conf. Series, 2017, **907**, 1, 012027
- [4]. Gusev V.R. et. al., Proc of the 21st IAEA FEC. 2006, **16**, 21

**ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ
«ИНЕРЦИАЛЬНЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ»**

**SECTION
«INERTIAL FUSION»**

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С УЧЕТОМ РЕЗОНАНСНОГО МЕХАНИЗМА И ГЕНЕРАЦИИ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАЗМЕ С РАЗМЕРОМ ВОЗНИКАЮЩИМ ПРИ ЗАЖИГАНИИ ТЕРМОЯДЕРНОЙ МИШЕНИ

Демченко Н.Н.

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: demchenkonn@lebedev.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.076

Рассмотрена модель резонансного поглощения лазерного излучения в плазме с учетом деформации профиля плотности пондеромоторной силой. Рассмотрен механизм линейной трансформации лазерного излучения в плазменные волны при резонансном поглощении. Для описания генерации быстрых электронов плазменными волнами использовалось уравнение квазилинейной диффузии электронной функции распределения в плазменном поле. Получены оценочные формулы для расчета доли энергии, поглощенной за счет резонансного механизма, а также для расчета энергии быстрых электронов. Эти формулы использованы в двумерной гидродинамической программе ATLANT-HE [1]. Проведены расчеты гидродинамики плазмы и поглощения лазерного излучения для условий эксперимента на установке NIF при мощности излучения 30 ТВт и длительности импульса 7.5 нс по основанию [2]. В эксперименте плоская СН-мишень облучалась частью пучков установки NIF. Плазма имела пространственные размеры, которые возникают при облучении сферической мишени, предназначенной для зажигания термоядерной реакции. Расчеты показали, что резонансный механизм поглощения приводит к генерации быстрых электронов с энергией масштаба 40-80 кэВ. Энергия, переносимая быстрыми электронами, составляет величину масштаба (1 ÷ 3)% от лазерной энергии [3]. Эти результаты оказались близкими к результатам, полученным в эксперименте.

Если считать, что основным механизмом генерации быстрых электронов является механизм резонансного поглощения, то результаты эксперимента с плоской мишенью нельзя переносить на случай сферической мишени. Резонансный механизм сильно зависит от углов падения излучения на плазму, и в случае сферической мишени только малая доля потока лазерного излучения будет иметь условия взаимодействия близкие к случаю плоской мишени. Это представляется важным для выбора режимов облучения и состава лазерных мишеней, предназначенных для зажигания термоядерной реакции, так как существуют жесткие ограничения на предварительный прогрев мишени быстрыми электронами.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-11-10174).

Литература

- [1]. I.G. Lebo, N.N. Demchenko, A.B. Isakov, et al., *Laser Part. Beams*, **22**, 267 (2004)
- [2]. M.J. Rosenberg, A.A. Solodov, J.E. Myatt et al., *Phys. Rev. Lett.*, **120**, 055001 (2018)
- [3]. Н.Н. Демченко, *ЖЭТФ*, т. 157, с. 1 (2020)

УДАРНЫЕ ВОЛНЫ С ГИГАБАРНЫМ УРОВНЕМ ДАВЛЕНИЯ, ИНИЦИИРУЕМЫЕ ПОТОКОМ ЛАЗЕРНО-УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

¹Вергунова Г.А., ¹Гуськов С.Ю., ²Зарецкий Н.П., ³Змитренко Н.В., ^{1,3}Кучугов П.А.,
¹Яхин Р.А.

¹*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия*

²*НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия*

³*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. r*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.077

Воздействие пучка релятивистских лазерно-ускоренных быстрых электронов на твердое вещество обеспечивает возможность генерации мощной ударной волны с давлением в несколько гигабар [1], значительно превышающим предельные значения, соответствующие воздействию непосредственно лазерного излучения. Тем самым, появляется возможность перехода исследований уравнения состояния вещества в лабораторных условиях на новый гигабарный уровень давлений, что представляет значительный интерес для широкого круга задач.

В работе на основе численного моделирования исследуется влияние на характеристики ударной волны интенсивности падающего потока быстрых электронов, их спектра и начальной энергии, а также материала мишени. Установлен эффект сильного сжатия вещества в периферической области ударной волны до плотностей, в несколько раз превосходящих плотность на её фронте, за счёт радиационного охлаждения.

В результате проведённых исследований установлены расчётно-обоснованные значения энергии лазерного импульса, способного обеспечить генерацию ударной волны с давлением, превышающим гигабарный уровень, характер распространения которой отвечает требованиям эксперимента по исследованию уравнения состояния вещества.

Литература

[1]. Gus'kov S., Ribeyre X., Touati M., et al., PRL, 109, 255004, 2012

ИЗЛУЧЕНИЕ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ВОЛН ПРИ НАКЛОННОМ ПАДЕНИИ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА НА ГРАНИЦУ РАЗРЕЖЕННОЙ ПЛАЗМЫ

Фролов А.А.

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: frolova@lebedev.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.078

Построена теория генерации терагерцового (ТГц) излучения при падении s -поляризованного лазерного импульса на полугораниченную плазму, плотность которой значительно меньше критического значения. Исследованы угловые, спектральные и энергетические характеристики ТГц импульса в зависимости от угла падения и длительности лазерного излучения. Показано, что энергия ТГц сигнала максимальна при падении лазерного импульса под скользящим углом, когда имеет место эффект полного отражения лазерного излучения от границы плазмы [1].

Рассмотрена задача о наклонном падении s -поляризованного лазерного импульса на границу разреженной плазмы, занимающей полупространство. Показано, что даже при плотностях плазмы значительно меньше критического значения возможно полное отражение лазерного излучения при скользящем падении. Установлено, что при падении под углом полного отражения электрическое поле лазерного излучения в плазме имеет максимальное значение, а перенос энергии в этом случае происходит только вдоль границы. На основе уравнений Максвелла, усредненных по высокочастотным колебаниям, и уравнения движения для электронов плазмы с учетом пондеромоторного воздействия лазерного излучения рассмотрено возбуждение ТГц полей в плазме и в вакууме. Изучены физические характеристики ТГц излучения в вакууме и показано, что оно распространяется в направлении лазерного импульса, отраженного от границы плазмы. Исследован спектр ТГц излучения и показано, что он существенно зависит от угла падения, плотности электронов плазмы и длительности лазерного излучения. При малых углах падения в спектре излучения присутствует спектральная линия вблизи плазменной частоты, если длительность лазерного импульса τ сравнима с обратной плазменной частотой. При увеличении угла падения линия на плазменной частоте постепенно исчезает и когда τ заметно превышает период плазменных колебаний, то появляется широкий максимум на частоте сопоставимой с $1/\tau$ - обратной длительностью лазерного импульса. Установлено, что высота этого спектрального максимума имеет наибольшую величину, когда имеет место эффект полного отражения лазерного излучения. Интегрированием по спектру вычислена полная плотность энергии (флюенс) ТГц излучения и показано, что она имеет максимальное значение при падении лазерного импульса на плазму под углом полного отражения. Обсуждаются условия применимости представленной теории и приводятся оценки для характеристик ТГц излучения применительно к условиям современных лазерно-плазменных экспериментов. Полученные оценки свидетельствуют о возможности получения высокоинтенсивных ТГц импульсов под действием s -поляризованного лазерного излучения при скользящих углах падения, когда имеет место эффект полного отражения.

Литература

- [1]. Frolov A. A., Plasma Phys. Control. Fusion, 2020, V. 62, P. 0950020.

КУМУЛЯЦИИ ЭНЕРГИИ В ТРЕХКАСКАДНОЙ СЛОИСТОЙ СИСТЕМЕ

Пономарев И.В., Долголева Г.В.

МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, e-mail: wingof17@mail.ru, dolgg@list.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.079

В докладе рассматривается аналитический метод построения решений в задачах математического моделирования движения слоистых систем. Такие системы исследовались в связи с кумуляцией энергии [1] и, в частности, для осуществления управляемого термоядерного синтеза [2]. Слоистые системы - это конструкции из тонких (относительно своих линейных размеров) плоских, цилиндрических или сферических слоев, вложенных друг в друга. Движение их возникает при мгновенном или распределенном по времени вложении энергии в некоторые из слоев. Назначение и подбор слоев состоит в организации кумуляции доли вложенной энергии в геометрический центр системы. Эффективность кумуляции оценивается по величине этой доли энергии.

Простейший вариант слоистой системы - это три слоя: внутренний и двух соседних по отношению к нему (однокаскадная система). Энерговложение происходит во внутренний слой.

Более сложные системы (двухкаскадные, трехкаскадные) строятся из однокаскадной системы добавлением слоев, разделенных зазорами. Но в более сложных системах энерговложение происходит уже в каждом из слоев.

Цель данной работы рассмотрение кумуляции в трехкаскадной системе. Энерговложение начинается с внешнего каскада. Во внутренних каскадах начинает осуществляться в тот момент, когда к нему подлетает соседний, внешний каскад.

При вложении энергии (как правило) в средний слой начинается разлет окружающих его слоев. Эти слои получают в основном кинетическую энергию. Из законов сохранения массы, импульса и энергии при определенных предположениях находятся средние скорости этих слоев как функции пройденного пути.

Конечной целью исследований является - определение величины кумулирующейся энергии и выявление ее зависимости от параметров конкретной системы и способов энерговложения, исследование преимуществ трехкаскадной системы в сравнении с однокаскадной и двухкаскадной системами.

Литература

- [1]. Забабахин Е.И., Забабахин И.Е. Явления неограниченной кумуляции // М.: Наука, 1978
- [2]. Долголева Г.В., Забродин А.В. Кумуляция энергии в слоистых системах и реализация безударного сжатия // М.: Физматлит, 2004, 71 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЛАЗМЫ В УСТАНОВКАХ С ПЛАЗМЕННЫМ ФОКУСОМ

Ананьев С.С., Суслин С.В

НИИЦ “Курчатовский институт”, г. Москва, Россия, e-mail: suslin_sv@nrcki.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.080

В работе излагается подход к численному моделированию аксиального плазменного потока в плазмофокусных установках в рамках двумерной одножидкостной МГД-модели. Ранее, используемая МГД-модель хорошо зарекомендовала себя при моделировании движения токнесущей плазменной оболочки (ТПО) до образования плазменного фокуса [1], в том числе для таких газов, как дейтерий, неон, аргон и дейтерий-ксеноновая смесь [2]. В данной работе, та же модель была применена к процессу распространения плазменной струи. Поскольку в рамках используемых приближений, невозможно достоверно моделировать динамику плотного пинча, прямое продолжение моделирование разряда после образования пинча, в рамках данной модели, не может быть реализовано. В связи с этим необходимо корректно установить начальные условия для моделирования распространения плазменного потока.

В данной работе было проведено моделирование динамики плазменного потока в диапазоне начальных условий, полученных из моделирования сжатия ТПО и экспериментальных измерений. В связи с тем, что возможности измерения вблизи плотного пинча весьма ограничены, была поставлена и решена обратная задача восстановления начальной скорости потока по экспериментальным наблюдениям за его динамикой на удалении 15-95 см, опубликованным в литературе. Полученные значения сравнивались с прямыми измерениями в прианодной области ($0,5 - 1,0 \cdot 10^7$ см/с) [3] и были использованы в дальнейшем моделировании.

Предложенный подход был применен для моделирования плазменных потоков на установках ПФ-3 и КПФ-4. Полученные результаты демонстрируют хорошее соответствие с экспериментальными измерениями скорости распространения потока в фоновом газе, величины захваченного магнитного поля и его радиального распределения в потоке, а также формы головной части потока. Было показано, что путем сопоставления с экспериментальными данными нескольких различных диагностических систем (например, оптических коллиматоров, магнитных зондов, кадровых скоростных фотографий) возможно однозначно определить все варьируемые при моделировании параметры. Моделирование показало значительное влияние на динамику распространения потока металлических диафрагм на его пути для установки ПФ-3, а также позволило выделить два характерных механизма распространения плазменного потока, каждый из которых является преобладающим на различных этапах движения плазменной струи (удалении от места формирования).

Литература

- [1]. С.С. Ананьев, С.В. Суслин, А.М. Харрасов // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2016, т. 39, вып. 2, с. 69-80
- [2]. С.С. Ананьев, С.В. Суслин, А.М. Харрасов // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2017, т. 40, вып. 3, с. 37-48
- [3]. С.С. Ананьев, В.И. Крауз, В.В. Мялтон, А.М. Харрасов // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2017, т. 40, вып. 1, с. 29-35. DOI: 10.21517/0202-3822-2017-40-1-21-35

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ВЛИЯНИЯ ПРЕДИОНИЗАЦИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛАЗЕРОВ

¹Елисеев С.И., ^{2,3}Тимшина М.В., ⁴Самохвалов А.А., ⁵Жао Й.-П., ^{2,3}Бурцев В.А.

¹*Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет, г. Санкт-Петербург, Россия*

²*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия*

³*ООО «Лаборатория им. В.А. Бурцева», г. Санкт-Петербург, Россия*

⁴*Университет ИТМО, кафедра фотоники, г. Санкт-Петербург, Россия*

⁵*Национальная лаборатория лазерных технологий, Харбинский политехнический университет, Харбин, Китай*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.081

Впервые возможность использования наносекундных капиллярных разрядов для создания условий, подходящих для усиления спонтанного излучения плазмы в области мягкого рентгеновского диапазона, была продемонстрирована в конце 1980х [1]. Интерес к подобным разрядам вырос существенно после достижения лазерного эффекта на переходах неоноподобных ионов аргона в плазме капиллярного разряда [2]. В последующие десятилетия существенные усилия были направлены на оптимизацию технологии рентгеновских лазеров для различных промышленных и научных задач.

Критически важным технологическим аспектом газоразрядных рентгеновских лазеров является предварительная ионизация газа в капилляре, повышающая эффективность передачи электрической энергии в плазму, обеспечивающая стабильность сжатия плазмы на основной стадии разряда, а также уменьшающая электростатическую нагрузку на капилляр. Для этих целей обычно используются импульсы тока существенно большей длительности и меньшей амплитуды по сравнению с основным импульсом. В ряде экспериментальных работ наблюдалась существенная чувствительность интенсивности излучения рентгеновского лазера к параметрам преддиозиационной схемы [3-5]. Интерпретация этих результатов в терминах равновесной плазмы не позволяет объяснить все наблюдающиеся зависимости.

В работе было проведено теоретическое исследование механизмов влияния плазмы, образующейся на стадии преддиозиации, на основную стадию наносекундного капиллярного разряда. Формирования такой плазмы в условиях, схожих с типично используемыми в газоразрядных рентгеновских лазерах, получена в результате самосогласованных численных расчетов. Динамика разряда рассмотрена в деталях, начиная со стадии пробоя газа, происходящего по механизму волны ионизации, и заканчивая формированием самоподдерживающегося столба холодной неравновесной плазмы. Проанализированы возможные механизмы влияния параметров начальной плазмы на основную стадию разряда.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного фонда (грант №20-72-00039)

Литература

- [1]. Matthews D. L. et al. Demonstration of a soft x-ray amplifier //Physical review letters. – 1985. – Т. 54. – №. 2. – С. 110
- [2]. Rocca J. J. et al. Demonstration of a discharge pumped table-top soft-x-ray laser //Physical Review Letters. – 1994. – Т. 73. – №. 16. – С. 2192
- [3]. Shuker M. et al. The effects of the prepulse on capillary discharge extreme ultraviolet laser //Physics of plasmas. – 2006. – Т. 13. – №. 1. – С. 013102
- [4]. Tan C. A., Kwek K. H. Influence of current prepulse on capillary-discharge extreme-ultraviolet laser //Physical Review A. – 2007. – Т. 75. – №. 4. – С. 043808
- [5]. Jiang S. et al. Observation of capillary discharge Ne-like Ar 46.9 nm laser with pre-pulse and main-pulse delay time in the domain of 2–130 μ s //Applied Physics B. – 2012. – Т. 109. – №. 1. – С. 1-7

ВТСП НАПРАВЛЯЮЩАЯ ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ТРАНСПОРТА КРИОГЕННЫХ МИШЕНЕЙ С ПОМОЩЬЮ МАГНИТНОГО НОСИТЕЛЯ

Александрова И.В., Корешева Е.Р., Кошелев Е.Л., Никитенко А.И., Тимашева Т.П.

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: koreshevaer@lebedev.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.082

Создание системы бесконтактного позиционирования и транспорта криогенных топливных мишеней (КТМ) представляет собой одну из важнейших задач в общей проблеме инерциального термоядерного синтеза (ИТС). Эксперименты, проведенные в ФИАН по ускорению вдоль магнитного рельса левитирующего носителя КТМ, изготовленного из высокотемпературных сверхпроводников II рода (ВТСП), подтвердили плодотворность этого подхода [1-3]. В данной работе исследуется возможность создания обратной системы – ускорения магнитного носителя вдоль сверхпроводящей ленточной направляющей из ВТСП материалов.

В наших исследованиях при построении бесконтактного ускорителя КТМ предлагается отказаться от традиционно принятой осевой симметрии (см., например, цилиндрический сверхпроводящий ствол в работе [4]) и перейти к асимметричному варианту криогенного инжектора с ВТСП-лентой в виде направляющего рельса.

В докладе представлены результаты экспериментальной демонстрации возможности линейного движения левитирующего над ВТСП направляющей магнитного носителя под действием управляющих сигналов различной природы (магнитная, механическая, гравитационная).

ВТСП-направляющая представляла собой либо открытый параллелепипед, составленный из 3-х ВТСП-лент, либо желоб, составленный из 2-х ВТСП-лент, расположенных под углом 90° друг к другу. Параметры ВТСП-лент (производство ООО СуперОкс, г. Москва): длина каждой ленты 55 мм, ширина и высота - 12 мм, толщина - 65 мкм. Размеры испытанных магнитных носителей и величина их магнитного поля следующие: кубик ($5 \times 5 \times 5$ мм), 1160 Гс; шар (диаметр 3 мм), от 30 до 46 Гс; диск (внутр. диам. 6 мм, внешн. диам. 15 мм, толщина 3 мм), 1500 Гс.

Эксперименты показали, что данный подход обладает сравнительной простотой, а потому перспективен при решении задачи не только инжекционного, но и простого позиционирования КТМ в лазерном фокусе при отсутствии какого-либо материального подвеса, что необходимо для обеспечения требуемой симметрии облучения КТМ.

Работа выполнена в рамках Государственного Задания ФИАН и по программе Президиума РАН, а также при финансовой поддержке Международного Агентства по Атомной Энергии в рамках контракта № 24154.

Литература

- [1]. Aleksandrova I.V., Ivanenko O.M., Kalabukhov V.A., et al. *HTSC maglev systems for IFE target transport applications*. J. Russian Laser Research, 2014, **35** (2), 151-168
- [2]. Александрова И.В., Акунец А.А., Безотосный П.И. и др. *О возможности создания системы бесконтактной доставки криогенных термоядерных мишеней в реактор ИТС*. Краткие Сообщения по Физике, 2016, № 5, 15-25
- [3]. Aleksandrova I.V., Koshelev E.L., Nikitenko A.I., et al. *Magnetic acceleration of the levitating sabot made of type-II superconductors*. J. Russian Laser Research, 2018, **39** (2), 140-155
- [4]. Wang X.W., Royston J.D. *Superconductivity and Applications*. eds. Kwok H.S., et al., Plenum Press, New York, 1990

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ КЕЛЬВИНА-ГЕЛЬМГОЛЬЦА В ЛАЗЕРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

¹Змитренко Н.В., ^{1,2}Кучугов П.А.

¹*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: zmitrenko@imamod.ru*

²*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.083

Развитие гидродинамических неустойчивостей, сопровождаемое возникающей при этом турбулентностью, является ключевой проблемой в реализации необходимого сжатия мишеней лазерного термоядерного синтеза (ЛТС). Неустойчивость Релея – Тейлора (НРТ) характерна для процесса ускорения оболочки при поглощении лазерного излучения, равно как и процесса торможения оболочки вблизи момента максимального сжатия и формирования термоядерной вспышки в центре. В обоих случаях лёгкий горячий газ толкает плотное холодное вещество, в первом случае внутрь, во втором – наружу. При переходе неустойчивости РТ из линейной в нелинейную стадию её развитие начинает сопровождаться развитием неустойчивости Кельвина-Гельмгольца (НКГ). Последняя возникает из-за наличия встречных потоков жидкости или газа с коллинеарными и противоположными направлениями, образуемых «всплыванием пузырей» (лёгкое вещество) и «падением струй» (тяжёлое вещество). Такой вид развития исходной гидродинамической неустойчивости приводит к разрушению струй, «слиянию пузырей», и, тем самым, к определённому насыщению (или даже прекращению) роста неустойчивости.

НКГ имеет и непосредственные проявления в различных вариантах ЛТС. В частности, в проблеме ударного быстрого зажигания ускоряемый до значительных скоростей (≥ 1000 км/с) небольшой диск (ударник) ударяет по холодному сжатому в центре мишени термоядерному топливу и инициирует его зажигание благодаря существенному подъёму температуры. При этом ударник движется в канале, встроеном в оболочку, и в месте скольжения вещества ударника по веществу мишени создаются условия для интенсивного развития НКГ, кардинальным образом влияющей на возможности быстрого зажигания в этих условиях.

В предлагаемой работе обсуждаются вопросы экспериментальных и теоретических исследований НКГ. В Лаборатории лазерной энергетики Рочестерского Университета экспериментально исследовалась динамика ускоренного лазером одного образца вещества по практическому покоящемуся другому. Этот процесс исследовался также и теоретически. В результате 2D и 3D расчетов установлены закономерности развития НКГ в этом случае, изучена динамика роста возмущений, их характер, а также проанализировано развитие зоны перемешивания.

ОБ УСЛОВИЯХ ИНЖЕКЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ УСКОРЕНИИ ЛАЗЕРНЫМ ГАУССОВЫМ ПУЧКОМ

Кастильо А.Х., Милантьев В.П.

*Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия,
e-mail: milantsev_vp@pfur.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.084

Проблеме лазерного ускорения электронов посвящено большое количество работ, в которых лазерное излучение, как правило, рассматривается в параксиальном приближении в виде гауссовых пучков различных мод. При этом обычно предполагается, что электрон в начальный момент времени находится в фокусе пучка. В ряде работ (например, [1 – 3]) рассматривались различные способы ввода пучка электронов в область взаимодействия с лазерным излучением. В частности, в работе [1] обсуждалась проблема ускорения релятивистских электронов при условии, что электрон инжектируется под некоторым углом к распространяющемуся лазерному гауссову пучку основной моды. Было показано, что характер движения электрона существенно зависит от интенсивности лазерного излучения, характеризуемой безразмерным параметром $g = eE/mc\omega$. При $g \leq 1$ электрон пересекает лазерный пучок без изменения энергии в согласии с теоремой Лоусона-Вудворда. При $g > 1$ электрон может отражаться от лазерного пучка, приобретая при этом значительную энергию. В данной работе рассматриваются особенности движения электрона, инжектируемого в лазерный пучок под постоянным углом, связанные с изменением его начальных динамических переменных. Лазерное излучение задается в виде гауссова пучка основной моды линейной или круговой поляризации. Проводилось численное решение релятивистских уравнений движения электрона по методу Рунге-Кутты. Показано, в согласии с [1], что в случае $g \leq 1$ электрон при энергии инжекции (в безразмерной форме) $\gamma_0 = 32$ получает и теряет энергию по мере прохождения через фокус лазерного пучка. При релятивистской интенсивности излучения ($g > 1$) при тех же начальных условиях в работе [1] обнаружен эффект отражения электронов лазерным пучком и их ускорения. Наши вычисления показывают, что при определенных условиях инжекции возможно не только отражение электронов от лазерного пучка, но и проникновение в него с приобретением значительной энергии. Подобный эффект отражения или преломления электронов электромагнитным полем ранее рассматривался в работе [4]. Нами проведен детальный анализ влияния начальных условий для динамических переменных на характер взаимодействия электрона с лазерным пучком. Показано, что эффективность ускорения релятивистского электрона полем бесконечного лазерного пучка очень чувствительна к малейшим изменениям параметров инжекции. Найдены условия эффективной инжекции, при которых достигаются максимальные значения выигрыша энергии электрона. Например, в поле лазера с мощностью 100 TW ($g = 4$) электрон приобретает энергию $\Delta\gamma \sim 600$ при начальной энергии $\gamma_0 = 32$.

Литература

- [1]. Hsu J. L., Katsouleas T., Mori W. B., Schroeder C. B. & Wurtele J. S. AIP Conference Proceedings. AIP. 1997. **396**(1), P. 21
- [2]. Salamin Y. I. and Keitel C. H. Laser Physics. 2003. **13**(4), P. 407
- [3]. Salamin Y. I. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. 2006. **39**(6), P.1353
- [4]. Kibble T. Phys. Rev. 1966, **150**, P. 1060

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МИКРОКАПСУЛ-ОБОЛОЧЕК ДЛЯ ЛАЗЕРНЫХ МИШЕНЕЙ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

¹Пастухов А.В., ²Даванков В.А., ¹Акунец А.А., ¹Борисенко Н.Г., ¹Кувшинов И.Р.,
¹Писарева Е.А., ¹Громов А.И.

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: avpast@gmail.com,

²Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: davank@ineos.ac.ru.

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.085

Для изготовления мишеней инерциального термоядерного синтеза перспективным является использование полых полимерных оболочек [1-4]. В качестве материала для таких оболочек в настоящей работе использовали поли-альфа-метилстирол синтезированный методом катионной полимеризации при температуре $-70 - 90^{\circ}\text{C}$. Методом гелепроникающей хроматографии установлено, что полученные образцы полимеров имеют широкое распределение по молекулярным массам от 10^4 до 10^6 с максимумом от $3 \cdot 10^5$ до $4.5 \cdot 10^5$. Пустотелые полимерные оболочки получали методом микрокапсулирования в нескольких технических вариантах исполнения этого метода с использованием способов вертикального и горизонтально-роторного перемешивания. Микрокапсулы-оболочки сформированные из раствора полимера с помощью капельницы с тремя коаксиальными трубками вводили в водно-солевую среду с поверхностно-активным веществом - стабилизатором дисперсии оболочек в жидком состоянии. В качестве растворителей полимера использовали фторбензол, смеси дихлорэтана с бензолом, тетрачлорэтана с орто-ксилолом, а в качестве водной фазы растворы поливинилового спирта с нитратом аммония. Жидкие микрокапсулы-оболочки после удаления растворителя при нагреве в определенных температурно-временных режимах, не теряя формы переходили в твердое состояние. Оболочки, полученные в оптимальных условиях после термического удаления внутренней воды, отличались хорошей сферической формой с максимальным отклонением 0.5 % от среднего значения диаметра сферы и отклонением 2 % от среднего диаметра 2150 мкм в группе из 100 полых оболочек.

Литература

- [1]. Meifang Liu, Sufen Chen, Xiao bo Qi, Bo Li, Ruiting Shi, Yiyang Liu, Yongping Chen, Zhanwen Zhang. Improvement of wall thickness uniformity of thick-walled polystyrene shells by density matching / Chemical Engineering Journal. 2014. V.241. P.466-476
- [2]. Xiuyun Shangguan, Sufen Chen, Shuang Ma, Meifang Liu, Changhuan Tang, Yong Yi, Zhanwen Zhang. Effect of molecular weight on the quality of poly(alpha-methylstyrene) mandrel / Matter and Radiation at Extremes. 2017. 2. P.197-203
- [3]. Meifang Liu, YawenHuang, Sufen Chen, Dawei Pan, Miao Chen, Qiaomei Chu, Yiyang Liu, Qiang Yin, Zhanwen Zhang. Progress and challenges in the fabrication of DPS shells for ICF / Matter and Radiation at Extremes. 2019. V.4. 018401
- [4]. Pastukhov A.V., Davankov V.A., Akunets A.A., Borisenko N.G., Orekhov A.S., Tolokonnikov S.M., Pervakov K.S. Hollow Poly(alpha-methyl-styrene) Shells for Inertial Confinement Fusion Targets / Journal of Physics: Conference Series. 2017. V.907. N1. 012020

МГД-МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СФЕРИЧЕСКИХ КАМЕРАХ С ПЛАЗМЕННЫМ ФОКУСОМ С УЧЕТОМ ГЕНЕРАЦИИ НЕЙТРОНОВ

Гаранин С.Ф., Долинский В.Ю., Макеев Н.Г., Мамышев В.И., Маслов В.В.

РФЯЦ – ВНИИЭФ, г. Саров, Россия, e-mail: VYuDolinskij@vniief.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.086

Приведены результаты разработки двумерного МГД-кода для проведения расчетных исследований динамики токовой плазменной оболочки в сферических камерах с плазменным фокусом. В работе использовались уравнения магнитной гидродинамики с учетом диффузии магнитного поля, теплопроводности и излучения плазмы. При расчете магнитного поля применялась неявная схема, которая позволяет описывать движение плазмы в области с малой плотностью позади плазменной оболочки. Для расчета проводимости плазмы использовались формулы, учитывающие возможное появление в плазме аномального сопротивления. Расчет нейтронного выхода проводился с учетом термоядерного и ускорительного механизмов генерации нейтронов [1]. Изучено влияние минимального значения остаточной плотности газа за плазменной оболочкой на кумуляцию плазменной оболочки. Рассмотрено влияние диффузии магнитного поля, теплопроводности и аномального сопротивления плазмы на динамику плазменной оболочки. Расчеты выполнены для двух сферических камер [2, 3], работающих в установках плазменного фокуса с токами до 1 МА и 2 МА и нейтронными выходами до 10^{12} и $1.5 \cdot 10^{13}$ ДТ-нейтронов, соответственно. Сравнение расчетных зависимостей с экспериментальными данными по току, напряжению и нейтронному выходу позволило уточнить параметры, используемые в расчетах и добиться удовлетворительного согласия расчета с экспериментом.

Литература

- [1]. Гаранин С.Ф., Мамышев В.И., Физика плазмы, 2008, Т.34, № 8, с. 695
- [2]. Dolinskii V.Yu., Garanin S.F., Mamyshev V.I. et al., Proc. of the 15th Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, Ed. by V. Novac, 2018, с. 69
- [3]. Маслов В.В., Румянцев В.Г., Басманов В.Ф. и др., Приборы и техника эксперимента, 2014, № 2, с. 43

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА ИНТЕНСИВНОСТИ ЛИНИЙ Ar XVII И Ar XVIII, ЭМИТИРОВАННЫХ ПИНЧЕВОЙ ПЛАЗМОЙ

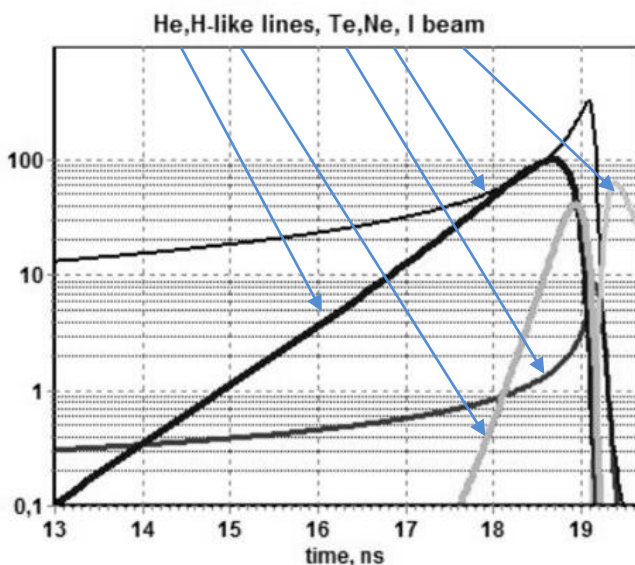
Баронова Е.О., Вихрев В.В.

НИЦ “Курчатовский институт”, г. Москва, Россия, e-mail: baronova04@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.087

Относительные интенсивности линий гелиеподобных и водородоподобных ионов широко используются для оценки электронной температуры и плотности высокотемпературной плотной плазмы. Однако, для реализации подобных оценок необходимо иметь ряд дополнительных сведений, таких как величина оптической плотности плазмы, наличие в плазме электронных пучков, сильных электромагнитных полей и т.д. Например, электронные пучки определенных энергий могут вызывать как поляризацию диагностических линий, так и изменение их интенсивности. Насколько сильно влияние электронного пучка - это зависит от его энергии и совпадения во времени моментов генерации пучка и времени жизни эмитированных линий.

В данной работе анализ влияния электронного пучка на интенсивности диагностических линий проведен в рамках нуль-мерной модели [1], описывающей поведение пинчевой плазмы, включая момент ее максимального сжатия и последующее охлаждение. Нуль-мерная модель включает в себя баланс энергии, в котором энергия плазмы увеличивается в результате джоулева нагрева и работы сил магнитного поля, уменьшается за счет потерь на излучение. Генерация электронного пучка описана в рамках модели, предложенной Драйсером [2]. При расчете потерь на излучение учтены процессы ионизации возбуждения, диэлектронной и радиационной рекомбинации, тормозное излучение. Для расчета



интенсивностей линий гелиеподобного и водородоподобного ионов аргона используется модель, учитывающая процессы, имеющие место в плотной плазме (обмен между уровнями). Проведенные расчеты предсказывают поведение интенсивностей линий аргона и интенсивность электронного пучка во времени. Проведено тестирование модели: расчетные данные совпадают с экспериментально полученными на установке плазменный фокус с током 500 кА.

На приведенном рисунке показана динамика свечения диагностических линий, динамика генерации электронного пучка и динамика плотности и температуры плазмы

для разряда с током 500 кА. Очевидно, что в данном разряде влиянием электронного пучка на интенсивности диагностических линий можно пренебречь. Создание и развитие подобных моделей, а также расчеты, проведенные с их помощью, позволяют усовершенствовать существующие методы диагностики пинчевой плазмы.

Литература

- [1]. Вихрев В.В. Простая модель плазменного фокуса // *Физика плазмы*. 1977. Т. 3. С. 981
- [2]. Dreicer H. Electron and Ion runaway in a fully ionized gas I // *Phys. Rev.* 1959. V. 115. No. 2. P. 238-249

О МЕХАНИЗМАХ ГЕНЕРАЦИИ НЕЙТРОНОВ В Z-ПИНЧАХ

¹Вихрев В.В., ²Фролов А.Ю.

¹НИЦ “Курчатовский институт”, г. Москва, Россия, e-mail: vikhrev@mail.ru,

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия, e-mail: alexeyfrolov92@yandex.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.088

Изложены используемые в настоящее время в теоретических работах механизмы генерации нейтронов для Z-пинчей. Проанализирован также предложенный в настоящее время механизм генерации нейтронов в работе [1]. Показана сложность интерпретации, основанной только на полностью ускорительном или термоядерном механизме генерации нейтронов. Дело в том, что в процессе развития импульсного разряда в Z-пинчах может происходить изменение механизма генерации нейтронов.

Если из-за какого-то механизма набора энергии ионы приобретают немаквелловское распределение, то из-за того, что сечение кулоновских столкновений существенно больше сечения ядерных столкновений, направление движения этих ионов хаотизируется, а само распределение по энергии максвеллизируется. В итоге для частиц, которые приобрели энергию при последующих столкновениях, их механизм генерации нейтронов становится тепловым, т.е. термоядерным. Для того, чтобы нейтронный выход из высокотемпературной плазмы можно было применять термоядерные формулы необходимо, чтобы произведение плотности плазмы на время ее удержания было достаточно для максвеллизации этой плазмы. Обычно в системах с плотным плазменным фокусом это хорошо выполняется.

Моделирование показывает, что при учете хаотизации движения ионов в Z-пинчах заметное количество нейтронов появляется вследствие МГД-неустойчивости пинча, т.е. происходит из-за образования в нем горячей плазмы в результате развития перетяжек в Z-пинче. Для импульсных систем с плотным плазменным фокусом основной набор энергии ионами происходит за счет адиабатического сжатия плазмы в перетяжках. В этом случае термоядерный механизм генерации нейтронов преобладает с самого начала развития разряда в этих системах.

Таким образом Z-пинчи из-за наличия в них термоядерного механизма генерации нейтронного излучения и следствия, что нейтронный выход в этом случае в них пропорционален току в четвертой степени [2], могут рассматриваться как основа для создания промышленного термоядерного реактора.

Литература

- [1]. Гаранин С.Ф. и др. Физика плазмы, 2020. Т. 46, № 10, С. 890
- [2]. Михайлов Ю.В. и др. Физика плазмы, 2019. Т. 45, № 4, С. 323

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛИМЕРНЫХ КАПСУЛ ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНЫХ МИШЕНЕЙ

Дороготовцев В.М.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия, e-mail: dorog@list.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.089

Доклад посвящен анализу высокотемпературных процессов формирования полых полимерных микросфер с идеальными геометрическими параметрами для нужд лазерного термоядерного синтеза и других альтернативных применений. Оболочки получают методом высокотемпературного вспенивания сплошных сферических гранул содержащих газообразователь при температурах выше температуры деполимеризации T_{dp} полимера [1].

Расчеты проведенные для модели «теплопроводный нагрев – вспенивание» показывают, что для получения капсул диаметром ≥ 3 мм. требуются печи падения с высотой зоны нагрева в несколько метров [2]. Однако в физическом эксперименте нами были получены полистирольные оболочки диаметром ≥ 3 мм. при температурах $T_f \geq 2.5T_{dp}$ при высоте зоны нагрева 0.5 м. В модельном эксперименте при вспенивании пористых гранул, полученных из сплошных исходных гранул аналогичных исходным гранулам физического эксперимента и насыщенных газообразователем, также были получены капсулы близких размеров. Данные результаты показывают, что при температурах $T_f \geq 2.5T_{dp}$ в процесс нагрева существенный вклад вносит тепломассоперенос, а в процессе вспенивания реализуются альтернативные механизмы [3].

Высокие температуры инициируют или ускоряют физические и физико-технологические процессы. Высокая температура и скорость нагревания сплошных полимерных гранул включает механизмы сферизации гранул и элиминации дефектов и неоднородностей, которые являются или продуктом начальной дефектности структуры гранулы, и/или возникают в ходе сбоя технологического процесса. При этом большие температуры и высокие скорости нагрева создают глубокие уровни пересыщения и большую частоту образования зародышей газовой фазы, т.е. стимулируют гомогенное зародышеобразование и последующее сферически симметричное вспенивание. Большие температурные градиенты в сферически симметричных пенных структурах инициируют перенос газовой фазы в центр гранулы, тепломассоперенос, превалирующий над иными механизмами теплопередачи, ускоряет нагрев центра гранулы, процессы структурирования и деградации пены, формирования и расширения полых микрокапсулы.

Высокотемпературное вспенивание в сочетании с использованием теплообменных газов с высокой теплопроводностью и вязкостью, с использованием низкого давления в камере и применение в устройстве изготовления протяженного антистрессового перехода из нагревательной камеры в камеру охлаждения, гарантирует формирование полых микросфер с характеристиками, соответствующими требованиям к мишеням для лазерного термоядерного синтеза.

Литература

- [1]. A.A. Akunets, V.M. Dorogotovtsev, Yu.A. Merkuliev and all, Production of hollow microspheres from solid plastic granules, Fusion technology, v. 28, No. 5, p. 1781 (1995)
- [2]. Y.A. Merkuliev, S.A Startsev and R.C. Cook, Simulation of high temperature formation of large (2 mm) polystyrene shells from solid granules, Book of viewgraphs for the Eleventh Target Fabrication Specialists' Meeting, Orcas Island, Washington, Sept. 8-12, (1996)
- [3]. V.M. Dorogotovtsev, Mechanisms of forming hollow microspheres from solid granules, Journal of Russian Laser Research, Volume 40, Number 2, March, (2019)

ТОНКИЙ СЛОЙ ИЗ НАНОПОРОШКОВ ИЗБРАННЫХ МЕТАЛЛОВ ДЛЯ МИШЕНЕЙ ИТС, ПОЛУЧЕНИЕ И МОНИТОРИНГ

Громов А.И., Акунец А.А., Борисенко Н.Г., Пастухов А.А., Перваков К.С.,
Писарева Е.А., Толоконников С.М.

Физический институт им П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия,

e-mail: gromovai@lebedev.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.090

Значительное внимание в последнее время обращается на мишени с малоплотными тонкими металлическими слоями, из нанопорошков, позволяющими получить интересные результаты на действующих и на вводимых в строй установках ИТС. Разработки подобных слоёв, а также методов их прецизионного мониторинга проводятся ряд лет в ФИАН [1 – 4].

Технология изготовления низкоплотных 1/50-1/300 и особо-низкоплотных, до 1/600, слоёв из ряда металлов от плотности сплошного вещества, потребовала длительной постепенной отработки. Также уделялось значительное внимание вопросам мониторинга, так как точность в контроле влияет на интерпретацию результатов эксперимента и при планировании дальнейших исследований. Для мониторинга применялись, прецизионные оптические, электронно-микроскопические и рентгеновские методы.

С развитием низкоплотных мишеней возникает разнообразие технологий, получения слоёв для мишеней из таких материалов, как Bi, Sn, Cu, W. Слои наименьшей плотности в настоящей работе получались из In и Au. Для каждого из этих материалов разрабатывались свои, как правило, технологические маршруты их изготовления. Опыты по получению более значительной конверсии лазерного излучения в рентгеновское для Bi и Au, что важно для непрямых мишеней, показали важность подобных слоёв из нанопорошков металлов [1, 4, 5] Удавалось, изменяя условия получения слоёв, в определённом диапазоне регулировать достигаемую плотность. При манипуляциях с микроскопическими количествами используемых материалов и работе с микрообъектами получены образцы мишеней для лазерных экспериментов.

Подобные слои важны для проведения новых лазерных экспериментов, а также разработки будущих, перспективных моделей мишеней [2, 3, 5, 6].

Работа выполнялась нами при частичной поддержке гранта РФФИ № 19-02-00875.

Литература

- [1]. L.A. Borisenko, I.V. Akimova, A.A. Akunets, A.I. Gromov, A.S. Orekhov. Metal produced as nano-snow layers for converters of laser light into X-ray for indirect targets as intensive EUV sources// *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2014. Vol. 299. No. 2. pp 955-960
- [2]. A.S. Orekhov, A.A. Akunets, L.A. Borisenko, N.G. Borisenko, A.I. Gromov, Yu.A. Merkuliev, V.G. Pimenov, E.E. Sheveleva, V.G. Vasiliev. Modern trends in low-density materials for fusion. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, **688** (1) 012080.
- [3]. I.V. Akimova, A.A. Akunets, N.G. Borisenko, A.I. Gromov, A.S. Orekhov, G.V. Sklizkov, S.M. Tolokonnikov, S. Chaurasia, C. Kaur, D.S. Munda., U. Rao, V. Rastogi. Metal nanoparticles modernized layers, including those with polymers, for laser thermonuclear fusion targets.// *IOP Conf Series: Journal of Physics: Conference Series* **907** (2017) 012018.
- [4]. M.V. Akimova, N.G. Borisenko, A.I. Gromov, et al., "Fabrication of effective low-density converter of intensive laser radiation to x-ray and novel measurement method of laser density from heavy metal nanoparticles." *J. Problems of atomic science and technology*. Series Thermonuclear fusion, issue 2, p. 122–130 (2012). (in Russian)
- [5]. L.A. Borisenko, I.V. Akimova, A.A. Akunets, et al. "Metal produced as nano-snow layers for converters of laser light into X-ray for indirect targets as intensive EUV sources" *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 299, no. 2, p. 955–960 (2014)
- [6]. C. Kaur, S. Chaurasia, N.G. Borisenko, A.I. Gromov, A.A. Akunets, G.V. Sklizkov, G.A. Vergunova and S.Y. Gus'kov "Demonstration of gold plasma as bright X-ray source and slow ion emitters" *Plasma Physics and Controlled Fusion*, vol. 61, issue 8, 084001, (2019)

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ РОЛИ ЖЕСТКОГО ИОНИЗАТОРА В ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАКАЧКИ АКТИВНОЙ СРЕДЫ КОМПАКТНЫХ ЛАЗЕРОВ ЭУФ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА.

^{1,2}Тимшина М.В., ¹Калинин Н.В., ^{2,3}Елисеев С.И., ¹Бурцев В.А.

¹*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия*

²*ООО "Лаборатория им. В.А. Бурцева", г. Санкт-Петербург, Россия*

³*Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.091

Приложение компактных источников излучения высокой спектральной яркости в экстремальном ультрафиолетовом(ЭУФ) диапазоне включает в себя широкий круг задач, связанных с атомной и молекулярной спектроскопией, биофизикой, медициной, литографией, диагностикой плотной плазмы, материаловедением. В связи с этим большой практический интерес представляет исследование возможности повышения эффективности таких источников. В данной работе рассматриваются источники на плазме многозарядных ионов, создаваемой в капиллярном разряде. Одним из путей ее повышения, является использование жесткого ионизатора: пучков быстрых электронов и высокоэнергетичных фотонов. Такой подход имеет определенные перспективы для создания лазеров на капиллярном разряде, где большие токи приводят к разрушению самого капилляра.

В докладе проведен анализ формирования активной среды лазеров ЭУФ спектрального диапазона в высоковольтном наносекундном разряде, развивающемся в капилляре, с учетом действия жесткого ионизатора. Внутренний ионизирующий источник определяется убегающими электронами и электромагнитным рентгеновским излучением, обусловленным взаимодействием электронов с тяжелыми частицами плазмы. Сформулированы требования к характеристикам потока этого излучения (длине волны, интенсивности, длительности импульса), необходимые для получения коэффициента усиления $k \geq 1 \text{ см}^{-1}$ на переходах H- и He-подобных ионов с длиной волны генерации $\lambda < 15 \text{ нм}$ элементов с атомным номером $Z_n = 6-7$.

ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ НАГРЕВА РЕНТГЕНОВСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ КАПСУЛ НЕПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ИХ СЖАТИЕ И ГОРЕНИЕ

Вергунова Г.А., Гуськов С.Ю., Яхин Р.А.

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: vergunovaga@lebedev.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.092

В работе проводится исследование сжатия и горения капсул не прямых мишеней при различной степени несимметрии облучения. Рассматриваются мишени, соответствующие исследованиям на установке NIF, относительно устойчиво сжимающиеся под действием рентгеновского импульса. Для иницирования рентгеновского импульса применялся лазерный импульс с повышенной интенсивностью в его начальной части (так называемый «high foot» импульс). Применение такого импульса приводит к более быстрому сжатию капсулы при меньшем времени развития гидродинамических неустойчивостей и меньшем уровне амплитуды начальных возмущений за счет теплового выравнивания. Тем не менее, зажигание пока не удается достичь, максимальный нейтронный выход составляет $2 \cdot 10^{16}$. Основной причиной, по которой пока не удастся добиться зажигания, считается недостаточный уровень однородности сжатия термоядерной капсулы при той энергии, которая доставляется на мишень рентгеновским импульсом.

Моделирование влияния низкомодовых нарушений пространственной однородности нагрева на сжатие и горение термоядерной капсулы было проведено в гибридной постановке [1].

На основе нескольких одномерных (1D) расчетов по программе радиационной гидродинамики РАДИАН [2] были получены распределения температуры, плотности, скорости вещества для различных значений энергии рентгеновского импульса в момент его окончания. На основании этих данных при различном выборе гармоник возмущений формировались начальные условия 2D расчёта дальнейшего сжатия и горения термоядерной капсулы. Исследования, выполненные на основе двумерного численного моделирования по программе NUTSY [3], показали сильную негативную роль низкомодовых нарушений пространственной однородности нагрева термоядерной капсулы непрямого облучения на эффективность её сжатия и горения. Главная причина такого влияния состоит в пространственном смещении областей нагретой и сжатой плазмы в момент завершения имплозии термоядерной. Именно этот эффект приводит к отсутствию области сжатой плазмы, в которой достигалось бы условие зажигания – превышение ионной температуры плазмы значения 5 кэВ в области с поверхностной плотностью не менее 0.35 г/см². Нейтронный выход, наиболее близкий к экспериментальному значению отвечает 2-й и 4-ой гармоникам нарушения однородности нагрева капсулы с амплитудой возмущения около 3.4%. При указанной амплитуде возмущения негативное влияние 6-ой гармоники значительно слабее. Влияние этой гармоники, способное понизить нейтронный выход до экспериментального значения, проявляется при амплитуде возмущений неоднородности нагрева примерно в 2 раза большей – около 7%.

Исследования и численные расчёты работы выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ №19-02-00299-а).

Литература

- [1]. С.Ю. Гуськов, Н.Н. Демченко, Н.В. Жидков и др., ЖЭТФ 138, с. 524 (2010)
- [2]. В.Б. Розанов, Г.А. Вергунова, ЖЭТФ, 148, 5(11), с. 857-868 (2015)
- [3]. В.Ф. Тишкин, В.В. Никишин, И.В. Попов, А.П. Фаворский, Мат.моделирование 7, с. 15 (1995)

ВЛИЯНИЕ ВАКУУМНОГО СЛЕДА НА КОЛЛИМАЦИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ И АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ДЖЕТОВ

¹Ильичев И.В., ^{2,3}Калашников И.Ю., ⁴Додин А.В., ¹Крауз В.И., ^{1,2,3}Чечеткин В.М.

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: ilichev_iv@nrcki.ru, krauz_vi@nrcki.ru

²Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Россия, e-mail: chechet@spp.keldysh.ru

³Институт автоматизации проектирования РАН, г. Москва, Россия, e-mail: kalasxel@gmail.com

⁴Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ, г. Москва, Россия, e-mail: dodin_nv@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.093

Известно, что астрофизический джет распространяется не в вакууме, а в среде с конечной плотностью. Окружающая среда может оказывать существенное влияние на параметры джета и его динамику. Результаты ранее проведенного численного моделирования [1] показали, что в случае генерации нескольких джетов второй и последующие движутся в среде с пониженной плотностью, в так называемом вакуумном следе первого.

На установке типа плазменный фокус (ПФ) ПФ-3 в Курчатовском институте в рамках программы по лабораторному моделированию астрофизических джетов была проведена серия экспериментов по исследованию влияния эффекта вакуумного следа на сгенерированный в разряде джет. В качестве рабочих газов были использованы неон и гелий. Регистрация потоков производилась посредством щелевой камеры К-008. Основная проблема заключается в том, что в ПФ разряде преимущественно формируется одиночный плазменный сгусток, генерируемый в стадии пинчевания. Однако в ряде случаев в результате повторного пинчевания возможно формирование двух и более сгустков. Из обширной базы развёрток были отобраны и проанализированы те разряды, в которых происходила генерация нескольких сгустков. Результаты эксперимента показали, что параметры второго джета значительно отличаются от параметров первого. Скорость второго потока обычно меньше скорости первого, что может объясняться различными условиями генерации потока в результате повторного сжатия токонесущей плазменной оболочки. Тем не менее, при этом не происходит формирования ударной волны, что свидетельствует о движении через среду меньшей плотности. Второй джет достаточно хорошо сколлимирован и имеет поперечный размер всего ~ 2 см на расстоянии 30 см от анода при аспектном отношении ≥ 2 .

Проведенное численное моделирование распространения лабораторного джета при разряде в гелии показало хорошее соответствие экспериментальным результатам [2]. Показано, что после прохождения первого сверхзвукового выброса за ним образуется вакуумный след, оставшаяся плазма в котором имеет более низкую плотность, повышенную температуру и продольную скорость. Совокупность этих трех факторов приводит к тому, что последующий выброс, следующий за первым, распространяется уже в вакуумном следе и испытывает гораздо меньшее сопротивление и меньшее ударное сжатие, благодаря чему оказывается более коллимированным. Показано, что аналогичные эффекты могут наблюдаться и при распространении джетов молодых звездных объектов.

Работы на установке ПФ-3 выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-21006_мк, работы по численному моделированию астрофизических джетов поддержаны Российским научным фондом, проект № 20-11-20165

Литература

[1]. I. Kalashnikov, et al. *Physics of Plasmas* 25, 062901 (2018)

[2]. И.Ю. Калашников и др. *Астрономический журнал*, 2020, принято в печать

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ АЗИМУТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ОСЕВОГО ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА НА УСТАНОВКЕ ПФ-3

¹Харрасов А.М., ²Митрофанов К.Н., ¹Ананьев С.С., ¹Ильичев И.В., ¹Крауз В.И.,
¹Мялтон В.В., ^{3,4}Бескин В.С.

¹НИЦ «Курчатовский институт, г. Москва, Россия, e-mail: kharrasov_am@nrcki.ru

²АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, г. Троицк, Россия, e-mail: mitrofan@triniti.ru

³Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия, e-mail: beskin@lpi.ru

⁴Московский физико-технический институт (НИУ), г. Долгопрудный, Россия

DOI: 10.34854/ISPAF.2021.48.1.094

В работе представлены результаты экспериментов по исследованию особенностей динамики внутренней структуры осевого плазменного выброса на установке ПФ-3. Проведены измерения азимутального распределения тороидального магнитного поля $B_\phi(\phi)$ с помощью 8 магнитных зондов, расположенных на одном радиусе и в нескольких точках по азимуту. Это позволило определить положение области протекания центрального тока осевого плазменного выброса и ее смещение относительно оси пролетной камеры установки. Из зондовых измерений, проведенных на различных радиусах, следует, что периферия плазменного потока, по которой протекают обратные токи замыкания, в экспериментах с неоном находится в диапазоне радиусов 6-8 см.

В ряде разрядов наблюдается не симметрия сигналов с расположенных по азимуту магнитных зондов, что, по-видимому, обусловлено наличием нескольких автономных сгустков с собственным захваченным магнитным полем. Такие режимы характерны для разрядов в неооне, в которых на кадровых снимках, полученных с помощью электронно-оптических преобразователей (ЭОП), наблюдаются четко выраженные структуры. Анализ азимутальных распределений $B_\phi(\phi)$ показывает, что положение областей с повышенным уровнем B_ϕ -поля меняется как во времени, так и в пространстве. Одновременно может проследиваться два типа движения: азимутальное вращение отдельных частей плазменного потока и смещение оси центрального тока относительно оси пролетной камеры установки. Оценка угловой скорости вращения дает значения $\sim(1.5-2.5)\cdot 10^6$ рад/с., при этом вращение наблюдается преимущественно против часовой стрелки.

Магнитозондовые измерения дополнены данными регистрации с помощью оптических скоростных камер. С помощью камер К-008 и СФЭР-6 получены временные развёртки плазменного потока на различных расстояниях от области его генерации. Анализ этих разверток также позволяет предположить наличие вращательного движения плазмы, а оценка скорости вращения дает значение $\sim 3\cdot 10^6$ рад/с, что близко к данным магнитозондовых измерений.

Для проверки этой гипотезы разработана схема регистрации плазменного потока с торца пролетной камеры посредством двух ЭОП, запускаемых с задержкой в несколько микросекунд друг относительно друга. В этих экспериментах удалось выделить отдельные структуры, имеющие азимутальную динамику. По двум кадрам невозможно определить направление вращения, но если предположить наличие вращения против часовой стрелки, то полученные значения угловой скорости $(1 - 2)\cdot 10^6$ рад/с также хорошо соответствуют магнитозондовым измерениям.

Таким образом, тремя независимыми методиками показано наличие вращения плазменного потока, при этом полученные значения скорости вращения $\geq 10^6$ рад/с находятся в хорошем соответствии с МГД теорией струйных выбросов из молодых звезд.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-29-21006_мк).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТРУКТУРИРОВАННЫХ МИШЕНЕЙ, ОБЛУЧАЕМЫХ УЛЬТРАКОРОТКИМ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ, ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НЕЙТРОНОВ

^{1,2}Бочкарев С.Г., ^{1,3}Гожев Д.А., ^{1,2}Брантов А.В., ^{1,2}Быченков В.Ю.

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева, РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: bochkaevsg@lebedev.ru

²ВНИИА им. Н.Л. Духова, г. Москва, Россия

³Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В. Ломоносова.

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.095

Ускорение заряженных частиц и генерация вторичного излучения под действием релятивистски-интенсивного лазерного излучения представляет большой интерес для фундаментальных исследований и возможных приложения в ядерной физике, медицине, термоядерном синтезе с инерционным удержанием и лабораторной астрофизике, для создания компактных источников рентгеновского излучения, ускоренных ионов, а также вторичных нейтронов [1 – 5]. Характеристики лазерно-ускоренных частиц сильно зависят от условий взаимодействия и типа используемой мишени. Востребованность компактных источников вторичного излучения побуждает к поиску механизмов ускорения и схем взаимодействия лазера с мишенью с целью оптимизации характеристик, повышения эффективности и энергии ускоренных частиц. Важную роль в этом контексте играют инновационные микро- и наноразмерные мишени, в том числе мишени упорядоченными или случайными поверхностными выростами в виде микро-волосков (микро-нитей) субмикронного размера, мишени с микро-каналами, мишени из нанотрубок, а также мишени с поверхностью в виде микро-слоев, канавок, конусов, сфер и др.

В настоящей работе с использованием трехмерного численного моделирования исследована лазерно-инициированная генерация термоядерных нейтронов из мишеней с микроструктурированной поверхностью в виде дейтерированных микро-волосков, используя ранее полученные результаты масштабной-конструкционной оптимизации мишени, обеспечивающей ее наилучший нагрев фемтосекундными лазерными импульсами умеренной интенсивности. Показано, что для современных лазерных технологий фемтосекундные лазеры небольшой (мульти-мДж) энергии даже предпочтительнее для создания нейтронного источника, чем более мощные (~1 Дж) в силу практически доступного режима высокой (~1 кГц) повторяемости импульсов. В качестве альтернативных микроструктурированных мишеней рассмотрены микро-слои (рельеф) и цилиндрические микро-отверстия на облучаемой стороне. Для последних продемонстрирована кумуляция ионов на оси отверстий, приводящая к росту плотности ионов выше исходной величины, и, как следствие, к возможному повышению выхода термоядерных нейтронов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 17-12-01283.

Литература

- [1]. Curtis A. et al., Nature Comm. 2018, **9**, 1077
- [2]. Purvis M.A. et al., Nature Photon. 2013, **7**, 796
- [3]. Kaymak V., Pukhov A., Shlyaptsev V.N. and Rocca J., Phys. Rev. Lett. 2016, **117**, 035004
- [4]. Иванов К.А. и др., Квантовая электроника 2020, **50**, № 2 169
- [5]. Gozhev D.A. et al, High Energy Density Physics 2020, **37** 100856

ИЗУЧЕНИЕ УСЛОВИЙ, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ СЖАТИЯ ИЗЛУЧАЮЩЕГО Z-ПИНЧА ПРИ ТОКОВОЙ ИМПЛОЗИИ 2-Х КАСКАДНОЙ ВЛОЖЕННОЙ СБОРКИ И ОДИНОЧНОЙ СБОРКИ ИЗ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

¹Александров В.В., ¹Браницкий А.В., ²Болдарев А.С., ²Вичев И.Ю., ²Гасилов В.А.,
¹Грабовский Е.В., ¹Грицук А.Н., ²Грушин А.С., ¹Митрофанов К.Н., ²Ольховская О.Г.,
²Сасоров П.В., ¹Шишлов А.О.

¹АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Троицк, г. Москва, Россия, alexvv@triniti.ru

²Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ISPAF.2021.48.1.096

Излучающие Z-пинчи, созданные при токовом сжатии плазмы под воздействием высоковольтного импульса мегаамперного тока электрофизических установок [1, 2], используются как мощные импульсные источники мягкого рентгеновского излучения (МРИ). При токовой имплозии вложенных лайнеров, когда внешний каскад представляет собой цилиндрическую сборку из пластиковых волокон, а внутренний - обычную сборку из вольфрамовых проволок, впервые было обнаружено на установке Ангара-5-1 [3], что могут реализоваться такие условия, при которых сжатие плазмы внутренней вольфрамовой сборки происходит устойчиво. При этом развитие магнитной Рэлей-Тейлоровской (МРТ) неустойчивости, которое свойственно сжатию плазмы одиночных цилиндрических проволочныхборок, оказывается сильно подавлено. Как следствие, на оси вложенныхборок образуется устойчивый и компактный Z-пинч. Расчетное и экспериментальное исследование процессов взаимодействия плазменных потоков и магнитного поля в межкаскадном пространстве вложенныхборок приведены в работе [3]. Сопоставление результатов численного моделирования и экспериментального исследования имплозии вложенныхборок показало, что при столкновении высокоскоростного плазменного потока внешнего каскада с магнитным полем разрядного тока, текущего по плазме внутреннего каскада, в межкаскадном пространстве формируется область ударной волны (УВ).

Доклад будет посвящен расчетно-теоретическому и экспериментальному изучению токовой имплозии 2-х каскадной вложенной и одиночнойборок из металлизированных диэлектрических волокон для поиска физических условий, определяющих управление временным профилем и амплитудой импульса МРИ. Для моделирования имплозии плазмы используется РМГД код MARPLE_3D [4], данные по уравнениям состояния и оптическим свойствам вещества были рассчитаны с помощью программы THERMOS [5], разработанными в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Для описания испарения проволок под действием тока применяется полуэмпирическая модель [6], с учетом экспериментальных данные о скорости плазмообразования [7]. Это позволяет адекватно учитывать процесс затянутого плазмообразования волокон и проволок вложенной сборки.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 18-29-21005-мк и № 20-02-00007-а).

Литература

- [1]. Deeney C. et al. // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 81. N. 22. P. 4883
- [2]. Грабовский Е.В. и др. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 1. С. 33
- [3]. Aleksandrov V.V. et al. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2019. V. 61. P. 035009
- [4]. Gasilov V. et al. // Advances in Parallel Computing. 2012. V. 22. P. 235
- [5]. <http://www.keldysh.ru/cgi/thermos/navigation.pl?en,home>
- [6]. Aleksandrov V.V. et al. // Plasma Physics Reports. 2001. V. 27. N 2. P. 89
- [7]. Mitrofanov K.N. et al. // Plasma Physics Reports. 2017. V. 43. N 2. P. 141

ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЙ СПЕКТРОМЕТР ИМПУЛЬСНЫХ КОРПУСКУЛЯРНЫХ ПОТОКОВ НА ОСНОВЕ АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

¹Красильников А.В., ¹Родионов Н.Б., ¹Мещанинов С.А., ¹Амосов В.Н., ¹Артемьев К.К.,
²Базулин И.А.

¹ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.097

Одним из актуальных направлений реализации управляемого термоядерного синтеза (УТС) является осуществление контролируемой термоядерной реакции в плазме, инициируемой импульсным лазерным излучением высокой мощности [1]. В сжатом и нагретом до термоядерных температур горючем происходят реакции синтеза изотопов водорода. При этом, вылетающие продукты несут информацию о состоянии сжатого ядра мишени и являются эффективным средством диагностики сжатой лазерной плазмы. Данная работа посвящена разработке времяпролетного спектрометра импульсных нейтронных и корпускулярных потоков на основе алмазного детектора для исследования физических процессов в лазерном термоядерном синтезе (ЛТС).

Алмазный детектор является радиационно-стойким, способным работать при высоких температурах (вплоть до 300°C), имеет высокое энергетическое разрешение и отличается высоким быстродействием не хуже 1.0 нс. Детектор регистрирует широкий спектр ионизирующих излучений: фотоны, нейтроны, альфа-частицы, атомы и ионы. Детектор будет регистрировать потоки продуктов термоядерных реакций на фоне сопутствующего фотонного излучения. Благодаря различной скорости вылета частиц и нейтронов из термоядерной «вспышки», алмазный детектор, установленный на некотором расстоянии от термоядерной мишени, облученной мощным лазерным излучением, будет работать как времяпролетный спектрометр импульсных корпускулярных потоков с заданной длиной пролетной базы (~10 м). Это позволит исследовать временную динамику термоядерной плазмы, инициируемой импульсным лазерным излучением, проанализировать структуру термоядерного источника ЛТС.

В качестве детектора для времяпролетной спектрометрии предлагается использовать алмазную гомоэпитаксиальную структуру [2]. Это легированная бором НРНТ подложка с нанесенной тонкой CVD-пленкой алмаза типа Па толщиной 40-50 мкм. Малая толщина пленки позволит регистрировать сигнал, длительностью сравнимой с характерным временем термоядерного горения в ЛТС.

Работа выполнена по договору от 05.09.2019 № 313/1672-Д «Разработка инновационных средств диагностики высокотемпературной плазмы, потоков частиц и излучения».

Литература

- [1]. Р.И. Ильяев, С.Г. Гаранин. Исследования по термоядерному синтезу на мощных лазерных установках. Плазма и термоядерный синтез. Сайт sarov.ru
- [2]. Родионов Н.Б., Амосов В.Н., Артемьев К.К., и др. Детектор для избирательной регистрации частиц и ионов на основе эпитаксиального слоя синтетического алмаза. Атомная энергия, 2016, т. 121, вып. 2, с. 98-103

**ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ
«ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ»**

**SECTION
«PHYSICAL PROCESSES
IN LOW-TEMPERATURE PLASMAS»**

РАСЧЁТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ГАЛЛИЯ

Апфельбаум Е.М.

*Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: apfel_e@mail.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.098

При решении различных фундаментальных и прикладных задач физики плазмы, возникающих в процессах электровзрыва проводников или взаимодействия излучения или потоков частиц с веществом необходимо знание теплофизических величин или свойств таких как уравнение состояния и электронные коэффициенты переноса. Их изучение представляет особую сложность при повышенных температурах, и в частности, для низкотемпературной плазмы металлов или полупроводников. В этом состоянии температура вещества - металла или проводника - как правило, превышает 5 кК, что приводит к естественным сложностям в проведении измерений. В теоретических исследованиях и расчётах так же возникают свои сложности. Они связаны с тем, что при повышении плотности даже до 0.1 от значения при нормальных условиях межчастичное взаимодействие между частицами становится существенным и его уже сложно учесть в рамках приближённых моделей [1]. Тем не менее, в последние годы для ряда металлов и полупроводников появились новые данные как измерений, так и расчётов [2,3], которые частично восполняют этот пробел. Но для галлия соответствующие аналогичные данные в области низкотемпературной плазмы практически отсутствуют [4].

Галлий плавится практически в руках - его температура плавления составляет 303 К. Поэтому различные свойства жидкого галлия очень хорошо изучены и, например, существуют даже достаточно точные многофазные уравнения состояния [5]. Однако область их применения ограничена лишь 2000 К. При более высоких температурах есть лишь ударно-волновые измерения и специально проведенные для них расчёты из первых принципов [6]. Область этих исследований достигает 10 кК, но по плотности они ограничены снизу 5.5 г/см^3 (нормальная плотность галлия 5.905 г/см^3). Есть также спектроскопические измерения при 100 кК и выше. Однако в диапазоне плотностей $<5.5 \text{ г/см}^3$ и температур 10 – 100 кК какие-либо данные по теплофизическим свойствам отсутствовали до недавнего времени [4]. Заполнить этот пробел - цель данной работы.

Ранее для расчёта термодинамических величин (давление, внутренняя энергия) и электронных коэффициентов переноса (электропроводность, теплопроводность и термоэдс) нами была разработана соответствующая модель, которая успешно применялась для ряда металлов и полупроводников [7, 8]. Она построена на химическом подходе и приближении времени релаксации (см. детали в [4]). В данной работе эта модель была модифицирована и применена для расчёта упомянутых выше величин в низкотемпературной плазме галлия.

Литература

- [1]. Fortov V.E., Yakubov I.T. Physics of Non-Ideal Plasmas. Hemisphere Publishing, New York, 1990
- [2]. Clerouin J., Noiret P. et. al., Phys. Plasmas, (2012) V. 19, 082702
- [3]. Кондратьев А.М., Коробенко В.Н., Рахель А.Д. ЖЭТФ, (2018) Т. 154, 1168
- [4]. Apfelbaum E.M., Phys. Plasmas, (2020) V. 27, 042706
- [5]. Golyshev A.A., Molodets A.M., J. Phys.: Conf. Ser. (2014) V.500, 182013
- [6]. Sheppard D., Mazevet S. et. al., Phys. Rev. E (2015) V. 91, 063101
- [7]. Apfelbaum E.M., Phys. Plasmas, (2018) V. 25, 072703
- [8]. Apfelbaum E.M., Contrib. Plasma Phys., (2019) V. 59, e201800148

ЗАКОНОМЕРНОСТИ В ПОРЯДКЕ ЗАПОЛНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ОБОЛОЧЕК В ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛАХ

Шпатаковская Г.В.

*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: shpagalya@yandex.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.099

Экспериментальные [1], [2] и теоретические [3] данные по электронным энергиям $E_{nlj}^{(Z)}$ в основном состоянии атомов в трех группах переходных металлов, железа ($n = 3$), палладия ($n = 4$), платины ($n = 5$), рассмотрены в специальных приведенных координатах [4]:

$$e_n = E_{n0}^{(Z)} Z^{-4/3}, \quad d_{nlj} = (E_{nlj}^{(Z)} - E_{n0}^{(Z)}) Z^{-2/3} (l + 1/2)^{-2}, \quad \sigma_n = \pi n Z^{-1/3},$$

где Z – атомный номер элемента, $n, l, j = l \pm 1/2$ – квантовые числа.

Отмечается разброс измерений энергий связи $|E_{nlj}|$ в разных источниках и почти полное отсутствие экспериментальных данных по энергиям d -состояний в этих группах. Обсуждается расхождение результатов измерений и расчетов [3] релятивистским методом локального функционала плотности RLDA (см. рис. 1а, 1б). Для оценки экспериментальных электронных энергий связи предлагается использовать эмпирический закон подобия по атомному номеру [5] и полиномиальную аппроксимацию функций $\lg |e_n(\sigma)|, \lg d_{nlj}(\sigma)$.

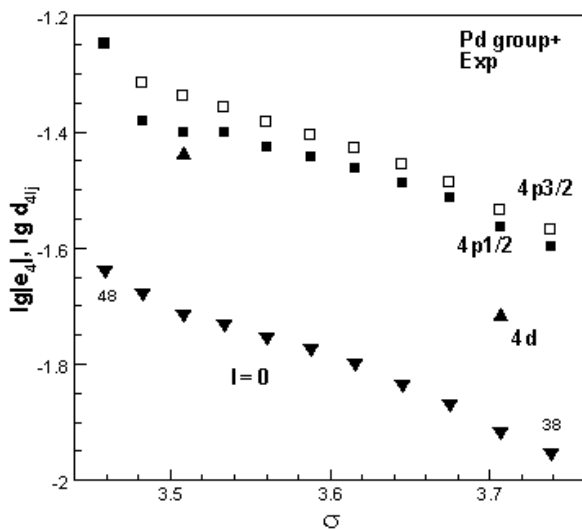


Рис. 1а. Экспериментальная зависимость по данным из баз [1, 2]

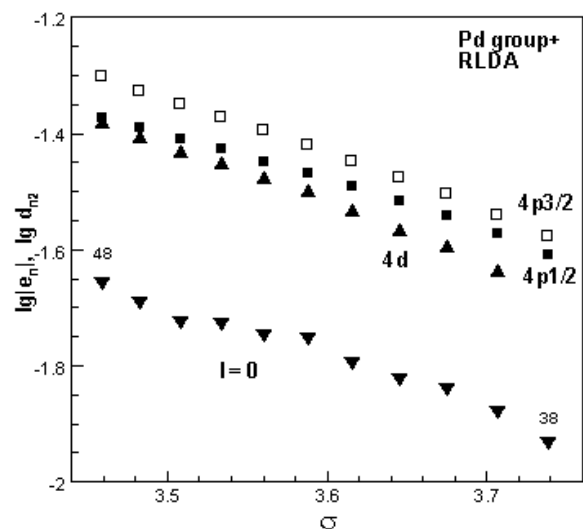


Рис. 1б. Расчет по релятивистской модели функционала плотности RLDA [3]

Литература

- [1]. A. Tompson et al, X-RAY DATA BOOKLET, Center for X-ray Optics and Advanced Light Source (Lawrence Berkeley National Laboratory, update October 2009). <http://xdb.lbl.gov/>
- [2]. Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J., and NIST ASD Team (2019). NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.7.1): <https://physics.nist.gov/asd>
- [3]. S. Kotochigova, Z.H. Levine, E.L. Shirley, M.D. Stiles, and Ch.W. Clark, Atomic Reference Data for Electronic Structure Calculations. <http://www.nist.gov/pml/data/dftdata/index.cfm>
- [4]. Г.В. Шпатаковская, УФН, **189**, 195 (2019)
- [5]. Г.В. Шпатаковская, ЖЭТФ, **158**, 430 (2020)

АВТОМОДЕЛЬНОСТЬ НЕЛИНЕЙНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ В АСИММЕТРИЧНОЙ КОМПЛЕКСНОЙ ПЛАЗМЕ

^{1,2}Мартынова И.А., ^{1,2}Иосилевский И.Л.

¹Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: martina1204@yandex.ru,

²Московский физико-технический институт (НИУ), г. Долгопрудный, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.100

В данной работе исследуются особенности нелинейного экранирования микроионами высоко-заряженных макроионов в классической асимметрично заряженной комплексной плазме. Изучаются двухкомпонентные электронейтральные системы макроионов конечных размеров и противоположно заряженных точечных микроионов в сферически-симметричной электронейтральной ячейке Вигнера-Зейтца с центральным макроионом. Данная работа посвящена проблеме соотношения между эффективным («видимым») зарядом макроиона Z^* и его исходным зарядом Z при учете эффекта нелинейного экранирования. Анализируется, как меняется это соотношение с ростом величины заряда центрального макроиона. Вычислены характеристики двух режимов в этой зависимости эффективного заряда от исходного [1, 2]. Продемонстрирована автомодельность указанной зависимости $Z^*(Z)$ для различных температур системы, концентраций и размеров макроионов [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение с ОИВТ РАН № 075-15-2020-785).

Литература

- [1]. Martynova I.A., Iosilevskiy I.L., J. Phys.: Conf. Ser., 2019, Vol. 946, P. 012147
- [2]. Martynova I.A., Iosilevskiy I.L., Contrib. Plasma Phys., 2019, Vol. 58, P. 203
- [3]. Martynova I.A., Iosilevskiy I.L., Contrib. Plasma Phys., 2020, e202000142

ОБЪЕМНЫЕ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫЕ СТРУКТУРЫ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ В СИЛЬНОМ ОДНОРОДНОМ И НЕОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Дзलिएва Е.С., Карасев В.Ю., Новиков Л.А., Павлов С.И., Тарасов С.В., Яницын Д.В.

*Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: plasmadust@yandex.ru.*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.101

В исследованиях пылевой плазмы в сильном магнитном поле произошел существенный прогресс. В случае применения ВЧ разряда диапазон магнитной индукции распространился до 6 Тл, исследуется влияние такого магнитного поля на плазменные процессы. В случае тлеющего разряда были созданы протяженные пылевые структуры в поле до 2.2 Тл, обнаружены новые (помимо стоячих страт) пылевые ловушки, создано пылевое образование в неоднородном магнитном поле.

В работе изучаются объемные плазменно-пылевые образования в магнитном поле с индукцией до 2 Тл. Наблюдалась существенно различная динамика вращательного движения пылевых кластеров и структур в ловушках в стратах и в области сужения канала тока в тлеющем разряде (от 4 рад/с до 100 рад/с). Протяженные пылевые структуры позволили наблюдать пылевую плазму впервые в сильно неоднородном магнитном поле, при этом скорость вращения имеет очень большие градиенты.

Представленное сообщение является обзором экспериментальных исследований, проводимых с пылевыми кластерами (проект РНФ № 18-72-10019), с пылевыми структурами (проект РНФ № 18-12-00009)

Литература

- [1]. Melzer A., Kruger H., Schutt S., and Mulsow M., *Physics of Plasmas*, 2019, 26, 093702
- [2]. Thomas E.Jr, Lynch B, Konopka U, Merlino R.L, and Rosenberg M., *Phys. Plasmas*, 2015, 22, 030701
- [3]. Schwabe M, Konopka U, Morfill G E et al., *Phys. Rev. Lett.*, 2011, 106, 215004
- [4]. M Thoma et al. *Contr Plasm Phys* 2020. e202000110
- [5]. Dzlieva E.S., Dyachkov L.G., Novikov L.A., Pavlov S.I. and Karasev V.Yu., *EPL*, 2018, 123, 15001
- [6]. Dzlieva E.S., Dyachkov L.G., Novikov L.A., Pavlov S.I. and Karasev V. Yu., *Plasma Sources Science and Technology*, 2019, 28, 085020
- [7]. Dzlieva E.S., Dyachkov L.G., Novikov L.A., Pavlov S.I. and Karasev V. Yu., *Plasma Sources Science and Technology*. 2020. 29. 085020

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЧ РАЗРЯДА В ВОДЕЛебедев Ю.А., Татаринов А.В., Эпштейн И.Л., Титов А.Ю.*Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: lebedev@ips.ac.ru*

DOI: 10.34854/ICSPAF.2021.48.1.102

Разряды различных типов в воде являются объектом интенсивного исследования в последние десятилетия. Настоящая работа продолжает цикл работ по моделированию СВЧ разряда в жидкостях и посвящена изучению кинетических процессов в газовой смеси продуктов разложения воды. Расчеты проводились для атмосферного и пониженного давления (30 торр) для нескольких значений газовой температуры в нульмерном и одномерном приближениях.

Используемая модель содержит балансные уравнения для нейтральных и заряженных газовых компонент плазмы, уравнение Больцмана для свободных электронов плазмы, уравнение для среднего СВЧ поля в малом объеме, заполненным плазмой [1] и уравнение Пуассона. Предварительно были проведены расчеты в нульмерном приближении с использованием кинетической схемы, предложенной в [2, 3] для постоянного СВЧ поля. Эти расчеты позволили проанализировать роль различных реакций в процессах диссоциации воды, образовании нейтральных продуктов, в частности водорода, и в образовании и гибели отрицательно и положительно заряженных частиц для различных значений E/N и температуры газа. Так, определены значения E/N при котором происходит переход от электроотрицательной плазмы к электроположительной для атмосферного давления и давления 30 торр. Проведенный анализ позволил уменьшить кинетическую схему до 19 компонент и 56 реакций. Такое сокращение кинетической схемы облегчает расчет в одномерном приближении и планируемый нами в дальнейшем расчет в двумерном приближении. Сокращенная модель включает положительно и отрицательно заряженные ионы: H_2O^+ , H_3O^+ , $H_5O_2^+$, $H_3O^+(H_2O)$, $H_3O^+(H_2O)_2$, $H_3O^+(H_2O)_3$, O_2^+ , H , O^- , OH^- , электроны и нейтральные молекулы H_2O , H_2 , O_2 , OH , H , O , H_2O_2 , HO_2 . Температура газа считалась равной 2000 К и 500 К и не зависела от состава плазмы.

В расчетах, проведенных с учетом СВЧ поля в плазме с параметрами плазмы, показано, что в широком диапазоне значений СВЧ на электроде-антенне для случаев как атмосферного, так и пониженного давления плазма электроотрицательна. Концентрация электронов невелика по сравнению с концентрацией положительных ионов H_3O^+ , $H_5O_2^+$, $H_3O^+(H_2O)_3$, а квазинейтральность поддерживается отрицательным ионом OH^- . Поле E ослабляется внутри плазмы и большие значения E/N не достигаются. Диссоциация воды не более 20 – 25%. Основные продукты разложения водород, кислород и перекись водорода.

Работа выполнена по Госзаданию ИНХС РАН.

Литература

- [1]. Гильденбург В.Б., Семенов В.Е. // Физика плазмы 1980, т. 6, вып. 2, с. 445
- [2]. Rehman, F., Lozano-Parada, J.H., and Zimmerman W.B. // *Int. J. Hydrogen Energy*, 2012, vol. 37, p. 17678
- [3]. Bobkova E. S., Tatarinov A. V., Ivanov E. V. and Gushchin P. A. // *Plasma Chemistry*, 2018, Vol. 52, No. 2, p. 154 – 164

МАСС-СЕПАРАЦИЯ СМЕСИ Ag+Pb В СКРЕЩЕННЫХ E×B ПОЛЯХ В БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ

¹Лизякин Г.Д., ¹Антонов Н.Н., ¹Усманов Р.А., ^{1,2}Мельников А.Д., ¹Тимирханов Р.А.,
¹Ворона Н.А., ^{1,2}Смирнов В.С., ^{1,2}Ойлер А.П., ¹Кисленко С.А., ¹Гавриков А.В.,
¹Смирнов В.П.

¹Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: glizyakin@gmail.com

²Московский физико-технический институт (НИУ), г. Долгопрудный, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.103

В настоящее время для переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) используется химический экстракционный PUREX процесс. Несмотря на промышленное применение метода, при переработке образуется большое количество жидких радиоактивных отходов (РАО). Это, создает дополнительную нагрузку на окружающую среду. Поэтому на сегодняшний день не прекращаются поиски новых технологий переработки ОЯТ с меньшим количеством и активностью РАО.

Одной из таких технологий является плазменная сепарация веществ [1, 2]. Концепция плазменной сепарации базируется на идее последовательных процессов: 1. Испарение и ионизация ОЯТ. 2. Разделения плазменного потока ОЯТ на две массовые группы (актиноиды и продукты распада урана) в скрещенных электрическом и магнитном полях в присутствии буферной плазмы. Задача буферной плазмы компенсировать объемный заряд разделяемых пучков для повышения производительности процесса по сравнению с электромагнитными методами. 3 Осаждение разделенных потоков ОЯТ на подложку.

В работе представлены исследования процесса сепарации на установке ЛаПлаС [3]. Для моделирования ОЯТ в экспериментах используется смесь серебра со свинцом. Вакуумная камера имеет диаметр 86 см и длину 220 см. В продольном магнитном поле зажигается отражательный разряд с термокатодом (буферный разряд). В этом разряде формируется радиальное электрическое поле. На периферию плазменного столба отражательного разряда инжектируется плазменной струи смеси Ag+Pb отдельным источником плазмы [4]. Электрическое поле буферного разряда увлекает ионы серебра и свинца в поперечном, по отношению к магнитному полю, направлении. Разделенные в пространстве компоненты смеси осаждаются на подложку. Образцы подложки анализируются методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

Литература

- [1]. Dolgolenko D.A and Muromkin Y.A., Physics-Uspekhi 2017, 60, 994
- [2]. Zweben S.J., Gueroult R. and Fisch N.J., Phys. Plasmas 2018, 25, 90901
- [3]. N. Antonov, G. Liziakin, R. Usmanov, A. Gavrikov, N. Vorona, and V. Smirnov, Phys. Plasmas 2018, 25, 123506
- [4]. N.N. Antonov, A.V. Gavrikov, V.P. Smirnov, G.D. Liziakin, R.A. Usmanov, N.A. Vorona, and R.A. Timirkhanov, J. Phys. Conf. Ser. 2018, 946, 012171

ГЕЛИКОННЫЙ ИСТОЧНИК ПЛАЗМЫ С НЕОДНОРОДНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Кузьмин Е.И., Маслаков И.Д., Чесноков А.В., Шиховцев И.В.

ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, e-mail: e.i.kuzmin.94@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.104

В ИЯФ СО РАН ведутся работы по исследованию генерации плазмы на установке с ВЧ источником плазмы на основе геликонного разряда. Перспективным применением такого источника является генерация плазмы в линейных магнитных ловушках и линейных плазменных системах для материаловедческих исследований (РМІ). В свою очередь, РМІ исследования важны при изучении материалов, которые предполагается использовать в качестве первой стенки термоядерных реакторов. На источники плазмы для таких установок накладывается ряд требований, таких как высокая плотность плазмы, отсутствие примесей и стационарный режим работы. Одним из наиболее подходящих источников являются ВЧ источники плазмы, обладающие высокой эффективностью генерации плазмы и длительным временем работы.

В геликонном источнике плазмы разрядная камера представляет собой кварцевую трубку диаметром 110 мм и длиной 400 мм. Разряд в камере создавался с помощью внешней ВЧ антенны – полуволновой геликонной с азимутальным волновым числом $m = \pm 1$. Длина антенны – 150 мм. Внешнее магнитное поле источника формировалось системой из пяти соленоидов с ослаблением поля в области антенны примерно в два раза с целью создания градиента поля в зоне генерации разряда. В качестве источника мощности использовался промышленный генератор COMDEL CX25000-S с частотой 13.56 МГц и мощностью до 25 кВт.

В эксперименте достигнуто стабильное согласование генератора с плазменной нагрузкой, и получена зависимость плотности от прикладываемой мощности в диапазоне $5 \div 25$ кВт. Изучены различные режимы генерации плазмы с магнитным полем в диапазоне $100 \div 600$ Гс в области антенны при давлении газа в разрядной камере $10 \div 45$ мТорр. Измерены радиальные и продольные распределения электронной температуры и плотности плазмы. Плазма имеет колоколообразный профиль плотности с максимумом на оси и седловидное распределение температуры с максимумами на периферии и минимумом на оси. Обнаружено, что по мере увеличения вклада мощности в разряд растет неоднородность профиля плотности с обострением максимума на оси. В целях оптимизации источника по пространственному распределению плазмы и согласованию магнитного поля источника с полями характерными для линейных материаловедческих установок ($\sim 1000 \div 2000$ Гс) выполнены эксперименты по сжиманию плазменного профиля в области сильного поля на расстоянии 40 см от центра антенны. Измерение параметров плазмы проведено с помощью тройных зондов Ленгмюра и СВЧ диагностики плазмы по отсечке. В эксперименте достигнута плотность плазмы $\sim 10^{13}$ см⁻³ с электронной температурой $7 \div 10$ эВ на оси источника.

РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ НОВОГО ЗОНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУИ ЭРД

^{1,2}Майстренко Д.А., ¹Шагайда А.А., ^{1,2}Ловцов А.С.

¹*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: kerc@elnet.msk.ru*

²*Московский физико-технический институт (НИУ), г. Долгопрудный, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.105

В работе представлена новая конструкция зонда с задерживающим потенциалом для исследования струи электроракетного двигателя. Использование подобных зондов позволяет измерять энергетический спектр ионов в струе ЭРД. Исследование струи дает возможность не только диагностировать работу двигателей космических аппаратов, но и предсказать влияние плазмы на бортовые устройства спутников.

Существующие зонды для измерения энергоспектра используют три или четыре сетки и токоприемник. Первая сетка заземлена и не позволяет внутренним сеткам зонда возмущать плазму вне зонда, что, в свою очередь, предотвращает искажение результатов. На вторую сетку подается отрицательный потенциал для отсека электронов. Третья сетка держится под положительным потенциалом и образует потенциальный барьер для ионов. Данная сетка пропускает ионы с энергией, достаточной для преодоления барьера, которые затем достигают коллектора. Зависимость тока на коллекторе от потенциала третьей сетки позволяет получить функцию распределения ионов по энергиям. Иногда перед коллектором располагают четвертую сетку, которая используется для запираания вторичных электронов, образующихся в результате ион-электронной эмиссии.

Эффективная прозрачность зонда для ионов изменяется в зависимости от плотности плазмы и плотности тока ионов, что затрудняет интерпретацию результатов и может приводить к неконтролируемому изменению систематической погрешности измерений. Поэтому для диагностики струи на всех углах нужно либо использовать зонд с изменяемой геометрией, либо использовать несколько зондов, что достаточно сложно и неудобно.

Зонд, представленный в докладе, решает эту проблему и позволяет измерять энергоспектр с погрешностью менее 3% как на оси плазменной струи с максимальной плотностью тока, так и на периферии, где плотность тока меньше на несколько порядков. Новый зонд использует ионно-оптическую систему для фокусировки ионного пучка и отсека электронов. Фильтрация ионов происходит непосредственно на токоприемнике, на который подается положительный потенциал. Ионы с недостаточной энергией не достигают токоприемника.

В докладе представлены результаты численного моделирования зонда. Исследовано влияние отклонения апертур от соосности и наклона падения ионов по отношению к оси зонда на погрешность измерений. Представлены особенности конструкции зонда и методика измерений токов в диапазоне от 1 нА до 1 мА на токоприемнике, находящимся под положительным потенциалом. Также в докладе показаны результаты измерения зависимости плотности тока от угла к оси двигателя и распределение ионов по энергиям на различных углах наклона к двигателю. Приведено сравнение работы зонда с результатами моделирования.

Литература

- [1]. Heubel E. Enhancing Retarding Potential Analyzer Energy Measurements 2014, 1, 141
- [2]. Hey F. G., Vaupel M., Groll C. Development of a Gridless Retarding Potential Analyser 2017, 1, 7
- [3]. Shagayda A. Simulation of charged particles in the ion-optical systems of ion engines (IOS-3D). Software Package, 2014, No. 2014610277

ТОКИ ОБРАТНОГО НАПРАВЛЕНИЯ В ТОКОВЫХ СЛОЯХ: ПРИЧИНЫ И СЛЕДСТВИЯ

Франк А.Г., Сатунин С.Н.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: annfrank@fpl.gpi.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.106

Один из наиболее интересных вопросов, относящихся к динамике токовых слоев, состоит в возможности появления в них электрических токов обратного направления, что теоретически предсказывалось С.И. Сыроватским [1] и было экспериментально обнаружено на поздней стадии эволюции токовых слоев [2, 3]. Вместе с появлением обратных токов наблюдалось уменьшение плотности тока и увеличение толщины периферийных областей токовых слоев. При этом вопросы о связи между этими явлениями и о природе обратных токов до последнего времени оставались открытыми.

В докладе рассматриваются динамические процессы в токовых слоях, которые вызваны движением направленных потоков плазмы в магнитном поле и возбуждением индукционных электрических полей. Это позволило объяснить причины возникновения обратных токов, особенности их эволюции и последствия их появления. Обсуждение базируется на результатах, полученных с помощью установки ТС-3D (ИОФ РАН) [4, 5].

Установлено, что обратные токи могут возникать в широком диапазоне экспериментальных условий, в том числе при формировании токового слоя в плазме с ионами различной массы, однако, момент появления обратных токов и их величины различаются.

Показано, что в пределах ширины токового слоя возникающие электрические поля существенно неоднородны, что обусловлено неоднородным характером скоростей движения плазмы и напряженности нормальной компоненты магнитного поля [6]. У боковых краев слоя индукционные поля максимальны и могут превышать по абсолютной величине начальное электрическое поле, которое инициировало формирование токового слоя. Этот вывод подтверждается результатами эксперимента, согласно которым обратные токи возникают именно у боковых краев слоя. Время появления обратных токов зависит от времени ускорения плазмы и растет для плазмы с тяжелыми ионами.

Есть все основания полагать, что сравнительно быстрое уменьшение плотности тока и увеличение поперечных размеров, или «утолщение», токового слоя вдали от центральной области вызывается появлением токов обратного направления не только у боковых краев, но в пределах всего токового слоя. Обратные токи меньшей величины не регистрировались непосредственно, но проявлялись косвенным образом.

В областях токового слоя с обратными токами впервые зарегистрированы токи Холла противоположных направлений по сравнению с токами Холла на ранних этапах эволюции слоя. Показано, что направление сил, которые ускоряют ионы, также должно изменяться на противоположное, что может вызывать торможение потоков плазмы.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 0024-2018-0045.

Литература

- [1]. С.И. Сыроватский, ЖЭТФ **60**, 1727 (1971)
- [2]. А.Г. Франк, С.Н. Сатунин, Физика плазмы **37**, 889 (2011)
- [3]. A.G. Frank, N.P. Kyrie, S.N. Satunin, Phys. Plasmas **18**, 111209 (2011)
- [4]. A.G. Frank, Plasma Phys. & Contr. Fusion **41**, Suppl. 3A, A687 (1999)
- [5]. С.Ю. Богданов, Н.П. Кирий, В.С. Марков, А.Г. Франк, Письма в ЖЭТФ **71**, 72 (2000)
- [6]. А.Г. Франк, С.Н. Сатунин, Письма в ЖЭТФ, **112**, 667 (2020)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ЗАЖИГАНИЯ СВЧ-РАЗРЯДА В ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДАХ

Лебедев Ю.А., Крашевская Г.В., Батукаев Т.С.

*Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: lebedev@ips.ac.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.107

Настоящая работа продолжает цикл исследований микроволновых разрядов в жидких углеводородах, одного из наименее исследованных разрядов в жидкостях [1, 2]. В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования начальной стадии зажигания СВЧ-разряда в нефтяном растворителе Nefras S2 80/120. Разряд инициировался на конце центрального проводника коаксиальной линии (диаметр 2 мм), сделанного из титана. Давление над поверхностью жидкости было равно атмосферному. Установка детально описана в [3, 4]. Зажигание разряда регистрировалось с помощью девятикадровой электронно-оптической камеры K011 и фотодиода, сигнал с которого выводился на Tektronix 2012B. На другой осциллограф GW Instec GDS71102 выводился сигнал с датчиков падающей и отраженной СВЧ мощности. Падающая мощность выбиралась из условия получения единичной вспышки разряда и была 350 Вт.

Были получены серии фотографий момента зажигания разряда в зависимости от падающей мощности. На фотографиях регистрировался светящийся пузырек с плазмой, интенсивность свечения при этом до определенного момента растет, потом падает, что соответствует отрыву пузырька от антенны. Наличие свечения также регистрировалось фотодиодом. Оцененное время жизни светящегося пузырька у антенны составляет порядка 1.0 мс. Исследование велось с использованием нефраса, но предыдущее изучение СВЧ разряда в широком классе жидких углеводородов показало, что в большинстве из них основные газовые продукты одинаковые [6]. Это позволяет ожидать, что по порядку величины и времени жизни пузырька с плазмой отличаются незначительно.

Динамика развития микроволнового разряда в жидком углеводороде была ранее проанализирована на основе двумерного моделирования в [5]. Модель предполагает, что при подаче СВЧ энергии происходит разогрев конца антенны, испарение углеводорода и газовом пузыре в его парах в объеме жидкости зажигается разряд. Этот пузырек начинает расти в объеме из-за разогрева газа и разложения углеводорода и, достигнув критического размера, он отрывается от антенны и всплывает на поверхность. При этом свечение разряда практически сразу прекращается из-за уменьшения напряженности СВЧ поля при удалении от антенны при учете только термических явлений при описании отрыва пузырька от антенны дает характерные времена на порядок превышающие измеренные. Для детального описания этого явления проводится модификация описанной модели с учетом геометрии настоящего эксперимента.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИХХС РАН.

Литература

- [1]. Lebedev Yu.A. Plasma Phys. Reports. 2017. V. 43. P. 676
- [2]. Lebedev Yu.A. High Temperature, 2018, V. 56, P. 811
- [3]. Averin K.A., Lebedev Yu.A. and Shakhmatov V.A. Plasma Phys.Reports, 2018 V. 44, P. 110
- [4]. Averin K.A., Bilera I.V., Lebedev Yu. A., Shakhmatov V.A., Epstein I.L. Plasma Process Polym. 2019. V. 16, e1800198
- [5]. Lebedev Yu.A., Tatarinov A.V., Epstein I.L. and Averin K.A., Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2016, V.36, P.535
- [6]. Lebedev Yu.A., Averin K.A., Tatarinov A.V. High Energy Chem. 2019, V. 54, 331

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОПЛАЗМЕННОГО СОСТОЯНИЯ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ («ВАКУУМНОМ») ПРЕДЕЛЕ

Иосилевский И.Л.

*Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: iosilevskiy@gmail.com*

Московский физико-технический институт (НИУ), г. Долгопрудный, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.108

Анализируется термодинамика вещества в пределе бесконечно разреженной плазмы нулевой температуры: $T \rightarrow 0$, $\rho \rightarrow 0$ $\{\mu_e(\rho, T) = \text{const.}\}$ («ХМП-предел»). Термодинамика плазмы приобретает в этом пределе замечательную схематическую структуру, являющуюся прообразом реальной структуры термодинамических зависимостей газовой плазмы при $T > 0$. Естественным управляющим параметром в ХМП-пределе является химический потенциал электрона (или атома, молекулы и др.) $\mu_e(\rho, T)$. При специальном выборе координат оба уравнения состояния плазмы (термическое и калорическое) вырождаются в ХМП-пределе в почти идентичные объекты предельно простой, ступенчатой формы («лестница ионизации»). Дифференциальные же термодинамические характеристики – в набор δ -образных пиков (либо провалов) («термодинамический спектр»). Принципиально, что все эти структурообразующие элементы («ступени» и «линии») точно равны по амплитуде и строго «центрированы» (в выбранных переменных) на главных элементах энергетической шкалы вещества – совокупности всех потенциалов ионизации и диссоциации, I_k и D_n , дополненной величиной теплоты сублимации $\Delta_s H^0$. Примечательно, что энергии связи только *основных состояний* комплексов проявляются в вышеуказанных деталях предельных структур. Энергии же возбужденных состояний любых комплексов не отвечают *никаким наблюдаемым элементам* этих структур («ступеням лестницы ионизации» или «линиям термодинамического спектра»). Принципиальным достоинством обсуждаемого представления изотермы $T = 0$ (модифицированной «холодной кривой») является ее роль естественного *нулевого приближения* в процедуре строгого обоснования химической модели плазмы (т.е. описания на языке смеси «свободных» комплексов) исходя из модели физической (ядра + электроны) в рамках систематического (асимптотического) разложения по малому параметру. Важным моментом при этом является то, что в отличие от традиционно развиваемого подхода, исходящего из разложения по степеням активности при постоянной температуре, таким параметром разложения должна служить *температура*, точнее разложение по асимптотической системе функций типа $\lambda_k(T) \sim \exp\{-A_k(\mu_e)/T\}$ при $\mu_e = \text{const.}$ сразу *во всем диапазоне* значений химического потенциала (т.е. одновременно на всей энергетической шкале – от полной ионизации до границы конденсации плазмы).

Обсуждаемая предельная структура термодинамики плазмы при $T \sim 0$ не является привилегией лишь квантовых систем. Существование аналогичных «лестниц ионизации» и «термодинамических спектров» можно ожидать и для широкого класса классических кулоновских систем, таких как модель заряженных твердых и мягких сфер или модель Глаубермана и многих других.

ЛОКАЛЬНЫЙ БАЛАНС ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЕ: ИСТОРИЯ ВОПРОСА

Медведев А.Э.

Институт лазерной физики СО РАН, e-mail: medvedev@laser.nsc.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.109

Интенсивные исследования газового разряда начались в начале 20-го века вместе с применением в стеклянных трубках для нужд наружной осветительной рекламы. Особенностью таких разрядов является протяжённый и однородный вдоль оси трубки, положительный столб (ПС), что позволяет при учёте баланса заряженных частиц не принимать во внимание составляющие электрический ток встречные потоки заряженных частиц, поскольку из-за однородности параметров вдоль оси трубки, количество проходящих через любое сечение частиц остаётся неизменным. Тогда в стационарном случае можем говорить, что для выбранного сечения трубки количество рождённых заряженных частиц равно количеству ушедших на стенки, или погибших в результате рекомбинации в объёме. Однако фактически, частицы рекомбинирующие на стенках сечения трубки (S) приходят из различных областей газового разряда (см. Рис.), положительные ионы (i) – со стороны анода, а электроны (e) – со стороны катода. Особенно это заметно при давлениях плазмообразующего газа более 0,01 Торр, когда разряд переходит из режима свободного пробега заряженных частиц в диффузный. Оценки показывают, что число электронов, прошедших через поперечное сечение трубки при давлении 1 Торр на несколько порядков превосходит число электронов ушедших на стенки трубки под действием амбиполярной диффузии, причём это соотношение возрастает пропорционально давлению газа. При атмосферном давлении отношение потока электронов вдоль оси трубки к потоку на стенки, для характерных размеров трубки составляет 5 – 6 порядков. Качественно соотношение статей баланса частиц не меняется и при учёте рекомбинационных потерь в объёме. Более того, при наличии сильной диссоциативной рекомбинации частиц в объёме стационарный тлеющий разряд физически не может существовать при повышенных и тем более атмосферных давлениях.



Рисунок.
Схема движения заряженных частиц в трубке.

Другими словами, понятие локального баланса заряженных частиц в газоразрядной плазме, корнями уходит в исследования разрядов в трубках достаточно низких давлений, когда частицы находятся в режиме свободного пробега. Исключительно в этом случае можно говорить о балансе как равенстве ионизации и рекомбинации, но не в выделенной точке ПС, как сейчас это понимают, а на участке разрядной трубки длиной порядка её диаметра. В дальнейшем понятие локального баланса частиц, укрепив свой вес и слегка изменив содержание, стало применяться для разрядов в диффузном режиме, с более высокими давлениями и другими геометриями. По существу, сейчас локальный баланс частиц является упрощающим расчёты однородного ПС математическим приёмом, который, как видно из рисунка, для неоднородных разрядов не имеет не только физического содержания, но и никаких оснований для использования в расчётах. Таким образом, налицо созревшая необходимость смены парадигмы моделирования газовых разрядов, с локального баланса заряженных частиц [1] на амбиполярный перенос или перенос плазмы как целого [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-29-19130 мк) и проекта госзадания (АААА-А17-117021750017-0).

Литература

- [1]. Смирнов Б.М. УФН **179** 591 (2009)
[2]. Медведев А.Э. ФНТП–2020 Сборник тезисов, с. 50

СВЯЗАННЫЕ СОСТОЯНИЯ ФОТОННЫХ ПАР КАК СЛЕДСТВИЕ ПРОЦЕССОВ КОГЕРЕНТНОГО СПОНТАННОГО И КОГЕРЕНТНОГО ВЫНУЖДЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЙ

Векленко Б.А.

*Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: ofpetrov@ihed.ras.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.110

Современные методы исследования оптических проблем в дисперсных средах используют формализм вторично квантования. Основные уравнения этого формализма хорошо известны. Кинетика фотонов здесь описывается уравнением Шредингера. Если речь идет о теории возмущений, то проблемы не возникают. Но при изучении кинетики множества фотонов в дисперсных средах возникает необходимость принудительного разрыва квантовых корреляторов. Погрешности при этом, могут превосходить основной результат. В настоящее время существуют два метода решения уравнений квантовой электродинамики при наличии в системе многих частиц (фотонов). Первый метод использует теорию возмущений с последующей заменой алгебраической теоремы Вика ее термодинамическим вариантом. Второй использует метод цепей Боголюбова с последующим принудительным разрывом корреляторов высших порядков. По сути дела, как первый метод, так и второй используют принудительную процедуру разрыва квантовых корреляторов и замену корреляторов высших порядков корреляторами низшего порядка. Ограниченность применения термодинамического варианта теоремы Вика можно усмотреть из ее следствий. Одним из таких следствий является уравнение Дайсона для квантовых двухчастичных функций Грина. Это уравнение замкнуто относительно двухчастичных функций Грина, и не содержит функций Грина более высоких порядков. Такое уравнение не может быть универсальным, и справедливо либо в предположении о гауссовом распределении изучаемых объектов, либо при насильственном пренебрежении корреляторами высших порядков.

В работе [1] был предложен метод Γ -операторов, позволяющий обойти эту трудность. Было показано [2], что метод Γ -операторов эквивалентен математическому аппарату, возникающему при третичном квантовании вторично квантованных уравнений.

В настоящей работе мы обращаем внимание, что метод Γ -операторов, учитывающий корреляторы высших порядков, дает возможность найти неизвестные в настоящее время решения основных уравнений квантовой оптики. Одно из таких решений описывает процесс когерентного вынужденного излучения связанных фотонных пар в максвелловском газе при повышенной температуре. В вакууме такой процесс отсутствует. В результате такого излучения генерирующие процесс возбужденные атомы продолжают оставаться в исходном возбужденном состоянии. Возникшие фотонные пары обладают нулевой энергией и нулевым импульсом. По этой причине их энергия меньше энергии свободных фотонов, волновые векторы в фотонных парах взаимно противоположны. Векторы поляризации фотонов в парах также направлены в противоположные стороны.

Если провоцирующие вынужденное излучение фотоны отсутствуют, то остается процесс когерентного спонтанного излучения фотонных пар. В результате таких процессов возбужденные атомы не изменяют своего первоначального состояния, и потому в квантовом смысле, эти процессы когерентны.

Литература

- [1]. Векленко Б.А. Theory and Applications of Physical Science 2019, том 1, глава 5, стр. 84-101. Doi:10.9734/bpi/taps/v1
- [2]. Векленко Б.А. Journal of Physics: Conference Series 1647 (2020) 01 2016 doi:10.1088/1742-6596/1647/1/012016

ПАРАМЕТРЫ ЭЦР-ПЛАЗМЫ, ФОРМИРУЕМЫЕ ПРОДОЛЬНОМ СВЧ-ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ И ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕОДНОРОДНЫМ МАГНИТНОМ ПОЛЯМИ

Балмашнов А.А., Бутко Н.Б., Калашников А.В., Степин В.П., Степина С.П.,
Умнов А.М.

*Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия,
e-mail: nich@rad.pfu.edu.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.111

Начата работа по изучению возможности создания компактного источника плазмы, в котором для ускорения заряженных частиц используется продольное СВЧ электрическое поле. Отличие данного источника от описанного в работе [1], состоит в способе формирования плазмы – применена схема, ранее используемая в работе [2], и организации продольного СВЧ электрического поля – используется E_{010} , а не E_{011} резонатор. Схема источника плазмы представлена на рисунке. Источник плазмы состоит из плазмопровода (диаметр 6 см., кварцевое стекло), вдоль которого располагается E_{010} цилиндрический резонатор и соленоид, формирующий пространственно-неоднородное стационарное магнитное поле. Возбуждение резонатора осуществляется петлевой антенной на частоте 2.45 ГГц. В работе используется магнетрон М-107 со стабилизированным источником анодного напряжения. Плазма формируется в области ЭЦР, создаваемой постоянными кольцеобразными магнитами (см. [2]).

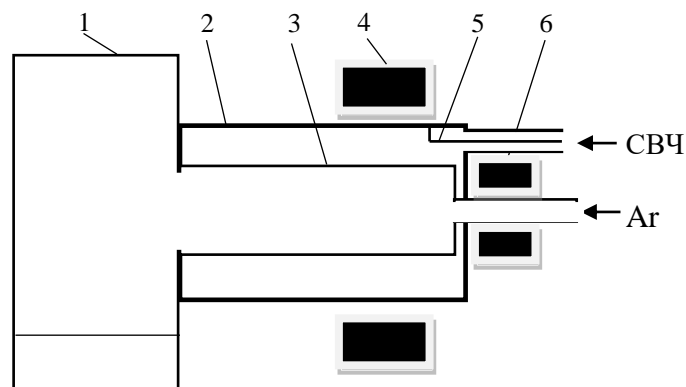


Рисунок. Схема источника плазмы. 1 – система откачки, 2 – корпус источника плазмы (E_{010} резонатор), 3 – диэлектрический плазмопровод, 4 – соленоид, 5 – петлевая СВЧ антенна, 6 – кольцеобразные магниты.

Установлено, что при давлении рабочего газа (Ar) $P = (4 - 8) \cdot 10^{-4}$ Торр и СВЧ мощности поступающей в резонатор, превышающей 100 Вт, формируется плазменный поток, продольная энергия ионной компоненты в котором зависит от величины и профиля магнитного поля в области ЭЦР разряда, создаваемого соленоидом.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы РУДН «500» и гранта РФФИ № 18-29-21041.

Литература

- [1]. Балмашнов А.А., Бутко Н.Б., Калашников А.В., Степин В.П., Степина С.П., Умнов А.М. XLVII Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС. Труды конф. Звенигород, 2020, 183
- [2]. Балмашнов А.А., Бутко Н.Б., Калашников А.В., Степина С.П., Умнов А.М. Прикладная физика. 2020

НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ В ХОЛЛОВСКОЙ МАГНИТНОЙ ГИДРОДИНАМИКЕ

Савельев В.В.

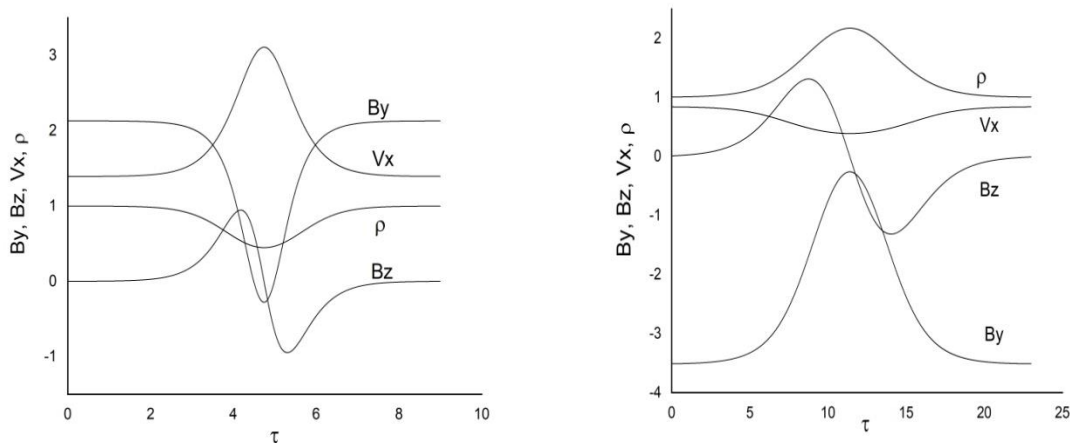
*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: ssvvvv@rambler.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.112

Холловская магнитная гидродинамика (ХМГД) это классическая магнитная гидродинамика (МГД) с учетом эффекта Холла [1,2]. В работе изучаются нелинейные волны в ХМГД. Рассматриваются одномерные уравнения и их решения вида бегущих волн. В отличие от [3] учитывается конечная температура в изотермическом приближении. Как показывается в работе, вопрос о существовании и свойствах таких волн сводится к исследованию следующей системы ОДУ-

$$\begin{aligned} \frac{d B_y}{d \tau} &= -\left(\frac{1}{4}(B_m^2 - B_y^2 - B_z^2 \pm \sqrt{(B_m^2 - B_y^2 - B_z^2)^2 - 8\beta \Pi^2}) - 1\right)B_z \\ \frac{d B_z}{d \tau} &= \left(\frac{1}{4}(B_m^2 - B_y^2 - B_z^2 \pm \sqrt{(B_m^2 - B_y^2 - B_z^2)^2 - 8\beta \Pi^2}) - 1\right)B_y + Q \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь B_y, B_z - компоненты магнитного поля в плоскости перпендикулярной направлению распространения волны (ось x), B_m, Q, β, Π - параметры. Показывается, что эта система является гамильтоновой с гамильтонианом $H(B_y, B_z)$. Линии уровня $H(B_y, B_z) = const$ - фазовые кривые. Особые точки системы (1) могут быть только двух типов - центры и седла. Центры - это периодические решения, а седла соответствуют уединенным волнам. Как следует из (1) имеется две ветви решений для этих волн (знаки (+) или (-)) в (1). Эти ветви отличаются как параметрами, так и свойствами решения. В качестве примеров на рисунке представлены уединенные волны для двух ветвей- левая - знак (+), правая знак (-).



Автор благодарен М.Б. Гаврикову за полезные обсуждения.

Литература

- [1]. Кадомцев Б.Б., Коллективные явления в плазме, 2-е издание. М., Наука, Глав. редакция физ.-мат. лит., 1988
- [2]. Морозов А.И., Введение в плазмодинамику, 2-издание, М., ФИЗМАТЛИТ, 2008
- [3]. V V Savelyev 2018 J. Phys.: Conf. Ser. 1094 012031

ПЛАЗМЕННОЕ ПОЛУЧЕНИЕ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Дудник Ю.Д., Кузнецов В.Е., Сафронов А.А., Ширяев В.Н., Васильева О.Б.

*Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: rc@iperas.nw.ru, julia_dudnik-s@mail.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.113

Плазменные способы получения ультрадисперсных материалов можно отнести к одним из наиболее перспективных технологий в данной области. Высокая температура (энтальпия) плазменного потока и скорость ее изменения позволяют обеспечить эффективный ввод энергии в обрабатываемый материал и, как следствие, гомогенную нуклеацию в парогазовой смеси.

Для этого процесса могут использоваться электродуговые подогреватели газа (плазмотроны) переменного или постоянного тока или СВЧ плазмотроны.

В работах [1 – 3] рассматриваются процессы получения наноматериалов при использовании плазменной дуги постоянного тока и высокочастотной плазменной дуги. Можно заключить, что для плазмотермического получения ультрадисперсных материалов используются плазмотроны постоянного тока мощностью до 100 кВт или высокочастотные плазмотроны мощностью до 50 кВт. С другой стороны применение плазмотрона переменного тока для плазмохимического реактора позволяет минимизировать размеры установки, упростить конструкцию системы питания и использовать стандартную промышленную электрическую сеть и обладают более высокой экономической эффективностью, что может объясняться наличием длительного ресурса непрерывной работы.

В работе рассматривается экспериментальная установка для плазмотермического получения ультрадисперсных материалов на базе однофазного плазмотрона переменного тока мощностью до 50 кВт. Плазмотрон этого класса способен работать с различными плазмообразующими средами при расходе плазмообразующего газа до 30 г/сек. со сроком службы электродов около 200 часов [4, 5]. Это может дать возможность производить ультрадисперсные материалы в непрерывном цикле, при обеспечении высокой химической чистоты процесса.

В работе приведены результаты экспериментальных исследований по получению ультрадисперсных оксидных материалов (оксида железа (III), оксид алюминия и др).

Литература

- [1]. Production of ultrafine metal powders by arc plasma / Uda M. // Nisshin Steel Tech. 1989. Rep. 61. P. 90-99.
- [2]. Production of ultra-fine silicon powder by the arc plasma method / Tanaka K., Ishizaki K., Yumoto S., Egashira T., Uda M. // Journal of Materials Science. 1987. V. 22. P. 2192–2198
- [3]. Formation of ultrafine Niparticles in reduced or atmospheric pressure Ar and H₂ plasma jets / Kikukawa N., Kobayashi M., Sugasawa M., Sakamoto H. // J. High Temp. Soc. Jpn. 1992. V. 18. P. 235-247
- [4]. Плазмотроны переменного тока. Системы инициирования дуги. Особенности конструкции и применения / Сафронов А.А., Кузнецов В.Е., Васильева О.Б., Дудник Ю.Д., Ширяев В.Н. // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 2. С. 58-66
- [5]. Исследование работы высоковольтных плазмотронов со стержневыми электродами / Сафронов А.А., Васильева О.Б., Дудник Ю.Д., Кузнецов В.Е., Ширяев В.Н. // Теплофизика высоких температур. 2018. Т. 56. № 6. С. 926-931

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАГНИТНОГО ТОРНАДО В СОЛНЕЧНОЙ ПЛАЗМЕ

Гавриков М.Б., Таюрский А.А.

*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: mbgavrikov@yandex.ru, tayurskiy2001@mail.ru.*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.114

Под магнитным торнадо понимаются, как правило, вихревые высокоскоростные потоки проводящего электрический ток газа в электромагнитном поле. Такие потоки неоднократно наблюдались в солнечной плазме [1]. Есть основания считать [2], что магнитные торнадо, зарождающиеся в хромосфере Солнца, образуют канал для транспортировки энергии из нижних слоёв Солнца в солнечную корону и являются причиной её аномального разогрева, возникновения солнечных пятен и генерации солнечного ветра.

В докладе показано, что магнитные торнадо теоретически могут реализоваться как специального вида стационарные осесимметричные течения плазмы в магнитном поле с параболическим по радиусу распределением давления, обобщающие известные из гидродинамики течения Т. Кармана вязкой несжимаемой жидкости, вызванное вращением плоского бесконечного диска. Указанные течения являются точными решениями уравнений классической МГД Х. Альфвена и находятся посредством решения некоторых краевых задач на полупрямой для выведенных авторами *уравнений магнитного торнадо* [3], к которым на указанных течениях редуцируются уравнения классической МГД. Комплексификация уравнений магнитного торнадо и преобразования подобия позволяют свести их к нелинейной системе двух уравнений теплопроводности относительно комплексных “температур” и тем самым понизить размерность задачи.

Рассмотрены два класса решений уравнений магнитного торнадо, содержащих течения плазмы типа торнадо, исследование которых сводится к решению *уравнений торнадо* [4] в атмосферном воздухе и позволяет изучить взаимное влияние динамики плазмы и магнитного поля, приводящие к возникновению магнитного торнадо. Рассмотрен численный метод установления нахождения стационарных решений уравнений торнадо [4].

Проведённое исследование указанных двух классов течений даёт, с одной стороны, теоретическое доказательство существования наблюдаемых магнитных торнадо в солнечной плазме, а, с другой, – позволяет обнаружить ряд важных закономерностей взаимодействия магнитного поля с плазмой торнадо. Достоверность полученных результатов такая же как и уравнений классической МГД, применимость которых к анализу явлений в солнечной плазме общепринята.

Литература

- [1]. Parker E. Nanoflares and the solar X-ray corona // *Astrophys. J.* 1988. V. 330. P. 474 – 479
- [2]. Sven Wedemeyer-Böhm, Eamon Scullion, Oskar Steiner, Luc Rouppe van der Voort, Jaime de la Cruz Rodriguez, Viktor Fedun, Robert Erdélyi. Magnetic tornadoes as energy channels into the solar corona // *Nature.* 2012. V. 486. P. 505 – 508
- [3]. Гавриков М.Б., Таюрский А.А. Математическая модель магнитного торнадо // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2020. № 42. 36 с
- [4]. Гавриков М.Б., Таюрский А.А. Простая математическая модель торнадо // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2019. № 42. 34 с

ЗАХВАТ ЭЛЕКТРОНОВ В РЕЖИМ СИНХРОННОГО УСКОРЕНИЯ В КОМБИНИРОВАННОЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ

Милантьев В.П.

*Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия,
e-mail: milantsev_vp@pfur.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.115

Для поддержания циклотронного резонанса электронов с волной в работах [1] было предложено использовать медленно нарастающее со временем ведущее магнитное поле. Этот механизм ускорения, названный гиромагнитным авторезонансом (ГА), был успешно реализован в комбинированной магнитной ловушке [2], представляющей собой цилиндрический резонатор моды TE_{111} , находящийся в магнитном поле пробочного типа. Теоретические исследования проводились с помощью численного моделирования в условиях, максимально приближенных к эксперименту. Вместе с тем, вопросы, связанные с особенностями захвата частиц в режим синхронного ускорения, остаются недостаточно изученными. В данной работе рассматриваются эти вопросы. Исходными являются релятивистские уравнения движения электрона в комбинированной ловушке указанного типа, в уравнениях выделены фазы циклотронного вращения и стоячей волны и их комбинации. Получены усредненные по быстрым фазам уравнения, описывающие движение электрона в области циклотронного резонанса. Предполагается, что синхронизм электрона с волной поддерживается с помощью медленного нарастания ведущего магнитного поля в течение некоторого промежутка времени по линейному закону. Получено формальное решение усредненных уравнений, представляющее собой фактически интегральное соотношение между динамическими переменными электрона. Предполагается, что условие циклотронного резонанса выполняется в середине ловушки, где можно пренебречь пространственной зависимостью пробочного магнитного поля и поля резонатора. Получено приближенное уравнение для резонансной фазы, имеющее вид нелинейного осциллятора с двугорбой потенциальной энергией [3]. С помощью интеграла «энергии» проведен анализ фазовых траекторий с разделением захваченных и пролетных частиц при условии, что импульс электрона задан. Определены резонансные фазы в состоянии равновесия. Показано, что параметр, характеризующий темп нарастания со временем ведущего магнитного поля, должен быть существенно меньше безразмерного параметра интенсивности ускоряющей волны. Найдены приближенные условия захвата электронов в режим синхронного ускорения. Захват электронов сильно ограничен в связи с тем, что глубина потенциальной ямы в рассматриваемых условиях является сравнительно небольшой. При точном рассмотрении условий захвата необходимо самосогласованное решение полной системы уравнений движения, включающей в себя пространственные переменные, продольную и поперечную компоненты импульса и резонансную фазу. Такая задача может быть решена численными методами.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-29-21041.

Литература

- [1]. Golovanivsky K.S. Phys. Scripta. 1980, **22**, 126; IEEE Trans. Plasma Sci. 1983, **11**, 28
- [2]. Andreev V.V., Chuprov D.V., Igisonis V.I., Novitsky A.A. and Umnov A.M. Phys. Plasmas, 2017, **24**, 093518
- [3]. Заславский Г.М., Сагдеев Р.З. Введение в нелинейную физику: От маятника до турбулентности и хаоса. М.: Наука. 1988. 368 с

РАЗРЯД, ПОДДЕРЖИВАЕМЫЙ ИМПУЛЬСОМ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ, КАК ИСТОЧНИК ЭКСТРЕМАЛЬНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Абрамов И.С., Господчиков Е.Д., Шалашов А.Г.

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.116

Источники экстремального ультрафиолетового излучения (ЭУФ) с длиной волны 9 – 14 нм необходимы для развития современной проекционной литографии [1]. Интерес к источникам ЭУФ излучения на основе разряда в расходящейся струе ксенона, поддерживаемого терагерцовым (ТГц) излучением связан с большей, по сравнению с традиционно используемым лазерным излучением, эффективностью поглощения ТГц-излучения плазменным образованием оптимальных с точки зрения генерации ЭУФ излучения размеров и плотности [2, 3].

В связи с этим было предложено использовать для поддержания разряда излучение терагерцовых лазеров на свободных электронах (ЛСЭ), в частности новосибирского ЛСЭ (NovoFEL) [4]. ЛСЭ могут генерировать излучение на частотах 10 – 15 ТГц [5, 6], что позволяет эффективно поддерживать плазменное образование с размерами в несколько десятков микрометров и концентрациями электронов порядка 10^{18} см⁻³. Такая плазма является оптически тонкой для целевого ЭУФ-излучения в диапазоне 11.2 нм $\pm 1\%$, но оптически плотной для большого количества линий с меньшей энергией кванта, что выгодно с точки зрения эффективности будущего источника. Главным же недостатком, затрудняющим использование терагерцовых ЛСЭ, является экстремально короткий (1–100 пс) импульс их излучения.

В настоящей работе предложена теоретическая модель нестационарного сильно излучающего разряда с ионами высокой кратности в расширяющемся потоке ксенона, поддерживаемого субнаносекундным импульсом предельно сфокусированного терагерцового излучения ЛСЭ. Модель использована для поиска перспективных экспериментальных сценариев, обеспечивающих генерацию целевого ЭУФ излучения в диапазоне 11.2 нм $\pm 1\%$.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-32-90019). И. С. Абрамов благодарит за персональную поддержку Фонд развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (грант 18-1-5-12-1).

Литература

- [1]. V. Bakshi, “*EUV Lithography*”, SPIE Press, Bellingham, 758 p. (2018)
- [2]. I.S. Abramov, E.D. Gospodchikov, A.G. Shalashov, *Phys. Rev. Applied* **10**, 034065 (2018)
- [3]. A.G. Shalashov, A.V. Vodopyanov, I.S. Abramov et al. *Appl. Phys. Lett.* **113**, 153502 (2018)
- [4]. A. V. Vodopyanov, A. V. Sidorov, A. P. Veselov et al. *Proc. of International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, 1–2 (2019)
- [5]. “Table of Parameters for IRTHz FELs Worldwide”, Helmholtz Zentrum Dresden Rossendorf Official Website (2020), https://www.hzdr.de/FEL_table
- [6]. Н.А. Винокуров, О.А. Шевченко, *УФН* **188**, 493–507 (2018)

РЕГИСТРАЦИЯ DD-НЕЙТРОНОВ ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫМИ ДЕТЕКТОРАМИ В ЗАМКНУТОМ ПРОСТРАНСТВЕ – МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Аблесимов В.Е., Пашарина О.Ю.

РФЯЦ – ВНИИЭФ, г. Саров, Россия, e-mail: ablesimov@elph.vniief.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.117

При подготовке эксперимента с плазмофокусным нейтронным источником, запитываемым от взрывомагнитного генератора, на начальном этапе проводится лабораторная отработка устойчивой работы плазмофокусной разрядной камеры (ПФ).

Результаты одного из этапов исследований описаны в работе [1]. В дальнейшем аналогичные эксперименты на той же установке были проведены с размещением сцинтилляционных детекторов (СД) на расстоянии 5 и 9 м от ПФ. Измерения проведены в экспериментальном помещении с размерами 18 × 12 м и высотой 7.5 м. Источник излучения располагался на высоте ~2 м от пола. Минимальное расстояние до ближайшей стены составляло 4.5 м, до бетонного потолка ~5.5 м. Направление от источника на детекторы составляло ~80° к оси камеры.

Проведено сравнение результатов измерения излучения ПФ-камеры сцинтилляционными детекторами методом времени пролета с результатами расчетов аналогичной зависимости методом Монте-Карло, рассмотрены особенности формирования сигнала детекторов в замкнутом пространстве экспериментального зала.

Для объяснения особенностей, наблюдаемых на экспериментальных осциллограммах, была предложена гипотеза о влиянии анизотропии выхода нейтронов из источника на форму сигнала СД. Для обоснования этого предположения были проведены модельные расчеты по методике С-007 [2], в которых угловое распределение источника нейтронов задавалось: а) изотропным и б) направленным по оси камеры (крайняя степень анизотропии). Для более наглядной интерпретации расчетов источник нейтронов считался мгновенным. Как общая картина, так и временное положение характерных пиков на экспериментальных осциллограммах в целом соответствуют расчетной картине и подтверждают гипотезу заметного влияния на формирование сигнала детектора рассеянного излучения вкуче с анизотропией потока нейтронов из источника.

Результаты расчетов можно применить для анализа проводимых экспериментов, в том числе для оценки наличия анизотропии выхода нейтронов в конкретном разряде.

Литература

- [1]. Аблесимов В.Е., Андрианов А.В., Базанов А.А., Глыбин А.М., Долин Ю.Н., Дудай П.В., Зименков А.А., Иванов В.А., Ивановский А.В., Калинычев А.Е., Карпов Г.В., Краев А.И., Ломтев С.С., Нудиков В.Н., Пак С.В., Поздов Н.И., Полюшко С.М., Рыбаков А.Ф., Скобелев А.Н., Туров А.Н., Февралев А.Ю. Разработка транспортабельного плазмофокусного нейтронного источника, запитываемого от взрывомагнитного генератора. // ПМТФ. – 2015 г.- № 1 - С. 94-103
- [2]. Житник А.К., Донской Е.Н., Огнев С.П., Горбунов А.В. и др. Методика С-007 решения методом Монте-Карло связанных линейных уравнений переноса нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. – 2011 г. - Вып. 1. - С. 17-24

СОПОСТАВЛЕНИЕ КОРПУСКУЛЯРНОЙ И ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИК В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ РАЗРЯДЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ В ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ

¹Казиев А.В., ^{1,2}Колодко Д.В., ¹Агейченков Д.Г., ^{1,3}Сергеев Н.С., ¹Харьков М.М.

¹НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия

²Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Россия

³НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICSPAF.2021.48.1.118

Исследования состава ионных потоков в низкотемпературной плазме газовых разрядов различных типов представляют большой интерес в связи с определяющим значением процесса ионной бомбардировки поверхности для многих технологических применений. В частности, важной задачей является диагностика ионных потоков в смесях технологических газов [1], либо при наличии в плазме, помимо основных, ионов другого рода [2].

Эксперименты по диагностике компонентного состава плазмы проводились на установке Бэлла. В ней плазма формируется при помощи высокочастотного генератора (13,56 МГц), возбуждающего планарную катушку, и заполняет достаточно большой объем (~ 30 л). Для корпускулярной диагностики использовался магнитный секторный масс-анализатор со специализированной системой экстракции [3]. Максимальная детектируемая масса при ускоряющем напряжении 4 кВ составляла 53 а.е.м. Для оптической диагностики применялся трехканальный спектрометр Avantes AvaSpec ULS2048L.

Проводилось несколько серий экспериментов. В первой серии диагностировался разряд в Ar при различных давлениях (3×10^{-4} – 1×10^{-3} мбар) и мощностях (700–2000 Вт). Изучалось поведение потоков ионов Ar^+ и Ar^{2+} и соответствующих этим ионам интенсивностей спектральных линий. Результаты измерений в зависимости от мощности показаны на рис. 1.

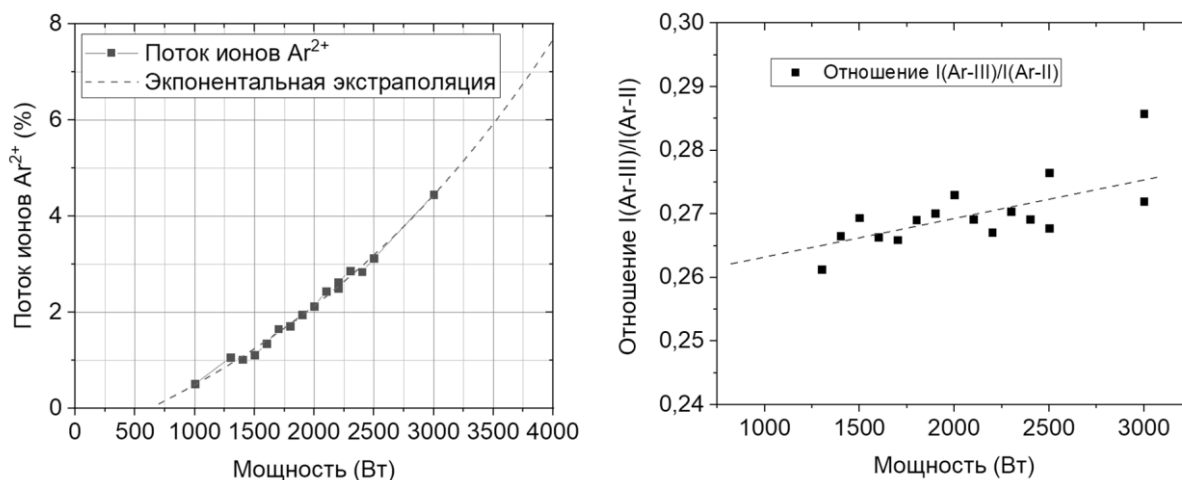


Рисунок 1. Доля ионов Ar^{2+} в потоке из плазмы (слева) и отношение интенсивностей линий Ar^+ и Ar^{2+} (справа)

Во второй серии исследовался разряд в смесях He/Ar и He/Ne с фиксированным суммарным давлением 1×10^{-2} мбар при мощности 1700 Вт. Малая примесь Ar в основном газе (He) приводит к значительному ионному потоку Ar^+ на поверхность. Для примеси в виде Ne такой эффект не наблюдается, и доля ионов Ne^+ в потоке близка к содержанию Ne в смеси. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 20-12-00203).

Литература

- [1]. Kolodko D.V. et al. *Journal of Physics: Conference Series* **747** (2016) 012018
- [2]. Sorokin I.A. et al. *Nuclear Materials and Energy* **12** (2017) 1243–1247
- [3]. Kaziev A.V. et al. *Journal of Instrumentation* **14** (2019) C09004

ДИАГНОСТИКА ПОТОКОВ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ В ПРОЦЕССАХ РЕАКЦИОННОГО МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

¹Казиев А.В., ^{1,2}Колодко Д.В., ¹Конагуру Р., ^{1,3}Сергеев Н.С., ¹Агейченков Д.Г.

¹НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия DOI: 10.34854/ISPAF.2021.48.1.119

²Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Россия

³НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

Известно, что при реакционном магнетронном осаждении оксидных, нитридных и других составных покрытий при изменении содержания реакционного газа в смеси наблюдаются нелинейные гистерезисные эффекты [1]. Эти процессы имеют большое значение для характеристик растущих пленок, поскольку ими определяются стехиометрия и скорость осаждения. Как правило, для контроля процессов реакционного распыления применяют оптическую эмиссионную спектроскопию, но она не позволяет локально определять потоки ионов разных сортов [2]. Для этой цели прекрасно подходит корпускулярная диагностика.

Эксперименты по диагностике компонентного состава потоков ионов из плазмы разряда проводились на установке с магнетроном с круглой плоской мишенью диаметром 75 мм (Pinch Magneto series). Для корпускулярной диагностики использовался магнитный секторный масс-анализатор со специализированной системой экстракции [3]. Максимальная детектируемая масса при ускоряющем напряжении 1 кВ составляла 140 а.е.м. Для повышения чувствительности измерений в качестве детектора применялся вторичный электронный умножитель, подсоединенный к пикоамперметру. Массовые спектры измерялись как в отдельных экспериментах, так и в процессе осаждения покрытий.

Исследовался разряд с мишенями Al и Zr в смесях Ar и O₂ с различным содержанием кислорода в общем потоке газа и при разной мощности разряда (100, 200, 300 Вт). Изучались режимы постоянного тока и импульсно-периодического среднечастотного (100 кГц) питания магнетрона. Выявлено, что повышение содержания кислорода в газовой смеси при сохранении полного потока Ar и O₂ ведет к снижению потоков положительных ионов Ar⁺ и ионов металлов (Al⁺ и Zr⁺), однако соотношение между ними при увеличении потока кислорода изменяется в сторону преобладания ионов металлов. Снижение токов ионов Ar⁺, O⁺, O₂⁺, Al⁺ и Zr⁺ сопровождается ростом тока отрицательных ионов O⁻.

Для импульсно-периодических режимов показано, что при увеличении длительности пауз для фиксированной средней мощности разряда абсолютные потоки ионов металла и газа увеличиваются. Этот эффект иллюстрируется на рис. 1 на примере циркониевой мишени.

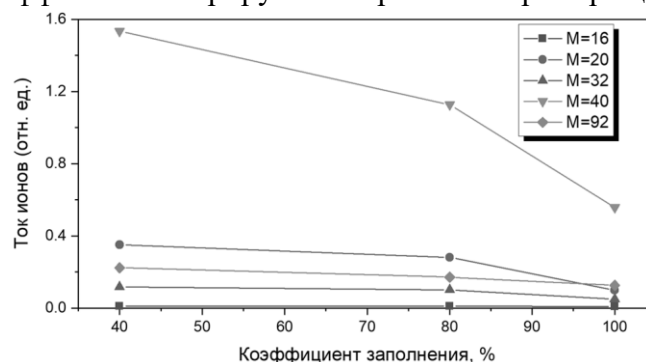


Рис. 1. Зависимость потоков ионов разных сортов от коэффициента заполнения импульсов

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 18-38-20185).

Литература

- [1]. Strijckmans K., Schelfhout R., Depla D. *Journal of Applied Physics* **124** (2018) 241101
- [2]. Sproul W.D., Christie D.J., Carter D.C. *Thin Solid Films* **491** (2005) 1–17
- [3]. Kaziev A.V. et al. *Journal of Instrumentation*, **14** (2019) C09004

ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЕ И ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В ПЛАЗМЕ С ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ЭЛЕКТРОННЫМ ВИХРЕМ УДЕРЖИВАЕМОЙ В ПРОБКОТРОНЕ

Андреев В.В., Новицкий А.А., Умнов А.М.

Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия, e-mail: temple18@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.120

Ранее было показано [1, 2], что гирорезонансное взаимодействие в двух симметрично расположенных областях длинного пробкотрона приводит к генерации плазменных сгустков, а их последующий сброс с центральную область пробкотрона к образованию устойчивого плазменного сгустка с энергичной (несколько сотен кэВ) электронной компонентой. Тормозное излучение, широко используется при изучении плазмы с энергичной электронной компонентой и содержит информацию о функции распределения энергии электронов по скоростям, а также позволяет определить область локализации горячей компоненты плазмы. Проведенные [3, 4] исследования поведения пространственно-временного и спектрально-углового распределения жесткого тормозного излучения показали наличие анизотропии ускоренных частиц и позволили определить временную динамику области локализации электронного сгустка в процессе его генерации и удержания.

Целью данной работы является изучение характеристического излучения генерируемого энергичными электронами сгустков на газовой мишени (тяжелые газы: Хе, Кr) для определения средней степени ионизации атомов, а также числа частиц в сгустке для определения собственных полей.

Для регистрации излучения применялись спектрометры X-123-CdTe и Si-Pin-X-123 откалиброванные по линиям Am^{241} . Проведённые исследования динамики изменения интенсивности характеристических линий рабочего газа (Хе $K_{\alpha 1} = 29,775$ кэВ, Кr $K_{\alpha 1} = 12,648$ кэВ) показали оптимальные условия для захвата частиц, что напрямую связано с количеством энергетических электронов в удерживаемом электронном вихре. Экспериментально определены изменения интенсивностей линий спектра характеристического излучения с газовой мишени при различных давлениях плазмообразующего газа. Спектр и квантовый выход рентгеновского излучения с газовой мишени показали, что электроны ускоренного плазменного сгустка в процессе удержания локализованы в минимуме пробочной ловушки и сконцентрированы в тонком цилиндрическом слое. Спектр и характеристики рентгеновского излучения в продольном и поперечном направлениях по отношению к направлению магнитного поля имеют радикальные отличия как по интенсивности ($I_{\text{поперч}}/I_{\text{продол.}} \sim 7$) так и по предельной энергии (60 и 250 кэВ, соответственно). Результаты настоящей работы объясняют ранее полученные результаты и могут быть использованы для получения информации о количестве ускоренных электронов, их энергетическом спектре и динамике его изменения в пределах рабочего цикла ускорения и удержания генерируемых сгустков в магнитостатическом поле длинного пробкотрона.

Литература

- [1]. Andreev V.V., Novitskiy A.A., Umnov A.M., Chuprov D.V. Instruments and Experimental Techniques. 2012. Т. 55. № 3. С. 301-312.
- [2]. Andreev V V, Chuprov D V, Ilgisonis V I, Novitsky A A and. Umnov A M 2017 Physics of Plasmas 24 093518
- [3]. V.V. Andreev, A.A. Novitsky, A.M. Umnov IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1094 (2018) 012013
- [4]. V.V. Andreev, A.A. Novitsky, A.M. Umnov IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1383 (2019) 012013

РАЗРАБОТКА САМОСОГЛАСОВАННОЙ СТОЛКНОВИТЕЛЬНО - ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ ДИССОЦИИ МОЛЕКУЛЫ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Шахатов В.А.

*Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: shakhatov@ips.ac.ru*

DOI: 10.34854/ICSPAF.2021.48.1.121

В настоящее время проявляется повышенный интерес к созданию плазмохимических реакторов, в которых для утилизации диоксида углерода CO_2 используется низкотемпературная плазма различных газовых разрядов атмосферного давления (барьерный, микроволновой и высокочастотный разряды, тлеющий разряд постоянного тока и т.д.).

Важным этапом при создании и оптимизации работы плазмохимических реакторов является разработка самосогласованных столкновительно – излучательных (высокой размерности) моделей многокомпонентной низкотемпературной плазмы в чистом CO_2 и в газовых смесях, содержащих CO_2 .

Данная работа посвящена разработке согласованных математической и физической моделей низкотемпературной плазмы в чистом CO_2 . Математическая модель включает: компонентный состав (модели химических соединений с соответствующими квантовыми состояниями), физико-химические процессы (с базами данных сечений, констант скоростей, коэффициентами переноса и т.д.), уравнения (электродинамики, процессов переноса излучения, компонент газовой среды и теплопроводности) и методы самосогласованного решения уравнений. Физическая модель многокомпонентной низкотемпературной плазмы основывается на предположениях, при которых справедливы уравнения и методы их решения. Основное внимание уделяется анализу малоизученных физико-химических процессов, обуславливающих диссоциацию углекислого газа в неравновесных условиях.

Установлено, что в низкотемпературной плазме атмосферного давления упругие столкновения и неупругие столкновения первого и второго рода между электронами и возбужденными молекулами CO_2 обуславливают сложную зависимость релаксации энергии, запасенной в поступательных степенях свободы электронов:

от параметров газового разряда (напряженности электрического поля E , концентрации плазмообразующего газа, давления и поступательной температуры газа), компонентного состава и концентраций тяжелых частиц в колебательно- и электронно- возбужденных состояниях;

от времени пребывания возбужденных частиц в газовом разряде и его послесвечении;

от полноты и степени детализации (по квантовым состояниям тяжелых частиц) кинетической схемы, описывающей упругие столкновения и неупругие соударения первого и второго рода электронов с тяжелыми частицами;

от абсолютных значений сечений, соответствующих упругим и неупругим соударениям электронов с тяжелыми частицами.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИНХС РАН.

СЕЛЕКТИВНОЕ РАСПЫЛЕНИЕ НИЗКОАКТИВИРУЕМОЙ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ ЭК-181 (РУСФЕР)

¹Голубева А.В., ¹Хрипунов Б.И., ¹Бобырь Н.П., ¹Преснякова Н.Н., ²Чернов В.М.

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

²АО ВНИИНМ им А.А. Бочвара, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.122

Ферритно-мартенситные стали с быстрым спадом наведённой активности (reduced activation ferrite-martensitic steels, RAFMS) – перспективные конструкционные материалы ядерных, термоядерных и гибридных реакторов. Рассматривают также возможность их применения в качестве обращённых к плазме материалов [1]. Основа RAFMS – железо. В этих сталях присутствуют также 8 – 12 вес. % Cr и 1 – 2 вес. % W. Концентрации прочих элементов гораздо ниже. Если при ионном облучении RAFMS энергия ионов достаточна, чтобы распылить железо и хром, и не достаточна для распыления вольфрама, имеет место селективное распыление. Предполагается, что обогащённый вольфрамом поверхностный слой может защитить материал от дальнейшего распыления.

В данной работе образцы отечественной RAFMS ЭК-181 (Русфер) облучались дейтериевой плазмой с энергией 100 эВ/ион в диапазоне доз облучения $10^{24} \div 10^{26}$ D/m² при потоке

$3 \cdot 10^{21}$ D/m²с и температурах 350 ÷ 650 К. Коэффициент распыления определялся по потере массы образца. При фиксированной температуре коэффициент распыления уменьшается с ростом дозы облучения. При фиксированной дозе облучения коэффициент распыления растёт с ростом температуры. В ходе распыления на поверхности образуются вытянутые структуры, высота которых увеличивается с ростом дозы облучения. Энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия показывает обогащение этих структур вольфрамом. По результатам спектроскопии резерфордского обратного рассеяния концентрация вольфрама на поверхности стали Русфер растёт с ростом дозы облучения и при дозе $7 \cdot 10^{25}$ D/m² увеличивается в 10 раз по сравнению с начальной концентрацией, достигая 4 ÷ 6 ат. %. Обогащение поверхности вольфрамом, вероятно, является причиной снижения коэффициента распыления с ростом дозы облучения.

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (приказ № 1953 от 29.09.2020).

Литература

- [1]. Н. Bolt ,V. Barabash ,G. Federici, J. Linke, A. Loarte, J. Roth, K. Sato, Part 1, “Plasma facing and high heat flux materials – needs for ITER and beyond”, J. Nucl. Mater., **307–311** (2002)

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ВОЛН НА КОЛЛЕКТИВНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В СКРЕЩЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ

^{1,2,3}Марусов Н.А., ^{1,3}Сорокина Е.А., ³Кирий П.А.

¹НИЦ “Курчатовский институт”, г. Москва, Россия, e-mail: marusov_na@nrcki.ru

²Московский физико-технический институт (НИУ), г. Долгопрудный, Россия

³Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.123

Известно, что флуктуации электрического потенциала в замагниченной плазме способны приводить к аномально высокой подвижности компонент плазмы поперек магнитного поля [1]. Сопутствующий перенос частиц и энергии плазмы, в частности, играет ключевую роль при описании физических процессов в плазменных разрядах низкого давления в скрещенных электрическом \mathbf{E} и магнитном \mathbf{B} полях, к которым относятся различные модификации магнетронных разрядов, стационарные плазменные двигатели, источники многзарядных ионов и т.д. Считается, что именно электростатические колебания в таких системах приводят к направленному движению электронной компоненты плазмы вдоль стационарного электрического поля от катода к аноду, что, в свою очередь, влияет на пространственное распределение самого поля [2].

В настоящей работе в рамках кинетического подхода исследуется влияние поля азимутальной электростатической волны на бесстолкновительную динамику и функцию распределения электронов в скрещенных неоднородном радиальном электрическом, $\mathbf{E} = E(r)\mathbf{e}_r$, и однородном осевом магнитном, $\mathbf{B} = B\mathbf{e}_z$, полях (конфигурация обращенного магнетрона). Решается бесстолкновительное кинетическое уравнение с источника $S = \delta(t)n_0(\mathbf{r})\gamma_0(\mathbf{v})$, где $\delta(t)$ – дельта функция от времени t , n_0 и γ_0 – распределения частиц в пространстве, \mathbf{r} , и по скоростям, \mathbf{v} , соответственно, что моделирует эволюцию заданного начального распределения электронов, инжектированных в систему или рождающихся в ней в результате процессов ионизации. Решение кинетического уравнения находится методом обратного интегрирования по траекториям и последующего усреднения функции распределения по времени, что эквивалентно действию слабых столкновений, [3]. Построены характерные зависимости результирующей функции распределения от фазы ларморовского вращения, от косинуса питч-угла между направлением внешнего магнитного поля и скоростью частицы и от модуля скорости; рассчитаны её первые моменты. Исследована зависимость величины осевого тока электронов от волнового вектора и амплитуды возмущений.

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-29-21041.

Литература

- [1]. Б. Б. Кадомцев, Турбулентность плазмы. В сборнике Вопросы теории плазмы. Т. 5. – М.: Атомиздат, 1964. С. 188
- [2]. G.S. Janes, R.S. Lowder. Anomalous electron diffusion and ion acceleration in a low-density plasma // Physics of Fluids. – 1966. – V. 9. – №. 6. – P. 1115-1123
- [3]. В.И. Ильгисонис, Е.А. Сорокина, Э.И. Юрченко. Бесстолкновительная генерация тока в центре плазмы токамака изотропным источником альфа-частиц // Физика плазмы. – 2010. – Т. 36. – №. 1. – С. 3-16

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОГО СВЧ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПАРАМЕТРЫ ПОТОКА ПЛАЗМЫ БЕЗЭЛЕКТРОДНОГО ИНЖЕКТОРА

Калашников А.В., Шевцов Е.А.

*Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия,
e-mail: nich@rad.pfu.edu.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.124

В работе представлены результаты, полученные на экспериментальном стенде [1], созданного для изучения возможности ускорения заряженных частиц продольным СВЧ электрическим полем. Стенд состоит из двух последовательно расположенных цилиндрических резонаторов и соленоидов, обеспечивающих продольное аксиально-симметричное магнитное поле. Диэлектрический плазмопровод (кварцевое стекло, диаметр 6 см, длина 200 см) проходит оба резонатора через их торцевые стенки. Один из резонаторов с модой колебаний TE_{111} выполняет роль плазмобразующего инжектора. Другой, с модой E_{011} , обеспечивает в своем объеме и соответственно в плазмопроводе СВЧ поле преимущественно с продольной электрической составляющей, влияние которой на параметры формируемой плазмы и является предметом исследования. Транспортировка потока плазмы из инжектора в резонатор E_{011} осуществляется созданием градиента осевого магнитного поля между резонаторами. В работе используются два магнетронных генератора со стабилизированными источниками питания (М-105-1, $\omega_0 = 2\pi f_0 = 1,5 \times 10^{10}$ рад s^{-1}). Возбуждение TE_{111} осуществляется двумя штыревыми антеннами, расположенными по азимуту под углом 90 градусов. Обе симметричные антенны запитаны от одного магнетрона с модернизированной системой охлаждения анода. Конструктивные особенности СВЧ тракта обеспечивают разность фаз СВЧ поля на одной антенне относительно другой, что в сочетании с азимутальным расположением антенн в резонаторе, приводит к формированию вращающегося радиального СВЧ-электрического поля. Резонатор E_{011} возбуждается петлевой пристеночной антенной от второго магнетронного генератора. Вакуумная откачка осуществляется турбомолекулярным насосом ТМН-1500, со скоростью откачки 700 л/с. Подача рабочего газа (Ar, Xe) контролируется пьезоэлектрической системой напуска СНА-1. Профиль магнитного поля определялся как расстояниями между соленоидами, так и номиналом силы тока в каждом из них. Измерение параметров плазменного потока проводилось пятисеточным электростатическим анализатором и дискообразным электродом.

Установлены оптимальные режимы работы стенда, при поддержании которых реализуется эффективная наработка плазмы в инжекторе и её дальнейшая транспортировка в E_{011} резонатор. Показана возможность формирования плазмы с концентрацией превышающей критическое значение для используемой СВЧ-частоты. Зафиксированы изменения в потоковой энергии ионной и электронной компонент плазмы под влиянием продольного электрического СВЧ поля.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости дополнительного оснащения экспериментального стенда средствами диагностики и контроля для дальнейших исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы РУДН «5-100» и гранта РФФИ № 18-29-21041.

Литература

- [1]. Балмашнов А.А., Бутко Н.Б., Калашников А.В., Степин В.П., Степина С.П., Умнов А.М. «Многофункциональный экспериментальный стенд. Ускорение частиц плазмы полем, формируемым продольным СВЧ-электрическим полем.». XLVII Международная звенигородская конференция по физике плазмы и УТС. Звенигород, 2020. Тез. док. С. 183

ИЗМЕРЕНИЕ ИОННЫХ ПОТОКОВ НА ПОДЛОЖКУ ПРИ ОСАЖДЕНИИ W И WO₃ В МАГНЕТРОННОМ РАЗРЯДЕ

^{1,2}Сергеев Н.С., ²Казиев А.В., ^{2,3}Колодко Д.В.

¹ НИЦ “Курчатовский институт”, г. Москва, Россия, e-mail: nickbebeskis@gmail.com

² НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия

³ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.125

Разработка технологии нанесения функциональных покрытий на основе вольфрама W и его оксида WO₃ является актуальной задачей как в области техники термоядерных реакторов, так и в областях полупроводниковых приборов. Основным методом осаждения этого типа покрытий является химическое (chemical vapor deposition, CVD) или физическое (physical vapor deposition, PVD). Наиболее распространенным методом PVD является способ осаждения с использованием плазмы, это (plasma enhanced physical vapor deposition). Такой способ активно применяется при осаждении покрытий на основе вольфрама, в частности на графитовую подложку [1].

В любых процессах осаждения первоочередную роль играют начальные осаждённые слои. От условия их осаждения будут во многом зависеть адгезионные свойства наносимого покрытия. Ионные потоки, приходящие на подложку, значительно влияют на процессы формирования первых слоев. В дальнейшем, от ионных потоков зависит получаемая структура покрытия: кристаллическая решётка и наличие в ней дефектов. Она определяет основные физические параметры покрытия: плотность, твёрдость, тепло- и электропроводность. Контроль состава и энергии ионных потоков позволяет лучше понимать процессы, происходящие во время осаждения, и использовать полученные данные для моделирования роста плёнки при напылении.

В работе исследуется процесс осаждения вольфрамовых покрытий в магнетронном разряде пониженного давления $p_r = 0,5$ Па, с плотностью мощности на мишени до 3 Вт/см². Исследовано влияние метода предварительной очистки поверхности образца, а также потенциала смещения в процессе осаждения на адгезионные свойства покрытия.

Разряд одновременно исследовался корпускулярным, зондовым и оптическим методами диагностики. В качестве масс-анализатора использовался магнитный сектор. Рядом с диафрагмой экстрактора располагался собирающий зонд, позволяющий определять абсолютные значения ионных потоков на поверхность подложки. В качестве детектора в анализаторе использовался вторичный электронный умножитель ВЭУ-6. Данная конфигурация позволяет регистрировать как положительные, так и отрицательные ионы. Для оценки параметров плазмы использовалась оптическая эмиссионная спектроскопия, дополнительно применялся зонд Ленгмюра для определения электронной температуры.

Литература

[1]. Fukumoto M. *et al. Phys. Scr.* 014029 (2017)

ИСТОЧНИК НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ДЕЗИНФЕКЦИИ БЫТОВЫХ И МЕДИЦИНСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

¹Рогозин К.А., ²Соколов М.Н., ¹Федорович С.Д., ¹Квасков В.С., ¹Коньков А.А.

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

²Ярославский государственный университет им. Демидова, г. Ярославль, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.126

Для обработки поверхностей с целью дезинфекции можно применять низкотемпературную плазму. Низкотемпературная плазма воздуха позволяет эффективно дезинфицировать поверхности без их повреждения и нагрева [1], воздействуя на вирусы и бактерии [2].

В работе [3] показано, что на гидрофильных поверхностях микрокапли, содержащие Covid-19, высыхают значительно быстрее, чем на гидрофобных и, следовательно, срок жизни вируса на гидрофильных поверхностях сокращается. Известно, что обработка различных поверхностей низкотемпературной плазмой позволяет уменьшить краевой угол смачивания.

Для дезинфекции поверхностей в качестве источника низкотемпературной плазмы предлагается использовать малогабаритный низкочастотный плазматрон атмосферного давления [4]. Параметры установки: напряжение питания 220 вольт, потребляемая мощность 500 Вт, масса 1.5 кг, напряжение разряда 10 – 20 кВ, ток разряда 10 мА, частота 80 кГц, рабочий газ – воздух, скорость потока рабочего газа 7.5 м/с.

Эргономичность и малые габариты устройства позволяют применять его для ручной обработки бытовых и медицинских поверхностей.

Проведены испытания по обработке культуры бактерий *Escherichia coli* (штамм dh5 α) низкотемпературной плазмой. Обработка проводилась плазмой воздуха и плазмой с присадкой аэрозоля перекиси водорода, полученного ультразвуковым методом. Инжекция аэрозоля проводилась на выходе разрядной камеры в основание центра факела.

В результате экспериментов обнаружено, что воздействие плазмы оказывает негативный эффект на испытываемую культуру бактерий. Инжекция пероксида водорода позволила достичь более эффективных результатов обработки. В области наиболее интенсивного воздействия плазмы перекиси водорода (центр обрабатываемой поверхности) наблюдается меньший рост культуры, чем на периферии. Обработка в течении минуты и выше позволила значительно уменьшить количество бактерий в испытуемом материале.

Получен оптический спектр плазменного разряда. При добавлении в разряд пероксида водорода наблюдается рост интенсивности и изменение молекулярного состава спектра, что объясняет повышение эффективности обработки с инъекцией пероксида водорода.

Работа частично поддержана Министерством науки и высшего образования РФ, проект № FSWF-2020-0023.

Литература

- [1]. R.A. Wolf, “Atmospheric pressure plasma for surface modification”, Scrivener Publishing LLC (2013)
- [2]. W.A. Rutala, D.J. Weber, and the Healthcare Infection Control Practices Advisory Committee (HICPAC) Guideline for Disinfection and Sterilization in Healthcare Facilities, 2008
- [3]. R. Bhardwaj, A. Agrawal; Physics of Fluids 32, 081702 (2020)
- [4]. K.A. Rogosin and A.A. Kon'kov Compact plasmatron with diverging rod electrodes Journal of Physics: Conference Series 1370 (2019) 012037

ОПТИЧЕСКАЯ ЭМИССИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЧ-ПЛАЗМЫ В СМЕСЯХ МЕТАН-ВОДОРОД-СИЛАН В ПРОЦЕССЕ ОСАЖДЕНИЯ ПЛЕНОК SiC И КОМПОЗИТОВ SiC-АЛМАЗ

¹Юров В.Ю., ^{1,2}Ральченко В.Г., ¹Мартыанов А.К., ^{1,2}Антонова И.А., ¹Седов В.С.,
¹Шевченко М.Ю., ¹Большаков А.П.

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия

²НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.127

СВЧ плазма в смесях силан-водород и силан-водород-метан эффективно используется для химического осаждения из газовой фазы пленок SiC и композитов SiC-алмаз, однако свойства такой плазмы при давлениях около 100 Торр до сих пор мало изучены [1]. Мы охарактеризовали СВЧ плазму (2,45 ГГц) в смесях SiH₄ + H₂ и SiH₄ + CH₄ + H₂ (72 Торр) с содержанием силана от нуля до 5% с помощью оптической эмиссионной (ОЭ) спектроскопии высокого разрешения. Помимо линий ОЭ димера C₂, серии Бальмера возбужденного атомарного водорода H_α, H_β, H_γ, H_δ, H_ε и радикала CH мы наблюдали атомные линии Si при 263, 288 и 391 нм и относительно слабую эмиссию SiH, при этом атомы Si являются основными Si-содержащими частицами в плазме (Рис.1а). Температура газа T_g ≈ 3160 К оценена по вращательному крылу линии димера C₂ в полосе излучения (Δν = 0, λ = 516.5 нм). Плотность поглощенной в плазме СВЧ мощности находилась в диапазоне от 36 до 43 Вт/см³. Интенсивность линий H, C₂ и Si в спектрах ОЭ в зависимости от концентрации силана в смесях с H₂ и H₂ + CH₄ демонстрирует явное изменение наклона при ≈0,5% SiH₄ (Рис. 1б). В этой же точке плотность СВЧ мощности, T_g, отношение интенсивностей H_α/H_β (чувствительное к электронной температуре T_e) также демонстрируют четкий экстремум. Мы обсудим возможные причины наблюдаемой динамики параметров плазмы, а также представим данные о структуре и свойствах выращенных пленок 3C-SiC на подложке (111) Si и композитных пленках SiC-алмаз.

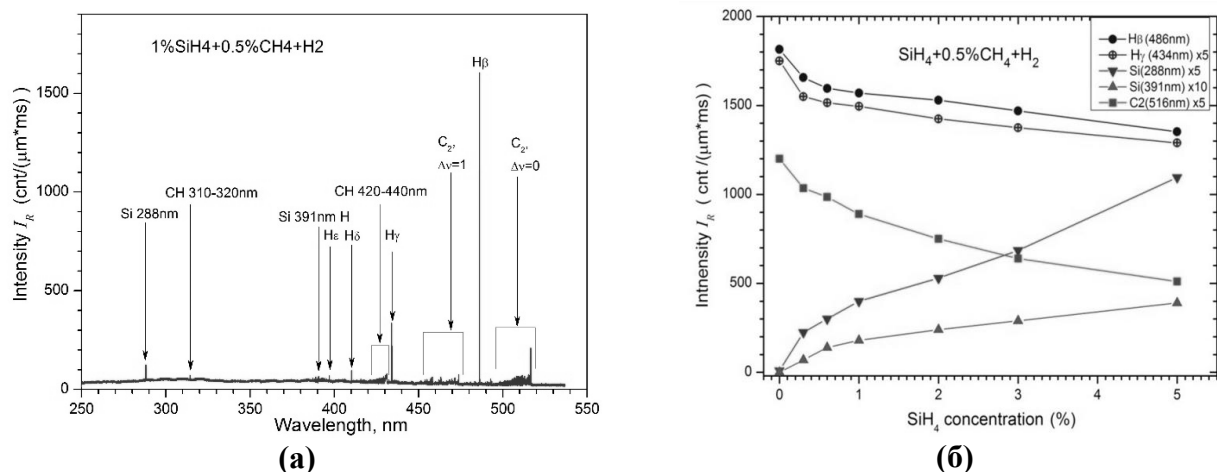


Рис.1. (а) Спектр ОЭ в смеси 1%SiH₄+0,5%CH₄+H₂. (б) Интенсивности линий Si 288 нм, Si 391 нм, H_β, H_γ и C₂(516 нм) в зависимости от содержания силана в смеси SiH₄ + 0,5%CH₄ + H₂.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 18-29-11023.

Литература

- [1]. V.S. Sedov, A.K. Martyanov, A.A. Khomich, S.S. Savin, V.V. Voronov, R.A. Khmel'nitskiy, A.P. Bolshakov, and V.G. Ralchenko, *Diam. Relat. Mater.* 98, 107520 (2019)

ГЕНЕРАЦИЯ СВЕРХТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ В ТОКОВЫХ СЛОЯХ, ФОРМИРУЕМЫХ ПРИ РАЗРЯДЕ В КРИПТОНЕ

Кирий Н.П., Воронова Е.В.

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук,
г. Москва, Россия, kyrie@fpl.gpi.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.128

В настоящей работе исследовалось ускорение криптоновой плазмы вдоль наибольшего из поперечных размеров токового слоя – ширины слоя. Ускорение происходит на метастабильной стадии эволюции токового слоя, при этом магнитная энергия, накопленная в окрестности токового слоя, преобразуется в кинетическую энергию плазмы [1].

Исследования проводились на установке ТС-3D спектральными методами [2, 3]. Токовые слои создавались в магнитном поле с X линией при разряде в криптоне, градиент магнитного поля составлял ~ 0.57 кГс/см, начальное давление рабочего газа ~ 33 мТорр, амплитудная величина электрического тока в слое – 45 кА. Часть экспериментов была выполнена в 3D магнитных конфигурациях, в которых вдоль тока прикладывалось однородное магнитное поле $B_z = 2.9$ кГс [4].

Измерения проводились с помощью двухканальной оптической схемы, в которой излучение плазмы собиралось как из центральной квазицилиндрической области, вытянутой вдоль направления тока в слое, так и вдоль ширины слоя, что позволило определить температуру и энергию ускоренных потоков ионов криптона.

Регистрировались спектральные линии ионов криптона: Кг II 473.9 нм и Кг III 501.6 нм, причем одновременно в обоих направлениях, в одном импульсе работы экспериментальной установки, с помощью программируемой цифровой электронно-оптической камеры, длительность строб-импульса составляла $\Delta t_{\text{gate}} = 1$ мкс.

Установлено, что максимальную энергию в процессе ускорения приобретают ионы криптона Кг II при формировании токового слоя в 2D магнитной конфигурации: $W_x^{\text{max}} \approx 420$ эВ, при этом направленная энергия ионов криптона W_x^{max} в ~ 6 раза превышает тепловую энергию ионов. Показано, что измеренные энергии ускоренных ионов криптона Кг II и Кг III в основном согласуются с действующими в токовых слоях силами Ампера, которые определялись из магнитных измерений [5]. Сделано предположение, что ускорение ионов криптона Кг II и Кг III пространственно неоднородно вдоль перпендикуляра к средней плоскости токового слоя. Заметим, что эта гипотеза требует экспериментальной проверки.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 0024-2018-0045 "Фундаментальные проблемы динамики, удержания и нагрева плазмы в трехмерных магнитных конфигурациях".

Литература

- [1]. Syrovatskii, S.I. // Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1981. V. 19. P. 163
- [2]. Кирий Н.П., Марков В.С., Франк А.Г. // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 95. С. 14
- [3]. Кирий Н.П., Марков В.С., Франк А.Г., Васильков Д.Г. // Физика плазмы 2019. Т. 45. С. 313
- [4]. А.Г. Франк, В.П. Гавриленко, Н.П. Кирий, Г.В. Островская. // ЭНТП. М.: Янус, 2008. Серия Б. Т III-2. С. 335
- [5]. Frank A.G., Kyrie N.P. // Plasma Phys. Rep. 2017. V. 43. P. 696

РАЗВИТИЕ САМОСОГЛАСОВАННОГО СВЧ РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЕ В ПОЛЕ ОТКРЫТОГО РЕЗОНАТОРА

Жуков В.И., Карфидов Д.М.

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук,
e-mail: zhukov.vsevolod@physics.msu.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.129

В работе исследуется развитие СВЧ разряда низкого давления, поддерживаемого поверхностной электромагнитной волной (ПЭВ) [1] в резонаторе открытого типа, образованного двумя плоскопараллельными металлическими зеркалами. Разряд осуществлялся в кварцевой трубке длиной 2 м диаметром 27 мм, заполненной воздухом в диапазоне давлений от 0.02 Торр до 2 Торр. ПЭВ возбуждалась волноводным аппликатором [2], подключенным к магнетрону, мощностью 800 Вт, генерирующему импульсы длительностью 50 мс на частоте 2.45 ГГц.

Разряд на поверхностной волне распространяется по трубке от источника излучения [1] и образует между аппликатором и первым зеркалом резонатора плазменный столб, поддерживаемый ПЭВ. Резонатор состоит из двух плоских медных зеркал радиусом 12 см, через центр которых проходит разрядная трубка. Накачка энергии в резонатор производилась через отверстие связи в первом зеркале – плазменный столб проникает в резонатор, являясь элементом связи и возбуждая поле в объеме резонатора. Распространяясь в резонаторе, разряд останавливается в минимуме создаваемого им же поля, где нарушается условие для существования ПЭВ: [3] $n_{\min} = (1 + \varepsilon_d)n_c$, где ε_d – диэлектрическая проницаемость кварца, а n_c – критическая концентрация плазмы. При этом граница столба имеет диффузионный характер и спадает от области с критической концентрацией для поверхностной волны n_{\min} с характерным масштабом 1 – 2 см [3]. Плазма с таким распределением концентрации на конце (границе) разряда попадает в область нарастающего в сторону пучности объемного поля резонатора, что приводит к резкому росту ионизации. При достижении критической концентрации n_{\min} поверхностная волна продолжает распространение. Такое развитие разряда продолжается до следующего узла поля, в котором он останавливается и весь процесс повторяется. Таким образом, разряд распространяется в виде следующих один за другим фрагментов длиной $\sim \lambda_0/2$ (где $\lambda_0 \approx 6.1$ см – длина волны в свободном пространстве) до исчерпания запасов энергии или до достижения им второго зеркала. На заключительной стадии распространения разряд превращается в плазменный столб с некоторой модуляцией плотности плазмы, по которому распространяется поверхностная волна. В работе показано, что с помощью подстройки резонатора возможно управление длиной разряда между зеркал.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90162.

Литература

- [1]. Trivelpiece A.W. Slow wave propagation in plasma waveguides, the DP-degree Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, 1958
- [2]. Moisan M., Zakrewski Z. // J. Phys. D: Appl. Phys., 1991, vol. 24, p. 1025
- [3]. Zhukov V.I., Karfidov D.M., K.F. Sergeichev // Plasma Physics Reports, 2020, vol. 46, No. 8, p. 760-768

МАКРОСКОПИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОВОЛНОВОГО ПОДПОРОГОВОГО РАЗРЯДА В ГАЗАХ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Артемьев К.В., Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Борзосеков В.Д., Давыдов А.М., Колик Л.В., Кончечков Е.М., Косый И.А., Моряков И.В., Петров А.Е., Сарксян К.А., Степахин В.Д., Харчев Н.К.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: borzosekov@fpl.gpi.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.130

Газовые разряды всевозможных форм и типов давно являются объектом прикладных исследований для создания новых плазмохимических технологий. Одно из таких технологических направлений связано с воздействием плазмы разряда на газы атмосферного давления: конверсия различных газов в экономически более ценные или деструкция экологически вредных газов. В ИОФ РАН (Москва) исследуется возможность использования подпорогового микроволнового разряда, возбуждаемого в гауссовом пучке излучения гиротрона (длина волны $\lambda = 4$ мм, мощность $P_{\text{СВЧ}}$ до 500 кВт, длительность импульса до 20 мс) для очистки атмосферного воздуха от широкого спектра экологически вредных примесей. Разряд характеризуется высокими температурами газа ($T_g = 4000 - 7000$ К), достигаемыми за короткое время ($dT_g/dt \geq 10^6$ кК/с), а также быстрым охлаждением ($-dT_g/dt \approx 10^4$ кК/с). Такие параметры разряда реализуются благодаря нелинейной стадии развития ионизационно-перегревной неустойчивости в плазменном ореоле несамостоятельного разряда, а сам разряд представляет собой чередование стадий несамостоятельного и самостоятельного разрядов. Хотя данный вид разряда уже становился объектом исследований (см., например, [1]), но для перехода к первым попыткам реализации технологии необходимо более подробно изучить его основные свойства (скорости распространения, газовую температуру) в различных экспериментальных условиях (род газа, давление, интенсивность микроволнового излучения).

В докладе представлены результаты экспериментов по исследованию зависимости скорости распространения подпорогового микроволнового разряда от мощности излучения гиротрона в пределах 70 – 400 кВт в воздухе и углекислом газе при атмосферном давлении, скорости распространения в аргоне при мощностях СВЧ 70 – 200 кВт. Практически во всем диапазоне мощностей зависимости могут быть представлены квадратичной параболой. Наименьшие скорости распространения наблюдались в углекислом газе, а наибольшие в аргоне. Определенные по континууму спектра свечения разряда [2] температуры газа не имеют явной зависимости от мощности и лежат в диапазоне 5 – 6 кК для воздуха и аргона, а для углекислого газа ~10 кК. Также в экспериментах была определена зависимость скорости распространения фронта разряда от давления газа (в воздухе и углекислом газе), которая оказалась пропорциональной $N_0^{-0.8}$, где N_0 — начальная концентрация газа. Полученные теневые фотографии разряда в воздухе указали на существование ударных волн перед фронтом разряда при мощностях СВЧ излучения выше 250 кВт, а также подтвердили возможность рассмотрения данного разряда, как системы множества плазменных «микровзрывов». Эксперименты, проведенные при малых мощностях микроволнового излучения гиротрона позволили обнаружить пороговую мощность (35 кВт), при которой фронт разряда теряет присущую ему ячеистую структуру, а скорость распространения существенно падает.

Литература

- [1]. С.В. Голубев, С.И. Грицинин, В.Г. Зорин, И.А. Косый, В.Е. Семенов. Высокочастотный разряд в волновых полях. ИПФ АН СССР, 1988, Горький, с. 136-197
- [2]. Спектральная пирометрия. Магунов А.Н. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2012. 248 с.

**ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ
«ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛАЗМЕННЫХ И ЛУЧЕВЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ»**

**SECTION
«PHYSICAL BASIS FOR PLASMA AND BEAM
TECHNOLOGIES»**

ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ: СВЯЗЬ С ФОНОНИКОЙ

Змиевская Г.И.

*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: zmig@mail.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.131

Численные эксперименты в области физики плазмopodobных сред осуществляются методом стохастического аналога неравновесных процессов образования зародышей фазового перехода /ФП/ под воздействием радиационных потоков [1, 2]. Решение систем стохастических дифференциальных уравнений Ито в смысле Стратоновича /СДУ/ связано с квазилинейными уравнениями математической физики в частных производных, доказаны существование и единственность решения СДУ. Имплантация ионов с образованием вакансионно - газовой поры /ВГД/ и их структур в кристаллической решетке, возникает на флуктуационной стадии ФП ($\sim 10^{-4}$ с) в «открытой» физической системе. Стохастические динамические переменные, $\{g(t)\}$, размер ВГД, $\{x(t)\}$, $\{y(t)\}$, $\{z(t)\}$ - декартовы координаты центра масс, описывают кластеризацию зародышей и Броуновское движение /БД/ системами СДУ, решение каждого использует 10^6 траекторий случайных процессов модели[3].

БД дефектов в решетке вызывается потенциалами $U(x, y, z, t)$ - дальнедействующими, косвенного упругого взаимодействия ВГД между собой, с границами расчетной области и дислокациями, которое осуществляется через возмущение колебаний акустических фононов решетки, рассчитываемых самосогласованно. Зависимость потенциала от расположения ВГД был выведен ранее с помощью диаграмм Фейнмана для слабоанизотропного типа решеток, коэффициенты в которых учитывают упругие модули плоскостей решетки.

В твердых телах важным фактором, который может влиять на регуляцию теплообмена, являются ВГД, важно понять какое реализуется тепловое сопротивление в их структурах и на границах слоев металла и диэлектрика. Тепловые фононы рассеиваются на дефектах. Именно по этой причине распространение тепла в твердом теле, в отличие от звука, описывается тепловой диффузией, то есть плавным изменением свойств образца при разных температурах, согласно фофонике — новому разделу физики, занимающемуся тонким управлением звуковыми, ультразвуковыми и тепловыми колебаниями в различных структурах [4]. Управление тепловыми потоками и использование фофоники, или фононных устройств, действуют как термодиоды, тепловые транзисторы, тепловые логические схемы и тепловая память, они применяются для транспортировки и управления тепловыми колебаниями, то есть частотами порядка терагерц и выше. Длины волн составляют считанные нанометры и меньше, то и соответствующие структуры должны изготавливаться чуть ли не с атомарной точностью. В принципе, такие многослойные структуры (сверхрешетки) делать умеют, но технически это уже гораздо более трудоемкий процесс. Расчеты пористости применялись при изучении свойств сред для одномерного фотонного кристалла и повреждений многослойных металлических технологических зеркал в диагностике и предупреждении деградации объектов культурного наследия, в создании новых материалов защитных покрытий и методов их нанесения и др.)

Литература

- [1]. G.I. Zmievskaya, A.L. Bondareva // J. of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, Volume 10, Issue 4, 802 – 808. – 2016
- [2]. Г.И. Змиевская // Известия РАН. Механика твердого тела, 2020, No 1, 140 – 151
- [3]. G.I. Zmievskaya // Physics of the Solid State, Vol, 62, No.1, 40-45. 2020
- [4]. M. Maldovan // Sound and heat revolutions in phononics. Nature, vol. 503, p. 209–217, 2013

МНОГОКАНАЛЬНОСТЬ СИНТЕЗА УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ

¹Шавелкина М.Б., ¹Иванов П.П., ¹Кавыршин Д.И., ¹Амиров Р.Х., ¹Бочаров А.Н.,
²Шавелкин М.А.

¹*Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия*

²*Национальный исследовательский университет "МЭИ", г. Москва, Россия*
e-mail: mshavelkina@gmail.

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.132

Углеродные нанотрубки представляют собой вытянутые структуры с диаметром от одного до нескольких десятков нанометров и длиной в несколько микрон и сочетают в себе свойства молекул и твердого вещества. Эти трубки содержат один или несколько гексагональных слоев графита, согнутых в цилиндр [1, 2]. Помимо цилиндрической геометрии слой графита может образовывать двумерный кристалл - графен. Уникальные физико-механические свойства углеродных нанотрубок и графена и их высокая удельная поверхность делают эти наноструктуры применимыми для разработки новых электронных устройств, сверхпрочных и легких материалов, современных источников питания (накопители водорода, суперконденсаторы, топливные элементы, фотоэлектрические преобразователи), эффективных фильтров, биосовместимые материалы и т. д. [3, 4].

С помощью плазмохимического подхода, основанного на применении плазмотрона постоянного тока, был синтезирован широкий спектр углеродных наноструктур: углеродные нанотрубки, наностенки, графен, гидрогенизированный графен и смесь нанотрубок с графеном. Синтез проводился в плазмохимическом реакторе с варьированием давления в диапазоне 350-710 Торр и типа углеводорода в плазмообразующей смеси с гелием. В качестве источника углерода использовались алифатические соединения (пропан, бутан, метан и ацетилен), обеспечивающие изменение соотношения С:Н. Плазмохимический пиролиз углеводородов в интервале температур 1000-8000К проанализирован с использованием термодинамических и газодинамических характеристик плазменного потока в предположении локального термодинамического равновесия [5]. Установлено, что основной вклад в образование предшественников конденсированного углерода вносит равновесный состав в интервале температур 2500-3500 К. В этом интервале взаимосвязь между атомарным водородом Н и молекулами углеводородов СН нарушается, и мольная доля твердого углерода S_{gr} увеличивается. Показано, что соотношение С: Н в исходном углеродном источнике влияет на плазмохимическую систему, что приводит к различным путям образования наноструктур.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 18-08-00081.

Литература

- [1]. Eletsii A.V. Physics-Uspekhi, 1997, 40, 899
- [2]. Eletsii A.V. et al. High Temperature, 2012, 50, 488
- [3]. Siwal S.S. et al. Polymers, 2020, 12, 505
- [4]. Mostofizadeh A. et al. Journal of Nanomaterials, 2011, 685081
- [5]. Shavelkina M.B. et al. J Phys D Appl Phys., 2019, 52, 495202

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ АЗОТА ПРИ СИНТЕЗЕ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПЛЁНОК С РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ АКТИВАЦИИ ГАЗА

¹Медведев А.Э., ²Емельянов А.А., ²Юдин И.Б., ²Плотников М.Ю., ²Тимошенко Н.И.,
³Окотруб А.В.

¹Институт лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск, Россия,
e-mail: medvedev@laser.nsc.ru

²Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия, e-mail: alemelyanov@gmail.com

³Институт неорганической химии СО РАН, г. Новосибирск, Россия,
e-mail: spectrum@niic.nsc.ru

DOI: 10.34854/ICSPAF.2021.48.1.133

В работе проводится анализ влияния добавок азота на синтез алмазных плёнок при различных способах активации прекурсоров: 1. в СВЧ плазме потока газов при средних давлениях; 2. в СВЧ камере при низком давлении [1]; 3. в потоке газов, активированных нагретой вольфрамовой нитью [2].

Добавки азота интересны, поскольку возле включений примеси азота возникают вакансии [3], которые при концентрации более 0,1% имеют особое значение для термодинамической стабилизации структуры по отношению к переходу алмаз-графит [4], обеспечивая CVD рост алмаза в метастабильном состоянии. Также азот является наиболее подходящим кандидатом на роль допирующего агента при получении электронной примесной проводимости с глубоким донорным энергетическим уровнем (около 1,7 эВ). Кроме того, при использовании алмаза в качестве малоразмерной системы для квантовой информатики перспективными являются азотно-вакансионные дефекты NV⁻. Наконец, добавление азота в газовую смесь ускоряет рост граней {100} по отношению к {111} до 4-х раз [5], позволяя управлять структурой кристаллов алмаза в процессе газофазного химического осаждения.

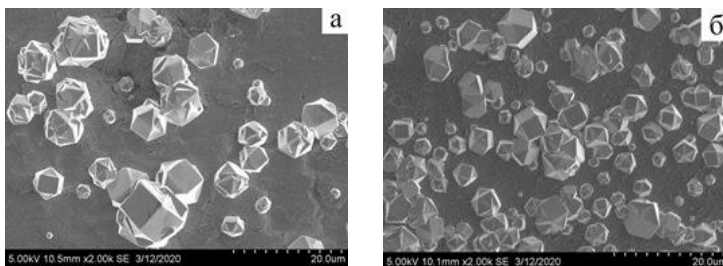
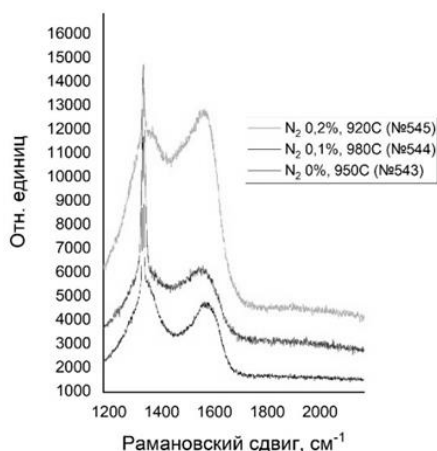


Рис. 1. Снимки РЭМ: а – образец №543 (без азота); б – образец №544 (с добавлением 0,1% азота).

Рис. 2. Спектр КРС алмазоподобной плёнки полученной при активации газовой смеси накаливаемой вольфрамовой нитью.

По результатам измерения КРС спектра можно увидеть, что оптимальное содержание азота в смеси не более 0,1%. Добавка азота сужает линию алмаза 1333 см⁻¹, в нашем случае, от 20 см⁻¹ до 7 см⁻¹. Характер G - линии говорит о том, что присутствующий графит находится в сильно разупорядоченном (сажеподобном) состоянии. Более высокую упорядоченность кристаллов при добавлении азота подтверждают и снимки РЭМ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№ 18-29-19069 мк, № 18-29-19130 мк и № 19-08-00533) и проекта госзадания (АААА-А17-117021750017-0).

Литература

- [1]. Поляков О.В., Городецкий Д.В., Окотруб А.В. Письма в ЖТФ, **39** 13 (2013)
- [2]. Емельянов А.А., Плотников М.Ю., Юдин И.Б. Журнал технич. физики, **89** 1891 (2019)
- [3]. Davies G., Lawson S., Collins A., Mainwood A., Sharp S. Physical Review, **B** 46 (1992)
- [4]. Bar-Yam Y., Moustakas T.D. Nature, **342** 786 (1989)
- [5]. Yiming Z., Larsson F., Larsson K. Theoretical Chemistry Accounts, **133** 1432 (2014)

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЕМКОСТНОГО РАЗРЯДА С ЭЛЕКТРОДАМИ БОЛЬШОЙ ПЛОЩАДИ

¹Двинин С.А., ²Кодирзода З.А., ³Синкевич О.А., ²Солихов Д.К.

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, г. Москва, e-mail: dvinin@phys.msu.ru

²ТНУ, физический факультет, г. Душанбе, Таджикистан, e-mail: davlat56@mai.ru

³Национальный исследовательский университет МЭИ, г. Москва, Россия, e-mail: oleg.sinkevich@itf.mpei.ac.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.134

Аналитически исследованы электродинамические свойства емкостного ВЧ-разряда низкого давления (частота столкновений электронов много меньше частоты поля) с электродами большой площади при возбуждении его электромагнитным полем частотой выше 13 МГц. Разряд поддерживается поверхностными волнами, распространяющимися вдоль границы плазма–слой пространственного заряда–металл, и высшими нераспространяющимися модами. Слой пространственного заряда рассматривается в рамках матричной модели, рассчитаны дисперсионные кривые собственных волн в трехслойной структуре: слой–плазма–слой, окруженной металлическими границами.

Для разряда, полностью или частично заполняющего разрядную камеру, аналитические расчеты поля показали, что представление поля в виде суммы поверхностных и нераспространяющихся собственных мод Е-волн в трехслойной структуре, позволяет правильно объяснить поведение импеданса. В стандартном случае локального возбуждения электромагнитного поля (на границе между электродом и вакуумной камерой) линии передачи, соответствующие возбуждению одинаковых типов мод в центральной и периферийной области соединены последовательно, а линии передачи, соответствующие возбуждению различных мод – параллельно.

Сравнение с аналитическими расчетами, проведенными в пакете COMSOL Multiphysics®, показали удовлетворительное согласие. Плотности электронов в плазме, при которых наблюдается резонанс, в большинстве случаев рассчитываются в аналитической модели с точностью до $\pm 10\%$.

В соответствии с общим выражением для импеданса при учете как распространяющихся, так и высших типов мод, а также токов в подводящей линии передачи можно выделить два типа резонансов в разряде – «глобальные» резонансы тока и напряжения связанные с компенсацией тока (либо напряжения) в электродинамической системе в целом и локальные резонансы, связанные с возрастанием амплитуд отдельных электродинамических мод. Локальные резонансы проявляются как увеличение поглощения поля при плотностях электронов, для которых наблюдается резонанс. Для расчета вольтамперных характеристик разряда решение уравнений Максвелла дополнялось уравнениями интегрального баланса частиц и энергий в разряде.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности управления пространственным распределением электромагнитного поля, поддерживающего плазму, а, следовательно, и пространственным распределением плотности электронов за счет пространственного расположения и конфигурации области возбуждения электромагнитного поля в разрядной камере [1 – 3].

Литература

- [1]. Двинин С.А., Синкевич О.А., Кодирзода З.А., Солихов Д.К. // Физика плазмы **46**, 1094 (2020)
- [2]. Двинин С.А., Синкевич О.А., Кодирзода З.А., Солихов Д.К. // Физика плазмы **47**, 28 (2021)
- [3]. Двинин С.А., Синкевич О.А., Кодирзода З.А., Солихов Д.К. // Физика плазмы, **47** (3), (2021) (в печати)

ОБ ИЦР-НАГРЕВЕ ПЛАЗМЫ ПО МЕТОДУ МАГНИТНОГО БЕРЕГА

Тимофеев А.В., Чеботарев Р.С.

НИЦ “Курчатовский институт”, г. Москва, Россия, e-mail: chebotarev_rs@nrcki.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.135

Ионный циклотронный резонансный нагрев (ИЦР-нагрев) играет ключевую роль в таких применениях плазмы как плазменная переработка отработавшего ядерного топлива, ИЦР-разделение изотопов, а также космический плазменный двигатель VASIMR. Однако в результате явления альфвеновского резонанса используемые для нагрева ионной компоненты плазмы альфвеновские колебания могут эффективно трансформироваться в нижнегибридные, обладающие значительной продольной составляющей электрического поля, что, в свою очередь, может привести к преимущественному нагреву электронов, но не ионов.

Для выявления ведущего механизма нагрева, реализующегося в условиях VASIMR, должен быть проведён двумерный анализ ИЦР-нагрева, – необходимо учитывать как продольную неоднородность магнитного поля, инициирующую ИЦР-нагрев по методу магнитного берега, так и естественную поперечную неоднородность плотности плазмы, предопределяющую явление альфвеновского резонанса.

В известных работах рассмотрены только отдельные взаимоисключающие приближения продольной неоднородности поля при поперечной однородности плотности, и наоборот [1, 2]; одна работа учитывает двумерную неоднородность задачи, но рассматривает унимодальный нагрев [3].

В работе предпринимается попытка рассмотрения модели, учитывающей неоднородность в обоих направлениях и принимающей в качестве источника нагрева модель реальной винтовой токовой антенны. Установлено, что при значениях плотности плазмы $n_0 = 10^{12} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$, а также выбранных конфигурациях антенны и магнитного поля поглощение происходит преимущественно в области ионного циклотронного резонанса.

Литература

- [1]. Тимофеев А. В. О ВЧ-нагреве неоднородной столкновительной плазмы в условиях ИЦР // Физика плазмы. 2015. Т. 41, № 11
- [2]. Bering E.A. et al. Observations of Single-Pass Ion Cyclotron Heating on a Trans-Sonic Flowing Plasma // Phys. of Plasmas. 2010. V. 17. No. 4
- [3]. Piotrowitz P. A. et al. Computational Investigation of Ion Cyclotron Heating on Proto-MPEX // Phys. of Plasmas. 2019. V. 26. No. 3

ЭВОЛЮЦИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕЧЕНИЯ ЗАТУХАЮЩИХ ПЛАЗМЕННЫХ КАНАЛОВ ПРИ ЭФФЕКТЕ ВЫТЕСНЕНИЯ.

Знаменская И.А., Татаренкова Д.И., Кули-заде Т.А.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, e-mail: znamen@phys.msu.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.136

Исследовалось влияние диэлектрической вставки на эволюцию интенсивности свечения импульсного сильноточного поверхностного разряда в воздухе. Скользящий разряд (плазменный лист) инициировался на поверхности 30×100 мм с диэлектрическим выступом в форме параллелепипеда ($48 \times 6 \times 2$ мм), расположенным параллельно направлению развития каналов разряда, как показано на рисунке 1. Поверхностный разряд имел многоканальную структуру: он представлял собой набор параллельных плазменных микроканалов протяженностью 30 мм, распределенных по диэлектрической поверхности длиной 100 мм. Показано, что наличие выступа искажает изначально однородное диффузное свечение разряда. Разряды на профилированной поверхности уже частично нашли свое применение, например, для воспламенения горючего и поддержания горения [1].

На рисунке 1 представлена схема установки с препятствием (1), которое было установлено на диэлектрическую поверхность с электродами (2). Сильноточный скользящий разряд (3) реализовался между электродами с помощью генератора, выдающего на разрядник прямоугольный импульс с амплитудой напряжения 15 – 30 кВ и длительностью 100 – 300 нс. Анализ свечения проводился по интегральным фотоснимкам с цифрового фотоаппарата, а также по изображениям, полученным электронно-оптической камерой Vifo K011 (4), которая предназначена для регистрации изображений и измерения пространственно-временных параметров в режиме девятикадровой съемки регистрируемого изображения. Минимальная экспозиция съемки составляет 100 нс, минимальное время между кадрами – 100 нс.

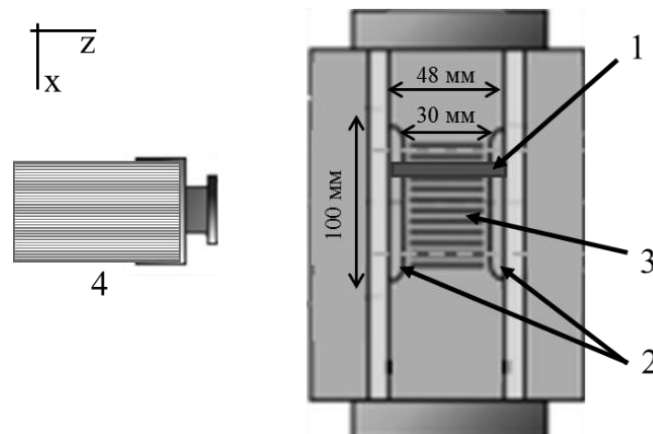


Рисунок 1. Схема установки

Полученные изображения показали эволюцию распределения интенсивности свечения затухающих плазменных каналов вблизи уступа в интервале времени до 5 микросекунд.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-08-00661.

Литература

- [1]. Y. Ju; W. Sun, (2015). Plasma assisted combustion: Dynamics and chemistry. Progress in Energy and Combustion Science, 48(), 21 – 83

ВЫБОР РАБОЧЕГО ГАЗА ПЛАЗМОТРОНА ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СВЕРХЧИСТОГО БЕЛОГО КОРУНДА

¹Кисон В.Э., ¹Муштафаев А.С., ²Сухомлинов В.С.

¹Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: s195001@stud.spmi.ru

²Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.137

С совершенствованием оптических систем, микросхем, медицинской аппаратуры растут требования и к производству материалов для их изготовления, а особенно к их чистоте. Белый корунд – один из таких материалов, широко используемый в вышеперечисленных отраслях. Кроме того, получение сверхчистого белого корунда является одной из ступеней технологии получения чистого алюминия из его расплава.

В промышленности на данный момент преобладают два способа получения корунда в дуговых электропечах мощностью 5 – 7 МВА во время плавки с разливкой на твердый блок, и в печах мощностью 12,5 – 16,5 МВА при плавке с выпуском продуктов плавки в две летки [1 – 3]. Основным недостатком этих способов – чрезмерное загрязнение получаемого корунда материалами электродов печи, связанная с ней неоднородность кристаллов, высокое энергопотребление.

Существуют также некоторые химические способы получения чистого корунда, например синтезирование из алюминия в реакторе высокого давления [4], алкоголятный метод [5] и другие, однако все они характеризуются время- и ресурсоемкостью.

Предлагаемая технология включает плавление глинозема в плазменном реакторе. Чистота получаемого корунда обеспечивается за счет использования сырья, содержащего минимальное количество примесей, а также за счет минимизации процесса загрязнения расплава.

Правильный выбор плазмообразующего газа для плазмотрона позволяет исключить загрязнение расплава продуктами взаимодействия плазменной струи:

- с расплавом,
- с электродами плазмотрона,
- с материалом футеровки реактора.

При исследованиях в качестве рабочего газа рассматривались водород, азот и аргон. Для них определялись эффективность теплообмена между струей и нагреваемой поверхностью, инертность по отношению к используемым конструкционным материалам и расплаву, взрывоопасность.

Литература

- [1]. Ветюков М. М., Цыплаков А. М., Школьников С. Н. Электрометаллургия алюминия и магния. - М.: Metallurgy, 1987. 320 с
- [2]. Grjotheim K. Introduction to Aluminium Electrolysis / K. Grjotheim K. and H. Kvande // Aluminium-Verlag. Oslo. 1993. 243 p
- [3]. Минцис М.Я. Электрометаллургия алюминия. / М.Я. Минцис, П.В. Поляков, Г.А. Сиразугдинов. -Новосибирск: Наука, 2001. -368 с
- [4]. Школьников Е.И., Лисицын А.В., Власкин М.С., Жук А.З., Шейндлин А.Е., патент РФ 2519450, 2012
- [5]. Тютин В.Ф. Завод нанокорунд для производства сверхчистого алюминия., ИТЦ ООО «СИТИС», Саров, Россия. 2012

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ АТОМНО-ЭМИССИОННЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ НА ПРИМЕРЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

¹Попова А.Н., ²Сухомлинов В.С., ¹Мустафаев А.С.

¹Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: popova_an@pers.spmi.ru

²Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.138

Аналитическая методика АЭСА позволяет выбирать и учитывать определенные параметры системы возбуждения спектра, системы регистрации, набора аналитических линий и т.д. Для каждого спектрометра применяется индивидуальный комплект градуировочных кривых, полученных путем исследования стандартных образцов, значения массовых долей примесей которых аттестованы. Фоновое излучение плазмы (не зависящее от концентрации данного примесного элемента), динамический диапазон ПЗС-приемников и, так называемые, «третьи» элементы [1-4] оказывают влияние на регистрируемую интенсивность спектральной линии исследуемого элемента. Необходимо производить систематическую рекалибровку эмиссионных спектрометров (корректировать градуировочные кривые).

В современном ПО спектрометров нет возможности точно вычислить фоновое излучение плазмы в месте расположения аналитической линии определяемого элемента, что приводит, в том числе, к необходимости калибровки каждого прибора по большому числу образцов. Учет этого излучения особенно важен при исследовании низких концентраций определяемых элементов.

Разработана уникальная методика, позволяющая точно рассчитывать фоновое излучение плазмы в месте расположения аналитической линии элемента, что дает возможность производить экспорт градуировочных кривых в приборах одного типа, применяя всего два образца. Спектры этих образцов используются для определения двух коэффициентов линейного преобразования измеряемых интенсивностей.

Проведено сравнение разработанного алгоритма рекалибровки (с точным учетом фонового излучения плазмы) и общепринятого алгоритма на примере определения концентрации углерода в диапазоне 0,005 – 0,05% для низко- и среднелегированных сталей по комплектам стандартных ГСО на четырех различных модификациях спектрометров «СПАС». Все построенные по новому алгоритму градуировочные кривые близки к линейным. Разработанный алгоритм позволяет существенно уменьшить среднеквадратическое отклонение при определении низких содержаний примесей в пробах, а также значительно улучшить метрологические характеристики существующей методики.

Литература

- [1]. Мосичев В.И., Николаев Г.И., Калинин Б.Д. Металлы и сплавы. Анализ и исследование. Методы атомной спектроскопии. Атомно-эмиссионный, атомно-абсорбционный и рентгенофлуоресцентный анализ. Том 2. / СПб. НПО Профессионал. в 4 томах. 2006. 716 с
- [2]. Зайдель А.Н., Островская Г.В., Островский Ю.И. Техника и практика спектроскопии / М. Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1972. - 376 с
- [3]. Мустафаев А.С., Цыганов А.Б., Добролеж Б.В. Многопроцессорная фотометрическая система спектрального анализа на основе линейных ПЗС-приемников. // Записки Горного института, 2010, т.187, с. 98-100
- [4]. Sukhomlinov V.S., Mustafaev A.S., Popova A.N., Koubaji H. Accounting for the effects of third elements in the emission spectral analysis and construction of global analytical techniques. *Journal of Physics: Conference Series*, 1384, [012054].
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1384/1/012054>

ШИРОКОПОЛОСНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ПЛАЗМЕННЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ИСТОЧНИКОВ

Иванов И.Е.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.139

Плазменные релятивистские генераторы имеют рекордную полосу генерации и их можно уверенно отнести к сверхширокополосным. Широкополосность определяется величиной η отношения диапазона генерации ($\nu_{\max} - \nu_{\min}$) к средней частоте диапазона $(\nu_{\max} + \nu_{\min})/2$. Если этот коэффициент $\eta > 0.2$, то такой источник относится к сверхширокополосным. Для плазменных приборов η может достигать значения 1. Рассматривается широкополосное излучение плазменных релятивистских генераторов с длительностью микроволнового импульса 300 – 500 нс для области частот 1 – 5 ГГц. Такой источник сверхширокополосного излучения является генератором шума. Для шумовых источников важно "качество шума". Речь идёт о полезной шумовой генерации, когда на любом временном интервале широкополосного импульса ширина полосы генерации будет одинакова. Также будет приблизительно одинакова и энергия "шума" на этом интервале. Энергия шумовых импульсов плазменных релятивистских источников остаётся равной энергии при работе и в других режимах – в режиме усиления внешнего сигнала и режиме обычной генерации, т.е. достигает 15 – 20 Дж. Для анализа шумовой генерации плазменных релятивистских источников, рис. 1, применяется обычное преобразование Фурье и метод мгновенной частоты.

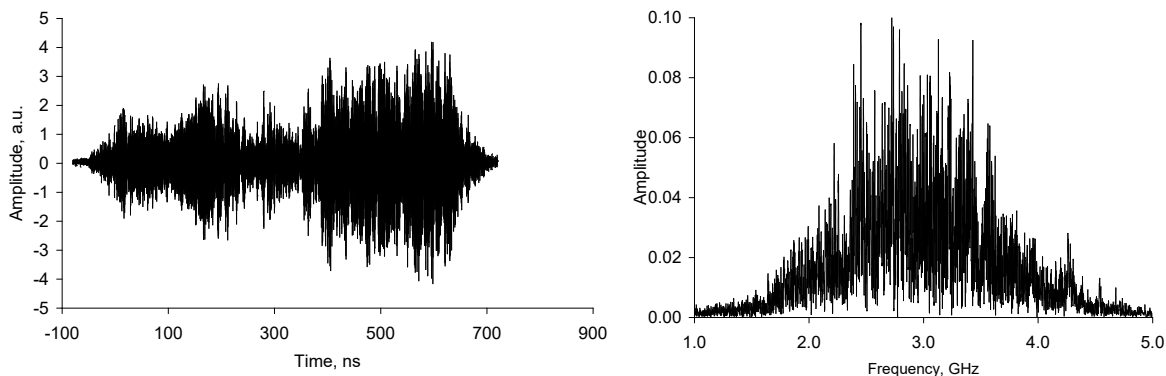


Рис. 1. Слева – осциллограмма шумового импульса, справа – Фурье-преобразование за весь временной интервал записи импульса (800 нс).

Указанные методы позволяют оценить стабильность шумовой генерации во времени и изменение амплитуды шумового импульса, напряжённость электрического поля. Однако для сравнения генерации шумовых импульсов от различных источников или режимов этих характеристик не достаточно. Демонстрируется применение корреляционного анализа с использованием автокорреляционной функции

$$B_f(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)f(t+\tau)dt$$

Вычисляются коэффициенты корреляции и время корреляции для участков осциллограммы различной длительности. Строятся графики скользящего коэффициента корреляции (скользящая корреляция), вычисляется средний квадрат коэффициентов корреляции в графиках скользящей корреляции. Указанной методикой сравниваются широкополосные импульсы релятивистского электронного пучка в вакууме и импульсы в присутствии плазмы в системе.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ 19-08-00625 А.

СПЕКТРЫ ПЛАЗМЕННОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО СВЧ УСИЛИТЕЛЯ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

Стрелков П.С., Иванов И.Е., Диас Михайлова Д.Е.

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва,
Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.140

Был создан мощный источник монохроматического излучения с возможностью электронной перестройки частоты. На электронном пучке (500 кэВ, 2 кА, 500 нс) было получено излучение, мощность которого достигала значений 100 – 150 МВт при подаче на вход усилителя сигналов с частотами $f_0 = 2.4, 2.7$ и 3.1 ГГц, [8]. Таким образом, ширина диапазона перестройки частоты составила 25 %. Длительность СВЧ импульсов при этом была равна 250 – 300 нс. Излучение на частотах входного сигнала сопровождалось широкополосным шумовым излучением, однако мощность шумов при этом не превышала 10 – 15 % от полной мощности излучения. В [11] было показано, что мощное СВЧ излучение наблюдается и в отсутствие входного сигнала из-за усиления собственных шумов РЭП. Ширина полосы шумов при этом составляет примерно 2 ГГц. Средняя частота такого излучения, в соответствии с линейной теорией, возрастает с увеличением плотности плазмы. Получить относительно высокий уровень отношения сигнал/шум в режиме усиления монохроматического сигнала удалось благодаря обнаруженному эффекту подавления шумов, [8]. Он заключается в том, что включение входного сигнала приводит к уменьшению уровня шумов, наблюдаемых в его отсутствие. СВЧ сигналы плазменного релятивистского усилителя регистрировались с помощью приёмной антенны, расположенной на расстоянии 75 см от излучающего рупора. СВЧ сигнал $U(t)$ по коаксиальному кабелю попадал на 60 дБ аттенюатор и затем на скоростной осциллограф. Определялась величина пропорциональная полной энергии СВЧ импульса

$$W = \int_0^T U^2(t)dt = 2 \int_0^\infty A^2(f)df \quad (1),$$

а также величина пропорциональная энергии шумов $W_1 = W - W_{f_0}$, здесь W_{f_0} – величина, пропорциональная энергии СВЧ импульса в диапазоне частот $f_0 \pm 30$ МГц, и величина пропорциональная энергии шумов в отсутствие входного сигнала W_2 . Было обнаружено, что при подаче на вход усилителя монохроматического сигнала параметры шумов изменяются. Энергия шумов становится более стабильной. В области малых значений плотности плазмы ($6.5 < n < 8$) включение входного сигнала приводит к ослаблению шумов РЭП. В более плотной плазме ($8 < n < 9$) наблюдается обратный эффект - включение входного сигнала увеличивает усиление шумов РЭП. Таким образом, в редкой плазме достигается максимальное отношение энергии сигнала на частоте внешнего источника к энергии шумов. При изменении плотности плазмы происходит изменение ширины спектра излучения на частоте входного сигнала. При малых значениях плотности плазмы ширина спектра усиленного сигнала более чем в 2 раза превышает ширину спектра входного сигнала. При больших значениях плотности плазмы ширина спектра усиленного сигнала примерно совпадает с шириной спектра входного сигнала.

Литература

- [1]. Strelkov P.S., Ivanov I.E., Tarakanov V.P. // 10th International Workshop “Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications”, Nizhny Novgorod – Moscow, 2017. P. 208
- [2]. Стрелков П.С., Иванов И.Е., Шумейко Д.В. // Физика плазмы. 2016. Т. 42. С. 644

ИЗМЕНЕНИЯ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ КИЛОАМПЕРНОГО РЭП ПРИ НАКАЧКЕ КОЛЕБАНИЙ В ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЕ

²Аржанников А.В., ^{1,2}Калинин П.В., ¹Макаров М.А., ^{1,2}Попов С.С., ^{1,2}Самцов Д.А.,
^{1,2}Сандалов Е.С., ^{1,2}Синицкий С.Л.

¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.141

В ИЯФ СО РАН на специализированной установке ГОЛ-ПЭТ проводятся экспериментальные исследования механизмов генерации субмиллиметровых волн (0,1 – 0,8 ТГц) мультимегаваттной мощности при коллективной релаксации пучка релятивистских электронов (0,6 МэВ / 20 кА / 6 мкс) [1]. К настоящему моменту в ходе исследований было предложено теоретическое описание механизмов генерации [2] и была продемонстрирована возможность получения излучения с энергосодержанием в импульсе более 4 МВт [3]. В данных экспериментах в столб плазмы диаметром 6 см и длиной 250 см с плотностью (0,8 – 1,5) 10^{15} см⁻³, который удерживается в магнитном поле 4,8 Тл, инжектируется пучок релятивистских электронов. На входе в плазму пучок имеет диаметр 4 см и плотность тока 2 – 4 кА/см². Важной задачей проводимых исследований является установление закономерностей в изменениях спектра субмм-излучения и направления его потоков из плазменного столба в зависимости от параметров инжектируемого пучка. Для выявления данных зависимостей необходимы измерения угловой расходимости и энергетического распределения электронов пучка после его прохождения через плазменный столб в условиях интенсивной накачки плазменных колебаний. Для измерения энергетического распределения электронов пучка, прошедшего через плазменный столб, был разработан многофольговый анализатор [4], регистрация в котором осуществляется стоящими одна за другой 10-тью алюминиевыми фольгами. Этот датчик располагается в однородном магнитном поле с индукцией 0,07 Тл, что обеспечивает понижение плотности тока пучка в фольгах до уровня 50 – 100 А/см². С учетом имеющегося опыта использования анализатора и результатов компьютерного моделирования поглощения электронов в фольгах проведена оптимизация их толщины в последовательности их расположения по мере продвижении пучка при поглощении. Проведенная обеспечивает возможность восстановления функции распределения электронов по энергиям с точностью не хуже 20%. В докладе описаны результаты экспериментов и приводится интерпретация наблюдаемых закономерностей.

Часть исследования, посвященная оптимизации многофольгового анализатора выполнена за счет средств гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект №20-32-90045). Часть исследования, посвященная измерению функции распределения электронов по энергии выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда (проект №19-12-00250).

Литература

- [1]. A.V. Arzhannikov, V.V. Annenkov, V.S. Burmasov, et al. // EPJ Web of Conferences. – EDP Sciences, 2018, vol. 195, p. 01002
- [2]. I.V. Timofeev, V.V. Annenkov and A.V. Arzhannikov. Regimes of enhanced electromagnetic emission in beam-plasma interactions // Phys. Plasmas 2015, Vol.22, P.113109
- [3]. A.V. Arzhannikov, I.A. Ivanov, A.A. Kasatov, et al., “Well-directed flux of megawatt sub-mm radiation generated by a relativistic electron beam in a magnetized plasma with strong density gradients” // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2020. T. 62. – №. 4. – С. 045002
- [4]. Arzhannikov A. V., Makarov M. A., Sinitsky S. L., Stepanov V. D. Energy spectrum of electrons in flow from plasma column heated by REB at GOL-3 facility // Fusion Science and Technology. – 2011. – Т. 59. – №. 1Т. – С. 304-306

ИЗМЕРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ ВО ВРЕМЯ РЕЛАКСАЦИИ В НЕЙ КИЛОАМПЕРНОГО РЭП ПРИ РАЗЛИЧНЫХ НАЧАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЯХ ЗАМАГНИЧЕННОГО ПЛАЗМЕННОГО СТОЛБА

^{1,2}Аржанников А.В., ¹Макаров М.А., ^{1,2}Калинин П.В., ^{1,2}Касатов А.А., ¹Куклин К.Н.,
^{1,2}Попов С.С., ^{1,2}Самцов Д.А., ^{1,2}Сандалов Е.С., ^{1,2}Синицкий С.Л.

¹*ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

²*Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.142

В ИЯФ СО РАН на установке ГОЛ-ПЭТ ведутся исследования генерации мегаваттных импульсов терагерцового (0,1 – 0,8 ТГц) излучения, возникающие при коллективной релаксации пучка релятивистских электронов (0,6 МэВ / 20 кА/ 6 мкс) в неоднородной плазме с плотностью $\sim 10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$ [1]. Для проведения экспериментов на этой установке создается столб предварительной плазмы диаметром 6 см и длиной 250 см в магнитном поле 4,7 Тл. Необходимое начальное распределение плотности предварительной плазмы вдоль оси столба задаётся импульсным распределенным напуском водорода вакуумную камеру с последующей его ионизацией током ~ 20 кА пеннинговского разряда [2]. Поперечная неоднородность распределения тока в разряде задается формой разрядных электродов и полярностью подключенного к ним импульсного источника питания. Во время инъекции мощного релятивистского пучка происходит нагрев электронов плазмы, что приводит к изменению распределения её плотности по сечению и длине столба. Данные изменения плотности могут приводить к изменениям характеристик генерируемого потока излучения, что вызывает необходимость отслеживать их временную динамику.

Регистрация плотности плазмы в различные моменты времени проводится с помощью интерферометрии и томсоновского рассеяния. Интерферометрические измерения ($\lambda=10.6\text{мкм}$) позволяют регистрировать усредненную вдоль хорды плотность плазмы в течение импульса. С помощью рассеяния лазерного излучения ($E \sim 5$ Дж, $\lambda = 1,06$ мкм) регистрируются локальные изменения плотности плазмы в выбранный момент времени.

В докладе представлены результаты измерений поведения во времени плотности плазмы при различных начальных условиях эксперимента. Обсуждаются факторы, определяющие изменения плотности во времени, и то, насколько существенно эти изменения влияют на характеристики потока терагерцового излучения, генерируемого в плазменном столбе.

Литература

- [1]. Arzhannikov A.V., Ivanov I.A., Kasatov A.A., Kuznetsov S.A., Makarov M.A., Mekler K.I., Polosatkin S.V., Popov S.S., Rovenskikh A.F., Samtsov D.A., Sinitsky S.L., Stepanov V.D., Annenkov V.V., Timofeev I.V. “Well-directed flux of megawatt sub-mm radiation generated by a relativistic electron beam in a magnetized plasma with strong density gradients” //Plasma Physics and Controlled Fusion. 2020. Т. 62. № 4. С. 045002.doi: doi.org/10.1088/1361-6587/ab72e3
- [2]. A. V. Arzhannikov, I. A. Ivanov, P. V. Kalinin, A. A. Kasatov, M. A. Makarov, K. I. Mekler, A. F. Rovenskikh, D. A. Samtsov, E. S. Sandalov and S. L. Sinitsky. “Creation of plasma column with different density gradients to generate terahertz radiation during beam-plasma interaction” //Journal of Physics: Conference Series 1647 (2020) 012011. IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/1647/1/012011

ДИНАМИКА СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ПОТОКА ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ РЕЛАКСАЦИИ РЭП В ПЛАЗМЕННОМ СТОЛБЕ В УСЛОВИЯХ РАЗЛИЧНОЙ ГРАНИЦЫ НА ВЫХОДЕ ПУЧКА ИЗ ПЛАЗМЫ

^{1,2}Аржанников А.В., ^{1,2}Калинин П.В., ^{1,2}Касатов А.А., ¹Куклин К.Н., ¹Макаров М.А.,
^{1,2}Попов С.С., ¹Ровенских А.Ф., ^{1,2}Самцов Д.А., ^{1,2}Сандалов Е.С., ^{1,2}Синицкий С.Л.,
^{1,2}Степанов В.Д., ^{1,2}Глинский В.В., ^{1,2}Тимофеев И.В.

¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.143

Экспериментальные исследования механизмов генерации субмиллиметровых волн (0,1 – 0,8 ТГц) при коллективной релаксации релятивистского электронного пучка (РЭП с параметрами 0,6 МэВ / 20 кА / 6 мкс) проводятся на специализированной установке ГОЛ-ПЭТ [1]. Эксперименты проводятся при плотности плазмы $\sim 110^{15}$ см⁻³ в магнитном поле 4,7 Тл, когда плазменный столб длиной 250 см имеет диаметр 6 см, а пучок с плотностью тока (2 – 4) кА/см² ограничен в диаметре 4 см.

В докладе представляются результаты экспериментов по исследованию характеристик потока генерируемого излучения области частот (0,15 – 0,6) ТГц, выходящего вдоль оси пучково-плазменной системы. Регистрация потока проводится после его выхода из вакуума в атмосферу через фторопластовое окно. Эксперименты проводятся в условиях, когда распределение плотности плазмы вдоль оси плазменного столба варьируется на участке спадающего магнитного поля в окрестности графитового коллектора, поглощающего прошедший через плазму пучок. Эксперименты показали, что, если на этом участке плазма имеет высокую плотность, то мощность в потоке излучения, выведенного через центральное отверстие в этом коллекторе диаметром 18 см, имеет величину 4 МВт [2]. Когда же до инъекции пучка на этом участке создаётся плазма с низкой плотностью, то мощность в потоке излучения поднимается на уровень десятка мегаватт [3]. В тексте описаны результаты регистрации динамики спектрального состава выведенного в атмосферу потока излучения для этих двух вариантов распределения плотности. Также приводится обсуждение закономерностей, установленных в этой серии экспериментов.

Литература

- [1]. Arzhannikov A.V., Annenkov V.V., Burmasov V.S. et al. // EPJ Web of Conferences. – EDP Sciences, 2018, vol. 195, p. 01002
- [2]. Arzhannikov A.V., Ivanov I.A., Kasatov A.A. et al. Plasma Phys. Control. Fusion 62, N 4 (2020) 045002
- [3]. Arzhannikov A., Annenkov V., Ivanov I. et al. 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1647 012010

ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ СФЕРОПЛАСТИКА НА ОСНОВЕ БУТАДИЕН-НИТРИЛЬНОГО КАУЧУКА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

^{1,3,4}Казаков Е.Д., ¹Калинин Ю.Г., ¹Крутиков Д.И., ¹Курило А.А.,
²Милехин Ю.М., ¹Орлов М.Ю., ²Садовничий Д.Н., ¹Стрижаков М.Г.,
²Шереметьев К.Ю.

¹НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия, e-mail: Kazakov_ED@nrcki.ru

²ФЦДТ "Союз", г. Дзержинский, Россия

³Национальный исследовательский университет "МЭИ", г. Москва, Россия

⁴Московский физико-технический институт (НИУ), г. Долгопрудный, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.144

Недавно проведенные эксперименты [1] показали, что воздействие сильноточного электронного ускорителя «Кальмар» на сферопластик сопровождается интенсивной абляцией поверхности последнего и формированием нановискеров на разрушенных микросферах. Электронный пучок обеспечивает уровни энерговыделения, достаточные для испарения материала мишени и генерации ударно-волновых процессов [2, 3]. Отметим, что условия экспериментов [1] сильно отличаются от классических условий получения нитевидных наноструктур [4, 5].

Один из возможных механизмов формирования нановискеров в сферопластике при воздействии на него электронного пучка связан с образованием нитевидных структур из конденсированных продуктов пиролиза полимерной основы в объеме коллапсирующей микросферы [1]. Поэтому представляет интерес изучить воздействие сильноточного электронного пучка на сферопластик, полимерная основа которого не содержит атомов кремния.

В настоящей работе экспериментально изучены особенности воздействия пучка ускорителя «Кальмар» на сферопластик, в котором в качестве полимерной основы использован низкомолекулярный бутадиен-нитрильный каучук СКН-10КТР, усиленный термостойким асбестовым волокном (8% масс.), а стеклянные микросферы МС-А9 имели диаметр 30 – 130 мкм. Массовая доля стеклосфер составляла 28%. Плотность сферопластика - 820 кг/м³.

Установлено, что при плотности потока энергии пучка 170 – 210 Дж/см² скорость разлёта плазмы с поверхности облучаемого образца достигает 25 км/с, а в продуктах абляции содержатся фрагменты стеклосфер микронного размера. Проведенные эксперименты показали, что химическая природа полимерной основы сферопластика оказывает определяющее влияние не только на особенности абляции при наносекундном воздействии релятивистских электронов, но и на возможность формирования нитевидных структур при коллапсе стеклосфер.

Эксперименты на установке «Кальмар» выполнены при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (Приказ №2073 от 09.10.2020).

Литература

- [1]. Милехин Ю.М., Садовничий Д.Н., Шереметьев К.Ю., Калинин Ю.Г., Казаков Е.Д., Марков М.Б. // Доклады академии наук. 2019. Т. 487. N 2. С. 159–163
- [2]. Демидов Б.А., Ивкин М.Б., Петров В.А., Фанченко С.Д. // Атомная энергия. 1979. Т. 46. В. 2. С. 101–116
- [3]. Ананьев С.С., Багдасаров Г.А., Гасилов В.А., Данько С.А., Демидов Б.А., Казаков Е.Д., Калинин Ю.Г., Курило А.А., Ольховская О.Г., Стрижаков М.Г., Ткаченко С.И. // Физика плазмы. 2017. Т. 43. N 7. С. 608 – 615. DOI: 10.7868/S0367292117070022
- [4]. Третьяков Ю.Д., Гудилин Е.А. // Успехи химии. 2009. Т. 78. N 9. С. 867–887
- [5]. Дубровский В.Г., Цырлин Г.Э., Устинов В.М. // ФТП. 2009. Т. 43. В. 12. С. 1586–1628

ДИНАМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЩНОГО ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА С ГАЗОВОЙ СТРУЕЙ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

¹Топорков Д.А., ¹Гаврилов В.В., ¹Житлухин А.М., ²Карлыханов Н.Г., ¹Костюшин В.А.,
²Матвеев Ю.И., ¹Позняк И.М.

¹АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Троицк, г. Москва, Россия, e-mail: toporkov@triniti.ru

²РФЯЦ – ВНИИТФ, e-mail: yu.i.matveenko@inbox.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.145

Представлены результаты исследования взаимодействия мощного потока плазмы с импульсной газовой струей. Экспериментальные данные анализируются совместно с проведенным расчетно-теоретическим моделированием. Полученные результаты могут представлять интерес, как с фундаментальной точки зрения, так и для решения некоторых прикладных задач (например, для разработки диссипативного дивертора ИТЭР и лабораторного моделирования звездных джетов, проникающих в межгалактический газ).

Плазменный поток со скоростью $(4 \div 6) \times 10^7$ см/с и энергосодержанием до 40 кДж создавался импульсным электродинамическим ускорителем на установке МКТ (ТРИНИТИ). В качестве плазмообразующих газов использовались водород, азот и неон. Плотность ионов в потоке плазмы составляла $(2 \div 4) \times 10^{15}$ см⁻³. Плазменный поток транспортировался в продольном магнитном поле с индукцией $1 \div 2$ Тл. Сверхзвуковая газовая струя азота или неона формировалась с помощью плоского сопла Лавала. Максимальная плотность в газовой струе достигала 10^{17} см⁻³ при толщине струи ≈ 5 см и ширине ≈ 15 см. Газовая струя инжестировалась на расстоянии ≈ 3 м от выхода ускорителя перпендикулярно магнитному полю и, соответственно, направлению движения плазменного потока.

Информативные 2D-изображения области взаимодействия плазмы и газа были получены рентгеновской кадровой МКП-камерой. Измерения, проведенные с помощью рентгеновских фотодиодов, закрытых различными фильтрами, показали, что при столкновении потока плазмы со струей газа генерируются импульсы мягкого рентгеновского излучения (энергия фотонов ≤ 0.4 кэВ) длительностью $10 \div 15$ мкс. Регистрации спектров излучения в диапазоне $1 \div 70$ нм с пространственным и временным разрешением осуществлялась спектрометром с пропускающей решеткой и кадровой МКП-камерой.

Для моделирования процесса взаимодействия мощного плазменного потока с газовой струей разработана МГД-программа, включающая в себя вычисления интенсивности и спектрального состава генерируемого мягкого рентгеновского излучения. Результаты расчетов сопоставляются с экспериментальными данными.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ: № 18-29-21013 и № 20-21-00153.

ГЕНЕРАЦИЯ ИОНОВ В МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ПЛАЗМЕ УСКОРИТЕЛЯ С ЗАМКНУТЫМ ДРЕЙФОМ ЭЛЕКТРОНОВ

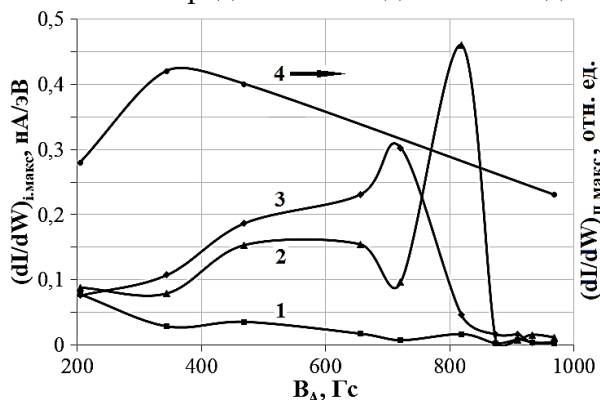
¹Строкин Н.А., ¹Казанцев А.В., ²Бардаков В.М., ¹Тхе Тханг Нгуен, ¹Ригин А.В.

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия, e-mail: strokin85@inbox.ru, kazanets@gmail.com, nguen.tkhe@yandex.ru, arseniy.rigin@mail.ru

²Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия, e-mail: vmbardakov38@mail.ru DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.146

Успешное продолжение работ по созданию прототипа плазмооптического масс-сепаратора в значительной степени зависит от понимания работы источника многокомпонентного потока ионов. В макете плазмооптического масс-сепаратора ПОМС-Е-3 [1] – это плазменный ускоритель с анодным слоем (УАС). Создание нового компактного плазменного анализатора «ТАНДЕМ», позволяющего проводить анализ потока ионов по энергии, массе и заряду [2], заметно расширяет возможности изучения как разрядов в скрещенных полях УАС, так и собственно результатов масс-сепарации.

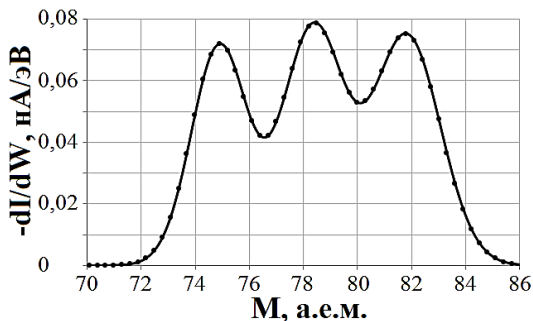
На рис. 1 приведены зависимости амплитудных значений интенсивности токов ионов Ne^+ , Ar^+ и Kr^+ от величины индукции магнитного поля на аноде УАС, измеренные анализатором ТАНДЕМ на выходе азимутатора ПОМС-Е-3. Кривая 4 на рис. 1 – это зависимость максимальных значений dI/dW , взятых из суммарного спектра $dI/dW = f(B_A)$, измеренного энергоанализатором с задерживающим потенциалом (ЭЗП). Сравнение этих зависимостей позволяет определить вклад иона каждой массы в полный ионный ток и оптимизировать



скорости напуска газов для достижения заданных парциальных соотношений.

Рис. 1. $dI/dW_{i,max} = f(B_A)$ для ионов Ne^+ (кривая 1), Ar^+ (2), Kr^+ (3) и выборка из суммарного распределения ионов по энергии (4) от величины индукции магнитного поля на аноде УАС; разрядное напряжение $U_p = 1100$ В; $P = 15 \cdot 10^{-5}$ Торр; скорости напуска газов $q_{Ne} = 10$ sccm; $q_{Ar} = 10$ sccm; $q_{Kr} = 10$ sccm.

Применение ТАНДЕМА позволяет, «незапланированно» увидеть и «тонкую структуру» сигналов от ионов каждого сорта в энергетическом окне, определяемом разрешением по энергии ΔW анализатора. На рис. 2 показан пример сигнала, формируемого на коллекторе анализатора ионами криптона. Проглядывается



одинаковая физическая природа данной структуры с наблюдавшимися ранее [3] изомагнитными скачками на суммарной функции распределения ионов, измеренной ЭЗП.

Рис. 2. Тонкая структура распределения ионов Kr^+ по энергиям (скоростям – массам) внутри ΔW фильтра Вина анализатора ТАНДЕМ.

Литература

[1]. Бардаков В.М., Кичигин Г.Н., Строкин Н.А., Письма в ЖТФ, 2010, 36, 75
 [2]. Строкин Н.А., Бардаков В.М., Нгуен Тхе Тханг, Казанцев А.В., Письма в ЖТФ, 2020, 46, 7
 [3]. Strokin N.A., Kazantsev A.V., Bardakov V.M., The Thang Nguyen, and Kuzmina A.S., Physics of Plasmas, 2019, 26, 073501

СРАВНЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА И ИЗЛУЧЕНИЯ ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА НА ВОДНЫЕ РАСТВОРЫ

¹Пискарев И.М., ²Аристова Н.А., ³Иванова И.П.

¹НИИЯФ МГУ, e-mail: i.m.piskarev@gmail.com

²Уральский федеральный университет, Нижнетагильский технологический институт,
e-mail: aristova-na@mail.ru

³Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского,
e-mail: ivanova.ip@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.147

Холодная плазма электрического разряда может непосредственно контактировать с обрабатываемым водным раствором. Активные частицы генерируются в самом разряде и попадают в раствор через поверхность раздела газ-жидкость. Горячая плазма импульсного электрического разряда при контакте с объектом будет повреждать его. Поэтому приборы, работающие с горячей плазмой, могут воздействовать на объект без термических повреждений только дистанционно.

В случае горячей плазмы, активными факторами импульсного электрического разряда, удаленного от объекта, являются частицы (радикалы), образующиеся в самом разряде, диффундирующие от области разряда до объекта, и световое излучение разряда. Под действием светового излучения в водном растворе образуются активные частицы. Действие светового излучения, проникающего в раствор, принципиально отличается от действия холодной плазмы, контактирующей с раствором, тем, что в холодной плазме все активные частицы уже есть, в то время как излучение никаких активных частиц не содержит. Частицы образуются в водном растворе при прохождении излучения. Рассмотрим активные факторы подробнее.

В холодной плазме электрического разряда на воздухе и в присутствии паров воды генерируются все активные формы кислорода и азота. Наибольшей активностью обладают гидроксильные радикалы. Но из-за высокой реакционной способности гидроксильные радикалы с большой вероятностью гибнут на месте образования, либо расходуются при первом же контакте с веществами, растворенными в воде, и находящимися на поверхности. Все остальные активные частицы холодной плазмы поглощаются через поверхность раздела газ-вода и могут диффундировать вглубь раствора.

Для горячей плазмы, основным продуктом, образующимся в электрическом разряде, согласно механизма Зельдовича, являются радикалы NO^\bullet . Они диффундируют до поверхности водного раствора и поглощаются в нем. При этом в воде образуется азотистая кислота. Под действием импульсного излучения с длинами волн 200 – 250 нм в воде, содержащей растворенные азот и кислород (воздух) образуются радикалы $\text{HO}_2^\bullet/\text{O}_2^{\bullet-}$, O^\bullet и молекулы N_2O . Излучение проходит в воду на значительную глубину. Ослабление излучения с длиной волны 200 нм в слое воды 10 см составляет 30%. Дальнейшие взаимодействия этих первичных частиц приводит к образованию азотистой кислоты (также как при поглощении радикалов NO^\bullet из газовой фазы) и комплекса ($\dots\text{ONOOH}/\text{ONOO}^- \dots$), распадающегося за время до 14 суток на пероксинитрит и пероксиазотистую кислоту. Первичные и вторичные продукты обуславливают химическую активность воды.

Радиационные выходы окисления и восстановления под действием импульсного излучения горячей плазмы составляют $\sim 6 (100 \text{ эВ})^{-1}$, радиационный выход азотистой кислоты не превышает $0.5 (100 \text{ эВ})^{-1}$. Отсюда следует, что основным активным веществом являются продукты распада комплекса. Эксперименты, выполненные авторами, подтверждают описанный механизм воздействия импульсного излучения горячей плазмы на водные растворы.

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ИНИЦИИРОВАНИЯ И ГАШЕНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ СИЛЬНОТОЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Глинов А.П., Головин А.П., Козлов П.В.

НИИ механики МГУ, г. Москва, Россия, e-mail: krestytroitsk@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.148

Ранее на электроразрядном стенде установки П-2000 НИИ механики МГУ реализованы режимы стабильного горения протяженной (до 30 см) сильноточной (до 700 А) стационарной электрической дуги в открытой воздушной среде [1]. Результат получен без использования традиционных методов стабилизации (внешним магнитным полем, изоляционными стенками или внешними потоками газов). Стабилизация обеспечивалась за счет выбора материалов, размеров и формы электродных узлов, и скорости раздвижения электродов (40 – 400 мм/с). Возникла стабильная катодная струя, взаимодействующая не с твердой поверхностью анода, а с узким (~1 см) прианодным плазменным слоем, формируемым анодными струйками, как из опорных пятен дуги, так и с горячей (~2000°C) поверхности анода. Эти результаты могут быть востребованы: в разработках систем инициирования и гашения протяженных электрических дуг; для моделирования испытаний защитных покрытий летательных аппаратов при их входе в плотные слои атмосферы планет, в частности Земли; при разработке установок утилизации (в т.ч. и токсичных) отходов, трудно разлагающихся при использовании традиционных химических технологий [2].

Основная цель настоящей работы - развитие системы инициирования и гашения дуг путем разведения первоначально замкнутых электродов [1, 3] за счет оптимизации процесса раздвижения электродов. Дополнительно исследованы возможности стабилизации стационарной дуги при таком ее инициировании и во внешнем аксиальном магнитном поле. На основе подходов и методик, развитых в [4, 5], проведено расчетно-теоретическое и экспериментальное исследование процессов при инициировании, стабилизации и гашении протяженных сильноточных электрических дуг в открытой воздушной среде атмосферного давления. Рассмотрены преимущественно вертикально ориентированные разряды. Изучались дуги между графитовыми (ЗОПГ) электродами разных диаметров (15 – 150 мм) и форм (от стержневых до блюдцеобразных).

Получены и уточнены новые данные о допустимых уровнях возмущений межэлектродного зазора, не приводящих к дестабилизации разряда. Достигнуты первые результаты в реализации автоматического гашения дуг в заданный момент времени с помощью системы раздвижки электродов (под управлением специального программного модуля в системе PURELOGIC, применяемой для станков с ЧПУ). Процесс гашения дуг реализуется без непосредственного участия оператора пульта управления экспериментальной установки и применения коммутационных устройств цепи.

Работа выполнена в НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова (госконтракт №АААА-А16-116021110198-5) при финансовой поддержке РФФИ (грант №18-29-21022).

Литература

- [1]. A P Glinov, A P Golovin, P V Kozlov, K V Shaleev, G A Lyubimov // J. Phys.: Conf. Ser. 1250 01 2019
- [2]. А.Ф. Рутберг, О.Б. Васильева, И.И. Кумкова, А.А. Сафронов // ТВТ, 2013, Т. 51, № 2, с. 191
- [3]. German V O, Glinov A P, Golovin A P, Kozlov P V, and Lyubimov G A // Plasma Physics Reports, 2013. Vol. 39. No. 13. p. 1142
- [4]. Glinov A.P., Golovin A.P., Kozlov P.V., Shaleev K.V. //Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics. 2019. V.20, iss. 2. <http://chemphys.edu.ru/issues/2019-20-2/articles/835/>
- [5]. A.P. Glinov, A.P. Golovin, and K.V. Shaleev, Prikl. Fiz. 2018(2), 21

ГЕНЕРАТОРЫ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА ОСНОВЕ ОТКРЫТОГО РАЗРЯДА С УБЕГАНИЕМ ЭЛЕКТРОНОВ С ПРОДУВОМ ГАЗА ЧЕРЕЗ РАЗРЯДНЫЙ КАНАЛ

Войтешонок В.С., Егорова Е.К., Туркин А.В., Шлойдо А.И.

*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: kerc@elnet.msk.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.149

Генератор электронного пучка (ГЭП) на основе стационарного открытого разряда (ОР) представляет собой цилиндрический разрядный канал малой длины и диаметра (десятые доли сантиметра), к которому приложена постоянная разность потенциалов величиной в единицы киловольт. Анод таких ГЭП выполнен в виде сетки или диафрагмы с высокой геометрической прозрачностью, что позволяет большей части электронов, ускоренных в разрядном промежутке, беспрепятственно покинуть разрядный канал и, испытывая торможение в рабочей среде, создавать плазму неоднородной пространственной структуры. Обширные экспериментальные исследования особенностей работы генераторов подобного типа были проведены в [1, 2].

Важным преимуществом ГЭП, основанных на стационарном ОР, является возможность создания высокоэнергетического электронного пучка (энергетический КПД стационарного ОР достигает 75 – 85% в зависимости от геометрии ячейки и сорта рабочего газа [3]) непосредственно в рабочей среде без использования сложных систем фокусировки и выведения пучка. При этом, существующие конструкции ГЭП на основе открытых разрядов имеют ограниченную сферу применения вследствие высокой зависимости эффективности работы ГЭП от параметров среды, в которой создается разряд. Показано, что наибольшая эффективность работы и наивысшее рабочее давление достигается при зажигании разряда в химически инертных и легких газах без воздушных примесей [4].

Доклад посвящен результатам экспериментальных исследований эффективности варианта конструкции генераторов электронных пучков на основе стационарного аномального высоковольтного тлеющего разряда с убеганием электронов (открытого разряда), организованного так, чтобы сквозь разрядный канал ГЭП продувался замещающий газ, эффективность создания электронного пучка в котором была приближена к максимально достижимым ускоряющим напряжениям. При этом рабочая среда, в которую помещен ГЭП и в которой электронный пучок тормозится, существенно отличаются по своим кинетическим и химическим свойствам от параметров замещающего газа. В докладе приводятся результаты исследований влияния геометрических особенностей конструкции модифицированного ГЭП на характеристики горения ОР (величина напряжения пробоя, стабильность горения, максимально достижимые давления замещающего газа и рабочей среды, вольтамперная характеристика разряда в зависимости от потока замещающего газа) для выбранной пары замещающий газ (гелий) – рабочая среда (воздух), проведено сравнение ВА характеристик работы стандартной и модифицированной (в качестве замещающей среды выбран гелий давлением от 2000 до 2600 Па) версий ГЭП при зажигании ОР в одной и той же рабочей среде (воздух, от 1000 до 2500 Па).

Литература

- [1]. Бобров В.А., Войтешонок В.С., Головин А.И., Голубев М.М., Туркин А.В., Шлойдо А.И., Генератор электронного пучка (варианты), Патент РФ № 2 535 622. Кл. МПК-Н05Н1/24.20.12.2014
- [2]. Бобров В.А., Войтешонок В.С., Головин А.И. и др, ЖТФ. 2013. Т. 83. № 8. С. 121
- [3]. Войтешонок В.С., Головин А.И., Егорова Е.К., Ломакин Б.Н., Туркин А.В., Шлойдо А.И., ТВТ, 2017, т. 55, вып. 5, с. 685 – 691
- [4]. Головин А.И., Голубев М.М., Егорова Е.К., Туркин А.В., Шлойдо А.И., ЖТФ, 2014, т. 84, вып. 5, с. 41 – 45

МЕХАНИЗМ УСКОРЕНИЯ ИОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ НА ГЕНЕРАТОРЕ РЭП "КАТРАН"

Белозеров О.С., Бакшаев Ю.Л., Хромов С.А., Данько С.А.

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: Belozеров_OS@nrcki.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.150

В импульсных генераторах релятивистских электронных пучков (РЭП), воздействующих на прозрачную для них нагрузку, существует явление ускорения ионов. Энергия отдельных сгустков ионов может в несколько раз превышать приложенное напряжение импульсного генератора, умноженное на ионный заряд. В рамках исследований по ускорению ионов были проведены эксперименты на генераторе «Катран» (напряжение в импульсе ~ 300 кВ, ток до 150 кА, длительность ~ 80 нс) [1]. Для исследования механизма ускорения ионных пучков мегаэлектрон-вольтных энергий использовались методы диагностики, описанные в работах [1, 2].

На рис. 1 представлена схема эксперимента, который проводился при зазоре между катодом и анодом в высоковольтном диоде равном ~ 7.5 мм. В качестве анода стояла алюминиевая фольга толщиной 10 мкм, за которой на удалении b размещался коллиматор из латуни длиной 8 – 16 мм с цилиндрическими отверстиями. Коллиматор предназначался для того, чтобы либо устранить образование виртуального катода за фольгой, либо ограничить дистанцию, на которой виртуальный катод мог ускорять ионы. При этом коллиматор пропускает узконаправленные ускоренные ионы к детекторам. В первых 15-ти пусках, проведенных без зазора b , ионы могли ускоряться только за счёт вихревого поля, возникающего в высоковольтном диоде.

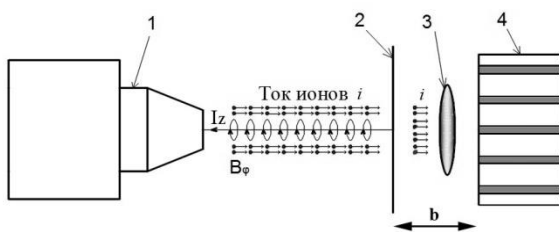


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – катод; 2 – анодная фольга; 3 – виртуальный катод; 4 – коллиматор.

исключительно в зазоре высоковольтного диода, а в фольге происходит торможение ионов. Медианные значения пересчитанной энергии ионов, ещё не прошедших сквозь анодную фольгу составляют 860 и 850 кэВ. Эти значения практически одинаковые, что говорит о том, что параметры пусков серии были достаточно стабильными для проведённого сравнения. При удалении коллиматора от анодной фольги ускорение ионов продолжается: энергия сгустков ионов и их количество монотонно возрастали до $E_p = 1.5 - 3.5$ МэВ и $N_i \approx 5 \times 10^{10}$ на дистанции в 30 мм. По-видимому, при удалении коллиматора от анодной фольги подключается механизм ускорения вне высоковольтного диода, обусловленный полем движущегося на ограниченной дистанции виртуального катода.

Работа была выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (приказ от 09.10.2020 №2073).

Литература

- [1]. Белозеров О. С., Данько С. А., Ананьев С. С. // ВАНТ Серия «Термоядерный синтез». 2020. Т. 43. Вып. 2. С. 80-86. DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-2-80-86
- [2]. Белозеров О. С., Бакшаев Ю. Л., Данько С. А. // ВАНТ Серия «Термоядерный синтез». 2018. Т. 41. Вып. 4. С. 99-105. DOI: 10.21517/0202-3822-2018-41-4-99-105

ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ НАНОСЕКУНДНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СКОЛЬЗЯЩЕГО РАЗРЯДА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА

Мурсенкова И.В., Уланов П.Ю., Кузнецов А.Ю., Ляо Ю.

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Россия,
e-mail: murs_i@physics.msu.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.151

Корректное определение характеристик разрядов в высокоскоростных потоках необходимо для определения механизма их воздействия на течение в задачах плазменной аэродинамики [1]. В работе представлены результаты экспериментальных исследований наносекундного поверхностного скользящего разряда в сверхзвуковых потоках воздуха в ударной трубе (числа Маха потока до 1.7). В разрядной камере инициировались импульсные поверхностные скользящие разряды площадью $100 \times 30 \text{ мм}^2$ длительностью $\sim 300 \text{ нс}$ [2]. Изучались характеристики разряда в сверхзвуковых потоках с плоской ударной волной и с наклонной ударной волной в разрядной камере.

Для определения параметров плазмы разряда использовались методы эмиссионной спектроскопии и данные измерений тока. Спектры излучения регистрировались при импульсном напряжении 25 кВ и токе $\sim 1 \text{ кА}$. На основе экспериментальных измерений оценивались концентрация электронов, энергия электронов и напряженность электрического поля. Концентрация электронов определялась по уширению линии водорода H_α и по осциллограммам тока. Отмечено, что в неподвижном воздухе при давлениях выше 50 торр и в потоках с ударной волной в спектре наблюдается непрерывная часть. Причиной возникновения континуума, по оценкам, является тормозное излучение. Энергия электронов рассчитывалась на основе обработки континуальной части эмиссионного спектра, которая сравнивалась с теоретическим спектром, построенным для разных энергий электронов. Напряженность электрического поля рассчитывалась по отношению интенсивностей полос второй положительной системы азота N_2 и первой отрицательной системы иона азота N_2^+ . Скорости реакции излучения прямо пропорциональны плотности электронов, которые, в свою очередь, зависят от величины электрического поля.

В сверхзвуковых потоках ток наносекундного поверхностного скользящего разряда концентрируется в каналах повышенной проводимости в областях низкой плотности [2, 3]. Экспериментально показано, что спектр и динамика излучения токовых каналов определяются характером их взаимодействия с ударными волнами. Концентрация электронов в разрядных каналах превышает 10^{15} см^{-3} , интенсивность излучения немонотонно изменяется со временем, длительность послесвечения может превышать 2.5 мкс [3]. Пространственная неоднородность энерговклада приводит к генерации ударных волн, возмущающих сверхзвуковой поток в канале в течение $\sim 100 \text{ мкс}$ после разряда.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-08-00661 с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития МГУ.

Литература

- [1]. A. Komuro, K. Takashima, K. Suzuki et al. Gas-heating phenomenon in a nanosecond pulse discharge in atmospheric-pressure air and its application for high-speed flow control. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2018. Vol. 27, 104005
- [2]. Мурсенкова И.В., Ляо Ю., Иванов И.Э., Сысоев Н.Н. Характеристики наносекундного поверхностного скользящего разряда в сверхзвуковом потоке воздуха, обтекающем тонкий клин. *Вестник МГУ, Сер. 3. Физика. Астрономия.* 2019. № 3. С. 54-60
- [3]. Mursenkova I.V., Kuznetsov A.Yu., and Sazonov A.S. Unsteady interaction of nanosecond surface sliding discharge with plane shock wave. *Appl. Phys. Lett.*, 2019. Vol. 115, No 11. 114102

ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ МОЩНОГО ИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА МАТЕРИАЛЫ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ПЛАЗМЕННЫХ УСТАНОВОК

^{1,2,3}Казаков Е.Д., ¹Бобырь Н.П., ¹Крутиков Д.И., ¹Курило А.А., ¹Орлов М.Ю.,
¹Спицын А.В., ¹Стрижаков М.Г., ¹Шашков А.Ю.

¹НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия, e-mail: Kazakov_ED@nrcki.ru

²Национальный исследовательский университет "МЭИ", г. Москва, Россия

³Московский физико-технический институт (НИУ), г. Долгопрудный, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.152

В мощных плазменных и плазменно-пучковых установках, в том числе ориентированных на решение задач управляемого термоядерного синтеза существует проблема сохранности первой стенки вакуумной камеры, обращенной к плазме. Особенно это касается нештатного срабатывания ускорительных установок, попадания плазмы или пучков ускоренных частиц на стенку в связи с развитием неустойчивостей или в аварийных ситуациях. В этом случае на поверхности может выделяться энергия с плотностями до сотен Дж/см². Это может приводить к серьезной деградации материалов первой стенки (см., например, [1, 2]).

В работе [3] было предложено применять для моделирования аварийных ситуаций с мощным энерговыделением на стенке вакуумной камеры сильноточный электронный пучок установки «Кальмар», работающей в режиме малых плотностей энергии [4]. Первые эксперименты продемонстрировали, что даже при относительно небольших воздействиях происходит значительное повреждение образцов. В то же время наблюдалось осаждение материала катода и подложки образца на поверхность, что не позволяло оценить количество унесенного с поверхности образца вещества.

В данной работе предложена схема диодного узла, позволяющая минимизировать влияние катодной плазмы на исследование воздействие сильноточного электронного пучка на материалы первой стенки мощных плазменных установок. Рассмотрена возможность применения катода и подложки из тугоплавкого материала (молибдена). На первый взгляд подобное решение кажется очевидным, но, как оказалось, имеется ряд существенных недостатков. Кроме того, что механическая обработка тугоплавких материалов весьма сложна, а, следовательно, отдельные детали крайне дороги, подобные материалы обладают повышенной хрупкостью. На большинстве сильноточных ускорителей формирование пучка и его взаимодействие с мишенью сопровождается развитием мощных ударных волн, распространяющихся по корпусу установки, что приводит к быстрому разрушению катодов. В данной работе представлены результаты экспериментов с применением катодов из молибдена и нержавеющей стали. Предложена альтернативная комбинированная схема катода, позволяющая минимизировать распыление катода и, в то же время, обеспечить его долговечность.

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (Приказ №1953 от 29.09.2020).

Литература

- [1]. Мартыненко Ю.В., Будаев В.П., Грашин С.А., Шестаков Е.А. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2017. № 6. С. 45– 52
- [2]. В.П. Будаев // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2015, т. 38, вып. 4, с. 5 – 33
- [3]. Е.Д. Казаков, А.А. Курило, М.Ю. Орлов и др. // Сб. научных трудов VI международной конференции «Лазерные, плазменные исследования». 2020. Т. 2 с. 265 – 266
- [4]. Demidov, V.A., Efremov, V.P., Kalinin, Yu.G., et al Journal of Physics: Conference Series 2016 V. 774, Is. 1, 27, 012129

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ В ПРОЗРАЧНЫХ ПОЛИМЕРАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В РЕЖИМАХ С НИЗКОЙ ЭНЕРГЕТИКОЙ

^{1,2,3}Казаков Е.Д., ¹Калинин Ю.Г., ¹Курило А.А., ¹Крутиков Д.И., ¹Орлов М.Ю.,
^{1,3}Смирнова А.Р., Стрижаков М.Г.

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

³Московский физико-технический институт (НИУ), г. Долгопрудный, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.153

Последнее время различные полимерные материалы благодаря своей легкости, относительной применяются в авиационной и ракетно-космической технике. В тоже время известно, что дешевизне и, главное, уникальным механическим и прочностным характеристикам, широко полимеры под воздействием ионизирующего излучения различной природы способны менять структуру и другие свойства, в том числе механические, а сопутствующий при этом нагрев вещества ещё более усложняет сценарий изменения характеристик материалов. Например, в неметаллических материалах (полимеры) нагрев даже на несколько десятков градусов может существенно изменить параметры уравнения состояния (например, снизить скорость звука).

Представлены экспериментальные результаты исследования распространения возмущений, вызванных сильноточным электронным пучком, в прозрачных образцах при работе ускорителя в режиме низкой энергетики. В качестве основной измерительной методики использовалось лазерное зондирование в сочетании с электронно-оптической регистрацией теневых фотографий в хронографическом режиме.

Эксперименты проводились на сильноточном электронном ускорителе «Кальмар» [1]. Ускоритель работал в следующем режиме: энергия электронов $E = 150 - 300$ кэВ, ток пучка электронов составлял $I = 2 - 12$ кА, длительность импульса на полувысоте $100 - 150$ нс. В качестве источника зондирующего излучения использовался твердотельный лазер, работавший в режиме внутриврезонаторной генерации второй гармоники с выходом излучения на длине волны 540 нм и энергией импульса 90 мДж. Более подробно применяемая теневая диагностика и чувствительность метода описаны в работе [2]. В качестве мишеней использовались образцы различной толщины из ПММА, полистирола и эпоксидной смолы, а также оптических стекол марок ЛК-5 и ТФ-7 толщиной 30 мм.

В работе продемонстрировано, что применение лазерного зондирования с электронно-оптической регистрацией теневых фотографий в хронографическом режиме позволяет получать разнообразные данные (например, скорости фронта, геометрические размеры возмущения, момент возникновения механических повреждений) о возмущениях в прозрачных образцах при низкоэнергетическом режиме работы установки. Показано, что возмущения носят преимущественно акустический характер.

Работа выполнена при поддержке гранта НИЦ «Курчатовский институт» (приказ № 1569 от 16 июля 2019 г.).

Литература

- [1]. Демидов Б.А., Ивкин М.В., Петров В.А., Фанченко С.Д. // Атомная энергия. 1979. Т. 46. Вып. 2. С. 101 – 116
- [2]. Демидов Б.А., Казаков Е.Д., Калинин Ю.Г., Крутиков Д.И., Курило А.А., Орлов М.Ю., Стрижаков М.Г., Ткаченко С.И., Чукбар К.В., Шашков А.Ю. // ПТЭ. 2020. № 2. С. 96 – 99

ОСОБЕННОСТИ ВРМБ В НЕОДНОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ ПРИ ДВУМЕРНОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ВОЛНЫ НАКАЧКИ

¹Двинин С.А., ²Солихов Д.К., ²Хобилов Д.У.

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, e-mail: dvinin@phys.msu.ru,

²Таджикский Национальный Университет, Душанбе, Таджикистан,

e-mail: davlat56@mail.ru.

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.154

Рассмотрена задача о конвективном усилении волн при ВРМБ в условиях, когда волны накачки распространяется вдоль плазменного слоя в двумерно ограниченной плазме при учете пространственной неоднородности поля волны накачки. В отличие от работы [1] учтена неоднородность поля волны накачки в направлении распространения. Такого рода задачи имеют практическое применение для диагностики плазмы, ускорения частиц и интерпретации других нелинейных процессов. В отличие от [2] в данной работе рассматривается двумерная задача. Для рассмотрения ВРМБ использована система укороченных уравнений для амплитуд рассеянных звуковой электромагнитных волн, которую можно получить из уравнений гидродинамики с учётом пондеромоторных сил и уравнений поля [3].

$$\frac{\partial a_1}{\partial t} - V_{1x} \frac{\partial a_1}{\partial x} + V_{1y} \frac{\partial a_1}{\partial y} + \gamma_s a_1 = v_1 a_2 e^{-i\varphi(x)}, \quad \frac{\partial a_2}{\partial t} - V_{2y} \frac{\partial a_2}{\partial y} + \gamma_t a_2 = v_2 a_1 e^{i\varphi(x)} \quad (1)$$

где $a_1 = i N_1 / N_0$, N_1 – возмущение концентрации электронов, $a_2 = \delta E^*$ – амплитуда поля рассеянной волны, $V_{1x} = k_x(x) V_s^2 / \omega$, $V_{1y} = k_y V_s^2 / \omega$, $V_{2y} = k_y c^2 / \omega'$ – проекции групповых скоростей на направления ОХ и ОУ, $v_1 = Ze^2 E_0 k^2 / 4 m m_i \omega_0 \omega \omega'$, $v_2 = E_0^* \omega_{Le}^2 / 4 \omega_0$ – коэффициенты нелинейной связи волн, $\gamma_t = -c^2 / 2 \omega' (dk_x / dx) + v_e \omega_{Le}^2 / (2 \omega'^2)$, $\gamma_s = V_s^2 / (2 \omega) (dk_x(x) / dx) + v_i / 2$ – соответственно коэффициенты затухания рассеянных и звуковых волн, e , m , N_0 – заряд, масса и концентрация электронов, z , m_i – зарядовое число и масса ионов, k_0 , ω , E_0 – волновое число, частота и амплитуда волны накачки, $\varphi(x) = \int_x \chi(x') dx'$ – разность фаз взаимодействующих с волной накачки (волновое число k_0) рассеянных (волновое число k') и звуковых (волновое число k) волн, возникающая из-за неоднородности плазмы, $\chi(x) = k_0(x) + k'(x) - k(x)$. Интенсивность рассеянного излучения рассчитывалась аналогично работе [4].

В приближении сильной диссипации звуковых волн получено точное решение для квадрата модуля амплитуды рассеянной волны и представлено её пространственное распределение. Показано, что интенсивность рассеянного излучения достигает максимального значения вблизи резонансной точки и уменьшается по мере удаления от неё. Определено пороговое значение коэффициента усиления волн вдоль направления распространения волны накачки в плазме.

Сопоставление расчетов характеристик рассеянного излучения при ВРМБ по полученным формулам с экспериментом [5, 6] показало их качественное согласие.

Литература

- [1]. Двинин С.А., Солихов Д.К., Нурулхаков Ш.С. // Оптика и спектроскопия. 2020. Т. 128. С. 98
- [2]. Горбунов Л.М. // УФН. 1973. Т. 109. С. 631
- [3]. Солихов Д.К., Двинин С.А., Хобилов Д.У. // Известия ВУЗов, Физика. 2019. Т. 62. № 12. С. 42
- [4]. Солихов Д.К., Двинин С.А. // Физика плазмы. 2016. Т. 42. № 6. С. 590
- [5]. Ng A., Pitt L., Salzmann D., Offenberger A.A. // Phys. Rev. Lett. 1979. V. 42. No. 5. P. 307
- [6]. Toroker Z., Malkin V.M., Fish N.Z. // Physics of plasmas. 2014. V. 21. P. 113110

МИКРОВОЛНОВЫЙ ФАКЕЛ КАК СПОСОБ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ КАТОДОВ

¹Артемьев К.В., ¹Давыдов А.М., ^{2,3}Казанцев С.Ю.

¹*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: artemievkv@mail.ru*

²*Московский политехнический университет, г. Москва, Россия, e-mail: s-kazantsev@mail.ru*

³*Московский технический университет связи и информатики, г. Москва, Россия, e-mail: s.i.kazantsev@mtuci.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.155

Важным элементом мощных импульсно-периодических нецепных HF(DF)-лазеров, иницируемых объемным самостоятельным разрядом (ОСР), является электродная система, которая должна обеспечивать стабильную работу лазера [1 – 3]. Использование катодов из карбида кремния (SiC) позволяет существенно увеличить однородность и устойчивость ОСР в рабочих средах электрохимических лазеров [3]. Однако для получения наиболее однородного ОСР в этих условиях необходимо, чтобы на катоде присутствовал мелкомасштабный рельеф ~50 мкм [1 – 3]. Создание мелкомасштабных неоднородностей представляет значительную проблему, поскольку высокая твердость SiC затрудняет механическую обработку катодов из этого материала. Поэтому представляется весьма актуальной задачей изучение возможности применения плазменной обработки поверхности как из карбида кремния, так и из металлов (Ti, Al) для создания катодов с рельефом.

Целью настоящей работы было исследование возможности применения микроволнового факела [4, 5] как способа плазменной обработки катодов (SiC, Ti, Al). Приводятся параметры микроволнового факела (газовая температура, температура и концентрация электронов) для плазмообразующих газов, таких как аргон и воздух. Обсуждаются физические аспекты процессов, происходящие при контакте плазмы с поверхностью.

Литература

- [1]. Belevtsev A.A., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Podlesnykh S.V. // *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, Vol. 51, 384003
- [2]. Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю. // *Письма в ЖТФ*, 2019, том 45, 23 – 25
- [3]. Apollonov V and Kazantsev S. *High-Energy Ecologically Safe HF/DF Lasers* (CRC Press, 2020)
- [4]. Грицинин С.И., Князев В.Ю., Косый И.А., Малых Н.И., Мисакян М.А. // *Физика плазмы*, 2004, том 30, № 3, с. 1 – 9
- [5]. Грицинин С.И., Давыдов А.М., Косый И.А., Кулумбаев Э.Б., Лелевкин В.М. // *Физика плазмы*, 2013, том 39, № 7, с. 655 – 667

ВОЗМОЖНОСТЬ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОКРИСТАЛЛОВ ОКСИДА МЕДИ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОФОРЕЗА В КОЛЛОИДНОМ РАСТВОРЕ УГЛЕРОДА В ЭТАНОЛЕ

Анпилов А.М., Бархударов Э.М., Косый И.А., Моряков И.В.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: igor_miw@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.156

Оксид меди Cu_2O , являющийся полупроводником p-типа, обладает уникальными электрическими оптическими и магнитными свойствами. Применяется для преобразования солнечной энергии фотокатолиза, является сенсорным антибактериальным материалом. Фундаментальные свойства nano- и микрокристаллического Cu_2O сильно зависят от их архитектуры и морфологии. В последнее время большое внимание уделяется вопросам, связанным с контролем морфологии Cu_2O [1].

Существуют различные методы получения нанокристаллов оксида меди: импульсное электроосаждение, процесс пиролиза, термическое окисление с участием катализатора и пр.

В данной работе приводятся результаты предварительных экспериментов, демонстрирующих возможность получения кубических нанокристаллов Cu_2O в результате процесса электрофореза коллоидного раствора нанокристаллов углерода в этаноле. Коллоидный раствор нанокристаллов углерода получен при помощи высоковольтного многоискрового разряда в этаноле с инъекцией аргона в межэлектродное пространство [2]. Разряд формировался с помощью генератора высоковольтных импульсов с энергией накопительного конденсатора $E \sim 1,6$ Дж, частотой следования импульса $f = 50$ Гц, амплитуда тока и напряжения составляла $I \sim 250 \dots 300$ А, и $U \sim 20$ кВ соответственно.

Коллоидный раствор представлял собой аморфный углерод (разупорядоченный графит), с характерным размером наночастиц от нескольких нм до 40 нм.

Было показано, что коллоидные частицы обладают зарядом. Это было использовано для поведения электрофореза. Эксперимент состоял в следующем: к помещенным в коллоидный раствор медным электродам, размерами $2 \cdot 3$ см², прикладывалось постоянное напряжение 200 В, при этом протекал ток 2 мА. На положительном электроде наблюдался процесс выделения наночастиц, отрицательный электрод оставался практически «чистым». После прохождения тока коллоидный раствор терял устойчивость, наночастицы выпадали в осадок. Для анализа выпавших в осадок частиц использовалась микроскопия и рентгеноструктурный анализ. Полученные результаты позволяют предположить наличие нанокристаллов Cu_2O кубической формы размером ~ 30 нм.

Литература

- [1]. Hu, L., Ju, Y., Hosoi, A., Tang, Y. The surface condition effect of Cu_2O flower/grass-like nanoarchitectures grown on Cu foil and Cu film. *Nanoscale Research Lett.* 2013. Vol. 8. № 1. P. 445 – 450
- [2]. Barkhudarov, E.M., Kosy, I.A., Anpilov, A.M., Ivashkin, P.I., Artem'ev, K.V., Moryakov, I.V., Misakyan M.A., N. Cristof, N., Burmistrov, D.E., Smirnova, V.V., Ivanyuk, V.V., Bunkin, N.F., Kozlov, V.A., Penkov, N.V., Sharapov, M.G., Volkov, M.Yu., Sevostyanov, M. A., Lisitsyn, A.B. Semenova, A.A., Rebezov, M.B., Gudkov, S.V. New Nanostructured Carbon Coating Inhibits Bacterial Growth, but Does Not Influence on Animal Cells. *Nanomaterials.* 2020. Vol. 10. № 2130. P. 1 – 12

СВЕЧЕНИЕ МИКРОПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА НА ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА, ПОКРЫТОГО ТОНКОЙ СПЛОШНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛЕНКОЙ, ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ТОКЕ РАЗРЯДА 50 А

Иванов В.А., Коныжев М.Е., Камолова Т.И., Дорофеев А.А.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: ivanov@fpl.gpi.ru DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.157

Известно, что поток плотной плазмы в вакууме может инициировать микроплазменные разряды (МПР) на поверхности металла, покрытого тонкой диэлектрической пленкой [1]. Эти разряды возникают в результате электрического разряда (пробоя) между заряженной в потоке плазмы внешней поверхностью пленки и открытой поверхностью металла [2, 3].

В данной работе была экспериментально исследована пространственная структура свечения (в оптическом диапазоне длин волн) импульсных МПР различной длительности (400 – 1600 мкс), возбуждаемых на поверхности титана (Grade-4), покрытого тонкой диэлектрической пленкой 2 – 10 нм. Эти разряды инициировались на поверхности титана импульсами «затравочной» плотной плазмы: концентрация электронов в плазме $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$, электронная температура 10 эВ, длительность импульсов 25 мкс. В последующие моменты времени распространение МПР на поверхности титана поддерживалось внешним источником импульсного электрического тока и напряжения (50 А, –400 В) (Рис. 1).

Образец титана представлял собой шлифованную пластину с размерами $20 \times 20 \text{ мм}^2$ и толщиной 0.6 мм. При этом на поверхности титана в воздушной атмосфере при комнатной температуре естественным образом формировалась диэлектрическая пленка двуоксида титана толщиной около 2 – 10 нм. После этого образец титана был установлен в вакуумную камеру на расстоянии 2.5 см от инжектора «затравочной» плазмы.

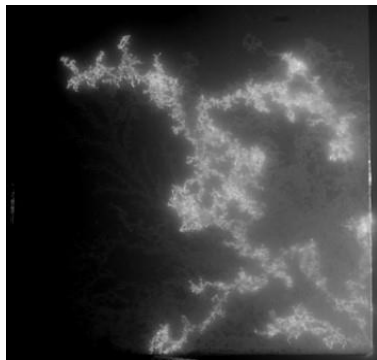


Рис. 1. Интегральная фотография свечения одиночного МПР на поверхности титановой пластины с размерами $20 \times 20 \times 0.6 \text{ мм}^3$, покрытой тонкой сплошной диэлектрической пленкой диоксида титана толщиной 2 – 10 нм.

Параметры МПР: амплитуда электрического тока разряда 50 А, длительность импульса разряда 1600 мкс, характерная скорость распространения разряда 15 м/с.

Пространственная структура свечения МПР на поверхности титана регистрировалась с помощью цифровой фотокамеры Nikon D7100 и макро-объектива Nikkor AF-S Micro 105mm/2.8 G ED.

Обнаружено, что свечение микроплазменного разряда визуально в макромасштабе имеет разветвленную структуру типа дендрита, которая в микромасштабе состоит из большого количества ярко светящихся «точечных» образований – локализованных на поверхности титана катодных пятен. Установлено, что микроплазменный разряд (ток разряда 50 А, напряжение на образце –400 В, длительность импульсов 400 – 1600 мкс) распространяется по поверхности титана, покрытого тонкой сплошной диэлектрической пленкой толщиной до 10 нм, со средней скоростью 15 м/с. При этом, распространение МПР в микромасштабе имеет «прыжковый» характер: плазма «неподвижных» горящих катодных пятен инициирует возбуждение новых катодных пятен на расстояниях локализации $\sim 10 \text{ мкм}$ от них [3].

Литература

- [1]. Ivanov V.A., Sakharov A.S., Konyzhev M.E., Plasma Physics Reports, 2008, V.34, No. 2, p. 150–161
- [2]. Ivanov V.A., Sakharov A.S., Konyzhev M.E. et al., Journal of Physics: Conference Series 907 (2017) 012023 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/907/1/012023/pdf>
- [3]. Ivanov V. A., Konyzhev M. E., Dorofeyuk A. A. et al., Journal of Physics: Conference Series 1647 (2020) 012018 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1647/1/012018/pdf>

СПЕКТРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА РАЗРЯДОВ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ИМПУЛЬСАМИ МОЩНОГО ГИРОТРОНА В МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЯХ

А.А. Летунов, Н.Н. Скворцова, В.Д. Степахин, А.В. Князев, Е.В. Воронова,
В.П. Логвиненко, В.Д. Малахов, Е.М. Кончевков, В.Д. Борзосекон

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва,
Россия, e-mail: let@fpl.gpi.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.158

При разработке плазмохимического метода синтеза структур микро- и нано размеров со сложным физико-химическим составом и максимально развитой поверхностью, основанного на использовании разряда в смесях порошков металл-диэлектрик, инициируемого импульсным излучением мощного гиротрона [1], для диагностики параметров низкотемпературной плазмы регистрировались эмиссионные оптические спектры. Получаемым в этих условиях оценкам температур и посвящено основное содержание работы. Исследовавшиеся процессы использовались для приготовления смесей высокоэффективного каталитического продукта на основе Pd на оксидном носителе [2]. В настоящем докладе представлены результаты экспериментов в смесях Pd, Al₂O₃, в атмосфере воздуха или азота, с использованием меламина и карборана, существенно увеличивающих выход конечного продукта. Процесс включает стадию инициирования, немного превышающую длительность микроволнового импульса, стадию разложения исходных материалов и реакций между всеми компонентами и этапа «закалки», когда происходит охлаждение зоны реакции и осаждение частиц.

Основная часть измерений спектров проводилась спектрометрами фирмы Avantes с волоконным входом. По интенсивностям линий палладия в предположении ЛТР электронная температура на первой стадии оценивалась как ~ 4 кК. Для первой и второй стадий характерно присутствие молекулярных спектров. При наличии органических добавок – меламина и в отдельных случаях карборана, как правило, в начале разряда возникают молекулярные полосы Свана перехода $d^3P_g - a^3P_u$ радикала C₂, которые при достаточном спектральном разрешении могут служить для оценки газовой температуры. И затем возникают полосы перехода $V^2\Sigma^+ - X^2\Sigma^+$, термически стабильного при температурах выше 3,5 кК АЮ. К концу второй – началу третьей стадии можно видимо отнести слабеющую атомную эмиссию примесных щелочных металлов и тепловое излучение, видимых видеокамерой, медленно остывающих частиц.

Последовательность молекулярного свечения: сначала C₂, сменяющееся затем АЮ свидетельствует об эффективном выгорании органики. Это показывает возможность использования разрабатываемого процесса еще и для повторного восстановления каталитической способности ранее наработанного или полученного другими методами каталитического продукта.

Литература

- [1]. Akhmadullina N.S., Skvortsova N.N., Obratsova E.A., Stepakhin V.D., Konchekov E.M., Letunov A.A., Konovalov A.A., Kargin Yu.F., Shishilov O.N. Plasma-chemical processes under high-power gyrotron's discharge in the mixtures of metal and dielectric powders // *Chemical Physics*, January 2019, V. 516, p. 63-70.
- [2]. Skvortsova N.N., Shishilov O.N., Akhmadullina N.S., Konchekov E.M., Letunov A.A., Malakhov D.V., Obratsova E.A., Stepakhin V.D. Synthesis of micro- and nanostructured materials via oscillating reactions initiated by high-power microwave pulses // *Ceramics International*, Volume 47, Issue 3, 1 February 2021, Pages 3978-3987.

**ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ
«ПРОЕКТ ИТЭР: ШАГ В ЭНЕРГЕТИКУ БУДУЩЕГО»**

**SECTION
«ITER PROJECT:
A STEP TO THE FUTURE OF POWER ENGINEERING»**

РАЗРАБОТКА ДИАГНОСТИКИ ИТЭР «ДИВЕРТОРНЫЙ МОНИТОР НЕЙТРОННОГО ПОТОКА»

¹Обуловский С.Ю., ¹Кормилицын Т.М., ¹Ковалев А.О., ¹Портнов Д.В., ¹Воробьев В.А.,
¹Кащук Ю.А., ¹Степанов С.Б., ²Гавриленко Д.Е., ²Иванцовский М.В., ²Бурдаков А.В.

¹ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия,

e-mail: T.Kormilitsyn@iterrf.ru,

²ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.159

Диагностика «Диверторный монитор нейтронного потока» должна обеспечить измерение полного нейтронного выхода и термоядерной мощности ИТЭР с заданной точностью и временным разрешением [1]. При разработке финального проекта диагностики критическим замечанием со стороны МО ИТЭР было требование обеспечить контроль герметичности модуля ДМНП, размещаемого внутри вакуумной камеры токамака-реактора. Контроль герметичности осуществляется с использованием сервисной вакуумной системы (SVS). Анализ показал, что обеспечить герметичность SVS трубок, подводимых к диагностическому оборудованию на теле диверторной кассеты, не представляется возможным (из-за движений и колебаний кассеты во время импульса установки). Принято техническое решение о переносе модуля ДМНП с диверторной кассеты (из под дома дивертора) на поверхность вакуумной камеры. Данное решение полностью соответствует требованиям руководства по вакууму ИТЭР.

Для новой позиции размещения модуля ДМНП выполнены уточненные ядерно-физические расчеты, которые включали в себя анализ воздействия нейтронного излучения, анализ наведенной активности и радиационных отходов. Также для нового размещения выполнены инженерные расчеты и обновлена спецификация нагрузок, учитывающая воздействие всех видов нагрузок и их комбинаций.

В рамках подготовки финального проекта диагностики ДМНП обновлены диаграммы (SLD, Cabling, PI&D, PFD) и интерфейсы с другими подсистемами ИТЭР, включая интерфейсы с интеграторами нижних портов №2, 8 и 14. Разработаны планы сборки, обслуживания и утилизации диагностики ДМНП. Разработана рабочая документация и выполнено макетирование критических узлов модуля ДМНП системой контроля герметичности.

Таким образом, финальный проект диагностики ДМНП [2] подготовлен к защите в МО ИТЭР.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 21.04.2020 № Н.4а.241.19.20.1042 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2020 году».

Литература

- [1]. Yu.A. Kaschuck, et al., “Divertor Neutron Flux Monitor: Conceptual Design and Calibration”, AIP Conf. Proc. 988, 303 (2008)
- [2]. System Design Description Document Divertor Neutron Flux Monitor, <https://user.iter.org/?uid=47LJLH>

РАЗРАБОТКА ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИТЭР ВЕРТИКАЛЬНАЯ НЕЙТРОННАЯ КАМЕРА В 2020 ГОДУ.

Немцев Г.Е., Родионов Р.Н., Хафизов Р.Р., Кумпилов Д.А., Ревякин П.А.,
Мещанинов С.А., Голачев В.М.

*ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия,
e-mail: g.nemtsev@iterrf.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.160

Вертикальная нейтронная камера (ВНК) ИТЭР – диагностическая система, предназначенная для построения профиля нейтронного источника в реальном времени. ВНК имеет 11 хорд наблюдения, расположенных в верхнем 18 и нижнем 14 портах вакуумной камеры токамака [1]. Для детектирования быстрых нейтронов в ВНК используются ионизационные камеры деления на основе ^{238}U и алмазные детекторы. Детекторы ВНК помещаются в блок детектирования быстрых нейтронов (БДБН). Каждый БДБН содержит два алмазных детектора, в конструкцию которых встроены калибровочные источники на основе изотопов ^{241}Am и ^{137}Cs и две камеры деления.

В настоящий момент диагностика находится на стадии разработки финального проекта. При разработке данной диагностической системы была успешно решена проблема значительного фона рассеянных нейтронов в каналах коллиматоров. За счет оптимизации конструкции детекторов и формы коллиматоров удалось улучшить в 3 – 4 раза соотношение сигнал-фон.

Был изготовлен БДБН оптимизированной конструкции и выполнены испытания детекторов в условиях, приближенных к условиям в каналах коллиматоров ВНК: рабочая температура до 150°C , технологический прогрев до 250°C , поток 14 МэВ нейтронов с плотностью до 10^9 н/см 2 с. По результатам испытаний можно сделать вывод, что детекторы БДБН обеспечат измерение нейтронного потока в условиях ИТЭР с требуемой по проекту погрешностью.

Также в рамках разработки был изготовлен и испытан макет измерительного тракта ВНК, включающий в себя алмазный детектор, линию связи на основе кабеля с минеральной изоляцией, макет токового предусилителя и оптическую гальваническую развязку. Определен вклад каждого компонента макета аналогового электронного тракта в суммарную погрешность измерений.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 21.04.2020 № Н.4а.241.19.20.1042 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2020 году».

Литература

- [1]. L. Bertalot, et.al. Concept design and integration aspects of ITER vertical neutron camera. Vol. 2015-Janua, 2015, p. 1 – 9

ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕ ЭКВАТОРИАЛЬНОГО ПОРТА №11 ИТЭР И ТЕСТЫ КЕРАМИКИ КАРБИДА БОРА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПОРТОВ

^{1,2}Шошин А.А., ^{1,3}Бурдаков А.В., ¹Иванцовский М.В., ^{1,2}Полосаткин С.В.,
^{1,2}Суляев Ю.С., ^{1,3}Семенов А.М., ^{1,2}Таскаев С.Ю.

¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.161

Одной из основных задач для диагностических портов строящегося во Франции экспериментального международного термоядерного реактора ИТЭР является нейтронная защита диагностического оборудования, особенно расположенного в вакуумной части установки, непосредственно рядом с «горячей» зоной реактора. В ИЯФ СО РАН для нейтронной защиты разрабатываемых институтом порт-плагов ИТЭР предложено использовать керамику из карбида бора, так как она имеет малый вес, что критично для порт-плагов, и бор имеет высокое сечение захвата нейтронов. Однако в ходе концептуального проектирования вакуумной камеры ИТЭР использовать керамику В₄С не предполагалось, в то время как на этапе финального проектирования экваториального порт-плага (ЭПП) 11 планируется использование большого количества керамики. Для ЭПП № 11 проведены детальные расчеты площади всех обращенных в вакуум компонент, как стальных, так и керамических.

Для подтверждения возможности использования большого количества керамики в вакуумной камере ИТЭР были проведены длительные и достоверные вакуумные тесты с большим количеством керамики российских производителей. Вакуумные тесты и подготовка к ним проводились согласно требованиям ITER Vacuum Handbook.

В результате проведенных исследований доказана возможность работы внутри вакуумной камеры термоядерного реактора ИТЭР нейтронной защиты из отечественной керамики на основе карбида бора. Показано, что после нескольких месяцев нахождения в вакууме удельное газовыделение керамики снижается в 3 раза.

Совместно в российском агентством ИТЭР и Организацией ИТЭР разработана спецификация на керамику карбида бора, на основании которой можно проводить закупки керамики для использования в портах ИТЭР.

Проведены эксперименты по активации образцов керамики карбида бора и нержавеющей стали 316L-ITER Grade быстрыми нейтронами, которые показали быстрое снижение остаточной радиоактивности в образцах и отсутствие опасных примесей.

СТАТУС СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИТЭР

Семенов И.Б., Голачев В.М., Ларионов А.С., Лазарева С.Г., Миронова Е.Ю.,
Миронов А.Ю., Нагорный Н.В., Портоне С.С., Семенов О.И., Звонарева А.А.

ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICSPAF.2021.48.1.162

Система управления установкой ИТЭР - CODAC (Control, Data Acquisition and Communication) разделена два уровня управления - на центральный супервайзор, за создание которого отвечает Международная Организация ИТЭР и нижний локальный уровень управления, за который отвечают Национальные Агентства. Супервайзер включает в себя центральное ядро системы управления (CODAC Core System), систему ядерной безопасности, систему блокировок и защит, систему управления плазмой и центральное вычислительное ядро, обеспечивающее работу установки в реальном времени. На нижнем уровне находятся более 130 технологических и диагностических подсистем установки. CODAC использует SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) EPICS, построенной на идеологии сервер-клиент и в настоящее время базирующейся на компьютерных сетях с пропускной способностью 10 – 40 Гбит/сек.

В докладе дан обзор состояния дел на февраль 2020 года по системе управления верхнего уровня, а также по системам управления технологических и диагностических систем за которые отвечает Российское Национальное Агентство ИТЭР (DIVERTOR NEUTRON FLUX MONITORS, DIVERTOR THOMSON SCATTERING, NEUTRAL PARTICLE ANALYZER, CXRS BASED ON DNB (EDGE), VERTICAL NEUTRON CAMERA, HIGH FIELD SIDE REFLECTOMETRY, PORT PLUG TEST FACILITY, EC RF GYROTRONS, REMOTE PARTICIPATION CENTER). На конференции состояние дел по данным системам будет подробно доложено в докладах авторами, непосредственно отвечающими за эти направления. Также рассмотрены проблемы, которые решались по мере создания систем управления в 2020 году. В частности, вопросы, связанные с интеграцией технологических и диагностических систем в центральную систему управления на стадиях приемосдаточных испытаний на предприятиях изготовителях, на площадке ИТЭР, во время запуска установки и работа во время получения первой плазмы, проблемы электромагнитной и радиационной совместимости. Отдельно рассмотрены вопросы интеграции и управления диагностическими комплексами установки в режиме удаленного доступа в рамках созданного в Проектном центре ИТЭР «Центра удаленного доступа».

Доклад представляет интерес для физиков и инженеров, работающих в области управляемого термоядерного синтеза.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 21.04.2020 № Н.4а.241.19.20.1042 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2020 году».

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ИКД ДМНП К СПЕКТРУ НЕЙТРОНОВ ИТЭР ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ИЗОТОПНОЙ ЧИСТОТЕ УРАНА-238

Ковалев А.О., Родионов Р.Н., Кумпилов Д.А., Обудовский С.Ю., Портнов Д.В.,
Кащук Ю.А.

ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия,
e-mail: A.Kovalev@iterrf.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.163

Диагностика «Диверторный монитор нейтронного потока» (ДМНП) предназначена для определения выхода нейтронов и термоядерной мощности плазмы ИТЭР 0 в широком динамическом диапазоне измерений. Временное разрешение диагностики составляет 1 мс. Требуемая относительная погрешность измерений для ДТ плазмы – 10%, а для ДД плазмы – 20%. В качестве детекторов ионизирующего излучения будут применены ионизационные камеры деления (ИКД) с различным изотопным составом и массой делящегося вещества (^{235}U и ^{238}U). ИКД с ^{238}U особенно чувствительны к нейтронам высоких энергий (>1 МэВ). Для минимизации влияния на измерения тепловых нейтронов в данных детекторах планируется использование ^{238}U с изотопной чистотой 99,9999%. В течении эксплуатации ИТЭР в данных ИКД нарабатывается 239-й изотоп плутония, что ведёт к изменению чувствительности детекторов до 8% 0. Изменение чувствительности ИКД будет вносить дополнительную погрешность в измерения. Так же, столь высокая степень содержания ^{238}U ведёт к увеличению стоимости изготовления детекторов ДМНП.

В работе исследовано изменение чувствительности ИКД ДМНП с ^{238}U за весь период работы установки ИТЭР. Рассмотрены четыре варианта чистоты урана, отличающиеся массовой долей ^{238}U : особо чистый (99,9999%), промежуточной чистоты (99,9%), отвалный (99,8%) и природный (99,26%).

На основании анализа результатов проведённых расчётов можно заключить, что уменьшение изотопной чистоты ^{238}U в ИКД приводит к уменьшению зависимости чувствительности измерений к наработке ^{239}Pu , т.к. уменьшение массовой доли ^{238}U увеличивает вклад рассеянных нейтронов в скорость реакции деления урана за счёт соответственного увеличения массовой доли ^{235}U . В рассмотренных вариантах количество нарабатанного ^{239}Pu практически не зависит от содержания ^{238}U .

Применение отвалного урана или урана промежуточной чистоты не требует существенной переработки конструкции ИКД ДМНП, т.к. чувствительность меняется не более чем на 17% относительно особо чистого урана (при этом погрешность нанесения урана на обкладки ИКД $\sim 20\%$). Применение отвалного урана существенно удешевит стоимость изготовления ИКД.

Использование природного урана так же возможно. Следует отметить, что чувствительность ИКД с природным ураном существенно выше, чем для ИКД с особо чистым ураном. Величина чувствительности ИКД влияет на величину возможного динамического диапазона измерений. Для сохранения величины динамического диапазона измерений системы ДМНП потребуется уменьшить массы ИКД с природным ураном в $\sim 1,5$ раза относительно масс ИКД с высокочистым ураном.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 21.04.2020 № Н.4а.241.19.20.1042.

Литература

- [1]. Yu.A. Kaschuck, et al., “Divertor Neutron Flux Monitor: Conceptual Design and Calibration”, AIP Conf. Proc. 988, 303 (2008)
- [2]. Д.В. Портнов и др., «Радиационно-транспортный анализ характеристик детекторов нейтронной диагностики ИТЭР «ДМНП», XLVII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 16 – 20 марта 2020 г.

ЛАЗЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА НАКОПЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА НА СТЕНКАХ ДЛЯ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2

Гаспарян Ю.М., Булгадарян Д.Г., Синельников Д.Н., Ефимов Н.Е., Ефимов В.С., Крат С.А., Попова М.А., Вовченко Е.Д., ¹Дмитриев А.М., ¹Елец Д.И., ¹Мухин Е.Е., ¹Раздобарин А.Г., Минаев В.Б., Новохацкий А.Н., Сахаров Н.В., Варфоломеев В.И.

НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия, e-mail: YMGasparyan@terphi.ru

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: e.mukhin@mail.ioffe.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.164

В современных термоядерных установках количество захваченного стенками топлива (изотопов водорода) определяется по измерениям газового баланса или при *post mortem* анализе обращенных к плазме компонентов. Методы удаленной диагностики локального накопления топлива в стенках разрабатываются в течение многих лет [1] и входят в список высокоприоритетных задач для реактора ИТЭР [2], однако задача количественного анализа захваченных стенкой изотопов водорода остается нерешенной. В данной работе представлены результаты экспериментов и компьютерного моделирования выхода изотопов водорода из водородосодержащих образцов при лазерном воздействии, а также концепция системы лазерной диагностики накопления изотопов водорода в токамаке Глобус-М2 [3].

Лабораторные эксперименты проводились на установке «Большой масс-монохроматор МИФИ», оснащенной Nd:YAG лазером с длиной волны 1064 нм, длительностью импульса 20 нс и максимальной энергией 70 мДж на импульс. Исследовались насыщенные дейтерием пленки титана, вольфрама, а также вольфрамовая пластина, экспонированная в области дивертора токамака Глобус-М в 2015 году. Для всех образцов при помощи предварительно откалиброванного квадрупольного масс-спектрометра получены зависимости количества выходящего дейтерия от плотности мощности лазерного импульса в диапазоне 5 – 200 МВт/см². С помощью растровой электронной микроскопии исследовалась поверхность материалов до и после облучения. В некоторых случаях наблюдалось отслоение пленок. Для сравнения с экспериментом, было проведено компьютерное моделирование выхода дейтерия из вольфрамового образца в коде TMAP7, предназначенном для решения комбинированных задач диффузии газа и теплопереноса. Расчеты находятся в неплохом согласии с полученными экспериментальными данными.

На основе полученных результатов спроектирована система лазерной диагностики распределения захваченного дейтерия в первой стенке и диверторе токамака Глобус-М2.

Литература

- [1]. Zlobinski M. et al. Laser induced desorption as tritium retention diagnostic method in ITER // Fusion Engineering and Design. 2011. Vol. 86, № 6. P. 1332 – 1335
- [2]. Reichle R. et al. Redefinition of the ITER Requirements and Diagnostics for Erosion, Deposition, Dust and Tritium measurements accounting for the change to tungsten divertor // Proc. of 25th IAEA Fusion Energy Conf., St. Petersburg, 2014
- [3]. Minaev V., et al., Spherical tokamak Globus-M2: design, integration, construction // Nucl. Fusion 57 (2017) #066047

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЛИНЕЙНОГО ИНТЕГРАЛА НЕМОНОТОННОГО ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ

Афонин К.Ю.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Троицк, г. Москва, Россия,
e-mail: kirill.afonin@phystech.edu

ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия
Московский физико-технический институт (НИУ), г. Долгопрудный, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.165

Ключевым элементом поддержки разряда в ИТЕР является внесение топлива (D, T) в виде замороженных капсул — пеллетов. При внесении пеллетов возникают локальные пики плотности у края плазмы, по величине превышающие центральную плотность [1].

В силу немонотонности профиля измерение профиля плотности плазмы методами рефлектометрии в области между пиками невозможно. Измерение интеграла плотности плазмы вдоль хорды зондирования ($\langle n_l \rangle$) методом рефрактометрии возможно, но сопряжено с трудностями при аппроксимации немонотонного профиля, так как погрешность в определении $\langle n_l \rangle$ не должна превышать 1% [2].

В рамках проведенного исследования были рассмотрены два метода определения $\langle n_l \rangle$: метод, предполагаемый в рефрактометрии для определения профилей плотности, монотонных относительно координаты тороидального потока, и метод, использующий данные и рефрактометрии, и рефлектометрии для измерения профиля до пиков и восстановления профиля плотности в промежутке между пиками. Ошибки измерений представлены на рисунке 1. Из рисунка видно, как в случае метода для монотонных профилей

(с использованием данных только рефрактометрии) растет систематическая погрешность по мере роста локальных пиков, при этом влияния на комбинированный метод рефлектометрии и рефрактометрии рост пиков не имеет.

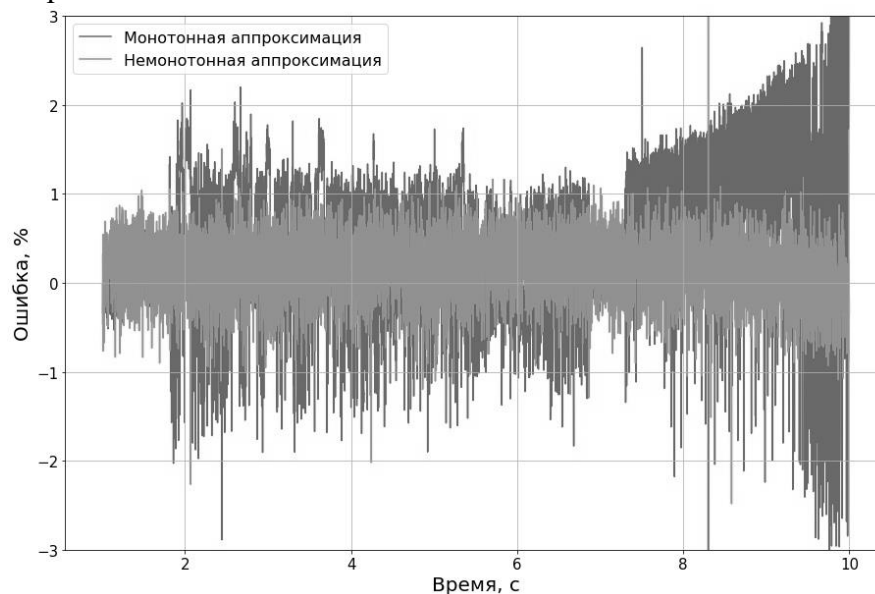


Рисунок 1 - Ошибка определения среднечордовой плотности плазмы

Литература

- [1]. Polevoi A. R. et al. Integrated modelling of ITER scenarios with DT Mix control //45th EPS Conference on Plasma Physics. – European Physical Society, 2018
- [2]. System Design Description (DDD) 55.F9 Reflectometry High Field Side [3WD9DT]

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ГАЛО ДЛЯ АКТИВНОЙ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ НА УСТАНОВКЕ ИТЭР

^{1,2}Павлова Г.С., ²Серов С.В., ²Тугаринов С.Н., ³von Hellermann M.

¹Московский физико-технический институт (НИИУ), г. Долгопрудный, Россия

²ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

³ITER Organization, Cadarache, France

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.166

Для измерения параметров плазмы (концентрация, температура, скорость вращения гелия и легких примесей) на установке ИТЭР будет использоваться активная спектроскопическая диагностика, обозначаемая в англоязычной литературе аббревиатурой CXRS (Charge eXchange Recombination Spectroscopy) [1, 2]. Принцип ее работы состоит в анализе перезарядочного излучения ионов рабочего газа и примесей, которое возбуждается высокоэнергетическими атомами пучка, инжектируемого в плазму.

Регистрируемый спектр состоит из нескольких спектральных контуров, включая линию активной перезарядки, в которой содержится искомая информация об ионной компоненте плазмы. Инжекция высокоэнергетического пучка атомов водорода приводит к образованию т.н. облака атомов «гало» вокруг области прохождения диагностического пучка через плазму. Наличие эффекта гало усложняет выделение линии активной перезарядки из спектра, так как он приводит к искажению наблюдаемой линии активной перезарядки [3, 4]. Также этот эффект приводит к ухудшению локализации измерений.

С помощью кода Simulation of Spectra (SOS) методами, описанными в работе [5], было проведено моделирование эффекта гало для четырёх примесей (He, C, Be, Ne) и рабочего газа (D) для основных сценариев работы установки ИТЭР.

С помощью моделирования было показано, что вклад излучения, вызванного эффектом гало, в интенсивность наблюдаемой линии активной перезарядки не превышает 20% для примесей и достигает 46% для рабочего газа. Также было получено, что этот эффект может заметно сказаться на пространственном разрешении, ухудшая его в два раза для середины радиуса плазменного шнура для линии D-alpha. В итоге можно сделать вывод, что эффект гало необходимо учитывать и моделировать при обработке данных, полученных с помощью активной спектроскопической диагностики на ИТЭР.

Литература

- [1]. С. Н. Тугаринов и др. Разработка концепции активной спектроскопической диагностики с использованием диагностического пучка атомов, применительно к установке ИТЭР // Физика плазмы. 2004, т. 30, с. 147 – 154
- [2]. С. В. Серов, С. Н. Тугаринов, М. Von Hellermann. Моделирование спектров излучения плазмы ИТЭР с использованием кода ADAS для диагностики активной спектроскопии // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2018, т. 41, № 2, с. 89 – 94
- [3]. J. T. Hogan. Calculation of hydrogen density in toroidal plasma // Journal of Nuclear Materials, 1982, Vol. 111 – 112, p. 413 – 419
- [4]. B. A. Grierson et al. Active spectroscopic measurements of the bulk deuterium properties in the DIII-D tokamak (invited) // Review of Scientific Instruments, 2012, Vol. 83, p. 10D529.
- [5]. M. von Hellermann et al. Simulation of Spectra Code (SOS) for ITER Active Beam Spectroscopy // Atoms, 2019, Vol. 7, no. 1

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ ИСТОЧНИКА DD И DT НЕЙТРОНОВ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕЙТРОННОЙ КАМЕРЫ ИТЭР

Родионов Р.Н., Кумпилов Д.А., Немцев Г.Е.

ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.167

Вертикальная Нейтронная Камера ИТЭР (ВНК) – нейтронная диагностическая система, предназначенная для измерения профиля нейтронного источника в полоидальном сечении плазмы [1]. ВНК состоит из двух подсистем – Верхней ВНК, расположенной в верхнем диагностическом порту № 18, и Нижней ВНК, расположенной в нижнем диагностическом порту №14. Верхняя ВНК содержит 6 коллиматоров, нижняя – 5. В конце каждого коллиматора расположен блок детектирования, включающий по две камеры деления с радиатором из ^{238}U и два алмазных детектора разных чувствительностей.

В работе представлен алгоритм одновременного восстановления профилей источников DD и DT нейтронов по измерениям камер деления и алмазных детекторов ВНК с учетом априорной информации о форме магнитных поверхностей. Метод восстановления профиля нейтронного источника основан на варианте метода максимального правдоподобия – EM-алгоритме [2]. Проведен анализ устойчивости восстановления нейтронного источника к статистическим ошибкам измерений детекторов и точности задания магнитных поверхностей. Показано, что разработанный алгоритм позволяет восстанавливать профиль нейтронного источника с погрешностью, не превышающей 10 % в экспериментах с DD и DT плазмой.

Работа выполнена в рамках государственного контракта между Частным учреждением «ИТЭР-Центр» и Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» №Н.4а.241.19.20.1042 от 21 апреля 2020 г.: «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2020 году».

Литература

- [1]. L. Bertalot, et.al. Concept design and integration aspects of ITER vertical neutron camera. Vol. 2015-Janua, 2015, p. 1 – 9
- [2]. K. Lange, R. Carson. EM Reconstruction Algorithms for Emission and Transmission Tomography. Journal of Computer Assisted Tomography, 8(2), 1984, 306 – 316

АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НЕЛОКАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА ПО РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

¹Куличенко А.А., ^{1,2}Кукушкин А.Б.

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

²НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.168

Интерпретация сигналов рефлектометрии плазмы в ЭЦ диапазоне частот ЭМ волн позволяет восстановить спектральный состав флуктуаций плотности плазмы (см. напр. [1]). Кроме интереса к общефизической задаче установления связи параметров турбулентности с процессами переноса тепла, проявляющимися, как известно, свойства сильной нелокальности (недиффузионности), практический интерес представляет [2] влияние нелокальных свойств турбулентности на измерение пространственного профиля плотности плазмы, включая такие измерения в ИТЭР с помощью рефлектометрии со стороны сильного магнитного поля.

Для плазмы токамака развиты аналитические методы, позволяющие связать спектральное распределение сигналов рефлектометрии с корреляционной функцией флуктуаций плотности плазмы (см., напр., [3, 4]). При этом для интерпретации свойств турбулентности плазмы используют модельные корреляционные функции флуктуаций плотности плазмы. Необходимое для указанной интерпретации прямое численное моделирование трехмерной турбулентности замагниченной неоднородной плазмы в условиях интенсивного нагрева плазмы пока не обеспечило создания базы данных, способной быть практически используемой для решения обратных задач восстановления свойств турбулентности по сигналам рефлектометрии.

В настоящей работе представлены предварительные результаты разработки универсального алгоритма восстановления нелокальных характеристик турбулентности плазмы токамака по рефлектометрии. В основе алгоритма лежит использование формализма интегро-дифференциального уравнения для супердиффузионного (нелокального) переноса возбуждения среды и разработанных в [5 – 7] методов точного численного и приближенного аналитического автомодельного решения таких уравнений. В них ядро оператора, интегрального по пространственным переменным, задаваемое функцией распределения переносчиков возбуждения по длине свободного пробега, медленно спадает с ростом расстояния и принадлежит к классу распределений Леви. Применение подхода [6, 7] к описанию нелокальных свойств турбулентности в рамках подхода, основанного на полетах Леви и предложенного в [8], позволило предложить задачу [9] восстановления этих свойств с помощью уравнения типа Бибермана-Холстейна с учетом конечной скорости переносчиков и заданного стохастического распределения их скоростей. Предлагаемый алгоритм включает в себя численное решение уравнения для функции распределения переносчиков возбуждения в неоднородной плазме со структурой, аналогичной слаботурбулентной МГД [10].

Литература

- [1]. V.A. Vershkov et al. 2017 Nucl. Fusion 57 102017
- [2]. D.A. Shelukhin et al. 14-th IRW Workshop Lausanna, Switzerland, 20-22 May 2019
- [3]. E. Z. Gusakov, M. A. Irzak, A. Yu. Popov et al. Phys. Plasmas **24**, 022119 (2017)
- [4]. Гусаков Е.З., Круткин О.Л., Физика плазмы, 2017, т. 43, № 6, с. 503 – 512
- [5]. Kukushkin A.B., Sdvizhenskii P.A. J. Phys. A: Math. Theor., 2016, **49**, 255002
- [6]. Kukushkin A. B., Kulichenko A.A. Phys. Scripta, 2019, **94**, paper 115009
- [7]. Куличенко А.А., Кукушкин А.Б. ЖЭТФ, 2020, том **157**, вып. 6, с. 1036 – 1050
- [8]. M.F. Shlesinger, B.J. West, J. Klafter 1987 Phys. Rev. Lett. **58**, 11
- [9]. A.A. Kulichenko, A.B. Kukushkin, Proc. 46th EPS Conference on Plasma Phys., Milan, Italy, 2019, ECA vol. 43C, P2.4013
- [10]. Кузнецов ЖЭТФ 2001, том 120, вып. 5(11), с. 1213 – 1226

УНИВЕРСАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ФОРМЫ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ В ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЕ

^{1,2}Летунов А.Ю., ^{1,2}Лисица В.С., ¹Горбунов А.В., ¹Левашова М.Г.

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

²НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ISPAF.2021.48.1.169

Измерение температуры и плотности плазмы в диверторе ИТЭР, можно осуществить, используя анализ формы спектральной линии [1]. Задача вычисления профиля линии существенно осложнена тем, что для диагностики ионной компоненты необходимо работать с переходами между высоко возбуждёнными уровнями. С ростом главного квантового числа стремительно растёт число радиационных переходов. Представлен новый метод вычисления формы спектральных линий в замагниченной плазме. С помощью него стало возможным решить две серьёзные проблемы в теории уширения спектральных линий: 1) Описание массива радиационных переходов между возбуждёнными атомными уровнями 2) Учёт влияния теплового движения ионов на форму спектральной линии. Однако, используя квазиклассическое приближение [2] и аппроксимацию ионного движения скачками - frequency fluctuation model [3], можно решить эти две проблемы. Применяя симметрию Кулонвского поля для диагонализации гамильтониана [4], и специфические свойства d-функций, можно получить простые выражения для интенсивности компонент Штарка-Зеемана [5, 6]. Таким образом получено универсальное описание формы спектральных линий в плазме, которое учитывает движение ионов, присутствие магнитного поля, а также электронный и доплеровский механизмы уширения. Расчёты для серии Бальмера показали, что представленный метод находится в согласии с точными квантовыми вычислениями. Универсальность метода заключается в том, что полученные квадратурные формулы имеют одинаковый вид для сколь угодно больших главных квантовых чисел.

Литература

- [1]. Gorbunov A.V. , Mukhin E.E., Berik E.B., Vukolov K.Yu., Lisitsa V.S., Kukushkin A.S., Levashova M.G., Barnsley R. , Vayakis G., Walsh M.J. , Fusion Engineering and Design, Vol. 123, 2017, 695 – 698
- [2]. Gulyaev, S. A. *Soviet Astronomy* 20 (1976): 573
- [3]. Буреева, Л. А., Кадомцев, М. Б., Левашова, М. Г., Лисица, В. С., Калисти, А., Талин, Б., & Розми, Ф. *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики* 90.10 (2009): 718 – 721
- [4]. Demkov, Yu N., B. S. Monozon, and V. Ostrovsky. *Sov. Phys. JETP* 30 (1970): 775 – 776
- [5]. Летунов А.Ю., Лисица В.С. *ЖЭТФ*, 158,11(5) (2020): 800 – 811
- [6]. Letunov A., Lisitsa V. *Universe*. – 2020. – Т. 6. – №. 10. – С. 157

ТОМОГРАФИЧЕСКАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ТРЁХМЕРНОГО ПРОФИЛЯ СВЕТИМОСТИ БЕРИЛЛИЯ В ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЕ ИТЭР С УЧЁТОМ ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА ОТ ПЕРВОЙ СТЕНКИ

¹Неверов В.С., ²Ромазанов Ю., ³Питтс Р.А., ^{1,4}Хуснутдинов Р.И., ⁵Карр М.,
¹Алексеев А.Г., ¹Андреев Е.Н., ³Де Бок М., ²Бородин Д., ²Брезинсек С.,
¹Горшков А.В., ²Ексаева А., ²Киршнер А., ¹Козлов А.М., ^{1,4}Кукушкин А.Б.,
⁶Ловелл Дж., ⁵Микенс А., ¹Морозов А.А., ³Вещев Е.

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: khusnutdinov_ri@nrcki.ru,

²Forschungszentrum Jülich, Germany

³ITER Organization, France

⁴НИЯУ «МИФИ», Россия

⁵Luffy AI Ltd., Culham Science Centre, UK

⁶Oak Ridge National Laboratory, USA

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.170

Предложен метод томографической реконструкции трёхмерных профилей светимости спектральных линий бериллия в видимом диапазоне длине волн в ИТЭР с последующей оценкой плотности потока бериллия с первой стенки в плазму. При помощи трассировки лучей в методе учитывается наличие в регистрируемых сигналах паразитного света, создаваемого отражением света от металлической первой стенки. Метод состоит из двух этапов:

(1) восстановления трёхмерного профиля излучения бериллия в пристеночной плазме ИТЭР по изображениям, полученным с помощью фильтровых камер широкоугольного обзора и наборов хорд наблюдения; (2) оценки распределения плотности потока бериллия со всех бериллиевых компонент первой стенки путём интегрирования произведения реконструированного профиля светимости и коэффициента S/XB [1, 2] вдоль нормали к первой стенке. Как и в [3] для расчётов используются библиотеки для трассировки лучей Raysect [4] и моделирования спектроскопии плазмы Cherab [5]. Оценка точности метода выполнена на синтетических данных моделирования глобальной миграции бериллия в ИТЭР с помощью кода ERO 2.0 в различных ожидаемых режимах работы ИТЭР [6].

При известных с достаточной степенью точности характеристиках отражения света первой стенкой и при известных значениях электронной плотности и температуры в пристеночном слое метод позволяет восстанавливать интегральные по модулю бланкета потоки бериллия с ошибкой менее 30% для большинства модулей с наиболее сильной эрозией в данном режиме работы. Показано, что не учёт отражений в некоторых режимах приводит к двукратному завышению полного восстановленного потока бериллия со стенки в плазму по сравнению с его истинным значением.

Работа выполнена при финансовой поддержке Частного учреждения Госкорпорации «Росатом» «Проектный центр ИТЭР».

Литература

- [1]. K.H. Behringer, J. Nucl. Mater., 1987, 145–147, 145
- [2]. A. Pospieszczyk, et al., J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., 2010, 43, 144017
- [3]. V.S. Neverov, R.I. Khusnutdinov, et al, Plasma Phys. Control. Fusion, 2020, vol. 62, 115014, <https://doi.org/10.1088/1361-6587/abb53b>
- [4]. A. Meakins and M. Carr, “Raysect Python raytracing package,” version v0.6.1, Zenodo, (2020), <https://doi.org/10.5281/zenodo.3633959>
- [5]. C. Giroud et al., “CHERAB spectroscopy modelling framework,” Zenodo, version v1.2.0, (2019), <https://doi.org/10.5281/zenodo.3551871>
- [6]. J. Romazanov et al., Contrib. Plasma Phys., 2020, 60, e201900149, <https://doi.org/10.1002/ctpp.201900149>

ОБОБЩЕНИЕ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НА ДВУМЕРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО СКОРОСТЯМ АТОМОВ ПРИ РЕЦИКЛИНГЕ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В ТОКАМАКЕ

^{1,2}Хуснутдинов Р.И., ^{1,2}Кукушкин А.Б., ²Неверов В.С.

¹НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия, e-mail: khusnutdinov_ri@nrcki.ru,

²НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

DOI:10.34854/ICRAF.2021.48.1.171

Разработано обобщение баллистической модели (БМ) [1 – 3] для функции распределения по скоростям (ФРС) нейтральных атомов водорода, одномерной по скорости и их координате, на случай двумерного распределения по скорости. Такое обобщение необходимо для использования БМ при интерпретации наблюдений излучения плазмы токамака в спектральных линиях атомов изотопов водорода на хордах наблюдения, направленных под косым углом (не перпендикулярно) относительно первой стенки вакуумной камеры, и развития синтетической диагностики Н-альфа в ИТЭР.

БМ [1 – 3] была разработана как простая, вычислительно эффективная модель, позволяющая рассчитывать ФРС атомов и молекул изотопов водорода в пристеночной плазме токамака путем итеративного решения кинетического уравнения для ФРС атомов и упрощенного решения кинетического уравнения для ФРС молекул. БМ учитывает проникновение медленных нейтралов со стенки в плазму с учетом диссоциации молекул на атомы и ионизации атомов и молекул, перезарядку медленных нейтральных атомов на быстрых ионах плазмы, а также упругое и неупругое отражение атомов от стенки, отражение ионов от стенки с их нейтрализацией, поступление молекул со стенки. Используя в качестве входных данных профили плотности и температуры ионов и электронов в пристеночном слое плазмы и температуру стенки, БМ в приближении плоского слоя позволяет в пристеночном слое получить ФРС нейтральных молекул и атомов. БМ верифицирована в [1, 3] путем сравнения с результатами численного моделирования методом Монте-Карло кодом EIRENE [4] для условий периферийной плазмы в ИТЭР, смоделированных кодом SOLPS4.3 [5].

Использование БМ позволит заменить моделирование кодом EIRENE [4] в диагностике Н-альфа, что намного ускорит решение обратной задачи восстановления плотности потока атомов и молекул со стенки путем подгонки спектров высокого разрешения линий Бальмер-альфа в синтетической Н-альфа диагностике для ИТЭР [6] и интерпретации экспериментов, например, при усовершенствовании методики, использованной в [7] для ДЖЕТ. Однако БМ [1 – 3] применима только для хорд наблюдения, направленных ортогонально первой стенке. В БМ искомая двумерная по скорости ФРС предполагается симметричной по полярному углу зависит от проекций скорости на параллельное и перпендикулярное стенке направления.

Литература

- [1]. Kadomtsev M.B., Kotov V., Lisitsa V.S. and Shurygin V.A. 2012 Proc. 39th EPS Conf. 16th Int. Congress on Plasma Physics (Stockholm, Sweden, 2–6 July 2012) p P4.093
- [2]. Lisitsa V.S., Kadomtsev M.B., Kotov V., Neverov V.S. and Shurygin V.A. 2014 Atoms 2 195 – 206
- [3]. A.B. Kukushkin et al. “Ballistic Model of recycling of atomic and molecular hydrogen between tokamak’s first wall and plasma and its comparison with EIRENE code modelling” *Plasma Phys. Contr. Fusion* 2020 (отправлено в редакцию)
- [4]. D. Reiter, M. Baelmans, and P. Boerner, *Fusion Sci. Tech.*, 2005, 47, 172 – 186
- [5]. A.S. Kukushkin et al. 2011 *Fusion Eng. Des.* **86** 2865
- [6]. A.B. Kukushkin, V.S. Neverov, A.G. Alekseev, S.W. Lisgo, A.S. Kukushkin. *Fusion Sci. Tech.*, 2016, 69 (3), 628 – 642
- [7]. V.S. Neverov et al 2017 *Nucl. Fusion* 57 016031

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ ПАССИВНОЙ ПЕРЕЗАРЯДКИ ВОДОРОДОПОДОБНЫХ ИОНОВ БЕРИЛЛИЯ ДЛЯ АКТИВНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ В ТОКАМАКЕ ИТЭР

¹Сдвиженский П.А., ¹Левашова М.Г., ^{1,2}Кукушкин А.Б., ^{1,2}Лисица В.С., ¹Неверов В.С.,
³Ромазанов Ю.А., ⁴Серов С.В., ⁵Толстихина И.Ю., ⁴Тугаринов С.Н.

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

²НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия

³Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Energie und Klimaforschung—Plasmaphysik,
Partner of the Trilateral Euregio Cluster (TEC), Jülich, Germany

⁴ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

⁵Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.172

Активная спектроскопическая диагностика (в англоязычной литературе - charge-exchange recombination spectroscopy, CXRS) широко применяется на современных токамаках для измерения таких важных параметров плазмы как концентрация и распределение примесей, профили ионной температуры и скорость вращения плазмы. Диагностика CXRS Edge на установке ИТЭР будет располагаться в третьем экваториальном порту и будет проводить измерения для внешней части плазменного шнура — от точки входа в плазму до середины малого радиуса плазмы.

Пассивный сигнал в CXRS-диагностике формируется вследствие перезарядки ионов периферии плазмы токамака на нейтральных атомах водорода/дейтерия, поступающих со стенки камеры в результате рециклинга. Предсказательное моделирование пассивного сигнала остается актуальной проблемой, поскольку требует совместного решения ряда теоретических задач, для чего необходимо сложное численное моделирование.

В данной работе, в соответствии с ранее разработанным алгоритмом [1], для одного из расчетных сценариев работы дивертора в ИТЭР выполнены расчеты фонового излучения от пассивной перезарядки для одной из линий иона бериллия Be IV, используемой для диагностики CXRS Edge пристеночной плазмы. Рассчитан вклад перезарядки ионов бериллия Be V на нейтральных атомах дейтерия в основном и первом возбужденном состояниях. Используются сечения реакции перезарядки, рассчитанные численным кодом ARSENY [2] и другими кодами. Используются данные из базы данных моделирования пристеночной плазмы ИТЭР на основе численного кода SOLPS [3, 4]: расчеты кинетики рециклинга дейтерия кодом EIRENE [5] и эрозии бериллиевой первой стенки кодом ERO2.0 [6]. Расчеты эффективных коэффициентов эмиссии фотонов выполнены с помощью кода *nl-KINRYD* [7].

Работа выполнена при финансовой поддержке Частного учреждения Госкорпорации «Росатом» «Проектный центр ИТЭР».

Литература

- [1]. Sdvizhenskii P.A., Kukushkin A.B., Levashova M.G., et al. In: Proc. 46th EPS Conf. Plasma Phys. Milan, Italy, 2019, ECA, vol. 43C, P4.1006
- [2]. Solov'ev E.A. Workshop on Hidden Crossings in Ion-Collisions and in Other Nonadiabatic Transitions. Harvard Smithsonian Centre for Astrophysics, 1991
- [3]. Kukushkin A.S., Pacher H.D., Kotov V., et al., Fusion Eng. Des. 2011, **86**, 2865
- [4]. Lisgo S.W., Börner P., Kukushkin A., et al., J. Nucl. Mater. 2011, **415**, S965
- [5]. Reiter D., Baelmans M., Börner P. Fusion Sci. Technol. 2005, **47**, 172
- [6]. Romazanov J., Brezinsek S, Kirschner A, et al. Contrib. Plasma Phys., 2019, DOI: 10.1002/ctpp.201900149; <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ctpp.201900149>.
- [7]. Kadomtsev M.B., Levashova M.G., Lisitsa V.S., JETP 2008, **106**, 635 – 649

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ МНОГОКАНАЛЬНОЙ БОЛОМЕТРИИ НА ТОКАМАКЕ Т-11М.

Скопинцев Д.А., Хованский А.В.

АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ", г.Москва, г.Троицк, Россия.
e-mail: scopintsev.d.a@triniti.ru, hovansky@triniti.ru.

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.173

В работе описано применение К–метода [1 – 3] решения обратной задачи Радона [4] для обработки модельных данных многоканальной болометрии на установке Т-11М.

Метод позволяет обрабатывать данные на потоке с разрешением $N \times N$, где ($N = 13, 31, 41$). Количество пиксельных переменных внутри круговой области инспекции $E - N_{vp} = 17, 657, 1245$. При 2–х – ракурсной схеме сканирования количество детекторов $N_e = 2 \cdot 32 = 64$, что определяет количество уравнений.

Задача сводится к недоопределённой СЛАУ (системе линейных алгебраических уравнений) с матрицей Радона $Ra(N_e \times N_{vp})$ с зашумлённой правой частью (зашумлены показания N_e детекторов) и поэтому является некорректной и требует регуляризации.

Регуляризация достигается за счёт вейвлетной (локально–нелинейной) аппроксимации решения на компакте Липшица и вейвлетной симметризации, повышающей ранг при переходе от матрицы Радона к вейвлетной матрице. Применяется метод наименьших квадратов, что гарантирует единственность решения за счёт невырожденности вейвлетной матрицы (матрица Грама), построенной по почти ортогональному вейвлетному базису в пространстве $(C^2 \cap L_2 \cap O)(E)$.

Здесь:

C^2 – Банахово пространство дважды непрерывно дифференцируемых функций;

L_2 – Гильбертово пространство функций, интегрируемых с квадратом;

O – класс функций с эффективно ограниченным спектром Фурье;

E – круговая область инспекции.

При построении вейвлетного базиса учитывается априорная информация о магнитном поле токамака.

Коэффициент устойчивости C_s (отношение ошибки в решении к ошибке детекторов) в нормах C и L_2 составляет $C_s(C) = 2 - 3$, $C_s(L_2) = 1 - 2$ при Гауссовском фоне $SigGb = 5\%$ и Пуассоновском шуме $SigPn = 5\%$.

Алгоритм реализации проверялся на сценарии № 1 (броуновское блуждание центра круговой гауссианы со случайным изменением ширины и амплитуды в пределах области инспекции, $N_t = 1000$ вариантов по времени).

Литература

- [1]. Хованский А.В., Скопинцев Д.А., Стародубцева Л.Н., Применение метода подбора и К–метода для решения задач нейтронной томографии ИТЭР. ГНЦ, РФ, ТРИНИТИ, Отделение физики токамаков–реакторов. Теоретические и экспериментальные исследования, выполненные в 2007 году. Троицк, 2008, с. 20 – 28
- [2]. Хованский А.В., Быстрый вариант К–метода с универсальной настраиваемой схемой сканирования для задач малоракурсной томографии на токамаках. М., Мат. Моделирование, 2012, Т 25, № 6, с. 65 – 80
- [3]. A.V. Khovanskiy, A Fast Variant of the K–Method with the Universal Adjustable Scheme of Scanning for Few View of Sight Computed Tomography on Tokamaks. *Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research (TRINITI), Troitsk, Russia*, Received April 23, 2012. ISSN 2070_0482, *Mathematical Models and Computer Simulations, 2014, Vol. 6, No. 1, p. 80 – 91*
- [4]. Наттерер Ф., Математические аспекты компьютерной томографии. М., Мир, 1990

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИАГНОСТИКИ «АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ИТЭР» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ТРАССИРОВКИ ЛУЧЕЙ

¹Шабашов А.Ю., ²De Bock M., ¹Серов С.В., ¹Тугаринов С.Н.

¹ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

²ITER Organization, Cadarache, France

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.174

Был разработан код “cxrs” для моделирования спектров излучения плазмы, регистрируемых диагностикой «Активная спектроскопия ИТЭР» [1, 2]. Она основана на регистрации и анализе излучения, возникающего в результате перезарядки ядер лёгких примесей плазмы на нейтральных атомах диагностического пучка. Диагностика позволяет определить концентрацию и температуру ядер лёгких примесей, а также скорость движения плазмы как целого. Для разработки был выбран язык программирования Python. Использовались библиотеки Raysect [3] для реализации алгоритма трассировки лучей и CHERAB [4] для создания моделей плазмы, диагностического пучка нейтральных атомов и соответствующего излучения. Разработанный код позволяет учесть особенности геометрии стенки реактора ИТЭР и оценить вклад отражённого света в полученные спектры излучения плазмы.

Проведено моделирование плазмы со следующими параметрами в центре: плотность электронов $n_e = 10^{20} \text{ м}^{-3}$; плотности лёгких примесей (Be и Ne) $n_{\text{Be}} = n_{\text{Ne}} = 0,005 n_e$; электронная температура $T_e = 16 \text{ КэВ}$; ионная температура $T_i = 14 \text{ КэВ}$ [5]. Также моделировался водородный диагностический пучок с мощностью 2 МВт и энергией 100 КэВ.

Результаты моделирования сравнивались со спектрами, полученными при помощи используемого долгое время кода SOS [6]. Сравнение яркости тормозного излучения показало разницу до 10%, что может быть объяснено различиями в задании геометрии плазмы для двух кодов. Различие в яркости излучения активной перезарядки составило до 22%. Было определено, что разница вызвана использованием различных атомных данных для моделирования излучения.

Для исследования влияния отражённого света были получены спектры излучения с отражающей стенкой и без. Замечено, что для различных типов излучения вклад отражённого света разный. Для тормозного излучения он гораздо больше, чем для излучения активной перезарядки и зависит от хорды наблюдения.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом н.4а.241.19.20.1042 от 21.04.20.

Литература

- [1]. С. Н. Тугаринов и др. Разработка концепции активной спектроскопической диагностики с использованием диагностического пучка атомов, применительно к установке ИТЭР // Физика плазмы. 2004. т. 30, с. 147 – 154
- [2]. С. В. Серов, С. Н. Тугаринов, М. Von Hellermann. Моделирование спектров излучения плазмы ИТЭР с использованием кода ADAS для диагностики активной спектроскопии // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2018. т. 41, № 2. с. 89 – 94
- [3]. Dr Alex Meakins, & Matthew Carr. (2018, August 7). raysect/source: v0.5.2 Release (Version v0.5.2). Zenodo. <http://doi.org/10.5281/zenodo.1341376>
- [4]. Dr Carine Giroud, Dr Alex Meakins, Dr Matthew Carr, Dr Alfonso Baciero, & Mr Corentin Bertrand. (2018, March 23). CHERAB Spectroscopy Modelling Framework (Version v0.1.0). Zenodo. <http://doi.org/10.5281/zenodo.1206142>
- [5]. L. Garzotti et al 2019 Nucl. Fusion 59 026006
- [6]. M. von Hellermann et al. Simulation of Spectra Code (SOS) for ITER Active Beam Spectroscopy. В: Atoms 7.1, 2019. doi: 10.3390/atoms7010030

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ С МАТЕРИАЛАМИ НА ОСНОВЕ ВЧ-ИСТОЧНИКА ГЕЛИКОННОГО ТИПА

Черкез Д.И., Степанов Н.О., Ананьев С.С., Спицын А.В.

НИИ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: Cherkez_DI@nrcki.ru

DOI: 10.34854/ISPAF.2021.48.1.175

Источники низкотемпературной плазмы в настоящее время широко применяются в самых разнообразных областях науки и техники и промышленности: бытовое применение в качестве источников света; производство микроэлектроники; плазменная обработка материалов; научные исследования, посвященные различным аспектам взаимодействия плазмы с материалами, в т.ч. перспективными для применения в термоядерном реакторе. Плазменные источники основываются на различных методах ионизации газа: ионизация молекул в тлеющем газовом разряде, ионизация газа электронным ударом, возбуждение высокочастотными (ВЧ) и сверхвысокочастотными (СВЧ) источниками тока и т.д. Для проведения прикладных исследований в области взаимодействия плазмы с поверхностью применительно к задачам термоядерных установок наиболее интересны высокопоточные плазменные генераторы, имитирующие плазменные потоки существующих и строящихся термоядерных реакторов.

К перспективному типу компактных плазменных источников для исследования взаимодействия плазмы с материалами можно отнести ВЧ-источники плазмы, в частности с индукционным разрядом геликонного типа [1 – 2]. Достоинством подобных плазменных источников является возможность варьировать плотность плазмы (и, соответственно, потоки плазмы) в широких пределах, а также отсутствие эродирующих в ходе горения разрядов электродов, что существенно влияет на чистоту плазмы. В тоже время, установки такого типа, позволяют достигать плотности плазмы порядка $10^{17} - 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и отличаются компактностью [3].

В работе представлены результаты проектирования лабораторной экспериментальной установки ГПИ-2 на основе 13,56 МГц геликонного источника плазмы мощностью 2 кВт, а также рассмотрены перспективы дальнейшей модернизации. В частности, рассмотрена возможность применения нескольких магнитных катушек (до 0,3 Тл) для создания магнитной фокусировки и поджатия потока плазмы. В качестве рабочего газа будут использоваться изотопы водорода (протий, дейтерий) с возможностью добавления гелия, неона или аргона. Установка предназначена для изучения взаимодействия плазмы с перспективными материалами термоядерных реакторов. Используемые при проектировании технические решения позволят получить плотность потока ионов дейтерия в камере взаимодействия в диапазоне $10^{20} - 10^{22}$ ионов/(с·м²) (до 100 А/м²).

Эта работа была частично поддержана Российским научным фондом (№ 18-72-10162).

Литература

- [1]. A.A. Ivanov, V.I. Davydenko, I.A. Kotelnikov, A.Kreter, V.V. Mishagin, I.A. Prokhorov, I.V. Shikhovtsev, B. Unterberg, «High Efficiency Helicon Plasma Source for PMI Studies» // Fusion Science and Technology / Volume 63 / Number 1T / May 2013 / Pages 217-220
- [2]. Кралькина Е.А. Индуктивный высокочастотный разряд низкого давления и возможности оптимизации источников плазмы на его основе — УФН, 2008, том 178, номер 5, 519–540, DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.0178.200805f.0519>
- [3]. Shinohara S. Helicon high-density plasma sources: physics and applications — Advances in Physics, X, 3:1, 1420424, DOI: 10.1080/23746149.2017.1420424

ВЛИЯНИЕ КОНВЕРСИИ МОД ПРИ ОТРАЖЕНИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ СТенок НА МНОГОПРОХОДНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ ВНЕШНЕГО ЭЦ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗРЯДА В ИТЭР

¹Минашин П.В., ^{1,2}Хайрутдинов Р.Р., ^{1,3}Кукушкин А.Б., ¹Лукаш В.Э.

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, Minashin_PV@nrcki.ru

²АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Троицк, г. Москва, Россия

³НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.176

Из-за технологических особенностей токамака-реактора ИТЭР омический пробой рабочего газа будет возможен для узкого диапазона значений давления нейтрального газа и ограниченного содержания примесей [1]. Поэтому на начальной стадии разряда в ИТЭР для ионизации рабочего газа, преодоления радиационного барьера и увеличения тока плазмы предусмотрено использование электронно-циклотронного (ЭЦ) резонансного нагрева [2, 3].

Для моделирования начальной стадии разряда в ИТЭР были разработаны 0D модели [1, 4 – 6], по-разному описывающие две главные компоненты задачи: поведение примесей, увеличивающих радиационных барьер, и поглощение инжектируемого ЭЦ-излучения, необходимое для надежного создания плазмы. В ИТЭР планируется система ЭЦ-нагрева с инъекцией обыкновенной волны со стороны слабого магнитного поля [7]. Из-за низких значений электронной температуры и плотности на начальной стадии разряда поглощение мощности обыкновенной волны на одном проходе будет мало. Необходимая для преодоления радиационного барьера мощность поглощается за счет многократного отражения ЭЦ-волн от стенки вакуумной камеры и конверсии мод при отражении волн от стенки камеры. Для моделирования этого эффекта предложена модель многопроходного поглощения ЭЦ-излучения на начальной стадии разряда в ИТЭР [8], а для учета поглощения на нескольких проходах ЭЦ-волны используют лучевые коды (например, код GRAY в [4]).

В настоящей работе в рамках подхода [8] анализируется влияние конверсии мод при отражении излучения от стенок на многопроходное поглощение внешнего ЭЦ-излучения на начальной стадии разряда в ИТЭР. Показано, что интенсивность излучения в камере, поглощаемого в случае многопроходности, существенно зависит от параметров конверсии мод при отражении от стенки.

Литература

- [1]. Lloyd B., Carolan P.G., Warrick C.D., *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 1996, 38, 1627 – 1643
- [2]. ITER Physics Expert Group on Energetic Particles, Heating and Current Drive, ITER Physics Basis Editors, *Nuclear Fusion*, 1999, 39, 2495
- [3]. Stober J., Jackson G.L., Ascasibar E., Bae Y.S., et al., *Nuclear Fusion*, 2011, 51, 083031
- [4]. Granucci G., Garavaglia S., Ricci D., Artaserse G., et al., *Nuclear Fusion*, 2015, 55, 093025.
- [5]. Kim H.-T., Fundamenski W., Sips A.C.C., *Nuclear Fusion*, 2012, 52, 103016
- [6]. Ricci D., Farina D., Figini L., Granucci G., et al., Proc. 43rd EPS Conference on Plasma Physics, Leuven, Belgium, 2016, O5.130
- [7]. Omori T., Henderson M.A., Albajar F., Alberti S., et al., *Fusion Engineering and Design*, 2011, 86, 951-954
- [8]. Минашин П.В., Кукушкин А.Б., Хайрутдинов Р.Р., Лукаш В.Э., *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез*, 2013, 36, 76 – 84

РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ МАКЕТА РЕФРАКТОМЕТРА НА T-11 M^{2,3}Афонин А.Ю., ¹Петров В.Г.¹АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Троицк, г. Москва, Россия,e-mail: aleksandr.afonin@phystech.edu DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.177²ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия³Московский физико-технический институт (НИУ), г. Долгопрудный, Россия

Рефрактометрия основана на измерениях времени задержки микроволнового сигнала, прошедшего через плазму [1, 2]. В отличие от рефлектометрии, рефрактометрия позволяет получать среднюю плотность плазмы из интегральных измерений времени задержки. На ИТЭР предполагается канал рефрактометрии, предназначенный для дополнения основного канала рефлектометра со стороны сильного магнитного поля в части измерения усредненной по хорде плотности плазмы. В данной работе рассматриваются особенности применения макета рефрактометра в условиях токамака T-11M. Зондирование на токамаке T-11 M проводилось на частоте, близкой к рабочей области частот рефрактометра в ИТЭР. Однако, в отличие от проекта ИТЭР [3], зондирование проводилось по вертикальным хордам. Кроме того, в макете используется дифференциальная схема измерения времени задержки, в то время как на ИТЭР предполагается применить АМ-модуляцию. В работе описана схема макета дифференциального рефрактометра (ДР) на основе двух микроволновых генераторов с частотами зондирования 94,1 и 95 ГГц, определены калибровочные характеристики для рефрактометра и Коттон-Мутон поляриметра (КМП), проведены измерения плотности с помощью ДР в двух конфигурациях: зондирование обыкновенной волной по вертикальной хорде зондирования –5 см, при этом КМП зондировал плазму по вертикальной хорде –1 см; и зондирование необыкновенной волной по вертикальной хорде +7 см, при этом КМП зондировал плазму по вертикальным хордам –1 и –13 см. Проведено сравнение данных ДР с данными КМП. Средняя плотность, измеренная с помощью рефрактометра на обыкновенной волне по вертикальной хорде –5 см, оказалась довольно близкой к значениям плотности, измеренным по центральной хорде –1 см с помощью Коттон-Мутон поляриметра, что указывает на то, что в данных режимах работы установки профили плотности были плоскими, что подтвердилось по результатам, полученным в ходе последующих экспериментов с зондированием плазмы по трем хордам –1 см, –13 см (КМП) и +7 см (рефрактометр на необыкновенной волне). Также проведено восстановление профилей плотности в предположении монотонности профиля электронной концентрации. При обработке данных КМП и рефрактометра учитывались как влияние рефракции, так и возможное смещение шнура в горизонтальном направлении. Поскольку в данном диапазоне частот наблюдается нелинейная зависимость между интегралом $\langle n_l \rangle$ и измеренным временем задержки (набегом фазы на разностной частоте), при определении $\langle n_l \rangle$ и восстановлении профиля электронной плотности применен рекуррентный метод.

По результатам проведенных экспериментов, в плазме была обнаружена область относительно низкой электронной плотности, которая перемещается в токамаке в радиальном направлении от центра к периферии со скоростью примерно 2.5 – 3 м/с. Эти данные согласуются с данными 32-канального болометра. Также был проведен Фурье-анализ сигналов ДР, который показал, что спектры рефрактометра схожи с аналогичными спектрами рефлектометра, полученными ранее на установке T-11M.

Литература

- [1]. А.А. Петров, В.Г. Петров, А.Ю. Малышев и др. Физика Плазмы, № 10, том 28, 2002 г. С. 877 – 885
- [2]. Petrov A.A., Petrov V.G. Rev. Sci. Instrum. 74, 2003. P.1465 – 1469
- [3]. DA version of the Design Description Document (DDD) 55.F9.40 Refractometry for CDR. ITER_D_UVA3E4_v1_2

РАДИАЦИОННЫЕ ПОТЕРИ БЫСТРЫХ ТЯЖЕЛЫХ ЧАСТИЦ В ТЕРМОЯДЕРНОЙ ПЛАЗМЕ

Демура А.В., Леонтьев Д.С., Лисица В.С., Шурыгин В.А.

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия,

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.178

В данной работе были рассчитаны радиационные потери альфа-частиц и электронов на тяжелых примесных ионах вольфрама в термоядерной плазме. Радиационные потери плазмы на тяжелых ионах примеси, вызванные возбуждением электронами, важны для определения эффективности работы термоядерного реактора. Основную роль играет возбуждение электронами примесных ионов, которое сопровождается их высвечиванием. От этого зависит энергетический баланс плазмы, так как радиационные потери энергии электронами могут привести к гашению термоядерной реакции при критической (летальной) концентрации примесей. Новый канал радиационных потерь связан с возбуждением ионов примеси быстрыми тяжелыми частицами, и его необходимо сравнить с величиной аналогичных потерь электронов. Важным параметром, необходимым для мониторинга плазмы, является соотношение между радиационными потерями альфа-частиц и электронов.

Так как электронная структура многозарядного иона довольно сложна, то квантовомеханические расчеты представляют сложную задачу, и поэтому необходимо развитие методов, позволяющих их облегчить. Одним из таких методов является статистическое приближение, которое применимо в данном случае, так как в ионе сохраняется большое число связанных электронов. Согласно этому подходу, удельные (на одну частицу и один ион примеси) радиационные потери q выражаются через статистические сечения фотовозбуждения $\sigma_{ph}(\omega)$ и поток эквивалентных фотонов, создаваемого налетающей заряженной частицей, которая движется в поле многоэлектронного иона по классической траектории. Интенсивность данного потока определяется квадратом фурье-разложения электрического поля рассматриваемой налетающей частицы, действующей на связанные электроны иона [1]. Эти сечения фотовозбуждения следует умножить на энергию фотона, скорость налетающей частицы и проинтегрировать по всем поглощаемым частотам. В статистическом подходе рассматриваются коллективные возбуждения электронных оболочек с частотами $\omega(r)$, зависящими от расстояния от ядра. Было предложено две модели такой зависимости: модель локальной плазменной частоты (ЛПЧ) [2, 3] и модель, основанная на принципах крамерсовской электродинамики (модель Роста) [4], селективная по орбитальному моменту остова. Результаты расчетов статистических моделей сравнивались с результатами, выполненными в Кулон-Борновском приближении [5]. Для расчета радиационных потерь следует взять приведенные в [5] скоростные коэффициенты возбуждения и проинтегрировать (просуммировать) их по всем возбуждаемым частотам.

Сравнение результатов расчетов по статистическим и Кулон-Борновскому приближениям показало, что все модели дают близкие друг к другу результаты, при этом при росте температуры наблюдается возрастание отношения потерь. При этом, данное отношение составляет до 1-5%, что гораздо ниже первоначальных грубых оценок в 20%, выполненных при помощи общего сечения для неупругих переходов.

Литература

- [1]. Fermi E. Zeitschrift für Phys. 1924. Vol. 29, № 1. P. 315 – 327
- [2]. Demura A. V. et al. JETP Lett. 2015. Vol. 101, № 2. P. 90 – 93
- [3]. Demura A. V. et al. Atoms. 2015. Vol. 3, № 2. P. 162 – 181
- [4]. Kogan V.I., Kukushkin A.B., Lisitsa V.S. Phys. Rep. 1992. Vol. 213, № 1 – 2. P. 1 – 116
- [5]. Skobelev I.Y., Vinogradov A. V. C J. Phys. B At. Mol. Phys. 1978. Vol. 11, № 16. P. 2899 – 2905

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ D-D НЕЙТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ЦЕЛЕЙ КАЛИБРОВКИ НЕЙТРОННЫХ ДИАГНОСТИК ИТЭР

^{1,2}Кормилицын Т.М., ¹Родионов Р.Н., ^{1,2}Панкратенко А.В., ¹Обудовский С.Ю.,
^{1,2}Кашук Ю.А.

¹ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия,
e-mail: T.Kormilitsyn@iterrf.ru

²Московский физико-технический институт (НИУ), г. Долгопрудный, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.179

В работе представлены результаты исследования поля излучения D-D нейтронного генератора с точки зрения использования данного типа нейтронных генераторов в рамках программы внутрикамерной *in situ* калибровки нейтронных диагностик токамака-реактора ИТЭР. Рассмотрена анизотропия выхода D-D нейтронного генератора на примере ИНГ-07Д. Проведен анализ распределения нейтронов по энергии и по интенсивности для разных направлений вылета быстрых нейтронов.

Проведено моделирование отклика детектора на основе сцинтилляционного кристалла $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ с помощью ПО GEANT4 [1] на модельный источник D-D нейтронов, соответствующий нейтронному генератору. Представлен сравнительный анализ модельных и экспериментально измеренных амплитудных спектров детектора $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ [2]. Метод цифрового разделения импульсов частиц по форме позволил провести детальный анализ селективного отклика детектора на быстрые нейтроны [3].

Анализ экспериментально полученного отклика детектора позволил сделать выводы о составе пучка вакуумной трубки нейтронного генератора ИНГ-07Д. Обнаруженные особенности распределения быстрых D-D нейтронов по энергиям на выходе из мишени нейтронного генератора необходимо учитывать при использовании данного типа генераторов для целей калибровки нейтронных диагностик ИТЭР.

На основании результатов работы построена диаграмма направленности, сделаны выводы о ключевых характеристиках поля излучения нейтронного генератора подлежащих контролю при проведении калибровки. В работе дополнительно исследован вопрос долговременной стабильности выхода нейтронного генератора.

Рассмотренный тип нейтронных D-D генераторов показан как оптимальный для целей калибровки нейтронных диагностик ИТЭР. Сцинтилляционный детектор на основе $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ рекомендован к применению как в качестве монитора выхода для подобных генераторов, так и для анализа распределения вылетающих D-D нейтронов по энергии и интенсивности.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 21.04.2020 № Н.4а.241.19.20.1042 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2020 году».

Литература

- [1]. J. Allison et al., “Recent developments in GEANT4”, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip., vol. 835, pp. 186 – 225, Nov. 2016
- [2]. Т.М. Кормилицын и др., “О регистрации быстрых нейтронов сцинтилляционным детектором $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ ”, Журнал Письма в ЭЧАЯ, 2021, Т.18, №1(233), С. 86 – 97
- [3]. Панкратенко А.В. и др. «Анализ характеристик кристалла LaCl_3 для целей нейтронной диагностики дейтериевой плазмы», XLVIII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 15 – 19 марта 2021 г

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЕФРАКЦИИ НА ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В РЕФРАКТОМЕТРИИ

^{1,2}Петров В.Г., ^{1,2,3}Афонин А.Ю., ^{1,2,3}Афонин К.Ю.

¹АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Троицк, г. Москва, Россия, e-mail: vpetrov@triniti.ru

²ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

³Московский физико-технический институт (НИУ), г. Долгопрудный, Россия

DOI: 10.34854/ISPAF.2021.48.1.180

В рефрактометрии интеграл плотности плазмы по хорде зондирования $\langle n_l \rangle$ определяется из измерений времени задержки [1, 2]. При этом, в отличие от классической интерферометрии, во многих случаях линейная зависимость между $\langle n_l \rangle$ и временем задержки не наблюдается. Это связано с тем, что, во-первых, на небольших установках (Т-11 М), для увеличения времени задержки зондирование проводится на низких частотах, что влечет за собой нелинейную зависимость между $\langle n_l \rangle$ и временем задержки. Во-вторых, на крупных установках с достаточно сильным магнитным полем, например на установках ИТЭР, Игнитор и т.п., зондирование плазмы будет возможно в достаточно узком окне прозрачности (для Х-волны), заключенном между нижней частотой отсечки и частотой электронного циклотронного резонанса. На токамаке ИТЭР – это 40 – 90 ГГц, а на токамаке типа Игнитор – частоты 80 – 270 ГГц, в зависимости от режима работы установки и геометрии зондирования. В условиях, когда зондирующие частоты близки к частотам отсечки, должна наблюдаться достаточно сильная рефракция луча в плазме, которая зависит как от параметров установки, так и от параметров рефрактометрии: геометрии зондирования, используемых частот, параметров антенно-передающей системы, и т.п.

В данной работе проводится анализ влияния рефракции в рефрактометрии плазмы в токамаках Т-11 М, ИТЭР и Игнитор. В докладе рассмотрены различные аспекты влияния рефракции на измерения: во-первых, это изменение траектории зондирующего луча в плазме, во-вторых, распределение электронной плотности вдоль траектории луча тоже претерпевает изменения, в-третьих, из-за отклонения луча в плазме мощность сигнала в приемной антенне, также изменяется. При этом, если в случае экваториального зондирования рефракцией можно пренебречь из-за ее малости (при зондировании перпендикулярно линиям равной плотности и отсутствии смещения плазменного шнура по вертикали), то при зондировании по вертикали необходимо учитывать следующее. Во-первых, возможно изменение положения плазменного шнура по горизонтали, во-вторых, в современных токамаках градиент электронной плотности в горизонтальном направлении обычно выше, чем в вертикальном (из-за вытянутости плазменного шнура по вертикали), в-третьих, в некоторых случаях зондирование плазмы производится не по центру плазменного шнура (эксперименты на токамаке Т-11 М). Известно, что рассчитанные на настоящий момент сценарии разрядов в ИТЭР предполагают смещение плазменного шнура по вертикали в пределах от -0.2 до $+0.7$ м, т.е. в условиях ИТЭР даже при зондировании вдоль экватора, эти эффекты необходимо принимать во внимание. При проведении анализа применялись как известные программные пакеты для анализа распространения лучей (Zemax и т.п.), так и способы, предложенные ранее в работах [3, 4].

Литература

- [1]. А. А. Петров, В. Г. Петров, А. Ю. Малышев и др. Физика Плазмы, № 10, том 28, 2002 г. С. 877 – 885
- [2]. Petrov A. A., Petrov V. G. Rev. Sci. Instrum. 74, 2003. P.1465 – 1469
- [3]. D. Veron. Infrared and Millimeter Waves. V. 2. Ed. By K. J. Button
- [4]. В. Г. Петров. Физика плазмы, т. 32, №4, 2006. – С. 340 – 345

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК КРИСТАЛЛА LaCl_3 ДЛЯ ЦЕЛЕЙ НЕЙТРОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЕЙТЕРИЕВОЙ ПЛАЗМЫ

^{1,2}Панкратенко А.В., ^{1,2}Кормилицын Т.М., ¹Обудовский С.Ю., ¹Джурик А.С.,
^{1,2}Кашук Ю.А

¹ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия,
e-mail: a.pankratenko@iterrf.ru

²Московский физико-технический институт (НИУ), г. Долгопрудный, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.181

В статье [1] предложен новый метод регистрации DD нейтронов с помощью сцинтилляционного детектора $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$. Детектирование быстрых нейтронов основано на регистрации протонов из реакции $^{35}\text{Cl}(n, p)^{35}\text{S}$. В данной работе представлен цифровой метод разделения частиц по форме импульса для сцинтилляционного детектора $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$. Такое разделение позволяет разделить импульсы, вызванные γ -частицами, нейтронами и α -частицами и тем самым проводить достоверные измерения распределения быстрых нейтронов по энергии.

В ходе работы с сцинтилляционным детектором на основе $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ получены следующие результаты: измерен собственный фон кристалла, измерен отклик кристалла при регистрации DD нейтронов, создаваемых генератором ИНГ-07Д, на основании измеренных откликов подобраны оптимальные параметры разделения, получены разделенные амплитудные спектры при регистрации α -, γ - и нейтронного излучения. Для нескольких различных энергий α -частиц собственного фона и нескольких различных энергий нейтронов, полученных при расположении детектора под различными углами к оси DD-нейтронного генератора, определены величины α/β и p/β , характеризующие световыход кристалла $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$.

Полученные экспериментальные результаты позволяют говорить о перспективности использования детектора LaCl_3 в целях спектрометрии быстрых DD-нейтронов с использованием цифрового метода разделения сигналов по форме импульса. Показана возможность калибровки детектора на основе $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ с использованием собственного фона кристалла [2].

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 21.04.2020 № Н.4а.241.19.20.1042 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2020 году».

Литература

- [1]. Т.М. Кормилицын и др., “О регистрации быстрых нейтронов сцинтилляционным детектором $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ ”, Журнал Письма в ЭЧАЯ, 2021, Т. 18, №1 (233), С. 86 – 97
- [2]. Hartwell, J. K., & Gehrke, R. J. (2005). Observations on the background spectra of four $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ scintillation detectors. *Applied Radiation and Isotopes*, 63(2), 223 – 228. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2005.02.009>

НЕЙТРОННЫЙ АНАЛИЗ КОМПОНЕНТОВ ДИАГНОСТИКИ ИТЭР ВЕРТИКАЛЬНАЯ НЕЙТРОННАЯ КАМЕРА

Кумпилов Д.А., Родионов Р.Н., Кофанова Е.Д., Немцев Г.Е.

*ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия,
e-mail: d.kumpilov@iterrf.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.182

Вертикальная Нейтронная Камера ИТЭР (ВНК) – нейтронная диагностическая система, предназначенная для измерения профиля нейтронного источника в полоидальном сечении плазмы [1]. ВНК состоит из двух подсистем – Верхней ВНК, расположенной в верхнем диагностическом порту №18, и Нижней ВНК, расположенной в нижнем диагностическом порту № 14. Верхняя ВНК содержит 6 коллиматоров, нижняя – 5. В конце каждого коллиматора расположен блок детектирования, включающий по две камеры деления с радиатором из ^{238}U и два алмазных детектора разных чувствительностей.

В работе представлены результаты нейтронного анализа внутривакуумных компонентов нижней ВНК и результаты расчёта ослабления нейтронного и гамма-излучения в конструкции защитного шкафа для электроники, расположенной в порт-камере.

Для режима работы ИТЭР с термоядерной мощностью 500МВт получены пространственное распределение энергетического спектра нейтронов, отношения сигнал/фон в детекторах ВНК, распределение мощности радиационного нагрева. Распределение энергетического спектра нейтронов было использовано для анализа активации конструкций ВНК с помощью кода FISPACT-II [2].

В результате расчётов активации получен объёмный источник гамма-излучения и временная динамика его изменения после остановки токамака. Проведены расчёты транспорта гамма-излучения и получено пространственное распределение мощности эквивалентной дозы гамма-излучения вокруг внутривакуумных компонентов нижней ВНК после извлечения из токамака. Данные по активации материалов конструкции будут использованы в разработке процедуры утилизации ВНК по завершению ее работы.

При моделировании радиационной защиты использовался изотропный объёмный источник, распределённый в пространстве вокруг защитного шкафа и плоскопараллельный источник для оценки максимального необходимого ослабления. Энергетический спектр нейтронов взят из расчётов [3]. Для расчета ослабления гамма-излучения моделировался гамма источник, вызываемый распадом изотопов ^{60}Co и ^{16}N , образованных в результате активации стали и воды соответственно.

Работа выполнена в рамках государственного контракта №Н.4а.241.19.20.1042 от 21 апреля 2020 г.: «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2020 году».

Литература

- [1]. XLV Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, Статус разработки диагностической системы вертикальная нейтронная камера ИТЭР, Немцев Г.Е. и др.
- [2]. M. Flemming, et al, The FISPACT-II User Manual, UKAEA-R(18)001 Issue January 2018
- [3]. ITER Reference Radiation Data (P47ZAY)

ПРОТОТИП ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЫ ПО УПРАВЛЕНИЮ ЗНАНИЯМИ В ОБЛАСТИ УТС НА ОСНОВЕ ПРОЕКТА ИТЭР

¹Семенов Е.В., ¹Портоне С.С., ¹Семенов И.Б., ¹Семенов О.И., ²Кирилин А.Е.,
²Соловьева Л.А., ²Куркина И.В.

¹*ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия*

²*Частное учреждение по цифровизации атомной отрасли «Цифрум»,
e-mail: IViKurkina@rosatom.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.183

Проект термоядерного реактора ИТЭР является одним из самых сложных и перспективных примеров реализации международных усилий в области управляемого термоядерного синтеза и включает в себя передовые разработки в различных научных областях, объединенных общей тематикой термоядерных исследований. Авторы работы на базе разрабатываемой Цифровой платформы по управлению знаниями реализуют прототип базы знаний на основе проекта ИТЭР. Для создания структуры и агрегации данных о проекте были проанализированы различные технологические разбиения установки ИТЭР на подсистемы, а также содержание и структура различных баз данных международного проекта ИТЭР. Для формирования функционально-технических требований и концепции реализации базы знаний в области УТС на базе проекта ИТЭР были проанализированы Единые отраслевые рекомендации и указания Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» по сохранению критически важных знаний в атомной отрасли, методология и подходы международной организации ИТЭР в отношении методов сбора, хранения и управления проектными знаниями.

В работе представлен прототип Цифровой платформы в применении к проекту ИТЭР с учетом технологических разбиений экспериментальной установки, компонентов систем, поставляемых РФ в рамках своих обязательств, специфики проектной документации международного проекта. Подготовлены функционально-технические требования к Цифровой платформе по управлению знаниями с учетом специфики проекта ИТЭР. Прототип системы позволяет реализовать базу знаний на основе технологических и диагностических подсистем установки ИТЭР, поставляемых РФ, обрабатывать сложные поисковые запросы по базе знаний с учетом специфики проекта ИТЭР, формировать матрицу компетенций и экспертное сообщество в области УТС. На следующих этапах реализации платформы предлагаемый модульный подход позволит с помощью программного интерфейса приложения расширить и интегрировать контент с другими базами знаний, например, публикационной активностью научных коллективов по тематике УТС.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 21.04.2020 № Н.4а.241.19.20.1042 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2020 году».

РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И СБОРА ДАННЫХ ДИАГНОСТИКИ ИТЭР ВЕРТИКАЛЬНАЯ НЕЙТРОННАЯ КАМЕРА

Нагорный Н.В., Малютин А.Ю., Немцев Г.Е., Портоне С.С., Миронова Е.Ю.,
Миронов А.Ю., Звонарева А.А., Журавлев М.К.

ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.184

Вертикальная нейтронная камера (ВНК) – диагностическая система токамака ИТЭР, построенная на основе многоканальных нейтронных коллиматоров и предназначенная для измерения профиля нейтронного источника и профиля термоядерной мощности в реальном времени. Всего в ВНК установлено 12 блоков детектирования, и каждый блок детектирования содержит два алмазных детектора и две ионизационные камеры деления. В данной работе приведена архитектура системы управления и сбора данных ВНК.

Импульсные сигналы от детекторов ВНК поступают на блок предусилителей (в предлагаемой архитектуре каждый модуль предусилителя получает сигналы от 4-х детекторов – один модуль предусилителя на один блок детектирования). Все модули предусилителей имеют функцию приема внешнего тестового сигнала для задач калибровки и тестирования. Модули предусилителей расположены в условиях повышенной радиации, поэтому они не содержат устройств управляющей электроники. Функции по управлению предусилителями, обеспечение их электропитанием и подача напряжения смещения на детекторы объединены в модулях управления предусилителями на основе медленных контроллеров. Модули управления предусилителями располагаются в диагностической галерее – зоне менее интенсивных потоков гамма и нейтронного излучения – и, в свою очередь, получают команды от быстрых контроллеров (связка промышленного ПК и шасси NI PXI с необходимым периферийным оборудованием). Также быстрые контроллеры используются для передачи тестового сигнала нужной частоты и формы и обеспечения гибкости управления.

Для уменьшения уровня электромагнитных помех передача информации от предусилителей на быстрые контроллеры, а также передача тестовых сигналов от контроллеров на модули предусилителей осуществляется по оптическим линиям через устройства оптических приемопередатчиков.

Регистрация сигналов с блоков детектирования осуществляется с помощью АЦП под управлением FPGA. При выборе модулей АЦП учитывались требования к оцифровке сигналов, наличие оборудования в каталоге ИТЭР, сложность интеграции и разработки программного обеспечения для этих модулей. Импульсы на входе АЦП имеют длительность порядка 15 нс. Для оцифровки импульсов с необходимой точностью используется 12-битный АЦП с частотой дискретизации не менее 500 МГц. При такой конфигурации между одним шасси PXI и одним промышленным ПК будет генерироваться поток данных 8 ГБ/с, а для всей ВНК – 48 ГБ/с. Собранные и предварительно обработанные с помощью FPGA данные со всех измерительных каналов передаются на ведущий быстрый контроллер с помощью сети Synchronous Databus Network ITER для расчёта профиля нейтронного источника. Временная синхронизация системы достигается с помощью сети Time Communication Network ITER, на уровне аппаратуры сбора данных.

Архитектура ВНК, представленная в данной работе, отвечает требованиям, предъявляемым к диагностике.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 21.04.2020 № Н.4а.241.19.20.1042 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2020 году».

ТИПОВАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ИТЭР КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

¹Миронов А.Ю., ¹Звонарева А.А., ¹Портоне С.С., ¹Миронова Е.Ю., ¹Семенов И.Б.,
¹Нагорный Н.В., ²Толоконский А.О.

¹ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

²НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.185

Система управления установкой ИТЭР разделена на два уровня управления – центральную систему и нижний локальный уровень управления, состоящий из более чем 130 технологических и диагностических подсистем установки. Проведение детальных проверок на соответствие требованиям международного проекта является важной задачей для поставщиков технологических и диагностических систем.

Диагностические системы ИТЭР подразделяются на семь основных групп:

Диагностики контроля состояния внутрикамерных элементов, магнитные, нейтронные и болометрические измерения, а также оптические, спектрометрические и микроволновые диагностики. В каждую группу подобраны диагностики со схожими физическими принципами измерения и контроля, но расположенные на различных линиях наблюдения за плазмой, что накладывает специфичные требования к организации компонентов системы, а также на измеряемые параметры плазмы.

Оптические диагностики ИТЭР имеют специфичные организации оптического тракта, в большинстве случаев завершаемого цифровой камерой специализированного научного исполнения, а также требуют организации ряда дополнительных функций: позиционирования оптических элементов, системы очистки зеркал, управления защищающим шаттером, калибровки оптического и измерительного канала.

Эти функции носят типовой характер для оптических и некоторых других диагностик ИТЭР, что говорит о возможности сокращения расходов при их реализации, особенно в части системы управления. В свою очередь комплекс, реализующий данный функционал может быть представлен в виде программно-аппаратной архитектуры, которая является результатом данной работы.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 21.04.2020 № Н.4а.241.19.20.1042 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2020 году».

АППАРАТУРА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО УСИЛЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ИОНИЗАЦИОННЫХ КАМЕР ДЕЛЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ ДМНП

Николаев А.И., Воробьев В.А., Кашук Ю.А., Обудовский С.Ю., Нагорный Н.В.,
Миронов А.Ю., Портоне С.С., Звонарева А.А.

ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.186

Диагностика Диверторный монитор нейтронного потока (ДМНП) входит в состав нейтронных диагностик ИТЭР и предназначена для измерения нейтронного потока и термоядерной мощности установки ИТЭР. Детекторами нейтронов ДМНП являются ионизационные камеры деления (ИКД). В диагностке используются ИКД различной чувствительности, с плоско-параллельной системой электродов. ИКД объединены в детекторные узлы (ДУ), в каждом из которых смонтированы три ИКД.

Проверка радиометрических параметров опытных экземпляров и поставочных комплектов ДУ будет осуществляться на стенде для входного контроля радиометрических параметров ИКД. Для работы в составе стенда спроектирована и изготовлена измерительная система (ИС), основой которой являются 4 предварительных усилителя (ПУ) сигналов ИКД. Каждый ПУ имеет в своем составе:

- конфигурируемый по полярности источник питания ИКД с дистанционной регулировкой напряжения в диапазоне 50÷400В;
- калибратор ПУ;
- выход для подключения Keithley-6487 как измерителя тока ИКД;
- интерфейс управления на базе микроконтроллера и ВОЛС;
- интерфейс передачи сигнала ИКД по ВОЛС.

Передача данных и управление ПУ осуществляется посредством 4-х канального оптического модуля (ОМ) с USB интерфейсом. Приведены схемные и компоновочные решения, а также результаты лабораторных испытаний ИС.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 21.04.2020 № Н.4а.241.19.20.1042 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2020 году».

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА

Гужев Д.И., Журавлёв М.К., Немцев Г.Е., Миронова Е.Ю., Нагорный Н.В.,
Николаев А.И., Пищулина П.А.

ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.187

Для каждой диагностической системы токамака-реактора ИТЭР разрабатывается система сбора данных и управления. Одной из ключевых функций систем контроля и управления является потоковая обработка получаемых экспериментальных данных. К данным системам предъявляется также ряд требований, в частности то, что вся получаемая информация о физическом процессе должна быть снабжена идентификатором, отметками времени, показателями качества, сигнала ошибок и т.д. Проект, в котором будут учитываться данные требования, рассматривается в данной работе.

Алмазные детекторы широко применяются для регистрации быстрых нейтронов. В ИТЭР алмазные детекторы будут применяться в качестве детекторов вертикальной нейтронной камеры. Алмазные детекторы способны функционировать при высоких температурах и обладают высокой радиационной стойкостью. При работе с данными алмазного детектора необходимо учитывать, что непосредственно измеренный спектр всегда содержит часть рассеянных нейтронов. Кроме того, в реальных экспериментах алмазные детекторы могут регистрировать фон гамма-излучения. Все это приводит к необходимости разработки алгоритмов, которые позволяют выделить необходимую информацию из сигнала измеренных данных (скорость счёта нейтронов в режиме счетчика и спектр нейтронов в режиме спектрометра).

Система сбора и обработки данных представляет собой гетерогенное устройство, состоящее из промышленного компьютера и связки высокоскоростного АЦП с многофункциональной платой ввода-вывода, использующей ПЛИС для потоковой обработки данных. В работе рассмотрены подходы, применяемые при разработке алгоритма потоковой обработки регистрируемого сигнала для получения амплитудного спектра импульсов.

Другой важной задачей является интеграция имеющегося оборудования в SCADA-систему. В нашем случае SCADA-системой является EPICS, и для интеграции имеющихся у нас средств можно использовать специализированное программное обеспечение Nominal Device Support v3, которое упрощает поддержку устройств для сбора данных, получения изображений и временной синхронизации. В докладе приводится процесс создания подобного программного обеспечения для измерительного канала системы сбора данных.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 21.04.2020 № Н.4а.241.19.20.1042 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2020 году».

АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ К СИСТЕМАМ СБОРА ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ В ITER КАК ОСНОВА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВИРТУАЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ

¹Звонарева А.А., ¹Портоне С.С., ¹Миронова Е.Ю., ¹Семенов И.Б., ¹Нагорный Н.В.,
¹Миронов А.Ю., ²Толоконский А.О

¹ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

²НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.188

Для успешной интеграции систем сбора данных и управления диагностических и технологических систем в центральную систему управления ITER необходимо соблюдать ряд особых требований при проектировании. Основным документом, регламентирующим разработку, является Plant Control Design Handbook. Часть требований направлена на обеспечение стандартизации и аппаратной интеграции оборудования в центральную систему управления, а часть отвечает за соблюдение правил при разработке программного обеспечения. Проведение детальных проверок на соответствие требованиям международного проекта является важной задачей для поставщиков технологических и диагностических систем.

Виртуальная Цифровая Платформа — это программно-аппаратный комплекс, создаваемый для имитации центральной системы управления установкой ИТЭР и её сетевой архитектуры. Данная платформа позволит проводить разработку, тестирование и приемосдаточные испытания диагностических систем в соответствии со стандартами, применяемыми в проекте ИТЭР. В отличие от mini-CODAC (предлагаемой ИТЭР программной эмуляции центральной системы управления с сильно сокращённым функционалом) Виртуальная Цифровая Платформа позволит тестировать механизмы передачи рассчитываемых параметров плазмы, различной архивации данных, системы обработки ошибок и ведения электронных журналов. При проектировании Виртуальной Цифровой Платформы необходимо учесть все требования для диагностических и технологических систем, а также для центральной системы управления ИТЭР. Проводя грубую оценку потоков генерируемых данных, возможно оценить необходимые объемы серверов для хранения и представления информации.

В данном докладе представлен анализ требований к диагностическим системам сбора данных и управления, на основе которого сформулированы требования к Виртуальной Цифровой Платформе. Исходя из требований к платформе предложена предварительная аппаратная и сетевая конфигурация платформы.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 21.04.2020 № Н.4а.241.19.20.1042 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2020 году».

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РАДИОЛЮММИНОГРАФИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НАКОПЛЕНИЯ ТРИТИЯ В ДЕФЕКТАХ СТРУКТУРЫ ВОЛЬФРАМА

^{1,2}Бобырь Н.П., ¹Иванов Б.В., ²Аникин А.С., ²Букин А.Н., ²Забилова Н.Е.

¹Медников А.А., ³Игнащенко А.П., ¹Спицын А.В.

¹НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия, e-mail: Bobyr_NP@nrcki.ru

²АО ВНИИНМ им А.А. Бочвара, г. Москва, Россия

³Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.189

Задача исследования накопления изотопов водорода в материалах современных термоядерных реакторов (ТЯР) является одной из важнейших задач топливного цикла и обеспечения безопасности. В отсутствие реального термоядерного реактора для получения предварительных данных о взаимодействии материалов стенки с водородом необходимо проводить экспериментальное моделирование воздействия отдельных факторов, присутствующих в ТЯР на материалы, и их взаимодействие с изотопами водорода.

В настоящее время в мире исследуются следующие конструкционные материалы ТЯР: вольфрам и сплавы вольфрама, бериллий, бронза, низкоактивируемые стали и сплавы ванадия. Особенно важным является исследование накопления и выделения изотопов водорода,

в частности трития, из материалов содержащих дефекты структуры.

В данной работе, представлены исследования накопления трития в вольфраме, в том числе содержащего электронно-индуцированные дефекты структуры. Насыщение образцов материалов тритием из газовой фазы проводится на установке РЕКА2 (АО ВНИИНМ) при давлении до 10^6 Па и температуре до 1000 К. Анализ содержания трития в образцах материалов проводился при помощи одного из перспективных экспериментальных методов по исследованию транспорта и накопления трития – радиolumинографии [1]. Данный метод успешно развивается в АО ВНИИНМ в последние годы и позволяет получить двумерное распределение трития на поверхности исследуемого образца с разрешением до 10 мкм.

В данной работе впервые проведено качественное исследование распределение дефектов структуры по толщине вольфрамового образца. Показано что даже небольшое количество дефектов ($\sim 10^4$ сна) способно существенно увеличивать захват изотопов водорода в вольфраме.

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (Приказ №1953 от 29.09.2020).

Литература

- [1]. Л.А. Ривкис, И.Г. Прыкина, В.М. Филин, В.И. Булкин, Б.М. Андреев // Атомная энергия., 2008. – Т. 104. – Вып. 3. – с. 164 – 169

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИМЕСИ ТАНТАЛА НА НАКОПЛЕНИЕ ДЕЙТЕРИЯ В СПЛАВЕ W-Ta

¹Бобырь Н.П., ²Ефимов В.С., ¹Козлов Д.А., ¹Ананьев С.С.

¹НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия, e-mail: Bobyr_NP@nrcki.ru

²НИЯУ "МИФИ", г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.190

В настоящее время вольфрам рассматривается как один из материалов, обращенных к плазме, для будущих термоядерных реакторов. В качестве материала, обращенного к плазме, W будет подвергаться интенсивным потокам дейтерия, трития, частиц гелия, а также нейтронов с энергией 14 МэВ (n) от реакции D – T-синтеза. Облучение нейтронами вызовет изменение микроструктуры W за счет смещения в объеме и образования Re и Os [1]. Было показано, что добавление 5 ат. % Re к W сильно снижает удерживание изотопов водорода после облучения тяжелыми ионами [2]. Интересно изучить влияние других легирующих элементов, таких как Mo и Ta, на удерживание изотопов водорода.

В данном исследовании в качестве экспериментальных образцов использовались пластины из монокристаллических сплавов W, W-xTa (x = 1; 3; 5 концентрация в ат. %). Все образцы были отполированы до зеркальной поверхности и дегазированы в вакууме при 1100 К в течение 2 часов. Наборы образцов W, W-1Ta, W-3Ta, W-5Ta экспонировались в газе D в диапазоне температур 400 ÷ 600 К при давлении 10⁴ Па. Удержание D в сплавах W и W-Ta измеряли методом термодесорбции. спектроскопия (TDS).

Обсуждается влияние примеси Ta на удерживание дейтерия в монокристаллах W после газового воздействия, исследованное с помощью TDS.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (No. 18-72-10162).

Литература

- [1]. H. Bolt et al., J. Nucl. Mater. **307 – 311**, 43 – 52 (2002)
- [2]. Y. Hatano et al., Nucl. Mater. Energy **9**, 93 – 97 (2016)

ИСПЫТАНИЯ ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ ДИАГНОСТИКИ ИТЭР «ДИВЕРТОРНЫЙ МОНИТОР НЕЙТРОННОГО ПОТОКА» В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

¹Воробьев В.А., ¹Джурик А.С., ¹Обудовский С.Ю., ¹Кашук Ю.А., ²Мартазов Е.С.,
²Парышкин Ю.А., ²Селяев Н.А., ²Федоров В.А., ³Булавин М.В., ³Куликов С.Н.

¹ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия,
e-mail: Y.Kashchuk@iterrf.ru

²НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия

³Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.191

«Диверторный монитор нейтронного потока» одна из нейтронных диагностик международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР, предназначенная для измерения полного нейтронного выхода. Ожидаемая плотность потока нейтронов в месте размещения детекторов составляет от 10^3 до 10^{13} н/(см²с). Для решения задачи измерения плотности потока нейтронов в динамическом диапазоне 10 порядков с временным разрешением 1 мс используется детекторный модуль с двумя 3-х секционными ионизационными камерами деления и многоканальная система сбора данных. Для подтверждения возможности измерения плотности потока нейтронов в широком динамическом диапазоне с применением такого модуля детектирования и оценки характеристик прототипа системы сбора данных был проведен ряд испытаний в условиях интенсивного нейтронного излучения. В испытаниях использовались детекторные узлы, конструктивно схожие с планируемыми к использованию на ИТЭР и мобильное исполнение прототипа системы сбора данных. Испытания проводились на нейтронном стенде, созданном на базе нейтронного генератора НГ-24М с выходом 10^{11} н/с, и на импульсном быстром реакторе ИБР-2 с плотностью потока нейтронов у замедлителя 10^9 - 10^{12} н/(см²с) в зависимости от месторасположения мониторов, при пиковой мощности 1,6 – 1,85 МВт. В ходе испытаний на нейтронном стенде была проверена работоспособность мобильной версии прототипа, выполнены регистрации усредненной формы импульсов и амплитудного спектра всех ионизационных камер, получены данные для калибровки измерительных каналов системы сбора и обработки данных. При испытаниях на реакторе ИБР-2 проводилась регистрация сигналов измерительных каналов подсистемы при изменении плотности потока нейтронов.

В докладе приводятся результаты испытаний и обсуждаются подходы к методикам калибровки подсистемы нейтронной диагностики ИТЭР.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 21.04.2020 № Н.4а.241.19.20.1042 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2020 году».

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ УЧЕБНО-ДЕМОНСТРАЦИОННОГО СТЕНДА ТОКАМАК С ДИВЕРТОРОМ В НИУ «МЭИ»

^{1,2}Будаев В.П., ¹Дедов А.В., ^{1,2}Саврухин П.В., ¹Федорович С.Д., ¹Комов А.Т.,
¹Карпов А.В., ^{1,2}Мартыненко Ю.В., ¹Иванов Д.П., ¹Губкин М.К., ¹Лазукин А.В.,
¹Лукашевский М.В.

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», e-mail: budaev@mail.ru

²НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.192

Создание современной учебно-демонстрационной базы для подготовки специалистов необходимо для кадрового обеспечения создаваемой в России термоядерной энергетики [1], строительства и эксплуатации термоядерного источника нейтронов на основе токамака (ТИН) [2], токамака Т-15МД (НИЦ «Курчатовский институт», токамака с реакторными технологиями ТРТ (ТРИНИТИ), международного термоядерного реактора ИТЭР, стендов и плазменных установок ГК «РОСАТОМ». В период до 2025 г. и на перспективу до 2030 г. требуется подготовить около 600 высококвалифицированных инженерных и инженерно-физических специалистов для реализации проектов ТИН, токамаков ТРТ и Т-15МД, участия России в проекте ИТЭР. НИУ «МЭИ», обладая профессорско-преподавательским потенциалом и современной учебной и экспериментальной стендовой базой, может обеспечить более половины такой кадровой потребности, включая высококвалифицированных инженеров по вакуумной технике, криогенике, силовой электронике и электротехнике, систем охлаждения, систем управления, диагностике плазмы, экспериментальной физике.

Разрабатывается концептуальный проект учебно-демонстрационного стенда токамак с дивертором, который будет сооружен в НИУ «МЭИ» до 2024 г. Предварительные проектируемые параметры токамака с дивертором: большой радиус $\sim 0,5$ м, аспектное отношение $\sim 3,2$, эллиптичность (вытянутость) сечения $\sim 1,8$, ток плазмы ~ 100 кА, тороидальное магнитное поле ~ 1 Т и более, дополнительный ИЦР нагрет.

Кроме учебных целей, на этом токамаке с ИТЭР-подобной геометрией будут проводиться исследования в поддержку участия России в проекте ИТЭР [3], по тематике диверторной плазмы, разработке стационарных технологий эксплуатации систем токамака, методов охлаждения высоконагруженных внутрикамерных компонентов. Будут экспериментально проверены новейшие диверторные технологии: режим с эргодической сепаратрисой (snowflakes), лимитер с магнитной защитой, открытый/закрытый асимметричный дивертор, магнитная конфигурация с отрицательной треугольностью, магнитная конфигурация с большим аспектным отношением, жидкометаллические литиевые технологии обращенных к плазме компонентов, технологии подавления срывов и негативных последствий глобальных неустойчивостей, включая вертикальное смещение. Эти технологии, направленные на стационарную эксплуатацию токамака, необходимо проверить на токамаке лабораторного масштаба до реализации на крупном токамаке и в термоядерном реакторе. В России пока отсутствует такая установка и предлагаемый токамак, проектируемый в НИУ «МЭИ», будет необходимым этапом в сооружении стационарного термоядерного токамака-реактора в России.

Литература

- [1]. Курчатов И.В. О возможности создания магнитных термоядерных реакторов. — В кн.: Собрание научных трудов. — М.: Наука, 2012, т. 5, с. 78 – 81.
- [2]. Велихов Е.П., Ковальчук М.В., Азизов Э.А., Игнатьев В.В., Субботин С.А., Цибульский В.Ф. Термоядерный источник нейтронов для производства ядерного топлива. — Атомная энергия, 2013, т. 114, вып. 3, с. 160 – 165
- [3]. Красильников А.В., Коновалов С.В. Термоядерные технологии: от ИТЭР к экспериментам следующего шага. XLVI Звенигородская конференция, 2019, с. 42

СИНТЕЗ CVD-АЛМАЗА ЭЛЕКТРОННОГО КАЧЕСТВА ДЛЯ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ ПРИБОРОВ И ДЕТЕКТОРОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

¹Красильников А.В., ¹Родионов Н.Б., ²Большаков А.П., ²Ральченко В.Г.,
³Вартапетов С.К., ³Сизов Ю.Е., ¹Мещанинов С.А., ¹Трапезников А.Г.,
¹Родионова В.П., ¹Амосов В.Н.

¹ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия центр ИТЭР»,
г. Москва, Россия

²Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва,
Россия

³АО «Оптосистемы» Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.193

Синтетический алмаз является перспективным материалом для создания детекторов ионизирующих излучений, в которых нуждаются термоядерные и космические исследования, атомная энергетика, медицина и другие отрасли. На основе алмаза может быть создана элементная база для высокопрецизионной электроники, уникальные электронные и оптические устройства для работы в условиях повышенной радиации, высоких температур, химически агрессивных сред. Проведенные в «Проектном центре ИТЭР» исследования качества алмазного материала различных изготовителей показали, что только компания Element 6 производит CVD алмазные кристаллы электронного качества. Сегодня уже понятно, что широкое применение алмаза вызовет технологическую революцию в электронике, поэтому крайне актуальным является создание технологии и отечественного производства синтетических CVD алмазных монокристаллов электронного качества.

В данной работе сообщается о реализации в «Проектном центре ИТЭР» CVD-синтеза гомоэпитаксиальных пленок на сильно легированных бором (p-тип) подложках на установке ARDIS-300. Три пленки (B21, B22, B23) были синтезированы на трех подложках с содержанием бора ≈ 100 ppm, а пленка (B25) на подложке с концентрацией бора ≈ 20 ppm. Толщины пленок составили: 40 мкм (B21), 110 мкм (B22), 60 мкм (B23), 60 мкм (B25).

У синтезированных алмазных пленок измерены спектры комбинационного рассеяния (КР) света, определены ширины пика КР на рамановском спектрометре «InViaRamanMicroscope». Анализ показал, что все образцы представляют собой монокристалл алмаза с хорошим структурным совершенством. Спектр КР 1-го порядка имеет простейший вид, содержит единственную линию на частоте $1332,5 \text{ см}^{-1}$. Ширины рамановских пиков ($\Delta\nu$) пленок гомоэпитаксиальных структур составили: $\Delta\nu = 2,4 \text{ см}^{-1}$ (B21), $\Delta\nu = 2.2 \text{ см}^{-1}$ (B22), $\Delta\nu = 2.7 \text{ см}^{-1}$ (B23), $\Delta\nu = 4.0 \text{ см}^{-1}$ (B25).

Электронное качество монокристаллических алмазных пленок, синтезированных на проводящих подложках с содержанием бора 100 ppm, было исследовано посредством измерения эффективности сбора заряда, генерированного в них альфа-частицами с энергией 5.5 МэВ от источника ^{241}Am . Для проведения этих исследований на стороны синтезированной алмазной пленки и подложки были нанесены металлические контакты толщиной 35 нм и проведены измерения амплитудных спектров созданных чувствительных элементов при облучении альфа-частицами. Измеренные амплитудные спектры сравнивались с эталонным алмазным детектором, с чувствительным элементом компании Element 6, обеспечивающим полный сбор заряда. CVD монокристаллы алмаза B21, B22 и B23 продемонстрировали эффективности сбора заряда 94%, 88% и 87% и энергетическое разрешение по ширине альфа пика в амплитудном спектре - 3.9%, 4.2% и 4.2%, соответственно, и могут быть эффективно применены в качестве чувствительных элементов спектрометрических детекторов ионизирующих излучений.

Работа выполнена в рамках реализации государственного контракта № Н.4ф.241.09.20.1087 от 05.06.20 г.

ПРОИЗВОДСТВО МАКЕТА И ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ДМНП

¹Гавриленко Д.Е., ^{1,4}Бурдаков А.В., ¹Иванцовский М.В., ²Кашук Ю.А.,
²Обудовский С.Ю., ¹Стешов А.Г., ¹Шиянков С.В., ^{1,3}Шошин А.А.

¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск

²ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

³Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск

⁴Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.194

В 2021 году в ИЯФ СО РАН запланировано производство и проведение предварительных испытаний макета новой конструкции ДМНП.

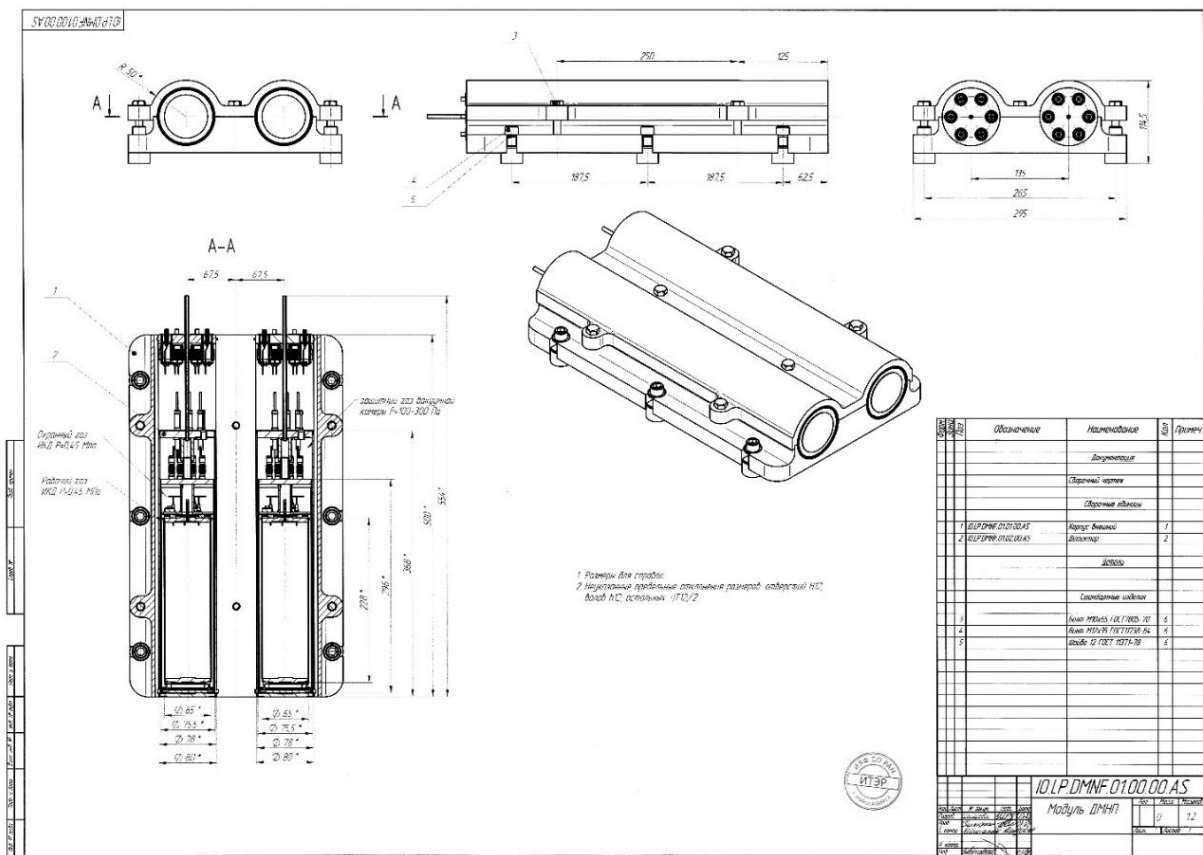


Рисунок 1. Сборочный чертеж новой конструкции модуля ДМНП

Производство и проведение предварительных испытаний макета критических узлов обновлённой конструкции модуля ДМНП с системой контроля герметичности в первую очередь включает в себя:

- Изготовление узла вывода электрических сигналов модуля ДМНП для отработки технологического процесса производства и контроля;
- Проведение электрических испытаний макета, включающих проверку электропрочности изделия и измерение сопротивления изоляции линий связи;
- Изготовление полномасштабного макета модуля ДМНП с камерами ИКД для проведения нейтронных испытаний обновленной конструкции ДМНП

Результаты данной работы позволят в полной мере подготовиться к финальной производственной стадии (MRR) изготовления диагностики ДМНП.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОДА ВTR ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ИНЖЕКТОРОВ ИТЭР

Длугач Е.Д., Панасенков А.А.

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: edlougach@gmail.com

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.195

Код ВTR (*Beam Transmission with Re-ionization*) [1] уже много лет используется в проектировании систем нейтральной инжекции (NBI). Работа над кодом началась в 1995 году, а в 2005 году состоялся его выпуск (Born-To-Run). Код создан на MS Visual C++ for Windows. Код ВTR исходно является открытым и предназначен для публичного использования. Благодаря высокой производительности и интерактивности, он похож на симулятор инжектора и нередко применяется в учебных целях. Код является параллельным, наилучшая производительность наблюдается на многопроцессорных компьютерах. Но даже на скромных системах (Windows) он способен моделировать поведение 10^{10} частиц, и это занимает всего несколько часов (2 – 5). Все модели ВTR – *легкие* и воспроизводимые, поддаются аналитической проверке. Поэтому код можно использовать также для верификации других кодов трассировки пучков [2]. Возможности и объем данных для моделирования (уровень детализации геометрии, статистика, шаги), объем выходных данных (карты нагрузки) и их разрешение (шаги сетки) - гибко адаптируются к любой задаче проектирования NBI. Сегодня ВTR – это живой и развивающийся код, его пользователям доступна бесплатная поддержка автора. Информация об обновлениях ВTR и руководства пользователя доступны онлайн [1].

Пучок в ВTR стартует из отверстий на выходной сетке источника-ускорителя ионов; дальнейшие преобразования и транспортировка частиц воспроизводятся простыми моделями пошаговой трассировки частиц. Ионы источника отслеживаются в электромагнитных полях, учитывается их нейтрализация и ионизация на газовой или плазменной мишени. Вся трассировка *детерминирована* и не зависит от случайных величин. Пучок из источника представляет собой массив большого числа *бимлет* (*cone-beams*); индивидуальное положение бимлет, фокусировка и внутреннее угловое распределение задаются независимо или списком. Модель пучка в ВTR отличает подробная *статистика*: типичный запуск состоит из 1280 бимлет источника, причем по 10^3 – 10^5 частиц (первичных) в каждой бимлете.

Ввод геометрии инжектора в ВTR позволяет гибко комбинировать стандартные компоненты и «свободные» поверхности, последние создаются вручную или с помощью инструментов САПР. Количество поверхностей может быть достаточно большим, можно отображать детали геометрии с точностью до нескольких миллиметров. Выходные данные включают карты распределения нагрузок, они могут быть построены в любом сечении пучка или на любой поверхности инжектора. Число и разрешение карт настраиваются интерактивно; типичный вывод состоит из 100-200 карт с разрешением $\sim 100 \times 100$ каждая.

Спектр *применения* ВTR достаточно широк и включает анализ потерь мощности пучка, эффективность его транспортировки, исследование влияния магнитного поля, динамики состава пучка, отслеживание отдельных компонент, построение отпечатков и карт нагрузки, *обработка изображений* и др. В докладе показаны примеры применения ВTR в процессе проектирования нагревных и диагностических инжекторов нейтральных пучков ИТЭР [3, 4]. Включены также результаты, полученные недавно центральной командой ИТЭР с использованием новой версии кода (ВTR-5, *Multi-Run*), которая предназначена для многопараметрического анализа и проведения массивных расчетов.

Литература

- [1]. E.D. Dlugach, ВTR webpage (2010), URL: <https://sites.google.com/site/btrcode/>
- [2]. E. Sartori et al, AIP Conference Proceedings, v. 1655, 2015, p.050006
- [3]. M.J. Singh et al, AIP Conference Proceedings, v. 1515, 2013, p. 498
- [4]. M.J. Singh et al, AIP Conference Proceedings, 1655(1), 2015, p. 050011

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТА ОСЛАБЛЕНИЯ ПОТОКА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ КОНСТРУКЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ ИТЭР

Фридрихсен Д.С., Кормилицын Т.М., Обудовский С.Ю., Ковалев А.О., Кашук Ю.А.

*ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия,
e-mail: D.Fridrikhsen@iterrf.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.196

Значительная мощность источника нейтронного излучения токамака-реактора ИТЭР приводит к высоким требованиям к защитным конструкционным материалам, как с точки зрения ослабления прямого нейтронного потока, так и с точки зрения долгосрочной активации материалов. Использование новейшего и дорогостоящего оборудования (например – диагностического) приводит к необходимости его обслуживания, а значит, задача минимизации долгосрочной активации является крайне актуальной для такой крупной установки, как ИТЭР.

Работа по верификации ослабления нейтронного потока проводилась с целью подтверждения свойств конструкционных материалов строящегося термоядерного реактора ИТЭР – нержавеющей стали 316L(N)-IG и бронзы марки БрХЦр.

Взаимодействие нейтронного излучения с конструкцией, характеристики радиационных полей, скорости ядерных реакций в объеме токамака-реактора на данный момент рассчитываются с помощью ПО MCNP [1]. Необходимость получения максимально точных результатов при определении нейтронного потока с помощью расчёта делает бенчмарк-эксперимент с использованием реалистичных источников и материалов критически важным референсным измерением.

Серия физических экспериментов по ослаблению нейтронного потока проведена на стенде нейтронной диагностики. Ионизирующее излучение создавалось нейтронными генераторами ИНГ-07Д ($E_n \sim 2.5$ МэВ) и ИНГ-07Т ($E_n \sim 14$ МэВ). В качестве барьерного материала, ослабляющего нейтронное излучение, использовались следующие образцы конструкционных материалов ИТЭР: полиэтилен, нержавеющая сталь SS316L-IG и бронза марки БрХЦр. Толщина барьера варьировалась от 4см до 24см. В качестве монитора потока прямых нейтронов, измеряющего распределение нейтронов по энергиям, использовался сцинтилляционный детектор на основе кристалла паратерфенила. Анализ проведенных экспериментов позволили подтвердить корректность ядерных констант для используемых материалов.

С помощью расчетных моделей MCNP были получены спектры быстрых нейтронов (2.5 МэВ и 14.7 МэВ) при прохождении барьеров различной толщины, проведено сравнение экспериментально полученных откликов детектора с модельными.

На основе проведенных экспериментов и построенных моделей были сделаны выводы о соответствии свойств материалов заявленным. Оработана методика проведения бенчмарк-эксперимента по ослаблению нейтронного потока, позволяющая оперативно провести аналогичные эксперименты для верификации свойств и для других материалов.

Литература

- [1]. J. T. Goorley et al., “Initial MCNP6 Release Overview - MCNP6 version 1.0,” Los Alamos, NM (United States), Jun. 2013. doi: 10.2172/1086758

СТАТУС РАБОТ ПО ДИАГНОСТИКЕ СПЕКТРОСОКОПИЯ ВОДОРОДНЫХ ЛИНИЙ ИТЭР

¹Шестаков Е.А., ²Алексеев А.Г., ²Асадулин Г.М., ²Вуколов Д.К., ²Горшков А.В.,
²Драпики Е.А., ²Капустин Ю.М., ²Качкин А.Г., ²Орловский И.И., ²Рогов А.В.

¹ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

²Автономная некоммерческая организация Координационный центр «Управляемый термоядерный синтез – международные проекты», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2021.48.1.197

Одной из систем, поставляемых Российской Федерацией в качестве натурального взноса в поддержку международного проекта ИТЭР, является диагностическая система Спектроскопия водородных линий (СВЛ).

Физический пуск реактора ИТЭР намечен на 2025 г. В настоящее время проект ИТЭР находится на фазе активного оснащения и оборудования компонентами вакуумной камеры, прокладыванием коммуникаций, размещением запертых элементов различных диагностических и служебных систем.

Согласно последней версии ITER Research Plan (24QSG6), вывод токамака на проектный режим с дейтерий-третиевой смесью будет производиться через несколько стадий: First plasma (FP), Pre-Fusion Operation (PFPO), Fusion Power Operation (FPO). При этом согласно System Requirements Document (28B39L) СВЛ необходима для работы уже на первой стадии FP.

СВЛ является одной из основных диагностических систем ИТЭР, позволяющая измерять следующие параметры плазмы: поступление примесей (бериллий, углерод, вольфрам, кислород, медь, неон, аргон, криптон) в плазму, интенсивность пристеночных мод (ELM), переход в моду с улучшенным удержанием, содержание дейтерия и трития в пристеночной области, поступление дейтерия и трития со стенки и пр.

Измеряемые СВЛ параметры плазмы нужны не только для исследовательских целей, также многие из них задействованы в цепях обратной связи для управления плазменным шнуром и защиты установки. Именно поэтому СВЛ должна быть оборудована на токамаке уже к моменту физического пуска к стадии FP.

С учетом того, что многие системы к первой плазме будут находиться еще только на стадии разработки, то в настоящий момент их дизайн и интеграция с другими системами, в том числе первоплазменными, пока не утверждены. Поэтому для того, чтобы определить конкретные требования к СВЛ к первой плазме в том числе с учетом неопределенности интеграции и ограниченных требований к измеряемым параметрам к первой плазме был выпущен меморандум (462ENA).

В данном докладе представлен текущий прогресс по разработке диагностики СВЛ в том числе с учетом требований ИТЭР к параметрам системы к первой плазме, прописанным в меморандуме. Рассмотрены основные компоненты СВЛ: внутривакуумные компоненты, система управления, вневакуумные компоненты. Представлен так же график работы по диагностике.

СПИСОК АВТОРОВ

D	
De Bock M.,	216
H	
von Hellermann M.	208
M	
Magee R.	89
Munoz Burgos J.M.	238
A	
Абдуллина Г.И.	38
Аблесимов В.Е.	154
Абрамов И.С.	153
Агапова М.В.	80
Агейченков Д.Г.	155, 156
Акунец А.А.	120, 125
Александров В.В.	131
Александров С.Е.	62
Александрова И.В.	117
Алексеев А.Г.	212, 239
Амиров В.Х.	68
Амиров Р.Х.	172
Амосов В.Н.	132, 235
Ананьев С.С.	36, 50, 51, 57, 58, 61, 86, 115, 129, 217, 232
Анашкин И.О.	42, 69
Андреев В.В.	157
Андреев Е.Н.	212
Аникин А.С.	231
Анпилов А.М.	196
Антонов Н.Н.	140
Антонова И.А.	164
Апфельбаум Е.М.	135
Аржанников А.В.	181, 182, 183
Аристов Н.А.	187
Арсенин В.В.	90
Артемьев К.В.	167, 195
Артемьев К.К.	99, 132
Асадулин Г.М.	239
Аскинази Л.Г.	38
Асмедьянов Н.Р.	70
Афонин А.Ю.	219, 222
Афонин К.Ю.	207, 222
Ахметов Т.Д.	60
Б	
Багрянский П.А.	43, 54, 60
Баженов А.Н.	62
Базулин И.А.	132
Бакшаев Ю.Л.	190
Балаченков И.М.	43, 71, 91

Балашов А.Ю.	77, 78
Балмашнов А.А.	148
Бардаков В.М.	186
Баркалов Е.Е.	69
Баркалов К.Е.	69
Баронова Е.О.	122
Бархударов Э.М.	196
Батанов Г.М.	167
Батукаев Т.С.	144
Бахарев Н.Н.	43, 66, 71, 73
Бахтин В.П.	55
Беклемишев А.Д.	52, 53
Белов А.М.	77, 78
Белозеров О.С.	190
Белокуров А.А.	38
Бельнова Л.М.	80
Бережецкая Н.К.	167
Бескин В.С.	129
Бобырь Н.П.	159, 192, 231, 232
Богданов А.М.	105, 106, 107
Болдарев А.С.	131
Большаков А.П.	164, 235
Бондарчук Э.Н.	32, 42
Борзосеков В.Д.	167, 198
Борисенко Н.Г.	120, 125
Бородин Д.	212
Борщеговский А.А.	79, 80
Бочаров А.Н.	172
Бочкарев С.Г.	130
Браницкий А.В.	131
Брантов А.В.	130
Брезинсек С.	212
Бруль А.В.	68, 89
Брунков П.Н.	43
Будаев В.П.	95, 234
Букин А.Н.	231
Булавин М.В.	233
Буланин В.В.	43, 91, 96
Булгадарян Д.Г.	103, 206
Бурдаков А.В.	64, 97, 201, 203, 236
Бурцев В.А.	116, 126
Бутко Н.Б.	148
Быченков В.Ю.	130
В	
Вадимов Н.А.	83
Варава А.Н.	95
Вартапетов С.К.	235
Варфоломеев В.И.	43, 62, 63, 71, 73, 206
Васильев Г.Б.	95
Васильева О.Б.	150
Васильков Д.Г.	104

Васина Я.А.	49
Вафин И.Ю	75, 76
Вахрушев Р.В.	88
Векленко Б.А.	147
Векшина Е.А.	43
Вергунова Г.А.	112, 127
Вершков В.А.	94
Вещев Е.	212
Виницкий Е.А.	103
Виноградова А.В.	99
Вихрев В.В.	122, 123
Вичев И.Ю.	131
Вовченко Е.Д.	206
Войтешонок В.С.	189
Воробьев В.А.	201, 228, 233
Воробьев Г.М.	102, 103
Ворона Н.А.	140
Воронин А.В.	43, 59, 63, 71
Воронова Е.В.	165, 198
Вуколов Д.К.	239
Вуколов К.Ю.	48
Г	
Гавриков А.В.	140
Гавриков М.Б.	151
Гавриленко Д.Е.	201, 236
Гаврилов В.В.	185
Ганин С.А.	102
Гаранин С.Ф.	121
Гасилов В.А.	131
Гаспарян Ю.М.	30, 206
Гладуш Г.Г.	99
Глинов А.П.	188
Глинский В.В.	183
Гожев Д.А.	130
Голачев В.М.	202, 204
Головин А.П.	188
Голубева А.В.	159
Горбун М.С.	72
Горбунов А.В.	48, 211
Горшков А.В.	212, 239
Горяинов В.Ю.	43, 59, 63
Господчиков Е.Д.	153
Грабовский Е.В.	131
Грашин С.А.	85
Гребенщиков С.Е.	104
Грибов А.А.	69
Грицук А.Н.	131
Гришина И.А.	75, 76, 104
Громов А.И.	120, 125
Грушин А.С.	131
Губкин М.К.	95, 234

Гужев Д.И.	229
Гусев В.К.	43, 62, 63, 66, 71, 73, 91, 96
Гуськов С.Ю.	112, 127
Д	
Даванков В.А.	120
Давыденко В.И.	43, 68, 89
Давыдов А.М.	167, 195
Данилов А.В.	47
Данько С.А.	190
Двинин С.А.	174, 194
Де Бок М.	212
Дедов А.В.	95, 234
Дейчули П.П.	68, 88, 89
Демидов Д.Н.	61
Демура А.В.	220
Демченко Н.Н.	111
Джурик А.С.	49, 233
Дзлиева Е.С.	138
Диас Михайлова Д.Е.	180
Длугач Е.Д.	57, 58, 101, 237
Дмитриев А.М.	206
Днестровский А.Ю.	47, 50, 56
Днестровский Ю.Н.	47
Додин А.В.	128
Долголева Г.В.	114
Долинский В.Ю.	121
Дороготовцев В.М.	124
Дорофеюк А.А.	197
Драбинский М.А.	82, 83, 87
Драпико Е.А.	239
Дремин М.М.	105
Дрягин С.Ю.	100
Дудник Ю.Д.	150
Дьяченко В.В.	37, 43
Е	
Егорова Е.К.	189
Ексаева А.	212
Елец Д.И.	206
Елисеев И.	126
Елисеев Л.Г.	82, 87
Елисеев С.И.	116
Емельянов А.А.	173
Еськов А.Г.	55
Ефимов В.С.	206, 232
Ефимов Н.Е.	102, 103, 206
Ж	
Жао Й.-П.	116
Жилин Е.Г.	43
Жильцов Н.С.	43, 62, 63, 66, 73, 91

Житлухин А.М.	55, 185
Жубр Н.А.	38
Жуков В.И.	166
Журавлев К.В.	95
Журавлев М.К.	226, 229
З	
Забирова Н.Е.	231
Забродский В.В.	59, 73
Зарецкий Н.П.	112
Захаренков А.В.	95
Звонарева А.А.	226, 227, 228, 230
Земцов И.А.	56
Змиевская Г.И.	171
Змитренко Н.В.	112, 118
Знаменская И.А.	176
Зубарев П.В.	60
И	
Иваненко С.В.	60
Иванов А.А.	35, 60, 68, 88, 89
Иванов Б.В.	51, 86, 231
Иванов В.А.	197
Иванов Д.П.	234
Иванов И.А.	53, 64, 65, 97
Иванов И.Е.	179, 180
Иванов П.П.	172
Иванова И.П.	187
Иванцовский М.В.	201, 203, 236
Игнащенко А.П.	231
Игонькина Г.Б.	78
Ильин К.И.	100
Ильичев И. В.	128, 129
Ильясова М.В.	66
Инжеваткина А.А.	53, 64, 65, 97
Иосилевский И.Л.	137, 145
К	
Кавин А.А.	32, 43
Кавыршин Д.И.	172
Казаков Е.Д.	184, 192, 193
Казанцев А.В.	186
Казанцев С.Ю.	195
Казиев А.В.	155, 156, 162
Калашников А.В.	148, 161
Калашников И.Ю.	128
Калинин Н.В.	126
Калинин П.В.	181, 182, 183
Калинин Ю.Г.	184, 193
Камолова Т.И.	197
Капитонов В.А.	68
Капралов В.Г.	105, 106, 107
Капустин Ю.М.	239
Карасев В.Ю.	138

Карлыханов Н.Г.	185
Карпов А.В.	95, 234
Карпов Д.А.	32
Карр М.	212
Карфидов Д.М.	166
Касатов А.А.	182, 183
Кастильо А.Х.	119
Качкин А.Г.	239
Кашук Ю.А.	201, 205, 228, 233, 236, 238
Квасков В.С.	163
Квашнин А.Н.	60
Кирий Н.П.	165
Кирий П.А.	160
Кирилин А.Е.	225
Кирнева Н.А.	42
Киршнер А.	212
Киселев Е.О.	43, 62, 63, 66, 71, 73, 91
Кисленко С.А.	140
Кисон В.Э.	177
Клищенко А.В.	57
Князев А.В.	198
Ковалев А.О.	201, 205, 238
Коваль А.Н.	62
Кодирзода З.А.	174
Козлов А.М.	212
Козлов Д.А.	232
Козлов П.В.	188
Колесников Е.Ю.	70
Колик Л.В.	167
Колмогоров А.В.	88
Колмогоров В.В.	88
Колодко Д.В.	155, 156, 162
Комов А.Т.	95, 234
Конагуру Р.	156
Коновалов А.Н.	43
Коновалов С.В.	32
Кончечков Е.М.	167, 198
Коныжев М.Е.	197
Коньков А.А.	95, 163
Корепанов П.А.	43
Корешева Е.Р.	117
Кормилицын Т.М.	201, 221, 223, 238
Корнев В.А.	38, 43, 66
Коробейникова О.А.	60
Королёв В.Ф.	69
Косый И.А.	167, 196
Костюшин В.А.	185
Кофанова Е.Д.	224
Кочнев Д.М.	55
Кошелев Е.Л.	117

Красильников А.В.	32, 132, 235
Крат С.А.	102, 103, 206
Крауз В.И.	128, 129
Крашевская Г.В.	144
Кривошеев А.Н.	105, 106, 107
Крикунов С.В.	38
Крохалев О.Д.	84
Крупин В.А.	56
Крутиков Д.И.	184, 192, 193
Крылов С.В.	105
Кувшинов И.Р.	120
Кудашев И.С.	56
Кузнецов А.Ю.	191
Кузнецов В.Е.	150
Кузьмин Е.Г.	32
Кузьмин Е.И.	141
Куклин К.Н.	182, 183
Кукушкин А.Б.	210, 212, 213, 214, 218
Кукушкин А.С.	32, 50
Кули-заде Т.А.	176
Куликов С.Н.	233
Куличенко А.А.	210
Кумпилов Д.А.	202, 205, 209, 224
Курило А.А.	184, 192, 193
Куркина И.В.	225
Курнаев В.А.	102, 103
Курские Г.С.	43, 48, 59, 62, 63, 66, 71, 73, 91, 92, 93, 96
Кутеев Б.В.	31, 36, 39, 58, 101
Кучугов П.А.	112, 118
Л	
Лазарев В.Б.	49
Лазарева С.Г.	204
Лазукин А.В.	234
Ларионов А.С.	204
Ларичкин М.В.	53
Лебедев С.В.	38
Лебедев Ю.А.	139, 144
Левашев П.Р.	41
Левашова М.Г.	48, 211, 214
Левин И.В.	42
Леонов В.М.	32, 42
Леонтьев Д.С.	220
Летунов А.А.	198
Летунов А.Ю.	48, 211
Лизунов А.А.	54, 60
Лизякин Г.Д.	140
Лисица В.С.	48, 211, 214, 220
Лисовой П.	74
Ловелл Дж.	212

Ловцов А.С.	142
Логвиненко В.П.	198
Ломов К.А.	53, 64, 65
Лубенченко А.В.	95
Лукаш В.Э.	218
Лукашевский М.В.	95, 234
Лукоянова А.В.	62
Лутченко А.В.	42
Лысенко С.Е.	47
Ляо Ю.	191
М	
Мазуль И.В.	32
Майстренко Д.А.	142
Макаров М.А.	181, 182, 183
Макеев Н.Г.	121
Максимов В.В.	54
Малахов Д.В.	198
Малютин А.Ю.	226
Мамышев В.И.	121
Мартазов Е.С.	233
Мартыненко Ю.В.	95, 234
Мартынова И.А.	137
Мартьянов А.К.	164
Марусов Н.А.	160
Марченков А.Ю.	95
Маслаков И.Д.	141
Маслов В.В.	121
Матвеев Ю.И.	185
Медведев А.Э.	146, 173
Медников А.А.	231
Мейстер А.К.	54
Мельник А.Д.	38, 43, 66
Мельников А.В.	47, 72, 81, 82, 83, 84, 85, 87
Мельников А.Д.	140
Мещанинов С.А.	132, 202, 235
Мещеряков А.И.	75, 76, 104
Микенс А.	212
Милантьев В.П.	119, 152
Милехин Ю.М.	184
Минаев В.Б.	43, 62, 63, 66, 71, 73, 82, 91, 96, 206
Минашин П.В.	218
Минеев А.Б.	32, 43
Мирнов С.В.	33, 49
Миронов А.Ю.	204, 226, 227, 228, 230
Миронов М.И.	43
Миронова Е.Ю.	204, 226, 227, 229, 230
Мирошников И.В.	43, 66, 73
Митранкова М.М.	43

Митрофанов К.Н.	129, 131
Моисеев Д.В.	60
Морозов А.А.	212
Моряков И.В.	167, 196
Мурахтин С.В.	60
Мурсенкова И.В.	191
Мустафаев А.С.	177, 178
Мухин Е.Е.	48, 62, 63, 206
Мялтон В.В.	129
Мялтон Т.Б.	56
Н	
Нагорный Н.В.	204, 226, 227, 228, 229, 230
Науменко Н.Н.	56
Неверов В.С.	212, 213, 214
Немец А.Р.	47, 56
Немцев Г.Е.	202, 209, 224, 226, 229
Неудачин С.В.	80
Никитенко А.И.	117
Николаев А.И.	228, 229
Никулин В.А.	69
Новиков Л.А.	138
Новицкий А.А.	157
Новоходская Е.О.	105, 106, 107
Новохацкий А.Н.	43, 62, 63, 71, 206
Ноткин Г.Е.,	42
Нургалиев М.Р.	47, 56
О	
Обудовский С.Ю.	201, 205, 221, 223, 228, 233, 236, 238
Ойлер А.П.	140
Окотруб А.В.	173
Ольховская О.Г.	131
Онгена Дж.	34
Орешонок В.В.	88
Орлов М.Ю.	184, 192, 193
Орловский И.И.	239
Осин Д.	89
Отрощенко В.Г.	49
Ошуев К.Ю.	43
П	
Павлов С.И.	138
Павлова Г.С.	208
Панасенков А.А.	58, 69, 237
Панкратенко А.В.	221, 223
Парышкин Ю.А.	233
Пастухов А.А.	125
Пастухов А.В.	120
Патров М.И.	43, 62, 63, 66, 71, 91, 96

Пашарина О.Ю.	154
Перваков К.С.	125
Петров А.В.	43, 91, 96
Петров А.Е.	167
Петров В.Г.	219, 222
Петров В.С.	69
Петров Ю.В.	43, 62, 63, 66, 71, 73, 91, 96
Петрова М.Н.	104
Пименов И.С.	80
Пинженин Е.И.	67
Писарева Е.А.	120, 125
Пискарев И.М.	187
Питтс Р.А.	212
Пищулина П.А.	229
Плотников М.Ю.	173
Позняк И.М.	185
Полосаткин С.В.	203
Пономарев И.В.	114
Пономаренко А.М.	43, 91, 96
Попов Л.Г.	80
Попов С.С.	181, 182, 183
Попова А.Н.	178
Попова М.А.	206
Портнов Д.В.	201, 205
Портоне С.С.	204, 225, 226, 227, 228, 230
Поступаев В.В.	53, 64, 97
Преснякова Н.Н.	159
Пришвицын А.С.	49, 102, 103
Прохоров И.	74
Пурыга Е.А.	60
Р	
Раздобарин А.Г.	206
Разуменко Д.В.	38
Ральченко В.Г.	164, 235
Ращенко В.В.	88
Ревякин П.А.	202
Ригин А.В.	186
Ровенских А.Ф.	97, 183
Рогов А.В.	239
Рогозин К.А.	95, 163
Родин И.Ю.	32
Родионов Д.С.	99
Родионов Н.Б.	99, 100, 132
Родионов Р.Н.	202, 205, 209, 221, 224, 235
Родионова В.П.	235
Рожанский В.А.	43
Рой И.Н.	42, 80
Ромазанов Ю.А.	212, 214
Романников А.Н.	42, 100

Рыжаков Д.В.	56
С	
Савельев В.В.	149
Савкин В.Я.	54
Саврухин П.В.	74, 234
Садовничий Д.Н.	184
Самохвалов А.А.	116
Самцов Д.А.	181, 182, 183
Сандалов Е.С.	181, 182, 183
Саранча Г.А.	81, 83
Сарксян К.А.	167
Сарычев Д.В.	56
Сасоров П.В.	131
Сатунин С.Н.	143
Сафронов А.А.	150
Сахаров Н.В.	43, 62, 63, 66, 71, 73, 91, 96, 206
Свобода В.	81
Сдвиженский П.А.	214
Седов В.С.	164
Селяев Н.А.	233
Семенов А.М.	203
Семенов Е.В.	225
Семенов И.Б.	204, 225, 227, 230
Семенов О.И.	225
Семенов П.С.	77, 78
Сениченков В.А.	62
Сениченков И.Ю.	43
Сергеев В.Ю.	39
Сергеев Д.С.	56
Сергеев Н.С.	85, 155, 156, 162
Серов С.В.	208, 214, 216
Сизов Ю.Е.	235
Синельников Д.Н.	206
Синицкий С.Л.	181, 182, 183
Синкевич О.А.	174
Скворцова Н.Н.	198
Скляр В.Ф.	53, 97
Сковородин Д.И.	54, 97, 98
Скопинцев Д.А.	215
Скрекель О.М.	43, 66
Слива А.П.	95
Смирнов А.И.	38
Смирнов В.П.	140
Смирнов В.С.	140
Смирнова А.Р.	193
Соколов М.М.	42, 78
Соколов М.Н.	163
Солдаткина Е.И.	54, 60
Солихов Д.К.	174, 194
Соловей В.А.	62, 73
Соловьев К.В.	105, 106, 107

Соловьев Н.А.	47, 56
Соловьева Л.А.	225
Соломахин А.Л.	43, 54
Солоха В.В.	92
Сон Э.Е.	29
Сорокин А.В.	68
Сорокина Е.А.	160
Спицын А.В.	192, 217, 231
Степанов В.Д.	183
Степанов Н.О.	217
Степанов С.Б.	201
Степахин В.Д.	167, 198
Степин А.В.	77, 78
Степин В.П.	148
Степина С.П.	148
Стешов А.Г.	236
Стрелков П.С.	180
Стрижаков М.Г.	184, 192, 193
Строкин Н.А.	186
Ступишин Н.В.	68, 88
Субботин Г.Ф.	47, 94
Судников А.В.	53, 64, 65, 97
Суляев Ю.С.	203
Суслин С.В.	61, 115
Сухомлинов В.С.	177, 178
Сушков А.В.	42, 47, 77, 78
Сычугов Д.Ю.	47, 72
Т	
Тарасов С.В.	138
Таскаев С.Ю.	203
Татаренкова Д.И.	176
Татаринов А.В.	139
Таюрский А.А.	151
Тельнова А.Ю.	43, 66, 71, 73
Тимашева Т.П.	117
Тимирханов Р.А.	140
Тимофеев А.В.	175
Тимофеев И.В.	183
Тимошенко Н.И.	173
Тимшина М.В.	116, 126
Титов А.Ю.	139
Ткаченко Е.Е.	62, 63
Токарев В.А.	43, 71
Толоконников С.М.	125
Толоконский А.О.	227, 230
Толстихина И.Ю.	214
Толстяков С.Ю.	43, 48, 62, 63, 66, 71, 73
Топорков Д.А.	185
Трапезников А.Г.	235
Трубников А.С.	105
Тугаринов С.Н.	56, 208, 214, 216

Тукачинский А.С.	38
Тупотилов И.А.	95
Туркин А.В.	189
Тхе Тханг Нгуен	186
Тюхменева Е.А.	43, 66, 71, 73
У	
Уланов П.Ю.	191
Умнов А.М.	157
Умрихин Н.М.	55
Усманов Р.А.	140
Устюжанин В.О.	53, 64, 65, 97
Ф	
Федоренков Э.А.	54
Федоров В.А.	233
Федорович С.Д.	95, 163, 234
Франк А.Г.	143
Фридрихсен Д.С.	238
Фролов А.А.	113
Фролов А.Ю.	123
Х	
Хабанов Ф.О.	82, 87
Хайрутдинов Р.Р.	32, 218
Хайрутдинов Э.Н.	78
Харрасов А.М.	129
Харчев Н.К.	82, 87, 104, 167
Харьков М.М.	155
Хафизов Р.Р.	202
Хвостенко П.П.	42
Хилькевич Е.М.	66
Хобилов Д.У.	194
Хованский А.В.	215
Хомкин А.Л.	40
Храменков А.В.	74
Хрипунов Б.И.	159
Христо М.С.	52
Хромов Н.А.	43, 71
Хромов С.А.	190
Хуснутдинов Р.И.	212, 213
Ч	
Чан Куанг В.	95
Чеботарев Р.С.	175
Черкасов С.В.	47
Черкез Д.И.	217
Чернаков Ал.П.	63
Чернаков П.В.	62
Чернов В.М.	159
Черноштанов И.С.	60
Чернышев Ф.В.	38, 43, 66
Чесноков А.В.	141
Чечеткин В.М.	128
Чугунов И.Н.	66

Чудновский А.Н.	42
Ш	
Шабашов А.Ю.	216
Шавелкин М.А.	172
Шавелкина М.Б.	172
Шагайда А.А.	142
Шалашов А.Г.	153
Шахатов В.А.	158
Шашков А.Ю.	192
Шевелев А.Е.	38, 66
Шевцов Е.А.	161
Шевченко М.Ю.	164
Шелухин Д.А.	85, 94
Шереметьев К.Ю.	184
Шестаков Е.А.	74, 239
Ширяев В.Н.	150
Шиховцев И.В.	43, 141
Шишлов А.О.	131
Шиянков С.В.	236
Шлойдо А.И.	189
Шошин А.А.	203, 236
Шпатаковская Г.В.	136
Штелинг В.С.	95
Штокель Я.	81
Шулятьев К.Д.	43
Шумихин А.С.	40
Шурыгин В.А.	220
Щ	
Щеголев П.Б.	43, 66, 71, 73
Э	
Эпштейн И.Л.	139
Ю	
Юдин И.Б.	173
Юров В.Ю.	164
Я	
Яковлев Д.В.	54
Яницын Д.В.	138
Яхин Р.А.	112, 127
Яшин А.Ю.	43, 91, 92, 96