

В333
Д.44

ДАР ЛАБОРАТОРИИ №10

XI Всероссийская конференция

«ДИАГНОСТИКА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ»

ДВП-11



ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Федеральное агентство по атомной энергии

*Федеральное государственное унитарное предприятие государственный научный центр РФ
«Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»*

Российский научный центр «Курчатовский институт»

Инжиниринговый центр «СФЕРАтек»

13-18 июня 2005г.
г. Троицк, Московской области

68821

ОРГКОМИТЕТ

Э.А. Азизов (ГНЦ РФ ТРИНИТИ) - д.ф.-м.н., председатель
Ю.П. Арефьев (ГНЦ РФ ТРИНИТИ) - зам. председателя
С.Н. Аврорин (РФЯЦ ВНИИТФ) - академик
О.И. Бужинский (ГНЦ РФ ТРИНИТИ) - д.т.н., зам. председателя
Е.П. Велихов (РНЦ КИ) - академик
Р.И. Илькаев (РФЯЦ ВНИИЭФ) - академик
Э.П. Кругляков (ИЯФ СО РАН) - академик
В.А. Курнаев (МИФИ) - д.ф.-м.н.
В.М. Коржавин (Росатом) - к.ф.-м.н.
Г.А. Месяц (ФИ РАН) - академик
Н.А. Обысов (Росатом)
П.П. Пашинин (ИОФ РАН) - член-корр. РАН
В.П. Смирнов (РНЦ КИ) - академик
О.Г. Филатов (ГП НИИЭФА) - к.ф.-м.н.
В.Е. Черковец (ГНЦ РФ ТРИНИТИ) - д.ф.-м.н.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

О.И. Бужинский (ГНЦ РФ ТРИНИТИ) - д.т.н.
В.С. Заверяев (РНЦ КИ) - к.ф.-м.н.
В.И. Зайцев (ГНЦ РФ ТРИНИТИ) - д.т.н.
А.В. Красильников (ГНЦ РФ ТРИНИТИ) - д.ф.-м.н., зам. председателя
Л.М. Коврижных (ИОФ РАН) - д.ф.-м.н.
В.Д. Письменный - член-корр. РАН, председатель
М.И. Пергамент (ГНЦ РФ ТРИНИТИ) - д.ф.-м.н.
М.П. Петров (ФТИ РАН) - д.ф.-м.н.
В.Г. Смирнов (ГП НИИЭФА) - к.ф.-м.н.
А.С. Шиканов (ФИ РАН) - д.ф.-м.н.

ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМИТЕТ

В.В. Кузнецов (ГНЦ РФ ТРИНИТИ), председатель
А.А. Гостев (ГНЦ РФ ТРИНИТИ)
Ю.В. Соколов (ГНЦ РФ ТРИНИТИ)
Е.В. Тараскина (ГНЦ РФ ТРИНИТИ)
В.В. Шабарина (ГНЦ РФ ТРИНИТИ)



ПН, 13.06	Вре мя	Вторник 14.06	Вре мя	Среда 15.06	Вре мя	Четверг 16.06	Время	Пятница 17.06
14:00 РЕГИСТРАЦИЯ	9:00	РЕГИСТРАЦИЯ						
	10:00	Открытие конференц ии <u>Секция 10</u> Вуколов, Родионов, Мещеряков, Хильченко	10:00	<u>Секция 6</u> Миронов, Худолеев, Люблин, Жинкин, Белов, Алексеев	10:00	<u>Секция 3</u> Науменк о, Тугарин ов, Воронов , Лизунов, Шукшин а, Афонин	10:00	<u>Секция 8</u> Петров, Петров, Димитрено Потапов, Фаенов, Скобелев,
	10:20		12:00		12:00			
	12:00		12:00		12:00			
	ПЕРЕРЫВ							
12:20	<u>Секция 1</u> Белов, Бендер, Левин, Патров, Семенов	12:20	Суляев, Красильнико в Цуцких, Чугунов, Гин	12:20	Ветров, Иванов, <u>Секция 11</u> Моисеев , Моисеев , Зубарев	12:20	Горлов, Кунин, Стародубцев Чефонов, Гилёв,	
14:00		14:00		14:00		14:00		
ОБЕД								

19:00 ФУРШЕТ	15:00	<u>Секция 4</u> Полосаткин, Исаев, Гавриленко, Щеглов, Мухин	15:00	<u>Секция 9</u> Бондаренко, Ярцев, Бендер, Амосов, Гендаль	15:00	Хильчен ко, Титов, Василье в <u>Секция 12</u> Соколов , Степано в	15:00	Исаев Литвин Кравченко <u>Секция 5</u> Сарьчев, Волков,	
	16:40		16:40		16:40		16:40		
	ПЕРЕРЫВ								
	17:00	Мухин, Прокошев, <u>Секция 7</u>	17:00	<u>Секция 2</u> Вячеславов, Петров, Кузнецов, Кузнецов, Соломахин, Квашнин	17:00	Скопинц ев Драпико, Игоньки на, Шарнин	17:00	Готт, Шевелев Аверин Байков Закрьтие конференции	
	17:40	Беграмбеков Крашевская, Будаев					18:20		
19:00 БАНКЕТ									

ОГЛАВЛЕНИЕ

<u>СЕКЦИЯ 1.</u>		
ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ		
1.1	МГД-ДИАГНОСТИКА ДЛЯ ТОКАМАКА КТМ А.М. Белов, А.Г. Алексеев, Г.В. Шаповалов	19
1.2	ДАТЧИКИ МАГНИТНОЙ ДИАГНОСТИКИ ТОКАМАКА КТМ С.Е. Бендер, А.А. Кавин, Е.Г. Кузьмин, К.М. Лобанов,	19

1.3	И.А. Миронов, РЕКОНСТРУКЦИЯ ФОРМЫ И ЭНЕРГОСОДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ ПО МАГНИТНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М С.Е.Бендер, В.К.Гусев, А.В.Деч, Ю.А.Косцов, <u>Р.Г.Левин</u> , А.Б.Минеев, Н.В.Сахаров.	22
1.4	ДИАГНОСТИКА ФЛУКТУАЦИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПЛАЗМЕННОГО ШНУРА СФЕРИЧЕСКОГО ТОКАМАКА ГЛОБУС-М С.Е.Бендер, В.К.Гусев, А.В.Деч, В.Б. Минаев, И.А.Миронов, <u>М.И.Патров</u> , Ю.В.Петров	24
1.5	ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ СВЯЗАННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ВАН ДЕР ПОЛЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ ПОДАВЛЕНИЯ МГД НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ В ТОКАМАКЕ Ю.В. Митришкин, <u>И.Б. Семенов</u> , А.Г. Вертинский, Н.Л. Марусов, И.С. Сушин	26
<u>СЕКЦИЯ 2.</u> МИКРОВОЛНОВЫЕ И СУБМИЛЛИМЕТРОВЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ		
2.1	TWO-DIMENSIONAL PHASE CONTRAST IMAGING FOR SPACE AND TIME RESOLVED MEASUREMENTS OF SMALL-SCALE TURBULENCE ON LHD L.N. Vyacheslavov, K. Tanaka, C. Michel, A.L. Sanin, K. Kawahata, T. Akiyama	28

2.2	МОНИТОР СРЕДНЕХОРДОВОЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ <u>В.Г. Петров</u> , А. А. Петров, А. Ю. Малышев, В. К. Марков, А. В. Бабарыкин	29
2.3	СЕЛЕКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МИЛЛИМЕТРОВОГО И СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЕТОЧНЫХ СТРУКТУР А.В. Аржанников, П.В. Калинин, <u>С.А. Кузнецов</u> , С.Л. Сеницкий	32
2.4	ДВУХВОЛНОВАЯ КВАДРАТУРНАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ В ДИАГНОСТИКЕ ИМПУЛЬСНЫХ ПРОЦЕССОВ В ВОДОРОДНОЙ И ЭРРОЗИОННОЙ ПЛАЗМЕ <u>А.П. Кузнецов</u> , А.А. Голубев, Г.И. Козин, К.Е. Коротков, Т.Ю. Мутин, А.С. Савёлов, А.Д. Фертман	35
2.5	ДИСПЕРСИОННЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ С ТЕРМОЯДЕРНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ П.А.Багрянский, Р.В.Воскобойников, А.А.Лизунов, <u>А.Л. Соломахин</u> , А.Д.Хильченко.	38
2.6	СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ДИСПЕРСИОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА НА ОСНОВЕ CO ₂ ЛАЗЕРА П.А. Багрянский, Р.В. Воскобойников, В.Ф. Гурко, П.В. Зубарев, <u>А.Н. Квашнин</u> , А.А. Лизунов, А.Л. Соломахин, А.Д. Хильченко	39

	СЕКЦИЯ 3.	
	СПЕКТРОСКОПИЯ ПЛАЗМЫ	
3.1	СВЕТОСИЛЬНЫЙ СПЕКТРОМЕТР ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ НА БАЗЕ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ ЭШЕЛЛЕ. <u>Н.Н. Науменко, С.Н. Тугаринов.</u>	42
3.2	СПЕКТРОСКОПИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ НА УСТАНОВКЕ Т-11М. <u>С.Н. Тугаринов, Д.М. Кулаков, Н.Н. Науменко.</u>	43
3.3	СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ИОНОВ И СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ПЛАЗМЫ В СТЕЛЛАТОРЕ Л-2М <u>Г.С. Воронов, Е.В. Воронова</u>	44
3.4	MSE-ДИАГНОСТИКА ДЛЯ МНОГОХОРДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ β ПЛАЗМЫ В ГДЛ <u>Г.Ф. Абдрашитов, П.А. Багрянский, Д. Ден Хартог, И.А. Иванов, С.А. Корепанов, А.А. Лизунов</u>	47
3.5	ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ В СКРЕЩЕННЫХ $E \times H$ ПОЛЯХ С ПОМОЩЬЮ ЭШЕЛЛЕ-СПЕКТРОГРАФА <u>И.В.Иванов, Д.В.Мозгрин, А.М.Снегирев, И.К.Фетисов, Т.В.Шукшина.</u>	48
3.6	ОБНАРУЖЕНИЕ МИКРОТЕЧЕЙ ВОДЫ В КАМЕРЕ ИТЭР <u>А.Б.Антипенков, О.Н.Афонин, И.В.Визгалов, В.А.Курнаев, В.Н. Колесников</u>	51
3.7	ДИАГНОСТИКА ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ МЕТОДОМ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ НА УСТАНОВКЕ ПН-3. <u>С.И. Ветров, А.В. Спицин, Д.А. Шуваев, С.В.Янченков</u>	54

3.8	ИЗМЕРЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ РЕГИСТРАЦИИ СДВИГА ФЛЮОРЕСЦЕНЦИИ РУБИНА <u>А.В. Аржанников, В.В. Болдырев, А.В. Бурдаков, И.А. Иванов, В.С. Койдан, В.В. Поступаев, А.А. Шошин, А.Ф. Ровенских, С.В. Полосаткин, С.Л. Сеницкий</u>	56
	СЕКЦИЯ 4.	
	ЛАЗЕРНЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ	
4.1	МНОГОКАНАЛЬНАЯ СИСТЕМА ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ НА УСТАНОВКЕ ГОЛ-3 <u>С.В. Полосаткин, А.В. Бурдаков, М.В. Иванчивский, В.С. Койдан, В.К. Овчар, А.Ф. Ровенских, В.В. Семионов, М.Г. Федотов</u>	59
4.2	НАБЛЮДЕНИЕ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ СИЛЬНОЙ ФОНОВОЙ ЗАСВЕТКИ <u>Р.О. Бужинский, К.И. Земсков, А.А. Исаев, В.В. Савранский.</u>	62
4.3	ЛАЗЕРНО-СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ПЛАЗМЕ. ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ <u>В.П. Гавриленко</u>	63
4.4	ИЗМЕРЕНИЯ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ СОДЕРЖАЩЕЙ ГЕЛИЙ И АРГОН <u>Д.А. Щеглов, С.И. Ветров, И.В. Москаленко, А.А. Сковорода, Д.А. Шуваев</u>	66
4.5	ДИАГНОСТИКА ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ В ДИВЕРТОРЕ ТОКАМАКА ИТЭР. <u>Е.Е.Мухин, Г.Т.Раздобарин, М.М.Кочергин, С.Ю.Толстяков, В.В.Семенов</u>	68
4.6	РАЗРАБОТКА ЛАЗЕРНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ СТенок РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ УСТАНОВОК ТОКАМАК <u>Е.Е. Мухин, Б.В. Кутеев, Г.Т. Раздобарин, С.Ю. Толстяков</u>	70

4.7	ЛАЗЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА ЭВОЛЮЦИИ ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕРОДА, ПРОИСХОДЯЩЕЙ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ Д.В. Абрамов ¹ , С.М. Аракелян ¹ , А.Ф. Галкин ¹ , И.И. Климовский ² , А.О. Кучерик ¹ , В.Г. Прокошев ¹	72
СЕКЦИЯ 5.		
РЕНТГЕНОВСКАЯ ДИАГНОСТИКА.		
5.1	ДИАГНОСТИКА РАДИАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ НА ТОКАМАКЕ Т-10 Д.В. Сарычев, Л.Н. Химченко.	75
5.2	СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВОГО МИКРОСЕКУНДНОГО Z-ПИНЧА. Г.С. Волков, В.И. Зайцев, А.В.Карташов, Н.И.Лахтюшко, С.В.Захаров, А.А.Рупасов, А.С.Шиканов, М.И.Иванов, С.Ю.Александрин	77
5.3	МНОГОЭЛЕКТРОДНЫЙ ДЕТЕКТОР РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И.А. Барыков, Ю.В. Готт, М.М. Степаненко	78
5.4	РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВОСТАНОВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М. А.Е. Шевелев, И.Н. Чугунов, Д.Б. Гин, Д.Н. Дойников, А.Л. Изотов, И.А. Полуновский, В.О. Найденов, А.И.Чугунов	79
5.5	ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЫ МИКРОПИНЧЕВОГО РАЗРЯДА ПО ОСЛАБЛЕНИЮ ПОТОКА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ФОТОЭМУЛЬСИИ М.С. Аверин, А.Ю. Байков, О.А. Башутин, Е.Д. Вовченко, А.С. Дмитрусенко, Ли Саньвэй, А.С.Савёлов	81

5.6	РАСЧЁТ ОДНОКАНАЛЬНОГО БЫСТРОГО СПЕКТРОМЕТРА ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО КРИСТАЛЛА BaF ₂ А.Ю. Байков, В.И. Береснев, Ю.В. Журов, А.С. Савёлов	83
СЕКЦИЯ 6.		
КОРПУСКУЛЯРНЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ		
6.1	ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОВ В ПЛАЗМЕ ПО ПОТОКАМ АТОМОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ В МЭВ ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ. М.И. Миронов, А.В. Худолеев	85
6.2	ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПЕРИФЕРИИ ПЛАЗМЫ В ИТЭРЕ ПО ПОТОКАМ АТОМОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ. А.В. Худолеев, М.И. Миронов	87
6.3	ПРОГРЕСС В РАЗРАБОТКЕ ИНЖЕНЕРНОГО ПРОЕКТА СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ РЕАКТОРА ИТЭР ПО ПОТОКУ АТОМОВ В.И. Афанасьев, Д.Б. Гаркуша, А.И. Кисляков, С.С. Козловский, Е.Г. Кузьмин, Е. Ламзин, Б.В. Люблин, М.П. Петров, С.Я. Петров, Ф.В. Чернышев, Г.Е.Шаталов, С.В.Шелудяков	89
6.4	МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЫ ВСТРОЕННЫМ ФОЛЬГОВЫМ АНАЛИЗАТОРОМ НЕЙТРАЛОВ В УСТАНОВКАХ С МАГНИТНЫМ УДЕРЖАНИЕМ Д.В. Жинкин, В.А Курнаев	92
6.5	КОРПУСКУЛЯРНАЯ ДИАГНОСТИКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЦРН А.М. Белов, А.И. Маркин, В.А. Мыслин	94
6.6	ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ТЕПЛОВОЙ ДЕТЕКТОР НЕУДЕРЖИВАЕМЫХ АЛЬФА-ЧАСТИЦА. Г. Алексеев	97

6.7	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ НЕЙТРОННОЙ ЭМИССИИ В МНОГОПРОБОЧНОЙ ЛОВУШКЕ ГОЛ-3 <u>Ю.С. Суляев, А.В. Аржанников, А.М. Батраков, А.В. Бурдаков, И.А. Иванов, К.И. Меклер, В.В. Поступаев, А.Ф. Ровенских, С.В. Полосаткин, В.Я. Сазанский, С.Л. Синицкий.</u>	98
6.8	КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ДИЗАЙН МОНИТОРА НЕЙТРОННОГО ПОТОКА ИТЭР В ДИВЕРТОРНОЙ ЗОНЕ <u>Ю.А. Кашук, А.В. Красильников, Д.В. Просвирин, А.Ю. Цуцких, С.I. Walker</u>	100
6.9	ПРОГРЕСС В КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ РАЗРАБОТКЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕЙТРОННОЙ КАМЕРЫ ИТЭР <u>А.Ю. Цуцких, Д.В. Просвирин, А.В. Красильников, Ю.А. Кашук, К.И. Волкер</u>	101
6.10	ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ДЛЯ ИТЕР <u>И.Н. Чугунов, А.Е. Шевелев, Д.Б. Гин, Д.Н. Дойников, А.Л. Изотов, В.О. Найденев, И.А. Полуновский, А.И. Чугунов</u>	102
6.11	ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЯ <u>Д.Б. Гин, А.Е. Шевелев, Д.Н. Дойников, А.Л. Изотов, И.А. Полуновский, В.О. Найденев, И.Н. угунов, А.И. Чугунов</u>	105
СЕКЦИЯ 7.		
ДИАГНОСТИКА ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЫ		
7.1	МНОГОПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЙ ЗОНД ДЛЯ ПЛАЗМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ <u>Л.Б. Беграмбеков, П.А. Шигин, J. Gunn, J. Y. Pascal, C. Brosset</u>	106
7.2	ЗОНДОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРАНИЧНО-УСТОЙЧИВОГО ПРОФИЛЯ ПЛАЗМЫ В БИДИПОЛЬНОЙ ЛОВУШКЕ «МАГНЕТОР» <u>А.М. Вайтонене, В.В. Вайтонис, Д.Е. Вовченко, Г.В. Крашевская, В.А. Курнаев, Г.В. Ходаченко, М.М. Цвентух</u>	108

7.3	ИССЛЕДОВАНИЕ СУПЕРДИФФУЗИИ В ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЕ <u>В.П. Будаев</u>	111
7.4	INFRARED THERMOGRAPHY ON TORE-SUPRA ТОКАМАК <u>D. Guilhem, B. Adjeroud, C. Balorin, C. Desgranges, R. Mitteau, R. Reichle, H. Roche, S. Vallet</u>	113
СЕКЦИЯ 8.		
ДИАГНОСТИКА СИСТЕМ ИНЕРЦИАЛЬНОГО СИНТЕЗА		
8.1	МЕТОД АБСОЛЮТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПОТОКОВ ЛИНЕЙЧАТОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ НА УСТАНОВКЕ «ИСКРА-5». <u>В.П. Лазарчук, А.Н. Мунтян, В.М. Муругов, С.И. Петров, А.В. Сенник</u>	116
8.2	МЕТОДИКИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЛИНЕЙЧАТОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ НА УСТАНОВКЕ «ИСКРА-5». <u>В.П. Лазарчук, А.Н. Мунтян, В.М. Муругов, С.И. Петров, А.В. Сенник</u>	117
8.3	ИЗМЕРЕНИЕ РЕНТГЕНСПЕКТРАЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ, ОБЛУЧАЕМЫХ МОЩНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ. <u>И.Н. Бурдонский, В.В. Гаврилов, А.Ю. Гольцов, В.В. Димитренко, Н.Г. Ковальский, А.И. Магунов, Б.Н. Миронов, Т.А. Пикуз, И.Ю. Скобелев, А.Я. Фаенов, И.К. Фасахов</u>	118
8.4	РЕНТГЕНОВСКИЕ СПЕКТРЫ МИШЕНЕЙ В УСЛОВИЯХ ОБЛУЧЕНИЯ МОЩНЫМИ УЛЬТРАКОРОТКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ <u>Л.В. Антонова, Д.А. Вихляев, А.Л. Запысов, А.Г. Какшин, Е.А. Лобода, В.А. Лыков, В.Ю. Политов, А.В. Потапов, В.А. Пронин, А.А. Угоденко, О.В. Ч ефонов</u>	119

8.5	РЕНТГЕНОВСКИЕ ПЛАЗМЕННЫЕ САТЕЛЛИТЫ В ПИКО - И ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ. <u>А.Я. Фаенов</u> , Т.А. Пикуз, И.Ю. Скобелев, А.И. Магунов, В.С. Беляев, В.И. Виноградов, А.С. Курилов, А.П. Матафонов, В.С. Лисица, В.П. Гавриленко, С.А. Пикуз мл., К.И. Ким, Г.М. Милчберг	121
8.6	ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ПЛАЗМЫ, НАГРЕВАЕМОЙ СВЕРХИНТЕНСИВНЫМИ ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ. <u>И.Ю. Скобелев</u> , А.И. Магунов, Т.А. Пикуз, А.Я. Фаенов	122
8.7	ВЛИЯНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА ФОТОКАТОДА НА РАБОТУ ПРИБОРОВ С ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ <u>Т.В. Горлов</u> , А.М. Тронь	123
8.8	СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОЗРАЧНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО КОНВЕРТОРА, ОБЛУЧАЕМОГО ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ СУБНАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ. <u>А.В. Кунин</u> , С.А. Бельков, А.В. Бессараб, С.В. Бондаренко, Н.В. Жидков, С.В. Калипанов, Е.И. Митрофанов, Н.А. Суслов, В.А. Токарев	125
8.9	ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ СФЕРИЧЕСКИХ ЛАЗЕРНЫХ МИШЕНЕЙ. В.Д. Атаманенко, А.В. Бессараб, Г.А. Бондаренко, Г.В. Долголева, В.А. Жмайло, А.Г. Кравченко, В.В. Мисько, В.М. Муругов, Е.А. Новикова, А.С. Павлушин, И.В. Попов, <u>В.А. Стародубцев</u> , В.П. Стаценко	126
8.10	ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И СПЕКТРА БЫСТРЫХ ИОНОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ МИШЕНЕЙ УЛЬТРАКОРОТКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ УСТАНОВКИ СОКОЛ-П А.В. Потапов, А.В. Андрияш, Д.А. Вихляев, Д.А. Дмитров, А.Л. Запысов, А.Г. Какшин, И.А. Капустин, Е.А. Лобода, В.А. Лыков, В.А. Пронин, В.Н. Санжин, В.Н. Сапрыкин, А.А. Угоденко, <u>О.В. Чефонов</u> , М.Н. Чижков.	127

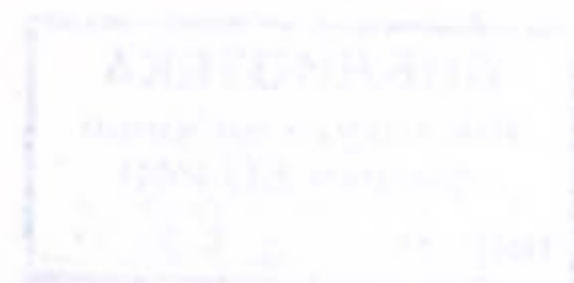
8.11	ПАРАМЕТРЫ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ЛАЗЕРА НА ОСНОВЕ БЫСТРОГО КАПИЛЛЯРНОГО РАЗРЯДА <u>О.Н. Гилев</u> , В.И. Осташев, В.Ю. Политов, В.И. Афонин, А.М. Гафаров, А.Л. Запысов, Н.А. Хавронин, Л.Н. Шамраев	128
8.12	ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ И ПУЛЬСНЫХ ЛАЗЕРОВ НА ПАРАХ МЕТАЛЛОВ В ДИАПАЗОНЕ 70-140 ГГц <u>А.А. Исаев</u> .	129
8.13	ФОТОХРОНОГРАФИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ИЗУЧЕНИЮ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВ НА ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКЕ «ИСКРА-5». С.А. Бельков, А.Г. Кравченко, А.В. Кунин, <u>Д.Н. Литвин</u> , В.М. Муругов, А.В. Сенник	130
8.14	ФОТОХРОНОГРАФИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ. <u>А.Г. Кравченко</u> , Д.Н. Литвин, В.В. Мисько, В.М. Муругов, А.В. Сенник, В.А. Стародубцев	131
СЕКЦИЯ 9.		
АППАРАТУРА, ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ		
9.1	ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ИЗ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА В УСЛОВИЯХ РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ <u>А.В. Бондаренко</u> , А.П. Дядькин, Ю.А. Кашук, А.В. Красильников, Г.А. Поляков, И.Н. Растягаев, Д.А. Скопинцев, С.Н. Тугаринов, В.П. Ярцев, В.А. Богатырев, А.Л. Томашук, С.Н. Клямкин, С.Е. Бендер	132
9.2	ИСПЫТАНИЯ ОПТОВОЛОКОННОГО ДАТЧИКА ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ А.В. Бондаренко, А.П. Дядькин, Ю.А. Кашук, А.В. Красильников, А.А. Олейников, А. Ю. Цуцких., <u>В.П. Ярцев</u>	135

9.3	ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ПРОХОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПО КАБЕЛЯМ С МИНЕРАЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ. С.Е. Бендер, П.В. Деменков, В.А. Степанов, П.А. Степанов	138
9.4	О РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ АЛМАЗНЫХ ДЕТЕКТОРОВ. В.Н. Амосов	140
9.5	БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ ДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ ГАЗА И.С. Глушков, Ю.Г. Гендель, Ю.А. Кареев, В.П. Новиков	141
СЕКЦИЯ 10. ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК		
10.1	СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАБОТ ПО ДИАГНОСТИКЕ ИТЭР К.Ю. Вуколов, В.С. Заверяев	143
10.2	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИОННО-ЦИКЛОТРОННОГО НАГРЕВА ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ НА ТОКАМАКЕ Т-11М. Н.Б. Родионов, Э.А. Азизов, А.Г. Алексеев, А.М. Белов, В.И. Гудков, А.В. Красильников, А.И. Маркин, С.В. Мирнов, В.А. Мыслин, А.А. Иванов, В.Г. Петров, В.П. Родионова, С.М. Сотников, С.Н. Тугаринов	144
10.3	ОБ ОТКЛОНЕНИИ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПО СКОРОСТЯМ ОТ МАКСВЕЛЛОВСКОГО ПРИ ЭЦР НАГРЕВЕ ПЛАЗМЫ В СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М РЕЖИМАХ С ВЫСОКИМИ УДЕЛЬНЫМИ ЭНЕРГОВКЛАДАМИ. А.И. Мещеряков, Д.К. Акулина, И.Ю. Вафин, Г.А. Гладков	146

10.4	АППАРАТУРА РЕГИСТРАЦИИ ДАННЫХ ДЛЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПЛАЗМЕННЫХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ИЯФ СО РАН А.Д. Хильченко, В.Ф. Гурко, П.В. Зубарев, А.Н. Квашнин, Д.В. Моисеев, В.А. Хильченко	148
СЕКЦИЯ 11. СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ		
11.1	КОМПЛЕКС АППАРАТНЫХ И ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКИ ГДЛ А.В. Аникеев, П.А. Багрянский, В.Ф. Гурко, П.В. Зубарев, А.Н. Квашнин, А.А. Лизунов, Д.В. Моисеев, Д.Н. Степанов, А.Д. Хильченко, В.А. Хильченко	151 ✓
11.2	АППАРАТУРА РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ИОННЫХ И АТОМАРНЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ ДАТЧИКОВ НА БАЗЕ ОДНО И МНОГОСЕКЦИОННЫХ ПРИЕМНИКОВ-КОЛЛЕКТОРОВ В.Ф. Гурко, П.В. Зубарев, А.Н. Квашнин, С.Г. Константинов, Д.В. Моисеев, А.Д. Хильченко, В.А. Хильченко.	154
11.3	КОНТРОЛЛЕР НАГРЕВНОГО ИНЖЕКТОРА ТОКАМАКА ГЛОБУС-М В.Ф. Гурко, П.В. Зубарев, А.Н. Квашнин, Д.В. Моисеев, А.Д. Хильченко, В.А. Хильченко.	157 ✓
11.4	СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ СТАЦИОНАРНОГО НЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ НА БАЗЕ ВАКУУМНОГО ТАНДЕМА А.Д. Хильченко, В.Ф. Гурко, П.В. Зубарев, А.А. Иванов, А.Н. Квашнин, Д.В. Моисеев, В.А. Хильченко	160
11.5	СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ДАННЫХ В УСТАНОВКЕ ТЕРМОДЕСОРБЦИОННОГО АНАЛИЗА Н.В. Титов, П.А. Шигин	163

11.6	СИСТЕМА КОНТРОЛЯ, РЕГИСТРАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ Ю.П. Арефьев, Р.П. Васильев, Л.Н. Любенко, М.М. Мурачев, В.П. Романюк, С.М. Сотников, И.Г. Стрижова	166
СЕКЦИЯ 12.		
ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ		
12.1	ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ РАБОТЫ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ РАЗЛИЧНЫХ УСТАНОВОК УТС Г.Б. Игонькина, М.М. Соколов	168
12.2	ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И СБОРА ДАННЫХ УСТАНОВКИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ ЛОВУШКА (ГДЛ ИЯФ СО РАН) А.В. Аникеев, П.В. Зубарев, А.А. Лизунов, Д.В. Моисеев, Д.Н. Степанов, А.Д. Хильченко	171
12.3	ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПОДБОРА В РЕШЕНИИ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ РАДОНА ДЛЯ НЕЙТРОННОЙ ТОМОГРАФИИ ИТЕР. А.В. Хованский, Д.А. Скопинцев, С.А. Кузьмина	174
12.4	РЕКОНСТРУКЦИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППАРАТА МНОГОМЕРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ. Е.А. Драпико, К.И. Байструков, В.М. Павлов, Л.Н. Тихомиров, И.Л. Тажибаева	176
12.5	ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ УНИФИЦИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ЗОНДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРОФИЛЯ ПУЧКОВ В ИНЖЕКТОРАХ УСТАНОВОК Т-10, ТУМАН-3М, ГЛОБУС-М Г.Б. Игонькина, М.М. Соколов, Г.Н. Тилинин	178

12.6	МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ С ДВУХЧАСТОТНОГО ИМПУЛЬСНОГО РАДАР-РЕФЛЕКТОМЕТРА НА ТЕРМОЯДЕРНОЙ УСТАНОВКЕ ТИПА ТОКАМАК В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ. А.В. Шарнин, Ю.Н. Голобоков, А.А. Мезенцев, К.И. Байструков, В.М. Павлов, Л.Н. Тихомиров, И.Л. Тажибаева.	181
------	--	-----





ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ.

1.1 МГД-ДИАГНОСТИКА ДЛЯ ТОКАМАКА КТМ

А.М. Белов¹, А.Г. Алексеев¹, Г.В. Шаповалов²

¹ ФГУП «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», 142190 г. Троицк, Россия, abelov@triniti.ru

² ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК, 490021 г. Курчатов, Республика Казахстан

В работе представлен проект МГД-диагностики для токамака КТМ, и некоторые результаты тестовых испытаний созданных для КТМ комплектов электромагнитных датчиков.

Два идентичных комплекта ЭМД в КТМ предназначены для исследования корреляции между интенсивностью радиационных потерь, тепловых потоков, вытекающих на диафрагму, и развитием МГД-возмущений плазмы (развитие неустойчивости срыва, запертой моды и др.). Также ЭМД позволят определить пространственную структуру магнитных возмущений плазмы и обеспечат проведение рутинных измерений МГД-активности плазмы в течение разряда КТМ.

ЭМД устанавливаются внутри вакуумной камеры КТМ. Для этого внутри ВК устанавливаются металлические защитные трубки, которые имеют открытый на атмосферу выходы, через которые осуществляется ввод ЭМД. Такая установка ЭМД внутри ВК обеспечивает как возможность регистрации быстрых процессов, протекающих в плазме токамака, так и возможность замены ЭМД без вскрытия ВК.

В КТМ будут установлены два комплекта ЭМД, которые являются идентичными и будут размещены в двух полоидальных сечениях ВК, разнесенных вдоль тороидального обхода ВК на угол $\Delta\phi = 72^\circ$. Комплект ЭМД состоит из 32 датчиков, позволяющих регистрировать изменение полоидальной компоненты магнитного поля плазменного шнура КТМ.

Тестовые испытания ЭМД проводились на стенде и токамаке Т-11М. В качестве системы сбора данных использовалась 32-х канальная синхронная ССД с 12 разрядными АЦП и частотой дискретизации до 40 МГц.

Литература.

1. А.М. Белов, И.Н. Макашин. Физика плазмы. Т. 30 (2004), с.195.

1.2 ДАТЧИКИ МАГНИТНОЙ ДИАГНОСТИКИ ТОКАМАКА КТМ

С.Е. Бендер, А.А. Кавин, Е.Г. Кузьмин, К.М. Лобанов, И.А. Миронов

ФГУП «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», 196641, г. Санкт-Петербург, п. Металлострой, промзона «Металлострой», дорога на Металлострой, д. 3; benderse@niiefa.spb.su

Датчики магнитной диагностики (датчики МД), разработанные для токамака КТМ, обеспечивают следующие требования:

- высокую надёжность работы датчиков в процессе эксплуатации токамака;
- возможность определения с высокой точностью пространственных (~ 1 мм) и угловых ($\sim 30^\circ$) координат датчиков при установке их на токамак;
- максимальное приближение конструктивных решений датчиков к требованиям ИТЭР.

В качестве основного материала для катушек датчиков магнитной диагностики ИТЭР выбран кабель с минеральной изоляцией (российский аналог - кабель КНМСС) [1]. Он представляет собой проводник с магниезиальной изоляцией в герметичной оболочке из нержавеющей стали и с внешним диаметром от 0.5 до 5.0 мм. Для датчиков КТМ выбран кабель с проводником из нержавеющей стали и оболочкой диаметром 1.5 мм. Кабель сохраняет работоспособность при длительном прогреве до 600°C . Для использования в условиях высокого вакуума предусмотрена дополнительная подготовка и обработка поверхности оболочки кабеля.

Датчики МД размещаемые внутри вакуумной камеры (двухкомпонентные магнитные зонды, секторные петли, датчики напряжений обхода, градиента полоидального магнитного потока, диамагнитного потока, горизонтального и вертикального магнитного потока) выполнены в виде катушек и петель. Для повышения надёжности датчиков не только их обмотки, но и выводные концы в виде витых пар до панелей клеммников, расположенных вне вакуумной камеры, выполнены единым кабелем.

С целью обеспечения стабильности характеристик двухкомпонентных магнитных зондов в процессе эксплуатации токамака и возможности точного определения их координат и углов наклона магнитных осей, датчики имеют металлический корпус с базовой поверхностью для установки геодезического знака и угломера [2].

Датчики, расположенные вне вакуума (пояса Роговского), выполнены намоткой провода с полиимидной изоляцией (диаметр проводника 0,20 мм) в два слоя на тонкостенный металлический каркас.

Диагностика формы и положения плазмы предъявляет высокие требования к проведению измерений. Для удовлетворительного контроля границы плазмы необходимо обеспечить погрешность измерения не более 3% [3]. Металлические корпуса магнитных зондов существенно влияют на их частотные свойства и соответственно на точность измерений. Для решения этой проблемы были измерены амплитудная и фазовая частотные характеристики головного образца зонда (рис.1), определена его передаточная функция и корректирующее звено.

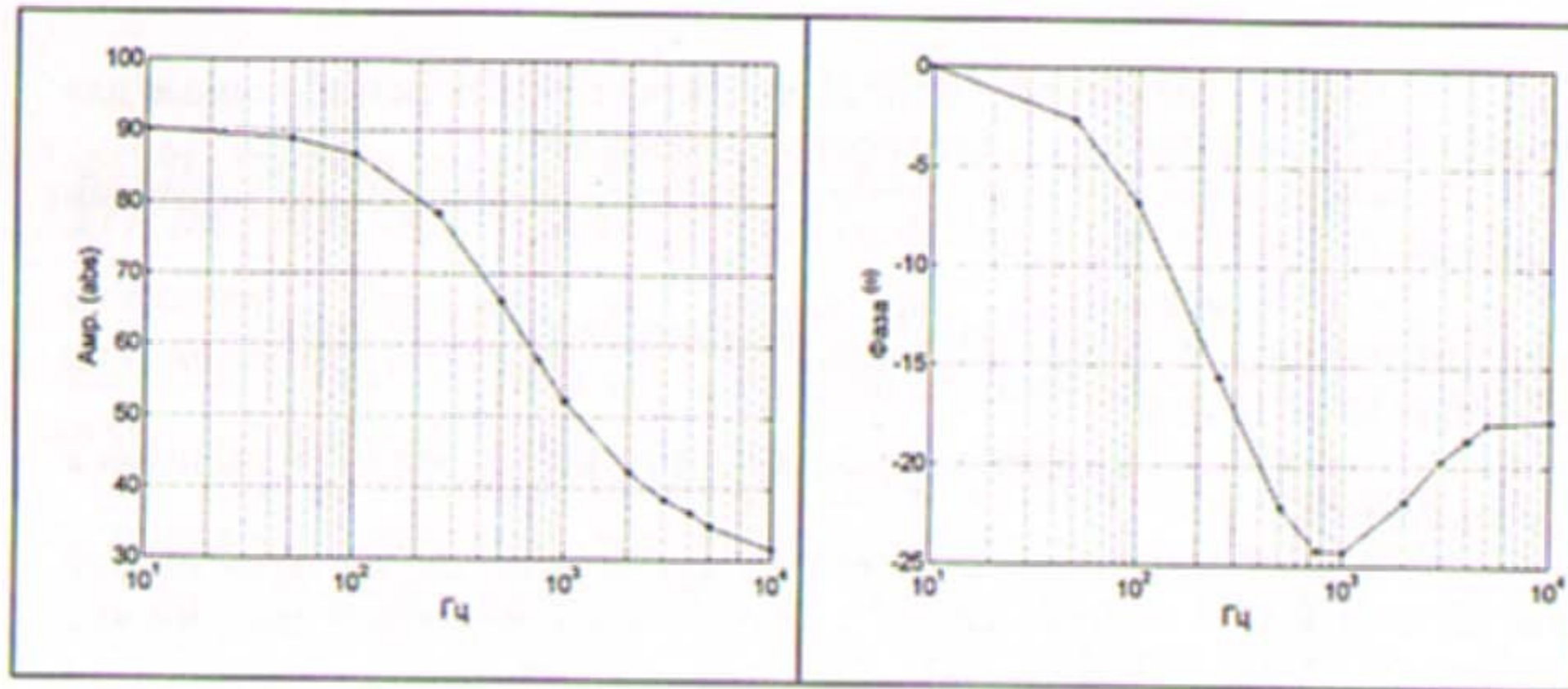


Рис. 1. Амплитудная и фазовая частотные характеристики двухкомпонентного магнитного зонда (катушка измеряющая нормальную к вакуумной камере компоненту поля).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S.E. Bender, V.M. Chernov, P.V. Demenkov, O.A.Plaksin, V.A. Stepanov Plasma Devices and Operations, 2003, vol. 11, № 3, pp. 185-191.
2. S.E. Bender, V.I. Bushuev, E.G. Kuzmin, I.A. Mironov, A.V.Nikiforovsky, Plasma Devices and Operations, 2001, vol. 9, № 1-2, pp. 143-157.
3. И. В. Зотов, И. С. Персиянов, Д. Ю. Сычугов, Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2004, вып. 4, с. 44-54.

1.3 РЕКОНСТРУКЦИЯ ФОРМЫ И ЭНЕРГОСОДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ ПО МАГНИТНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М

С.Е. Бендер¹, В.К. Гусев², А.В. Деч², Ю.А. Косцов¹, Р.Г. Левин²,
А.Б. Минеев¹, Н.В. Сахаров².

¹НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, 196641, С.-Петербург, Россия

²ФТИ РАН им. А.Ф.Иоффе, 194021, г. С.-Петербург, Россия

Первые эксперименты на сферических токамаках показали их преимущества по сравнению с обычными токамаками. Тем не менее, физика высокотемпературной плазмы в условиях малого аспектного отношения до сих пор мало изученной.

Еще до проведения первых экспериментов на сферических токамаках стало ясно, что в условиях сильной тороидальности появляется целый ряд новых возможностей управления параметрами плазмы с помощью внешних магнитных полей.

Условия малого аспектного отношения предоставляют ряд дополнительных возможностей по измерению кинетических параметров плазмы и профилей плотности тока с помощью внешних магнитных измерений на основе модели равновесия.

В 2004 году на токамаке Глобус-М была произведена модернизация магнитной диагностики. Внутри вакуумной камеры были установлены 14 полнообходных магнитных петель для измерения напряжения на обходе вакуумной камеры и полоидального магнитного потока (до этого на токамаке уже находились 7 магнитных петель). Модернизация магнитной диагностики позволила получить первые результаты реконструкции равновесия плазмы. На форму внешней магнитной конфигурации заметное влияние может оказывать рассеянное поле соленоида.

Расчеты равновесия и обработка экспериментальных данных производилась с помощью кода равновесия EFIT, адаптированного для персонального компьютера. Была создана модель вакуумной камеры, центрального соленоида и обмоток полоидального магнитного поля токамака Глобус-М. Входными параметрами кода являются сигналы поясов роговского и сигналы магнитных петель (полоидальный магнитный поток). Ток по вакуумной камере измеряется с помощью того же комплекта петель.

Результаты обработки экспериментов показали существенное влияние магнитной конфигурации на параметры разряда. Особое внимание было уделено переходу плазмы из лимитерной в диверторную конфигурацию. При «отрыве» плазмы от стенки интенсивность примесных линий в экспериментах минимум в два раза и останавливалась стационарной.

Характер временной зависимости интенсивности свечения углерода и кислорода носил абсолютно нестационарный характер.

Уже на первом этапе обработки экспериментальных данных было установлено, что плазменный разряд заканчивается на токамаке Глобус-М в результате срыва из-за неконтролируемого вертикального движения. Произведенный анализ показал, что такое смещение плазмы возникает из-за того, что плазма в таких условиях при вертикальном сдвиге имеет возможность создавать такое распределение полоидального магнитного потока, которое «оставляет» петли управления токамаком на одной магнитной поверхности. Таким образом, при вертикальном смещении плазмы датчик вертикального положения плазмы выдает нулевой сигнал. В ряде экспериментов была подкорректирована программа вертикального смещения в соответствии с результатами обработки предыдущих экспериментов, что позволило существенно увеличить длительность разряда и в нескольких разрядах получить резистивный разряд вместо срыва.

В ряде омических экспериментов были зарегистрированы высокие значения $\beta_p \approx 0.6$. Данные эксперименты производились в низком магнитном поле, что позволяло работать при значениях запаса устойчивости на границе плазмы $q_{95} \approx 3-4$. В таких режимах магнитная ось сильно смещается наружу, то есть минимум модуля полоидального магнитного поля сильно смещен в область слабого магнитного поля, а, кроме того, полоидальное и тороидальное магнитные поля на границе плазмы становятся соизмеримым. Реконструкция полоидальных магнитных полей показала, что в таких режимах образуется магнитная яма.

С помощью реконструкции равновесия в режимах с небольшими значениями вытянутости измерено энергосодержание плазмы. Были обработаны разряды с источниками дополнительного нагрева с помощью нейтрального инжектора и высокочастотного нагрева на первой гармонике ионно-циклотронной частоты. Первые результаты экспериментов показали слабую чувствительность данной диагностики к нагреву ионов. Это объясняется исходными параметрами омического разряда перед нагревом. В плазме токамака Глобус-М температура ионов в 5-6 раз ниже, чем температура электронов. Таким образом, нагрев ионов на 100 процентов приводит к росту суммарной температуры всего на 10-15 процентов, что крайне сложно зарегистрировать в условиях изменяющейся плотности. Произведена обработка экспериментов с плазменной пушкой.

1.4 ДИАГНОСТИКА ФЛУКТУАЦИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПЛАЗМЕННОГО ШНУРА СФЕРИЧЕСКОГО ТОКАМАКА ГЛОБУС-М

С.Е. Бендер², В.К. Гусев¹, А.В. Деч¹, В.Б. Минаев¹, И.А. Миронов²,
М.И. Патров¹, Ю.В. Петров¹

¹ ФТИ РАН им. А.Ф. Иоффе 194021, С.-Петербург, ул. Политехническая, д. 26, e-mail: michael.patrov@mail.ioffe.ru

² НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, 196641, С.-Петербург, Металлострой, промзона "Металлострой", дорога на Металлострой, д.3

В докладе описан диагностический комплекс флуктуаций магнитного поля плазменного шнура сферического токамака Глобус-М [1]. Данный диагностический комплекс спроектирован и создан сотрудниками НИИЭФА им. Д.В. Ефремова и ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. Основной задачей успешно решаемой данным комплексом является регистрация флуктуаций магнитного поля плазменного шнура токамака и восстановление пространственной структуры развивающихся МГД возмущений на всех стадиях разряда. Комплекс состоит из полоидального и тороидального массивов внутрикамерных магнитных зондов, включающих в себя 28 и 16 зондов соответственно. Массивы зондов позволяют диагностировать структуру МГД возмущений с полоидальным и тороидальным числом до $m=6$ и $n=5$ соответственно. Оба массива зондов ориентированы на наблюдение тангенциальной составляющей флуктуации магнитного поля плазмы, тороидальный массив дополнительно оснащен катушками для наблюдения нормальной составляющей.

Эксперименты с использованием части данного диагностического комплекса начаты в 2002 году. С начала 2005 года экспериментальные кампании проводятся с использованием всех возможностей системы. Диагностика структуры МГД возмущений плазменного шнура сферического токамака имеет ряд особенностей и сложностей. За время работы массивов зондов на токамаке Глобус-М, был разработан способ обработки сигналов зондов, включающий методы математической фильтрации, позволяющий восстанавливать структуру МГД возмущений в условиях сильной неоднородности тороидального магнитного поля.

В докладе приведены результаты исследований МГД возмущений, развивающихся в различных стадиях разряда токамака, после различной подготовки вакуумной камеры, в омическом режиме и режиме с дополнительным нагревом плазмы. Структура некоторых из регистрируемых возмущений не находит объяснения в рамках модели винтовых неустойчивостей [2].

Литература

1. V.A. Belyakov, V.A. Divavin, N.Ya. Dvorkin et al. Preprint ФТИ РАН 1629, СПб, 1994.
2. V.Gusev, F.Alladio, A.W.Morris, Basics of Spherical Tokamaks and Progress in European Research, Plasma Phys. Contr. Fus., 2003, v.45, 12.1, A59-A58.

1.5 ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ СВЯЗАННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ВАН ДЕР ПОЛЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ ПОДАВЛЕНИЯ МГД НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ В ТОКАМАКЕ

Ю.В. Митришкин¹, И.Б. Семенов², А.Г. Вертинский³, Н.Л. Марусов²,
И.С. Сушин³

¹Институт проблем управления РАН,

²Институт Ядерного Синтеза РНЦ «КИ», 123182, г. Москва, пл. Курчатова 1

³Московский Физико-Технический Институт

Развитие крупномасштабных Магнито Гидродинамических (МГД) неустойчивостей в плазме токамака может происходить на так называемых резонансных магнитных поверхностях $q(r_s)=m/n$, т.е. на поверхностях, где силовая линия магнитного поля, обращаясь вокруг тора счетное количество раз, замыкается сама на себя (здесь $q(r_s)$ – запас устойчивости, r_s – радиус рациональной поверхности, $m, n = 1, 2, 3, 4, \dots$ – количество оборотов силовой линии в полоидальном и тороидальном направлениях соответственно). Экспериментально показано, что в конкретном разряде токамака из бесконечно набора возможных неустойчивостей одновременно происходит возбуждение не более 4-6 резонансных магнитных поверхностей, например, с $q(r_s)=m/n=1/1, 2/1, 3/1, 3/2, 4/1$.

Было также показано, что динамика развития этих связанных неустойчивостей имеет много общих черт с динамикой развития колебаний в связанной системе нелинейных осцилляторов Ван дер Поля (ВДП). К числу общих черт можно отнести:

- Наличие биения нескольких частот вдали от точки захвата частоты (locking point);
- Усиление инжектированного возмущения (т.е. возмущения наведенного внешними магнитными полями от систем обратных связей или связанных с не идеальностью магнитной системы токамака (Error or feedback fields), а также наведенными внутренними гармониками возмущений других резонансных поверхностей);
- Насыщение амплитуды колебаний;
- Неоднородное вращение фазы возмущений вблизи точки захвата (вблизи locking point);
- Захват частоты внешнего инжектированного возмущения (locking phenomena).

Последнее явление наиболее опасно, т.к. переход в Locked моду часто приводит к развитию неустойчивости срыва и прекращению существования плазменного шнура. Характерные времена этих процессов – десятки

микросекунд, что лежит за пределами полосы частот современных систем стабилизации крупномасштабных МГД неустойчивостей.

В работе рассмотрена динамика развития автоколебаний в системе из двух, трех и шести связанных ВДП генераторов. На основе предложенной модели N связанных ВДП генераторов разработан многомерный регулятор обратной связи с использованием принципов компенсации внутренних перекрестных обратных связей объекта и введения демпфирующих обратных связей по каждому каналу управления. Методом математического моделирования для перечисленных случаев показано, что разработанный регулятор гарантированно подавляет автоколебания в системе ВДП генераторов в достаточно широком диапазоне изменения параметров объекта управления (имеет хорошие робастные свойства). Разработанная нелинейная система управления с обратной связью позволяет предотвратить развитие неустойчивых МГД возмущений в плазме токамака.



МИКРОВОЛНОВЫЕ И СУБМИЛЛИМЕТРОВЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ.

2.1 TWO-DIMENSIONAL PHASE CONTRAST IMAGING FOR SPACE AND TIME RESOLVED MEASUREMENTS OF SMALL-SCALE TURBULENCE ON LHD

L.N. Vyacheslavov¹, K. Tanaka², C. Michel², A.L. Sanin¹, K. Kawahata²,
T. Akiyama²

¹ Budker Institute of Nuclear Physics, 630090, Novosibirsk, Russia

² National Institute for Fusion Science, Toki, 509-5952 Japan

Recently a novel two-dimensional (2-D) modification of the phase contrast interferometry (PCI) was advanced [1]. The 2-D PCI offers new possibilities for temporally and spatially resolved observation of plasma microturbulence. The idea of the modification lies in two-dimensional structure of electrostatic turbulence where transverse correlation lengths are much shorter than longitudinal ones. Such turbulence can be thought of as random set of long filaments orientated along the magnetic field. Due to magnetic shear, the degree of field-line twist is different at different locations along the viewing line within plasma. With probe beam passing the plasma vertically from the bottom through plasma center to the top, the top view of fluctuation associated with some particular location looks like a ladder whose bars are oriented strictly along the magnetic field. Provided that focal depth of the PCI is larger than plasma size, the image of density fluctuations appears uniformly line-integrated and constitutes a pile of differently oriented ladders. Analysis of elementary pictures from the line-of-sight integrated image can be performed using 2-D-spatial Fourier transform. Then Cartesian coordinates of 2-D Fourier transform are converted to polar ones so polar angles are matched one-to-one with radial locations of fluctuation and polar radii with wavenumbers of fluctuations respectively. This technique in combination with 2-D multichannel detector array yields radial distribution of plasma density fluctuations with high temporal resolution determined by sampling rate and detector bandwidth. Temporal resolution offers new possibilities relative to earlier use of magnetic shear by 1-D methods [2, 3], which can produce radial distribution only on shot-by-shot basis. Now analysis of the PCI images sampled with high frame rate and their 2-D spatial Fourier transforms permits to obtain radial distribution of V_{θ}^E and V_{θ}^E in

addition to \tilde{n} . The analysis uses the fact that poloidal and radial motions correspond respectively to shift and rotation of elementary 1-D structures in the setup where the probe beam crosses plasma through the center. LHD has the additional benefit for improvement of the longitudinal resolution due to large magnetic shear: the magnetic field line direction projected perpendicular to the line of sight varies from -40 to 50 degrees as the probe beam travels from the plasma bottom to the plasma top within the last closed flux surface. The high-resolution 2-D spectral estimation can be used instead of 2-D Fourier analysis to improve spatial resolution at the expense of much longer computation time.

The 2-D PCI technique is realized with cw CO₂ laser (10W, 10.6μm) and detector array of 8 by 6 element matrix of CdHgTe (MCT) liquid nitrogen cooled photoconductors. The PCI images are sampled at 1MHz so the images or associated spectral distributions, when assembled in a movie, can present dynamic radial structure of turbulence. Results obtained on plasma illustrate the use of the 2-D PCI for microturbulence observations on LHD.

REFERENCES

- [1] A.L. Sanin, K. Tanaka, L.N. Vyacheslavov, K. Kawahata, T. Akiyama, "Two-dimensional phase contrast interferometer for fluctuations study on LHD", presented at the 15th Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics, in San Diego, USA, 2004, *Rev. Sci. Instrum* 75, 3439, (2004)..
- [2] A. Truc, A. Quéméneur, P. Hennequin, D. Grésillon, "ALTAIR: An infrared laser scattering diagnostic on the TORE SUPRA tokamak", *Rev. Sci. Instrum.* Vol.63, pp. 3716-3724, 1992
- [3] S.Kado, T.Irie, K.Muraoka, K.Matsuo, K.Tanaka et al, "Improvements of the laser phase contrast method for measuring the spatial distribution of electron density fluctuation in Heliotron E", *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 34, pp. 6492-6500, 1995

2.2 МОНИТОР СРЕДНЕХОРДОВОЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ

В.Г. Петров, А. А. Петров, А. Ю. Малышев, В. К. Марков, А. В. Бабарыкин

ФГУП «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», 142190, г. Троицк, Московской обл., Россия

Разработан «бессбойный» одноканальный монитор среднечордовой плотности для измерения плотности плазмы в токамаках. Метод основан на измерении времени распространения микроволновых сигналов, прошедших через плазму. При достаточно большой частоте несущей (много большей плазменной частоты), измеряемое время распространения τ будет пропорционально среднечордовой электронной плотности независимо от профиля плотности:

$$\tau = \frac{\partial \Phi}{\partial \omega} = k \cdot \int_l n(l) dl, \quad (1)$$

где n – электронная плотность плазмы, в 10^{14} см^{-3} , τ – время задержки, в нс. В зависимости от способа, которым измеряется время задержки сигнала в плазме, можно выделить 2 метода. Первый метод – это метод с непосредственным измерением времени задержки (импульсный метод), когда непосредственно измеряется время распространения короткого (~5 нс) микроволнового импульса в плазме. Второй метод основан на измерении времени задержки с использованием первой части формулы (1), когда время задержки вычисляется через измерения разности фаз $\Delta\Phi_{12}$ между двумя волнами с близкими частотами ω_1 и ω_2 в плазме:

$$\tau \approx \frac{\Delta\Phi}{\Delta\omega} = \frac{\Delta\Phi_1 - \Delta\Phi_2}{\omega_1 - \omega_2} = \frac{\Delta\Phi_{12}}{\Delta\omega} \approx \frac{\Delta\Phi_1 \cdot \Delta\omega}{\omega_1}$$

При соответствующем выборе разности частот $\Delta\omega$ можно сделать так, что измеряемая разность фаз будет менее 2π во всем диапазоне измеряемых плотностей, что и обеспечит «бессбойность» измерений. Преимущество такого способа измерений времени задержки (по сравнению с импульсным методом) – это возможность повышения чувствительности измерений за счет появляющейся возможности фильтрации сигнала на достаточно высокой промежуточной частоте (~0.5-1 ГГц). Дополнительно появляется возможность регулировки динамического диапазона измерений

плотности за счет подбора (оптимизации) разности частот $\Delta\omega$. При импульсном же методе измеряемые времена задержки для малых токамаков оказываются в диапазоне 100 пс, что существенно ограничивает предельную точность измерения плотности.

В докладе приведены принципиальная схема монитора и его основные технические характеристики. В докладе также представлены результаты лабораторных испытаний монитора среднечордовой плотности и отдельные результаты, полученные на установке Т-11М с использованием описываемого прибора.

2.3 СЕЛЕКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МИЛЛИМЕТРОВОГО И СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЕТОЧНЫХ СТРУКТУР

А.В. Аржанников, П.В. Калинин, С.А. Кузнецов, С.Л. Синицкий

Институт ядерной физики СО РАН им. Г.И.Будкера, 630090 г. Новосибирск,

Селективные элементы на основе 1-мерных и 2-мерных сеток из линейных проводников с шагом расположения g много меньше длины волны λ находят успешное применение в технике миллиметровых и субмиллиметровых волн [1-3], включая квазиоптические системы СВЧ-диагностики плазмы.

Нечувствительность 2-мерных сеток к поляризации падающего излучения определила их основное использование в качестве рефлекторов в многолучевых интерферометрах типа Фабри-Перо и составных интерференционных фильтрах [2, 3], в то время как высокая поляризационная селективность (при $g \ll \lambda$) 1-мерных сеток эффективно применяется главным образом в поляризаторах и делителях микроволновых пучков. Отметим, что в работах [4-6] нами было показано, что интерференционные структуры, составленные из 1-мерных сеточных поляризаторов со скрещенной ориентацией проводников в соседних сетках, обладают возможностью плавной перестройки своих спектральных характеристик за счет варьирования как зазоров между сетками, так и углов их скрещенности.

В первой части настоящей работы изложены основные элементы теории 1-мерных и 2-мерных сеток, а также реализуемых на их основе составных интерференционных фильтров типа Фабри-Перо (ФП) и перестраиваемых фильтров на скрещенных поляризаторах (СП). Отмечены технологические особенности изготовления в ИЯФ СО РАН сеток и сеточных фильтров на частотный диапазон 75 ГГц. Кроме этого, описан разработанный комплекс квазиоптических диагностик спектрального состава 4-мм излучения на установке ЭЛМИ (мазер на сильноточном ленточном РЭП, ИЯФ СО РАН) [7], включающий сеточные интерференционные фильтры в качестве рабочих элементов. Диагностический комплекс ЭЛМИ включает спектральные диагностики двух типов: 1) 4-х канальную, предназначенную для обзорных спектральных измерений, в которой используются четыре ФП-фильтра со сдвинутыми друг относительно друга полосами пропускания; 2) 1-канальную, содержащую СП-фильтр, который совмещен с гетеродинным спектроанализатором с целью проведения детальных измерений спектра генерации лазера с разрешением 20 МГц в пределах полосы пропускания СП-фильтра. Для ФП-фильтров основой служат 2-мерные медные сетки, нанесенные на тонкие текстолитовые подложки. Данные фильтры работают на 4-м порядке интерференции и имеют следующие геометрические параметры: период g , ширина a и толщина t сеточных проводников

соответственно равны $g=1$ мм, $a=0.32$ мм, $r=0.018$ мм, рабочая апертура сеток – 90×90 мм. Установленные в квазиоптическом тракте такие ФП-фильтры выделяют в спектре пропускания полосу шириной около 600 МГц при ослаблении в максимуме 4 дБ и контрасте 25 дБ. Относительное смещение полос пропускания соседних каналов 4-канальной диагностики на величину ~ 0.9 ГГц обеспечивается отстройкой значения межсеточных зазоров L в соответствующих ФП-фильтрах на величину $\Delta L \cong 100$ мкм при среднем значении $\langle L \rangle \cong 8$ мм. В свою очередь, СП-фильтр состоит из трех плоскопараллельных сеточных поляризаторов с рабочим диаметром 110 мм, изготовленных из золоченых вольфрамовых проволочек диаметром $a=70$ мкм при шаге расположения проволочек $g=220$ мкм. Указанные геометрические параметры поляризаторов обеспечивают на частотах в области 75 ГГц ослабление Е-поляризованной падающей волны не менее, чем на 30 дБ, и пропускание Н-волны близкое к 100%. Конструкция СП-фильтра обеспечивает прецизионное смещение сеток друг относительно друга и поворот центральной сетки вокруг оси фильтра, что дает возможность варьировать положение и ширину $\Delta\nu$ полосы его пропускания соответственно. При работе на втором порядке интерференции экспериментально измеренное минимальное значение $\Delta\nu$ составляет 0.3 ГГц.

Во второй части работы приводятся результаты тестирования сеток и сеточных интерференционных фильтров, изготовленных по технологии микролитографии. Данная технология обеспечивает требуемую топологию сеточных ячеек вплоть до размеров 2.5 мкм на подложках диаметром до 100 мм. При использовании в качестве подложек дисков из слабо поглощающих материалов (кремний, кварц, сапфир) микролитография применима для изготовления сеточных структур для широкого диапазона длин волн: от нескольких миллиметров до десяти микрометров.

В заключительной части работы рассмотрены вопросы, связанные с возможным использованием сеточных структур для решения возникшей в ходе экспериментов на токамаке Т-10 проблемы выделения полезного зондирующего сигнала лазерного интерферометра на рабочей длине волны 337 мкм ($\nu \cong 890$ ГГц) на фоне мощного излучения гиротронов, которые используются для ЭЦР нагрева плазмы на частотах 130–140 ГГц. При использовании сеточных структур в качестве режекторных фильтров главная задача состоит в недопущении потерь полезного сигнала с частотой 890 ГГц на величину более, чем 2 дБ, при подавлении гиротронного излучения более, чем на 30 дБ. В качестве приемлемых решений указанной проблемы можно отметить применение высококонтрастных интерференционных фильтров с узкой полосой пропускания на длине волны 337 мкм и использование одиночных 1-мерных проволочных сеток с тщательно подобранными параметрами. В последнем случае, согласно предварительным расчетам в численном пакете типа ANSYS, сетка из золоченых проволочек диаметром $a=100$ мкм при оптимальном шаге расположения $g=325$ мкм обеспечивает ослабление на уровне ~ 22 дБ для плоской Е-поляризованной волны с

частотой 130–140 ГГц, в то время как волна с частотой 890 ГГц проходит через сетку с ослаблением менее 0.1%. Более значительное ослабление паразитного гиротронного излучения может быть осуществлено последовательным применением нескольких таких сеток.

- [1] *Н.А. Ирисова* Вестник АН СССР, 1968, № 10, с. 63-71.
- [2] *E.A.M. Baker, B. J. Walker* Phys.E: Sci. Instrum., 1982, Vol. 15, pp. 25-32.
- [3] *R. A Ulrich* Applied Optics, 1968, Vol. 7, № 10, pp. 1987-1996.
- [4] *А.В. Аржанников, С.А. Кузнецов* ЖТФ, 2001, том 71, вып.12, с. 1-5.
- [5] *А.В. Аржанников, С.А. Кузнецов* ЖТФ, 2002, том 72, вып.9, с. 102-107.
- [6] *A.V. Arzhannikov, S.A. Kuznetsov., S.L. Sinitsky* Proc. of 13th Int. Symp. on High Current Electronics, Tomsk, Russia, 2004, pp. 288-291.
- [7] *A.V. Arzhannikov et al.* NIM, 2003, A507, pp. 129-132.

А.В. Аржанников, arzhannikov@inp.nsk.su
630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 11, ИЯФ СО РАН

П.В. Калинин, sinitsky@inp.nsk.su
630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 11, ИЯФ СО РАН

С.А. Кузнецов, sakuzn@inp.nsk.su
630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 11, ИЯФ СО РАН

С.Л. Синицкий, sinitsky@inp.nsk.su
630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 11, ИЯФ СО РАН

2.4 ДВУХВОЛНОВАЯ КВАДРАТУРНАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ В ДИАГНОСТИКЕ ИМПУЛЬСНЫХ ПРОЦЕССОВ В ВОДОРОДНОЙ И ЭРРОЗИОННОЙ ПЛАЗМЕ

А.П. Кузнецов¹, А.А. Голубев², Г.И. Козин¹, К.Е. Коротков¹,
Т.Ю. Мути², А.С. Савёлов¹, А.Д. Фертман²

¹Московский инженерно физический институт 115409, Москва, Каширское ш., 31. savjlov@plasma.mephi.ru

²Институт теоретической и экспериментальной физики 117218, Москва, Б.Черемушкинская ул., 25. Alexander.Golubev@itep.ru

При интерферометрической диагностике плазмы разделить вклады в фазовый сдвиг зондирующей электромагнитной волны, вносимый электронами и тяжелыми частицами на фоне возможных вибраций оптических элементов установки можно за счет сильной дисперсии плазмы. Для этого необходимо проводить интерферометрические измерения одновременно на нескольких, по возможности, существенно разных длинах волн, с последующей обработкой интерферограмм.

На рис. 1 показана оптическая схема двухволнового интерферометра с фотозлектрической регистрацией двух квадратурных каналов разработанного для диагностики импульсной плазмы. Лазеры и оптические элементы интерферометра размещены на массивной оптической плите механически развязанной с плазменным объектом. Излучения He-Ne лазеров 30 мВт на длине волны 0.63 мкм и 6 мВт на 3.39 мкм пространственно совмещаются вместе на дихроичном зеркале 1 и системой зеркал вводятся в интерферометр Маха-Цендера настроенного в режим бесконечно широкой полосы. В блоке регистрации зондирующие излучения разделяются на дихроичном зеркале. С помощью четвертьволновых пластинок, ориентированных под 45° к плоскости поляризации зондирующих излучений и взаимно ортогональных поляризаторов, установленных перед фотоприемниками D_1, D_2 и D_3, D_4 , формируются квадратурные сигналы вида: $U_1 \sim \sin(2kn\ell)$ и $U_2 \sim \cos(2kn\ell)$ на обеих длинах волн. Их преобразование, позволяет восстановить закон изменения оптической длины $n\ell(t)$ и, соответственно линейной электронной плотности плазмы.

Разработанный квадратурный интерферометр позволяет однозначно регистрировать большие набег фазы с высокой точностью и позволяет избавиться от ошибок измерений, вызванных изменением интенсивности зондирующего излучения в плечах интерферометра, например, из-за

флуктуаций мощности излучения зондирующих лазеров или поглощения в плазме.

Интерферометр был использован для измерения динамики электронной плотности эрозийного капиллярного разряда в воздухе атмосферного давления и водородной плазмы мишени в экспериментах по торможению тяжелых ионов с энергией 110 кэВ/нуклон в ионизированном веществе. В экспериментах по исследованию энергетических потерь протонных и ионных пучков в ионизированном веществе двухволновая интерферометрия позволила измерить линейную плотность электронов и среднюю степень ионизации водородной плазменной мишени. На рис. 2. показаны квадратурные интерференционные сигналы (a,b) на длине волны 0.63 мкм, изменение разрядного тока инициирующего плазму в мишени (c) и восстановленная зависимость изменения электронной плотности водородной плазмы во времени (d).

Работа выполнена при финансовой поддержке Международного научно-технического центра (проект МНТЦ № 2107).

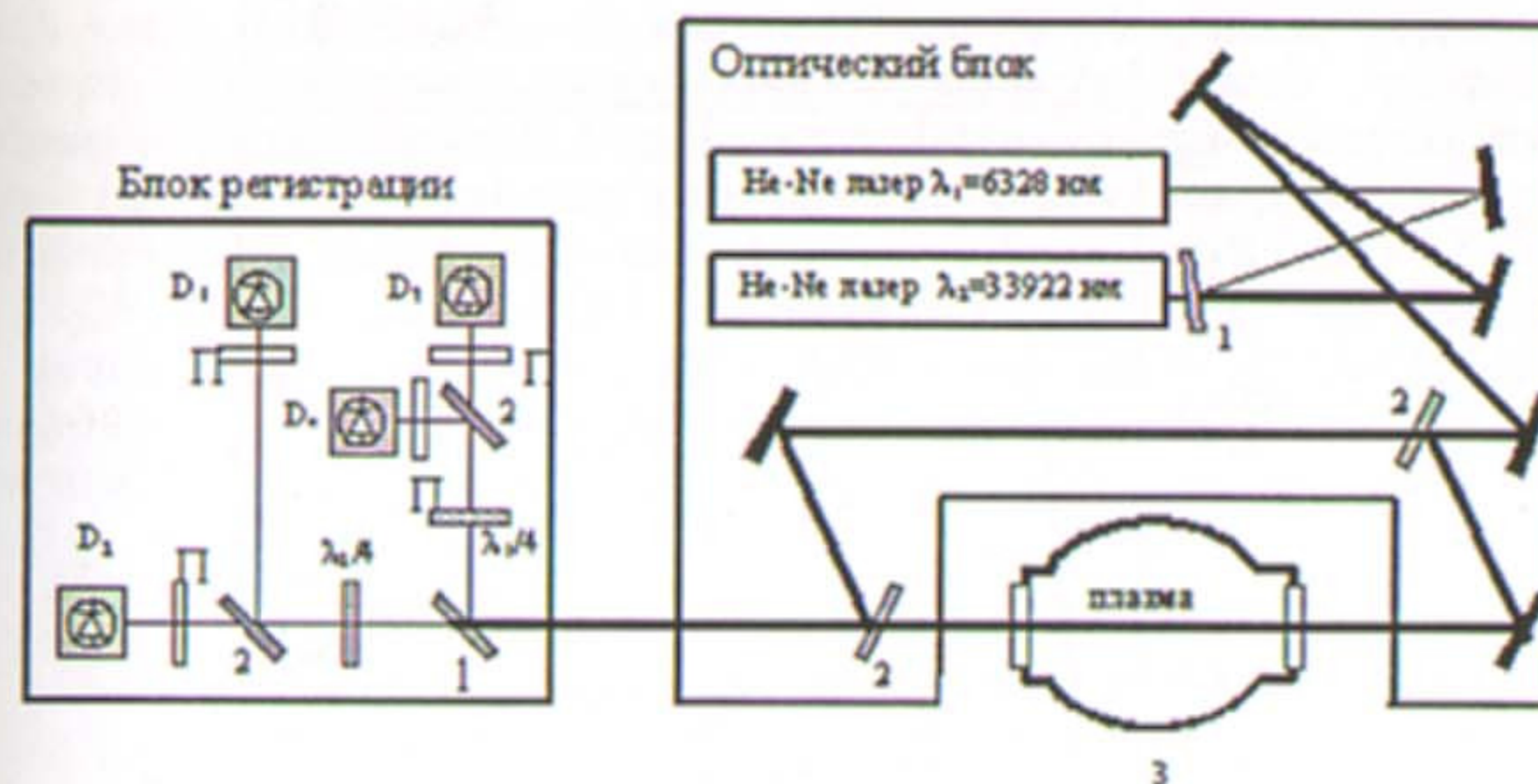


Рис.1 Двухволновый квадратурный интерферометр
1 - дихроичные зеркала, 2 - делительные 50% зеркала, 3 - плазменная камера,
П - поляризатор

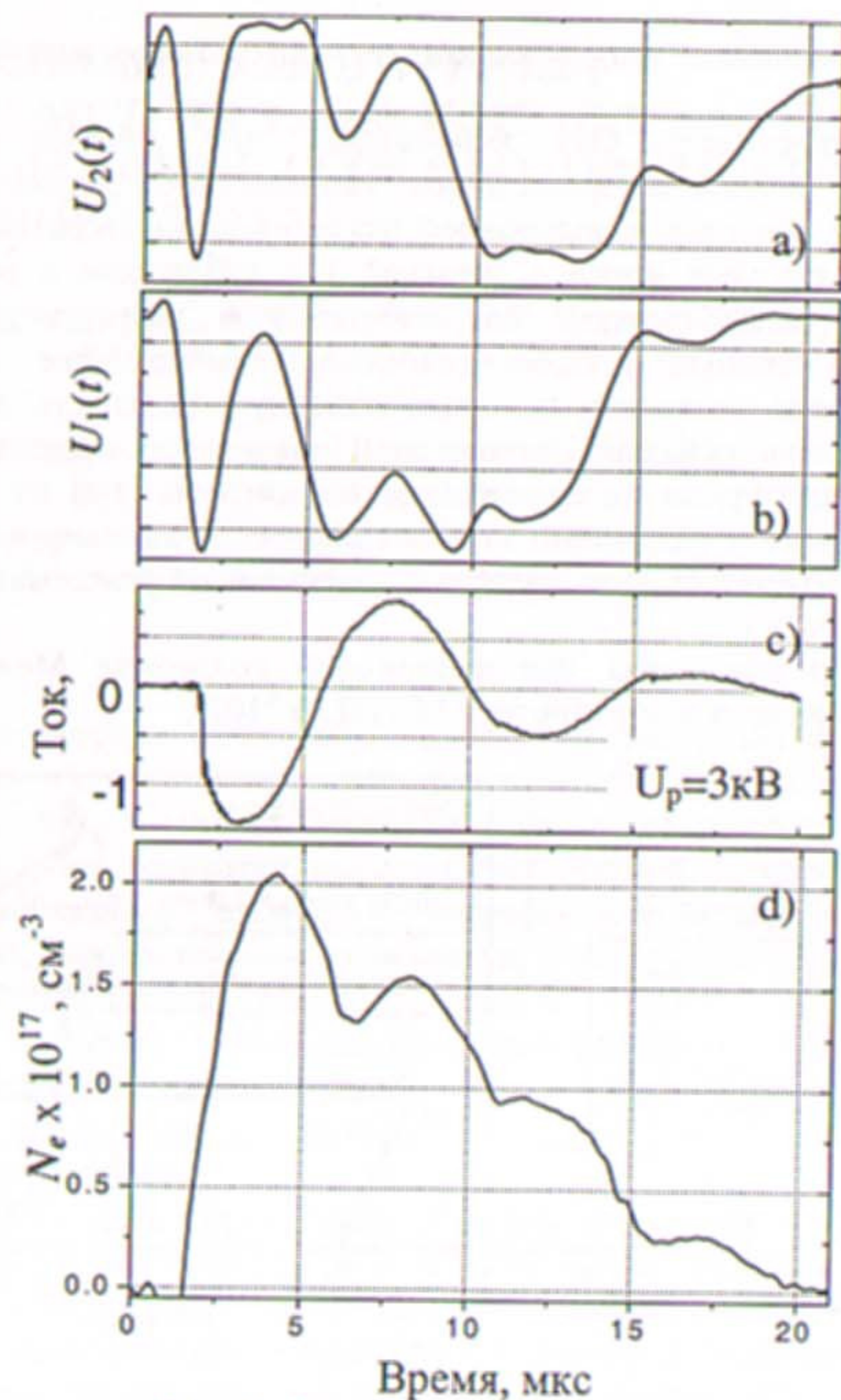


Рис. 2. Сигналы с квадратурного интерферометра (а, б), временная зависимость разрядного тока (с) и результат обработки сигналов - динамика линейной электронной плотности плазмы (д).

2.5 ДИСПЕРСИОННЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ С ТЕРМОЯДЕРНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

П.А. Багрянский¹, Р.В. Воскобойников¹, А.А. Лизунов¹,
А.Л. Соломахин², А.Д. Хильченко¹.

¹Институт ядерной физики СО РАН им. Г.И.Будкера, 630090, Новосибирск,
²Новосибирский Государственный Университет, 630090, Новосибирск,

Спроектирован и изготовлен двухпроходный дисперсионный интерферометр с длиной волны зондирующего излучения 9,6 мкм для диагностики плазмы в установках ГДЛ (Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера, Новосибирск, Россия) и TEXTOR (FZ Juelich, Германия). Главной особенностью интерферометра является полное отсутствие виброизолирующей станины. Основные оптические элементы, включая лазер, удвоитель частоты и детектор размещены на оптическом столе, который располагался на расстоянии около 4 метров от вакуумных камер ГДЛ и TEXTOR. На вакуумных камерах установок размещены только входные окна и полые уголкового отражатели. Работоспособность интерферометра продемонстрирована в экспериментах на установках ГДЛ и TEXTOR. Достигнута чувствительность $\approx 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ при временном разрешении ≈ 50 мкс.

2.6 СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ДИСПЕРСИОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА НА ОСНОВЕ CO₂ ЛАЗЕРА

П.А. Багрянский¹, Р.В. Воскобойников¹, В.Ф. Гурко¹, П.В. Зубарев¹,
А.Н. Квашнин¹, А.А. Лизунов¹, А.Л. Соломахин², А.Д. Хильченко¹

¹ Институт ядерной физики СО РАН им. Г.И. Будкера, 630090, Новосибирск.

² Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск.

В классической схеме двухцветного дисперсионного интерферометра выходной сигнал пропорционален синусу набега фазы, вызванному изменениями плотности плазмы. Это приводит к известным ограничениям, как по разрешению, так и по диапазону измерения плотности ввиду возможной неоднозначности в интерпретации получаемых результатов из-за наличия минимумов производной на аппаратной функции интерферометра. С целью устранения указанных недостатков в рассматриваемом варианте схемы построения дисперсионного интерферометра использован специальный вспомогательный узел – модулятор фазы волны одной из рабочих гармоник на базе электрооптической ячейки. Высококачественная модуляция набега фазы синусоидальным сигналом позволяет в процессе регистрации результирующего выходного сигнала восстанавливать текущее значение плотности плазмы в точках с максимумом производной аппаратной функции интерферометра, т.е. при его максимальной чувствительности. Вторым, весьма важным положительным фактором предлагаемой схемы интерферометра является так же то, что при искусственной глубине модуляции фазы одной из гармоник зондирующего излучения более полосы, в нем реализуется возможность однозначного восстановления динамики поведения плотности плазмы в практически неограниченном динамическом диапазоне. Естественно, что это имеет место лишь при условии малых изменений плотности плазмы на периоде модулирующего сигнала.

В состав схемы построения системы управления и регистрации дисперсионного интерферометра с модуляцией фазы, помимо стандартных источников питания лазера и фотоприемника, входят модули: стабилизатора температуры нелинейного кристалла ZnGeP₂ – удвоителя частоты зондирующего излучения, высоковольтного генератора модулирующего синусоидального сигнала для электрооптической ячейки GaAs и регистратора данных.

Стабилизатор температуры построен на микроконтроллере AT90S8535 и предназначен для фиксации диапазона изменения температуры нелинейного кристалла на уровне $90 \pm 0.5^\circ \text{C}$. Необходимость в стабилизации рабочей температуры кристалла с указанной точностью обусловлена тем, что ее изменения, вызванные поглощением излучения первой гармоники, сильно влияют на эффективность преобразования исходного излучения во вторую

гармонику, а так же приводят к дополнительному, неконтролируемому набегу фаз проходящих через кристалл волн.

Высоковольтный генератор формирует модулирующее синусоидальное напряжение частотой 250 кГц и амплитудой 3 кВ для электрооптической ячейки.

Наиболее сложным электронным модулем интерферометра является блок регистрации, на который возложены функции управления работой всех узлов интерферометра и их взаимодействия с базовым компьютером. В качестве элемента управления и сопряжения с компьютером в блоке регистрации используется процессор серии ARM7TDI S3C4530A со встроенным сетевым интерфейсом Ethernet-10/100. Процессор оснащен оперативным ЗУ на основе SDRAM объемом 16Мб и энергонезависимым ЗУ на базе Flash объемом в 4Мб. Регистрация текущих значений амплитуды модулирующего сигнала и сигнала, снимаемого с фотоприемника интерферометра, производится синхронно с помощью двух 12-ти разрядных АЦП, оснащенных буферной памятью объемом по 128 Мбайт на каждый канал. Частота дискретизации АЦП выбрана равной 32 МГц, что позволяет на каждом периоде модулирующего сигнала формировать по 128 отсчетов по обоим каналам и на их основе восстанавливать текущее значение набега фазы в данном периоде с разрешением около 10^{-3} от пелосы. Помимо указанных ранее элементов в состав регистратора включены: 8-ми канальный управляющий регистр, с помощью которого подается питающее напряжение на все узлы интерферометра и формируются сигналы управления ВЧ генератором и CO₂ лазером, 8-ми канальный входной регистр, использующийся для контроля за текущим состоянием интерферометра, а также интерфейс I₂C для подключения датчиков температуры DS1621.

Процессор блока регистрации работает под управлением операционной системы μCLinux и прикладной программы-сервера, которые загружаются в оперативную память сразу же после включения источника питания. Прикладная программа обеспечивает прием по сети Ethernet команд управления от компьютера и передачу ему сведений о текущем состоянии узлов интерферометра, а так же данных, полученных в процессе регистрации. Кроме того, программа производит циклический опрос датчиков температуры, контролирует наличие воды в контурах охлаждения и в случае аварийной ситуации самостоятельно отключает силовые узлы интерферометра.

Помимо процессора в состав блока регистрации входят две ПЛИС фирмы Altera EPF10K30, которые формируют сигналы управления для АЦП и буферных ЗУ в процессе регистрации, производят предварительную обработку сигналов, а также позволяют в режиме реального времени восстанавливать фазу.

Программа-клиент, работающая в компьютере, представляет собой графическую консоль оператора, отображаемую на экране монитора. На консоли расположены две панели. С помощью первой производится выбор режима работы регистратора (режим цифрового осциллографа, либо режим

измерения набега фаз), задается мода запуска (внешний/программный), глубина используемой памяти, а также производится отображение данных в виде осциллограмм и их запись на жесткий диск. Режим цифрового осциллографа для системы является вспомогательным и используется на этапе юстировки и поверки элементов диагностического тракта. На второй панели расположены элементы управления остальными узлами интерферометра и индикаторы, отображающие текущее состояние его оборудования.

Изначально дисперсионный интерферометр был апробирован на установке ГДЛ, а в настоящее время работает в составе диагностического комплекса установки TEXTOR (FZ Juelich, Германия). В реальных экспериментах на этой установке получено разрешение по $n_l \sim 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Уровень шумов и помех, вызванный вибрациями элементов интерферометра и разностью его плеч для излучения с разной длиной волн, не превышает указанного выше разрешения.



СПЕКТРОСКОПИЯ ПЛАЗМЫ.

3.1 СВЕТОСИЛЬНЫЙ СПЕКТРОМЕТР ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ НА БАЗЕ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ ЭШЕЛЛЕ.

Н.Н. Науменко¹, С.Н. Тугаринов².

¹ИМАФ, НАН Беларуси, г. Минск, РБ.

²ФГУП «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», 142190, г. Троицк, Московской обл., Россия

Для реализации корпускулярно – спектроскопической диагностики в рамках программы ИТЭР в Троицком Институте Инновационных и Термоядерных Исследований был разработан и создан светосильный спектрометр высокого разрешения на базе дифракционной решетки эшелле. Дизайн спектрометра был сделан в Институте Молекулярной и Атомной Физики НАН Беларуси. Там же были изготовлены основные элементы конструкции описываемого спектрометра.

В докладе приведены принципиальная схема спектрометра и его основные технические характеристики. В докладе также представлены результаты лабораторных испытаний спектрометра и отдельные результаты, полученные на установке Т-11М с использованием описываемого спектрометра.

3.2 СПЕКТРОСКОПИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ НА УСТАНОВКЕ Т-11М.

С.Н. Тугаринов¹, Д.М. Кулаков¹, Н.Н. Науменко².

¹ФГУП «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», 142190, г. Троицк, Московской обл., Россия

²ИМАФ, НАН Беларуси, г. Минск, РБ.

На установке Т-11М создан комплекс аппаратуры, позволяющий проводить спектроскопические исследования с высоким спектральным и временным разрешением в видимом и ближних УФ и ИК диапазонах спектра.

Спектроскопические исследования проводились в различных режимах работы установки: в омическом режиме и в условиях дополнительного ионно-циклотронного нагрева; с углеродным и с литиевым лимитером. Основной упор в работе был сделан на измерение изотопного состава рабочего газа и на измерение ионной температуры по доплеровскому уширению линии CVI. В режимах с дополнительным ионно-циклотронным нагревом обнаружен существенный рост ионной температуры, а также возникновение направленного движения нагретых ионов в плазме.

В докладе приведены результаты, полученные в различных режимах работы установки Т-11М с использованием метода спектроскопии высокого разрешения в видимом диапазоне спектра.

3.3 СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ИОНОВ И СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ПЛАЗМЫ В СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М

Г.С. Воронов, Е.В. Воронова

Институт Общей Физики РАН 119991, г. Москва ул. Вавилова, 38
voronov@fpl.gpi.ru

Для измерения профилей спектральных линий ионов в плазме стелларатора Л-2М используется спектральный комплекс высокого разрешения на основе монохроматора ВМС-1 и CCD камеры S2C-MF. Входная щель монохроматора заменена на пластину с тремя щелями фиксированной ширины 40 мкм. Изображение плазмы проектируется на входные щели с помощью системы зеркал таким образом, что линия наблюдения для центральной щели проходит по вертикали через центр плазменного шнура, а для боковых щелей – по касательной к магнитным поверхностям в полоидальном и тороидальном направлениях.

Монохроматор ВМС-1 с дифракционной решеткой 1200 $\text{л}/\text{мм}$ и зеркалами $F = 600$ мм имеет дисперсию 1.3 нм/мм. Общая светосила системы – 1 : 6.5

В качестве детектора применяется CCD-камера с матрицей 1100 x 1040 элементов. Спектральная ширина одного элемента при дисперсии 1.3 нм/мм – 0.021 нм/пиксель.



Оригинальная система работы в многокадровом режиме с быстрым переносом изображения⁽¹⁾ позволяет за время импульса снимать 10 кадров с экспозицией 1 мс.

Рис. 1. Трехканальная схема спектральных измерений

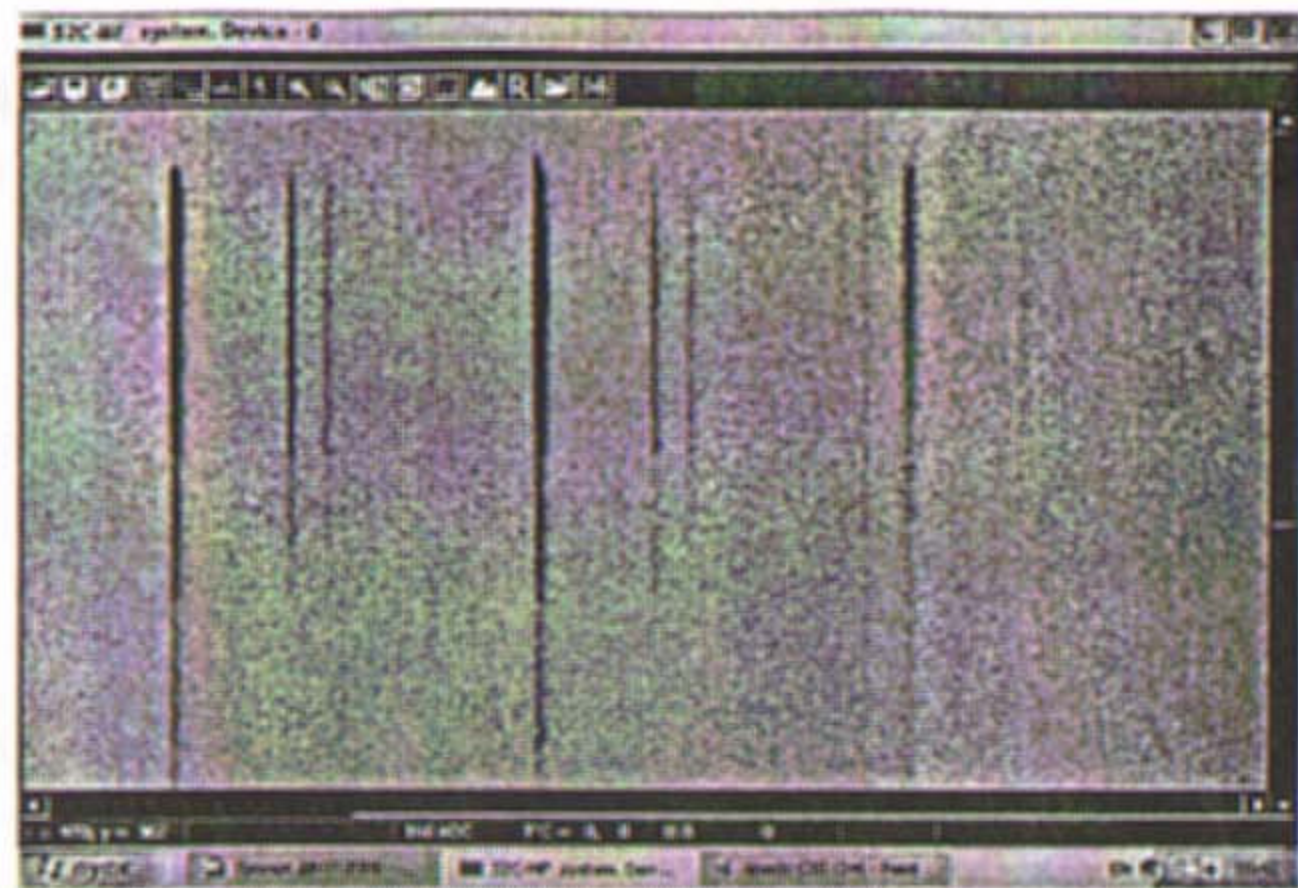


Рис. 2. Участок спектра излучения плазмы в диапазоне 645 – 665 нм. Видны линии атома водорода H α 656.3 нм и ионов CII 657.8 нм и 658.3 нм.

На рис.2 показан участок спектра излучения в режиме ЭЦР нагрева водородной плазмы. Каждая спектральная линия представлена тремя изображениями. Это не создает каких либо неудобств, так как спектр излучения очень редкий. Успешная борьба с примесями с помощью боронизации стенок вакуумной камеры^[2] привела к тому, что кроме линий рабочего газа – водорода или гелия в спектре видны только очень слабые линии примесей углерода и бора.

Аппаратная ширина всей системы – 0.04 нм. Для ярких линий ионов рабочего газа точность измерения ширины линий 0.002 нм. Для слабых линий ионов примесей – 0.004 нм. Это обеспечивает точность измерения температуры ионов Ti 10-15 %. Точность измерения скорости вращения плазмы – 2 км/с.

После боронизации камеры в стеллараторе Л-2М почти при всех режимах работы наблюдается скачок $T_e \sim 100$ эВ на краю плазмы^[2]. Так что представленные в спектре линии излучаются ионами, находящимися на периферии плазмы при $r/a > 0.75$. Линии наиболее горячего из наблюдаемых ионов BIV (энергия ионизации 254 эВ) излучаются слоем плазмы ограниченным магнитными поверхностями с $r \sim 8 - 10$ см. Линии еще более горячего иона CV к сожалению слишком слабы для регистрации диодной матрицей без усилителя яркости.

Литература:

1. ГУП НПП «Электрон Оптронику» г. Санкт-Петербург. www.silar.ru
2. А.И. Мешеряков, Д.К. Акулина, Г.М. Батанов и др. Физика Плазмы, № 6, 2005.

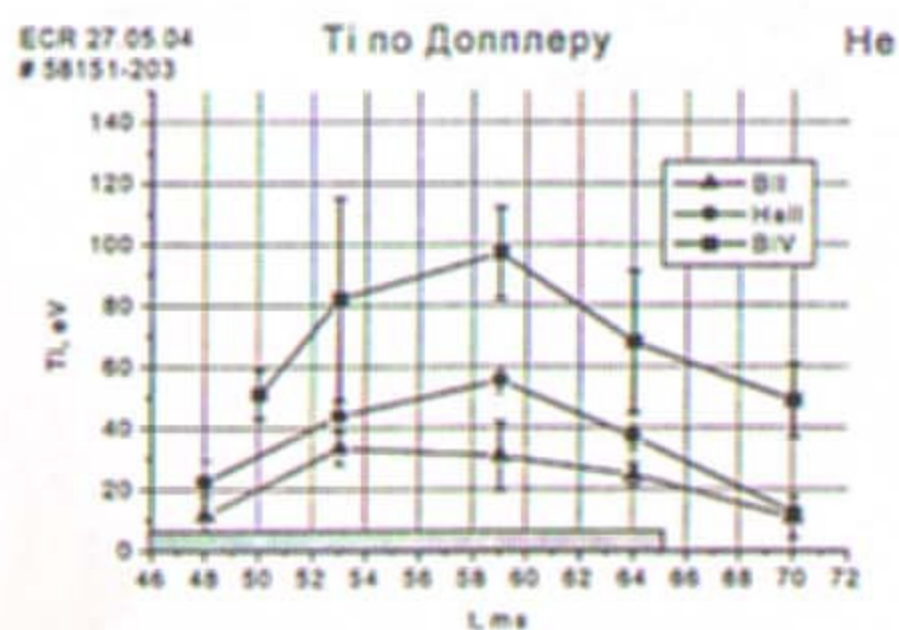


Рис. 3. Временной ход температуры ионов при ЭЦР нагреве гелиевой плазмы.

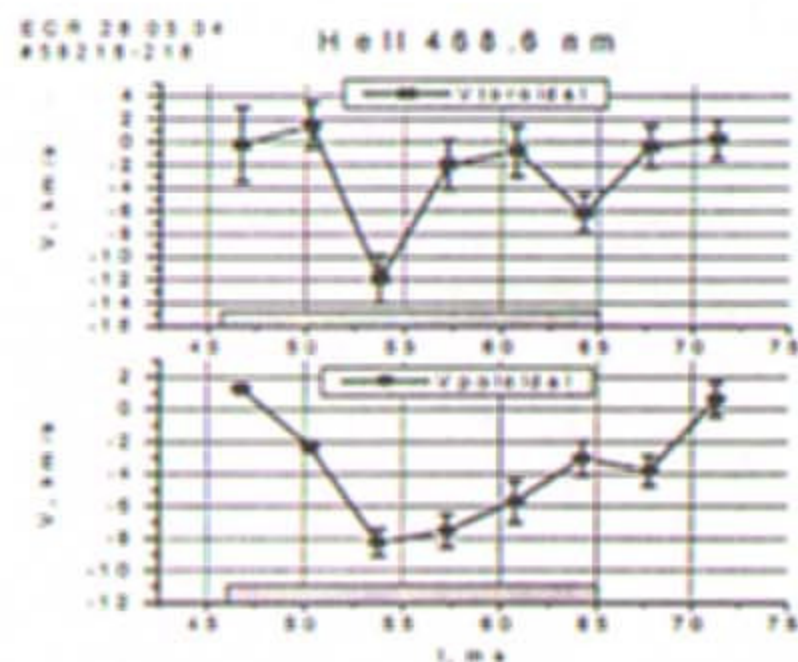


Рис. 4 Результаты измерения вращения плазмы по смещению линии HeII 486.6 нм.

3.4 MSE-ДИАГНОСТИКА ДЛЯ МНОГОХОРДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ β ПЛАЗМЫ В ГДЛ

Г.Ф. Абдрашитов¹, П.А. Багрянский¹, Д. Ден Хартог², А.А. Иванов¹,
С.А. Корепанов¹, А.А. Лизунов¹

¹Институт ядерной физики СО РАН им. Г.И. Будкера, 630090, Новосибирск,
e-mail: A.A.Lizunov@inp.nsk.su

²Университет Висконсин-Мэдисон, Мэдисон, США

Измерения магнитного поля в плазме установок с магнитным удержанием методом анализа штарковского расщепления линии излучения диагностического атомарного пучка (MSE-диагностика) являются надежным и широко распространенным подходом. Спектральная MSE-диагностика [1], разработанная на установке газодинамическая ловушка (ГДЛ), применяется для измерения абсолютной величины поля в плазме. Эти измерения имеют большую важность для изучения удержания ионно-горячей плазмы с $\beta \geq 0.4$ [2].

Дальнейшая программа экспериментов по исследованию анизотропной плазмы с высоким давлением выдвигают существенно более высокие требования к временному и пространственному разрешению, а также точности измерений магнитного поля. Для их реализации разработан модернизированный диагностический комплекс, включающий атомарный инжектор RFX-DNBI [3] и оптическую систему, позволяющую измерять пространственный профиль магнитного поля в каждом эксперименте. Излучение линии H_{α} диагностического пучка с каждой из восьми хорд наблюдения регистрируется детектором на основе ПЗС-матрицы, дальнейшая обработка сигнала при помощи квантово-механической модели спектра мультиплета H_{α} [4] позволяет с требуемой точностью вычислять магнитное поле и β плазмы.

Проект поддержан грантом CRDF #RP1-2553-NO-03.

1. P.A. Bagryansky, P.P. Deichuli, et al., "Measurements of the radial profile of magnetic field in the Gas-Dynamic Trap using a motional Stark effect diagnostic", *Rev. of Sci. Instrum.* 74, No. 3, 1592 (2003).
2. A.A. Ivanov, A.V. Anikeev, et al., "Experimental Evidence of High-Beta Plasma Confinement in an Axially Symmetric Gas Dynamic Trap", *Phys. Rev. Lett.* 90, No. 10, 105002 (2003).
3. П.П. Дейчули, С.А. Корепанов и др., "Инжектор атомов водорода для активной штарковской спектроскопии плазмы", препринт ИЯФ СО РАН #2003-37 (2003).
4. G. Fiksel, D.J. Den Hartog et al., "Calculation of the Optical Transition Intensity and Energy Level Splitting for General Conditions of the Motional Stark Effect Diagnostic", BINP preprint #2003-29 (2003).

3.5 ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ В СКРЕЩЕННЫХ ЕХН ПОЛЯХ С ПОМОЩЬЮ ЭШЕЛЛЕ-СПЕКТРОГРАФА

И.В. Иванов, Д.В. Мозгрин, А.М. Снегирев, И.К. Фетисов,
Т.В. Шукшина.

Московский инженерно-физический институт, 115409, Москва,
Каширское шоссе 31, Shukshina_Tanya@mail.ru.

Экспериментальное исследование сильноточных форм квазистационарного разряда в скрещенных ЕХН полях при низких давлениях от 10^{-2} до 5 тор в различных газах (Ar , N_2 , H_2 , SF_6) и газовых смесях (Ar/SF_6 , Ar/O_2) при различных конфигурациях и величинах магнитных полей позволили установить существование устойчивой формы разряда, не переходящей в дугу при значительных плотностях тока. Это так называемый сильноточный диффузный разряд [1], существующий в диапазоне токов от 10 до 2000 А с плотностью катодного тока до 90 A/cm^2 , характеризующийся постоянным напряжением горения 75 - 140 В, временем существования свыше 1 мс, а также отсутствием контракции в плазме и катодном слое. Плотность плазмы, создаваемой в этом разряде, достигает 10^{15} см^{-3} , а электронная температура 3 - 8 эВ.

Ввиду того, что в настоящее время не существует общей теории процессов определяющих существование разряда данного типа, актуальной является задача исследования параметров плазмы разряда и прикатодных областей. Предположительно, преобладающим механизмом ионизации в разряде данного типа является термический механизм, а преобладающим механизмом эмиссии электронов с катода – вторичная ион-электронная эмиссия. Для подтверждения термического механизма ионизации, как основного механизма поддержания разряда, необходимо прямое измерение температуры тяжелой компоненты плазмы. Одним из основных методов измерения температуры тяжелой компоненты является анализ доплеровского уширения профиля спектральной линии. Ввиду предположительно низкой температуры ионной компоненты и импульсного характера источника излучения применение этого метода требует использования спектральных приборов с высоким разрешением и максимальной светосилой.

Для получения сильноточного диффузного разряда использовалось устройство с профилированными электродами. Оно представляет собой два полых аксиально-симметричных электрода диаметром 120 мм, разнесенных на расстояние порядка 10 мм и помещенных в магнитное поле катушек, включенных навстречу. Профиль электродов совпадает с профилем силовой

линии магнитного поля, что обеспечивает перпендикулярность электрического и магнитного полей вдоль всей поверхности катода.

Для регистрации спектра излучения плазмы сильноточного диффузного разряда использовался Эшелле-спектрограф с компенсированным астигматизмом [2] - компактный спектрограф со скрещенной дисперсией, в котором спектральный диапазон 200 - 800 нм уложен в 90 строк на площадке $\varnothing 40$ мм. Изображение спектра регистрировалось на высокочувствительную фотопленку ILFORD DELTA 3200 (чувствительность 3200 ед. ISO). Ширина входной щели спектрографа - $\Delta=50$ мкм. Ввиду импульсного характера источника излучения необходимая экспозиция достигалась за 100 импульсов.

Зарегистрированный обзорный спектр излучения плазмы диффузного разряда в аргоне при $p = 0,33$ Тор, $B = 1$ кГс, $U = 75-85$ В и токе в диапазоне от 750 А до 1225 А содержит линии как нейтрального аргона, так и одно- и двукратно ионизованного иона аргона. Для исследования были выбраны линии Ar^+ 476,8 нм (потенциал возбуждения 15,5 эВ), Ar^{2+} 457,9 нм (потенциал возбуждения 19,89 эВ). Для них восстанавливались профили спектральных линий, зарегистрированных при разных параметрах разряда, а именно, при разных токах разряда; измерялась ширина на полувысоте и определялась температура ионов в зависимости от тока разряда (рис.1). При достигнутой разрешающей способности 0,02 нм ошибка измерений составила ~30%.

На рис.1 также даны значения, полученные в ходе оценочного расчета, в котором состояние ионизованного газа в зоне разряда описывается термодинамическим уравнением состояния газа и законом сохранения энергии [1]. Отличие расчетных данных от экспериментальных объясняется предположениями, сделанными в ходе расчета: реальный профиль электродов заменялся плоским; и в законе сохранения энергии не учитывались вклад энергии за счет рекомбинации и потери энергии на излучение возбужденных метастабильных уровней атомов газа.

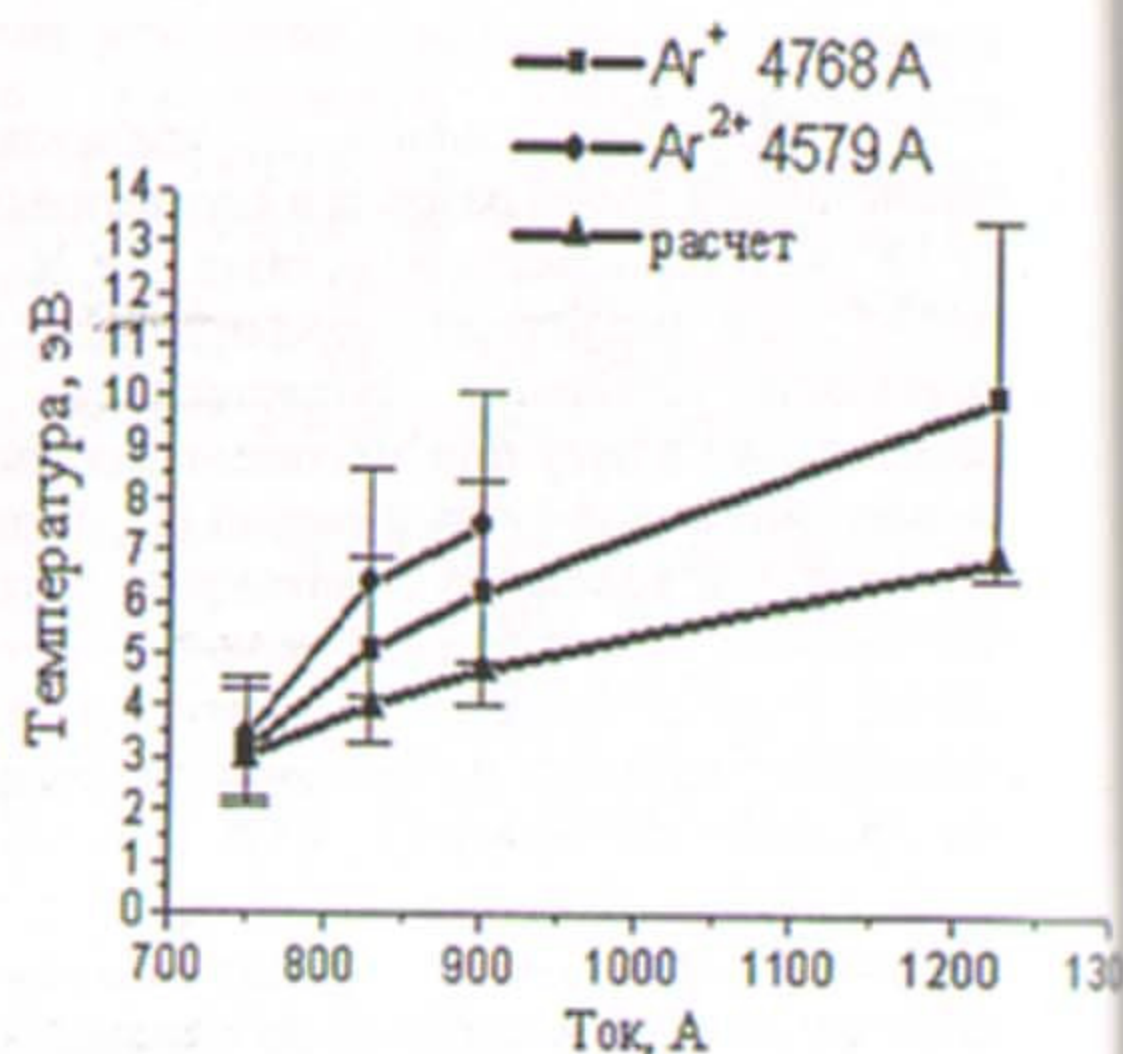


Рис.1. График зависимости температуры ионов от тока разряда

Полученные значения ионной температуры позволяют предположить, что термический механизм ионизации является основным для сильноточного диффузного разряда.

Следует отметить, что спектральный прибор данного типа могут быть успешно применены для диагностики импульсной плотной низкотемпературной плазмы, в частности для измерения параметров плазмы разрядов низкого давления и параметров диверторной плазмы термоядерных установок.

- 1) И.К. Фетисов «Газовый разряд низкого давления в магнитном поле», М.: МИФИ, 1999г.
- 2) Ю.С.Нагулин, Н.К.Павлычева, Э.А. Яковлев «Оптика и спектроскопия», 1980, т. 49, вып. 5, стр. 987-989.

3.6 ОБНАРУЖЕНИЕ МИКРОТЕЧЕЙ ВОДЫ В КАМЕРЕ ИТЭР

А.Б. Антипенков¹, О.Н. Афонин², И.В. Визгалов², В.А. Курнаев²,
В.Н. Колесников³

¹Институт технической физики, Карлсруэ, Германия PF3640,
D-7602antip@fzk.itp.de

²Московский инженерно-физический институт, 115409, г. Москва,
Каширское шоссе 31

³Физический институт РАН, 119991, г. Москва, Ленинский пр.53,
kolesn@mail.ru

В проекте ИТЭР отмечена желательность своевременного обнаружения микротечей воды в камере ИТЭР со скоростью натекания до 10^{12} с^{-1} [1]. В [2,3] был предложен спектроскопический метод, обладающей необходимой для этого чувствительностью. По оценкам она может быть доведена до 10^{11} с^{-1} , если течь локализована (модель «точечной» течи) и отсутствуют помехи, обусловленные излучением десорбированных со стенки частиц.

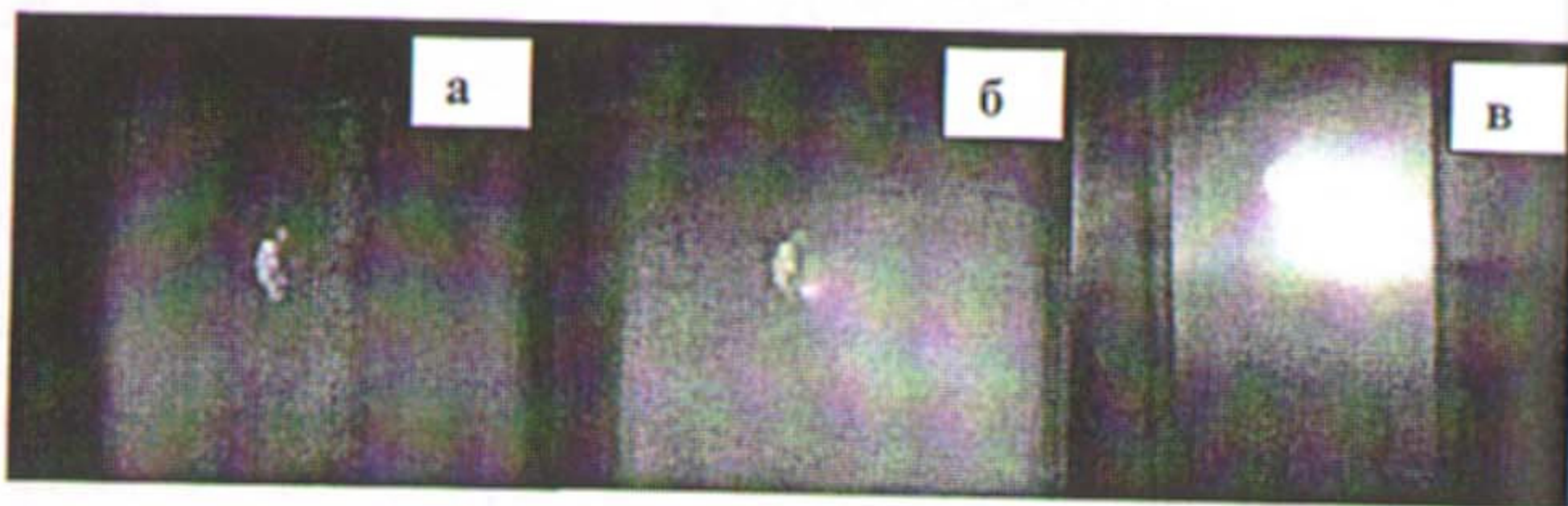


Рис.1 Динамика свечения при напуске в плазменно-пучковый разряд паров воды: а) разряд до поступления паров воды, б) через 40мс после открытия натекаателя, в) через 80мс после открытия натекаателя.

В данном сообщении рассматривается ситуация, более близкая к реальности, когда выход канала течи загорожен от наблюдения, облицовочной плитой (модель «нелокализованной» течи) и существует фон излучения десорбированных частиц. Приводятся также результаты первых экспериментов по наблюдению свечения паров воды. Эти эксперименты проводились на установке ПР-2 с плазменно-пучковым разрядом в МИФИ.

Пары воды вводились через натекаатель в периферическую зону разряда, где концентрация электронов $N_e = 10^{10} + 10^{11} \text{ см}^{-3}$. На рис.1 приведена наблюдаемая в белом свете картина при регистрации цифровой камерой.

Эффект виден, но для максимальной обнаружительной способности необходимо проводить наблюдения в узком диапазоне спектра (например, в полосе ОН).

Однако конструкция внутренней стенки камеры ИТЭР такова, что наблюдать можно только расплывчатое пятно паров просочившихся через зазор порядка 10мм между облицовочными плитами элементов blankets (рис.2). В этом случае можно применить оптическую схему наблюдения, интегрирующую излучение по достаточной части зазора. Кроме того, целесообразно возбуждение радикалов ОН осуществлять не разрядом, а пучком электронов, чтобы максимально избежать нагрева стенки. Оценки показывают, что в этом варианте удастся сохранить высокую чувствительность метода.

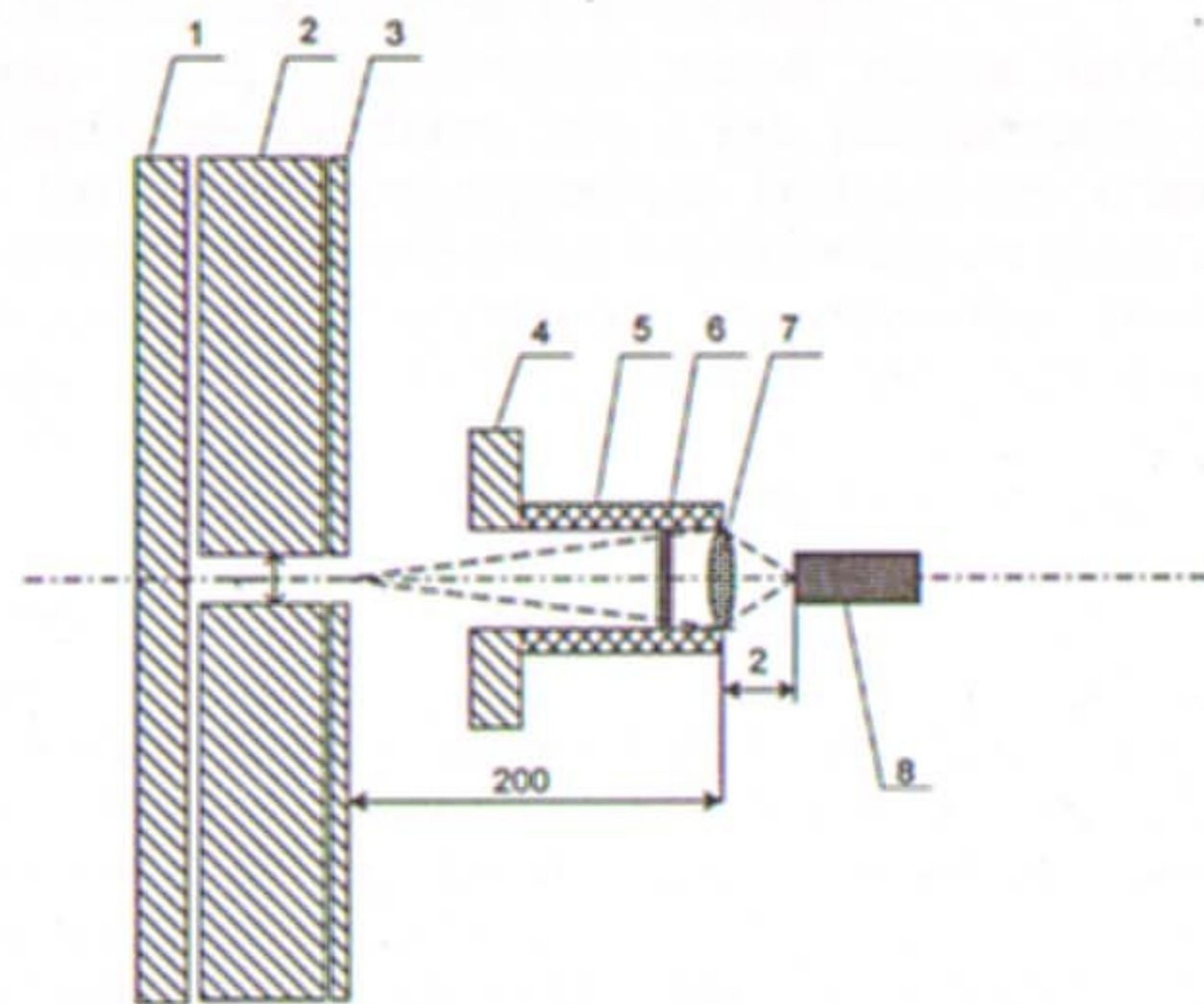


Рис.2. Оптическая схема диагностики течи воды для ИТЭР. 1-первая стенка, 2-стальная плита, 3-берилливая пластина, 4-электроды, 5-изолятор, 6-интерференционный фильтр, 7-объектив, 8-ФЭУ.

В данном варианте диагностики предполагается монтаж блока оптической регистрации, показанном справа на рис.2 на подвижном манипуляторе, используемом для очистки и обезгаживания стенок тлеющим разрядом.

1. Отчет ИТЭР: Design Description Document WBS 3.1 (1998)
2. И.В. Визгалов, В.А. Курнаев, В.Н. Колесников, Д.В. Мозгрин, В.М. Смирнов, Н.Н. Трифионов.. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2002, вып. 3-4, с. 125-136.
3. О.Н. Афонин, И.В. Визгалов, В.Н. Колесников, В.А. Курнаев, Н.Н. Трифионов., Тезисы докладов X Всероссийской конференции по диагностике высокотемпературной плазмы. Троицк, 2003, с.22.

3.7 ДИАГНОСТИКА ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ МЕТОДОМ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ НА УСТАНОВКЕ ПН-3.

С.И. Ветров, А.В. Спицин, Д.А. Шуваев, С.В. Янченков

Институт ядерного синтеза, РНЦ "Курчатовский институт" 123182, Москва, Площадь Курчатова, Россия, 1, e-mail: svetrov@nfi.kiae.ru

Одним из наиболее эффективных методов оптических диагностик плазмы является метод эмиссионной спектроскопии. Он основан на анализе характера излучения плазмы. Данный метод является бесконтактным и имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами диагностики: простота реализации, надёжность, отсутствие возмущения плазмы, возможность получать локальные значения измеряемых параметров.

В случае, когда спектроскопия самой плазмы проблематична, производится добавление инертного газа в неё. Использование инъекции инертных газов для диагностики параметров пристеночной плазмы путем анализа их излучения в настоящее время считается эффективным средством расширения возможностей эмиссионной спектроскопии. Введен даже специальный термин для этой группы методик: TRG OES (trace-rare-gas optical-emission-spectroscopy).

На плазменном нейтрализаторе ПН-3 была проведена серия измерений методами эмиссионной спектроскопии:

Гелиевая плазма:

На ПН-3 TRG методика реализовывалась в виде так называемого "гелиевого термометра". Используя сведения о характере излучения двух линий нейтрального гелия – 728 и 706 нм, можно получить распределение электронной температуры в установке.

Использовалась импульсная инжекция гелия в аргоновую плазму. С помощью специального оптико-механического модуля проводилось сканирование плазмы по различным хордам. Полученное боковое распределение интенсивностей свечения этих линий посредством абелизации приводилось к их распределению по радиусу установки. С помощью радиационно-столкновительной модели гелия на основе отношения интенсивностей этих двух линий получено распределение электронной температуры по радиусу.

Аргоновая плазма:

Аналогичным способом выполнено сканирование линии нейтрального аргона (750.3 нм) в аргоновой плазме. В результате было получено распределение светимости плазмы по радиусу установки. Анализ этого распределения с

учетом интерферометрических и зондовых измерений позволил получить распределение концентрации нейтрального аргона в установке. Было показано, что его содержание в центре значительно ниже содержания ионов, что подтверждает высокую эффективность создания плазмы в установке.

3.8 ИЗМЕРЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ РЕГИСТРАЦИИ СДВИГА ФЛЮОРЕСЦЕНЦИИ РУБИНА

А.В. Аржанников¹, В.В. Болдырев², А.В. Бурдаков¹, И.А. Иванов¹,
В.С. Койдан¹, В.В. Поступаев¹, А.Ф. Ровенских¹, С.В. Полосаткин¹,
С.Л. Синицкий¹, А.А. Шошин¹

¹Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН, 630090, Новосибирск,

²Институт химии твердого тела СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия

I.A.Ivanov@inp.nsk.su

На установке ГОЛ-3 ИЯФ СО РАН проводятся исследования удержания плазмы в открытой гофрированной ловушке, нагреваемой микросекундным релятивистским электронным пучком с энергосодержанием до 200 кДж [1]. В этих условиях на мишень, установленную в камере, попадает пучок релятивистских электронов и поток плазмы с плотностью энергии до 30 МДж/м². В результате происходит разогрев и испарение поверхности. Этот процесс может сопровождаться возникновением в веществе волны сжатия (давления) большой амплитуды. Интерес к изучению такой кратковременной волны давления связан с возможностью ее использования для модификации свойств различных веществ при импульсном воздействии. Эти исследования также представляют интерес в связи с разработкой плазмоприемников для установки ГОЛ-3 и выбором материала для диверторных пластин реактора ИТЭР.

Метод расчета величины давления на кристалл по измерению сдвига линии флюоресценции известен [2, 3]. Обычно этот метод используют для измерения статического давления; для измерения импульсного давления в условиях установки ГОЛ-3 методика была модифицирована. В качестве активного элемента в ней используется кристалл рубина. Кристалл помещен внутрь ячейки высокого давления, на которую воздействует пучок релятивистских электронов и плазмы. Входящие в состав рубина ионы хрома возбуждаются под действием излучения, передающегося через световод от импульсной газоразрядной лампы. В связи с тем, что облучение мишени электронным пучком сопровождается тормозным излучением, была обнаружена эффективная дополнительная накачка флюоресценции рубина рентгеновским излучением. Этот факт в последующих экспериментах позволит проводить измерения без дополнительной накачки флюоресценции, что существенно упрощает схему эксперимента. Сжатие кристалла меняет размер решетки кристалла, что приводит к сдвигу линий флюоресценции рубина R1 (6942 Å) и R2 (6928 Å) в красную область. Для уменьшения фоновой засветки от лампы накачки при регистрации флюоресценции

длительность накачки сделана меньше, чем характерное время флюоресценции рубина. Переизлученный свет собирается кварцевым световодом, непосредственно пристыкованным к кристаллу, и направляется в спектральную систему, включающую в себя спектрометр высокого разрешения (спектральное разрешение 0.15 нм) с двумя независимыми системами регистрации. Первая из них представляет собой линейку фотодиодов и используется для точного измерения спектра флюоресценции, что необходимо для настройки и калибровки системы. Вторая система состоит из трехканального коллектора световодов с регистрацией света на ФЭУ. Она имеет высокую чувствительность и временное разрешение, необходимое для экспериментов. При небольшом сдвиге линий флюоресценции происходит перераспределение света, попадаемого в каждый канал коллектора световодов. В результате по соотношению света между каналами коллектора можно определить величину сдвига линий флюоресценции. При небольших сдвигах эта зависимость является линейной. Точность определения сдвига линий данной методикой составляет ~ 0.004 нм, что соответствует измеряемому давлению $P \sim 0.1$ кБар.

Линейность системы проверялась измерением зависимости давления в кристалле от скорости ударника, падающего на ячейку высокого давления. Для калибровки системы были проведены тесты, в которых создаваемое динамическое давление на поверхность ячейки превосходило "временное сопротивление разрыва" материала, создающего давление. Результат калибровки смещения линий флюоресценции при воздействии импульсного давления ($\tau_{\text{фронта}} \sim 1$ мкс) совпал с данной зависимостью при статических нагрузках [2, 3].

Для изучения формирования и распространения волны давления в твердом теле под воздействием мощного потока релятивистских электронов и плазмы ячейка высокого давления помещалась внутрь плазмы на установке ГОЛ-3. Во время эксперимента релятивистский электронный пучок и горячая плазма нагревали и испаряли поверхность ячейки, что приводило к появлению большой реактивной силы и термомеханических напряжений. Численное моделирование такой системы показало, что амплитуда волны давления может достигать десятков кБар [4]. Проведенные измерения сдвига флюоресценции в поставленных экспериментах показали, что волна давления в кристалле достигает величины 2 кБар, что достаточно хорошо согласуется с численным моделированием.

Реализованный метод может быть использован в широком спектре исследований при создании сильных импульсных давлений.

Работа выполнена при поддержке U.S. Civilian Research & Development Foundation for the Independent States of the Former Soviet Union (CRDF), award No. NO-008-X1.

1. A.V. Arzhannikov et al., Transaction of Fusion Technology, 2001, v.39, № 1T, p. 17.
2. R.A. Forman, J.D. Barnett, G.J. Piermarini, Block S., Science, 1972, v.176, № 4032, pp. 284-285.
3. J.D. Barnett, S. Block, G.J. Piermarini, Rev. Sci. Instrum., 1973, v.44, № 1, pp. 1-9.
4. A.V. Arzhannikov, et al., Digest of Technical Papers PPS-2001, Pulse Power Plasma Science 2001, 28-th IEEE Intern. Conf. on Plasma Science, 13-th Intern. Pulsed Power Conf. Las Vegas, Nevada, USA, p. 1328.

4.1 МНОГОКАНАЛЬНАЯ СИСТЕМА ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ НА УСТАНОВКЕ ГОЛ-3

С.В. Полосаткин¹, А.В. Бурдаков¹, М.В. Иваншивский¹, В.С. Койдан¹,
В.К. Овчар¹, А.Ф. Ровенских¹, В.В. Семионов², М.Г. Федотов¹

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, 630090, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск
e-mail: S.V.Polosatkin@inp.nsk.su

Системы томсоновского рассеяния являются наиболее достоверными и надежными диагностиками для измерения локальных значений электронной температуры и плотности плазмы в современных термоядерных установках. В таких системах плазма зондируется лазерным лучом большой мощности. Интенсивность рассеянного на электронах плазмы излучения пропорциональна концентрации электронов, а спектр рассеянного света однозначно связан с электронной температурой.

На установке ГОЛ-3 создана многоканальная система томсоновского рассеяния для измерения электронной температуры и радиального профиля плотности плазмы, позволяющая проводить измерения в широком диапазоне температур (10 – 1000 эВ) при плотностях 10^{14} - 10^{16} см⁻³. Реализация этой диагностики на установке ГОЛ-3 имеет ряд особенностей, определяемых спецификой экспериментов по нагреву плазмы в многопробочной ловушке. В первую очередь это связано с высокой плотностью, и, соответственно, большой мощностью собственного излучения плазмы, что накладывает высокие требования на мощность источника зондирующего излучения.

В представленной системе для зондирования плазмы использовалось два различных генератора лазерного излучения. При проведении измерений во время инжекции электронного пучка, когда требования к мощности лазерного излучения особенно велики, использовался твердотельный лазер на неодимовом стекле (длина волны 1060 нм, длительность импульса ~15 нс, энергия импульса ~10 Дж), состоящий из задающего осциллятора, пятипроходного (ГОС-1001) и однопроходного (ГОС-1001) усилителей, системы призм для юстировки и фокусирующей линзы.

Применяемый при измерениях на стадии удержания плазмы лазер включал в себя задающий осциллятор, работающий в многоимпульсном

режиме, и однопроходный усилитель (ГОС-1001). Осциллятор состоял из двух диэлектрических зеркал с коэффициентами отражения 100% и 20% формирующих резонатор, стержня из неодимового стекла диаметром 20 мм, который накачивается импульсными ксеноновыми лампами, поляризатора Брюстера, и ячейки Поккельса для осуществления модуляции добротности. Во время накачки стержня на ячейку Поккельса подается запирающее напряжение, предотвращающее генерацию. После того, как популяция электронов на верхнем уровне станет максимальной, к ячейке Поккельса прикладывается напряжения в форме меандра со специального генератора с частотой ~ 50 кГц. Когда напряжение проходит через ноль, добротность резонатора резко возрастает и генерируется лазерный импульс. Осциллятор излучает пакет, состоящий примерно из 20 лазерных импульсов с интервалом ~15 мкс, полная энергия пакета ~5 Дж. Данный режим позволял проводить измерения динамики плотности в течение одного выстрела установки.

В качестве детекторов излучения используются лавинные фотодиоды со спектральным окном чувствительности 0,5- 1,1 мкм. Квантовая эффективность фотодиодов на длине волны 1,06 мкм равна 0,3, внутренний коэффициент усиления составляет ~100. Сигналы с фотодиодов усиливаются предусилителями с временем интегрирования 200 нс и регистрируются аналого-цифровыми преобразователями (12 бит, 40 МГц).

Рассеянное под углом 90° излучение из различных частей плазменного столба фокусировалось на коллектор из 16 кварцевых световодов, которые передавали свет в пульттовую для спектрального анализа и регистрации. Данная система позволяла за один выстрел проводить измерения распределения плотности по сечению плазменного шнура или измерения температуры и плотности из какой-либо точки по радиусу.

Регистрация спектра рассеянного на 90° градусов излучения позволяет измерять температуру плазмы в диапазоне 10-300 эВ. Для определения параметров высокотемпературной плазмы используется свет, рассеянный на угол 8°. Разработанная система позволяет регистрировать излучение, рассеянное вдоль или поперек магнитного поля, что дает возможность исследовать анизотропию функции распределения электронов. Для спектрального анализа излучения спроектирован полихроматор на интерференционных диэлектрических фильтрах, обладающий высокой светосилой и контрастностью. Диапазон измеряемых температур при регистрации рассеяния на малые углы составляет 100-2000 эВ.

Разработанная система позволила провести измерения электронной температуры и плотности плазмы в различных режимах работы установки – в предварительной плазме газового разряда, в высокотемпературной плазме, нагреваемой электронным пучком, и в горячей плазме, удерживаемой в многопробочном магнитном поле. С помощью описываемой диагностики обнаружено развитие флуктуаций плотности плазмы, предсказанные моделью быстрого коллективного нагрева ионов в ячейках многопробочной ловушки ГОЛ-3.

Работа частично поддержана РФФИ, грант № 03-02-16271-а, министерством образования и науки РФ, проект ЗН-315-05, U.S. Civilian Research & Development Foundation for the Independent States of the Former Soviet Union (CRDF), award No. NO-008-X1.

4.2 НАБЛЮДЕНИЕ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ СИЛЬНОЙ ФОНОВОЙ ЗАСВЕТКИ

Р.О. Бужинский¹, К.И. Земсков², А.А. Исаев², В.В. Савранский¹.

¹Центр естественно-научных исследований ИОФ РАН
119991 Москва, ул. Вавилова, д. 38; e-mail: savran@kapella.gpi.ru

²Физический институт РАН им. П.Н.Лебедева
119991 Москва, Ленинский пр-т, д.53; e-mail: isaev@sci.lebedev.ru

Приводятся результаты экспериментов по регистрации оптических изображений объектов, расположенных в области горения электрических дуг. Для формирования изображения использовалась оптическая система с усилителем яркости, в качестве которого применялась активная среда лазера на парах меди. Принцип действия системы обеспечивает узкополосную – в пределах ширины полосы атомного перехода – спектральную фильтрацию излучения внешней фоновой засветки. Усиленные по яркости изображения проектировались на экран для визуального наблюдения и регистрировались с помощью CCD-матричного приемника, подключенного к компьютеру. Исследованы разрешение, контрастность и яркость усиленных по яркости изображений, в зависимости от характеристик усилителя яркости, материала электродов и режимов горения дуг.

Полученные данные позволяют сформулировать требования к оптической системе регистрации изображений, работающей в условиях сильных фоновых засветок и к режимам работы усилителя яркости на парах меди в такой системе.

4.3 ЛАЗЕРНО-СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ПЛАЗМЕ. ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В.П. Гавриленко^{1,2}

¹Институт общей физики РАН им. А.М. Прохорова, 119991, Москва, Россия; e-mail: gavrilen@fpl.gpi.ru,

²Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума, Госстандарт РФ, Москва, Россия

Во многих физических процессах в плазме важную роль играют электрические поля. Электрические поля в плазме могут обладать различными временными и статистическими характеристиками. В качестве примера отметим (1) радиальное электрическое поле в токамаках; (2) электрическое поле плазменных волн; (3) электрическое поле СВЧ излучения, используемого для дополнительного нагрева плазмы в токамаках. Основным методом диагностики электрического поля в плазме является спектроскопический метод, основанный на эффекте Штарка атомов и ионов [1,2]. Для измерения относительно слабых электрических полей в плазме (с напряженностью менее 1 кВ/см) используется эффект Штарка на высоковозбужденных уровнях атомов, которые заселяются в результате переходов из низколежащих уровней под действием перестраиваемого лазерного излучения. В настоящей работе обсуждаются физические основы методов лазерно-спектроскопических измерений электрических полей в плазме и анализируются конкретные эксперименты, в которых были реализованы вышеуказанные методы.

Для измерения постоянного электрического поля в плазме может быть использован метод [3], основанный на штарковском расщеплении водородной спектральной линии P_ϵ , соответствующей переходу $n = 3 \leftrightarrow n_u = 8$ (длина волны $\lambda = 955$ нм). Для заселения уровня с главным квантовым числом $n_u = 8$ используются два лазерных пучка, распространяющиеся навстречу друг другу. Частота первого лазера настраивается в резонанс с частотой перехода H_α в водороде ($\lambda \approx 656.3$ нм). Излучение второго лазера возбуждает переход между уровнем $n = 3$ и высоковозбужденным уровнем энергии атома водорода $n_u = 8$. При этом частота второго лазера сканируется по штарковским подуровням верхнего уровня $n_u = 8$, что позволяет измерять напряженность электрического поля. Регистрируемым сигналом является сигнал флюоресценции при обратном переходе $n_u \rightarrow n = 3$. Использование двух лазерных пучков, распространяющихся навстречу друг другу, позволяет существенно снизить

роль эффекта Доплера. Это открывает возможность измерения слабых электрических полей в плазме. Минимальное электрическое поле, которое было измерено в [3] с помощью рассмотренного метода, составляет ~ 200 В/см.

Другая группа методов измерения постоянного электрического поля в плазме базируется на использовании эффекта Штарка на атомах аргона [4-6]. Так, например, в [6] для заселения высоковозбужденного уровня энергии (ВУЭ) аргона используется схема двухступенчатого лазерного возбуждения на переходе $\{4s[3/2]_2 \rightarrow 4p[3/2]_2 \rightarrow \text{ВУЭ атома } (n \gg 1)\}$ с помощью двух лазерных пучков ($\lambda_1 \approx 764$ нм, $\lambda_2 \approx 480$ нм), распространяющихся навстречу друг другу. Регистрируемым сигналом, содержащим информацию о штарковском расщеплении ВУЭ атома, является сигнал флюоресценции с промежуточного уровня на переходе $4p[3/2]_2 \rightarrow 4s[3/2]_1$ ($\lambda_{fl} \approx 801$ нм).

Для измерения микроволнового электрического поля в плазме можно использовать штарковское уширение спектральной линии атомарного водорода, соответствующей переходу $n = 3 \rightarrow n_u$, где $n_u \gg 3$ [7]. Заселение уровня $n=3$ в водороде осуществляется в результате двухфотонного возбуждения из основного состояния $n=1$. В результате возникает сигнал флюоресценции на линии H_α . Излучение перестраиваемого инфракрасного лазера ($\lambda = 820 - 925$ нм) возбуждает переход с уровня $n=3$ на ВУЭ атома водорода с главным квантовым числом n_u . В работе [7] возбуждались переходы на уровни с $n_u = 14$ и $n_u = 20$. В результате возбуждения перехода $n = 3 \rightarrow n_u$ имеет место уменьшение интенсивности сигнала флюоресценции на линии H_α . Спектральный профиль, который описывает зависимость интенсивности флюоресценции на линии H_α от длины волны инфракрасного лазера, содержит в себе информацию о характерной напряженности микроволнового электрического поля. В эксперименте [7] измеренная среднеквадратичная напряженность микроволнового поля ($\nu = 2.45$ ГГц) составляла величину $E_{rms} = 50 - 300$ В/см.

Таким образом, используя эффект Штарка на высоковозбужденных уровнях атомов и методы лазерной спектроскопии, можно измерять с хорошим временным и пространственным разрешением электрические поля в плазме с напряженностью от ~ 10 В/см до нескольких кВ/см.

Работа поддержана частично Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 03-02-17282) и МНТЦ (проект № 2098).

1. В.П. Гавриленко, "Спектроскопические методы измерения электрических полей в плазме." – В кн.: Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Под ред. В.Е. Фортова, Вводный том II, М.: Наука, 2000, С. 559-563.
2. V.P. Gavrilenko, V.N. Ochkin, S.N. Tskhai, "Progress in Plasma Spectroscopic Diagnostics Based on Stark Effect in Atoms and Molecules", Proceedings of SPIE, 2002, Vol. 4460, pp. 207-229.
3. E.K. Cherkasova, V.P. Gavrilenko, A.I. Zhuzhunashvili, in: "Spectral Line Shapes", Volume 12, Edited by C.A. Back, American Institute of Physics, Melville, New York, 2002, pp. 413-420.
4. V.P. Gavrilenko, H.J. Kim, T. Ikutake, Kim J.B., Y.W. Choi, M.D. Bowden, K. Muraoka, Physical Review E, 2000, Vol. 62, pp. 7201-7208.
5. V.P. Gavrilenko, H.J. Kim, T. Ikutake, J.B. Kim, M.D. Bowden, K. Muraoka, E. Physical Review, 2001, Vol. 63, pp. 047401-1 – 047401-4.
6. K. Takizawa, K. Sasaki, K. Kadota, V.P. Gavrilenko, American Physical Society, 55th Gaseous Electronic Conference, Minneapolis, MN, 2002, Meeting ID GEC02, abstract # GTP.050.
7. V.P. Gavrilenko, D. Luggenhoelscher, U. Czarnetzki, H.F. Doebele, In: "Spectral Line Shapes", Volume 13, Edited by E. Dalimier, Editions Frontieres, Paris, 2004, pp. 415-417.

4.4 ИЗМЕРЕНИЯ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ СОДЕРЖАЩЕЙ ГЕЛИЙ И АРГОН

Д.А. Щеглов, С.И. Ветров, И.В. Москаленко, А.А. Сковорода,
Д.А. Шуваев

Институт ядерного синтеза, РНЦ «Курчатовский институт» 123182,
Москва, Площадь Курчатова, 1, Россия, e-mail: shchegl@nfi.kiae.ru

Инжекция инертных газов в исследуемую плазму широко применяется в диагностических целях на установках различного типа. В последние годы на токамаках был проведен целый ряд экспериментов связанных с получением так называемых «радиационно улучшенных» режимов путем инъекции неона либо аргона [1]. Разряды такого типа планируется получать на токамаке ИТЭР, причём инъекция аргона считается предпочтительной. Следовательно при разработке диагностик для диверторной плазмы ИТЭРа необходимо учитывать наличие аргона наряду с гелием – «золотой» термоядерной реакции.

В настоящей работе описан ряд диагностик основанных на использовании методов лазерной спектроскопии и результаты их применения в экспериментах на установке ПН-3, рабочим газом для которой служит аргон. Гелий инжектировался путем импульсного напуска. В измерениях использована оптическая накачка перехода $2^3P \rightarrow 3^3D$ ($\lambda 588$ нм) с помощью узкополосного, плавно перестраиваемого по длинам волн лазера и регистрация флуоресценции гелия на $\lambda 388$ нм. Сканирование профиля линии поглощения путем перестройки λ_L даёт возможность измерять доплеровскую температуру атома $T_a(\text{He I})$. Суммирование сигналов полученных в ходе сканирования дает исходные данные для оценки локальной концентрации атомов с помощью столкновительно-излучательной модели. Столкновительный перенос возбуждения приводит также к флуоресценции на линии $\lambda 707$ нм. Выполнены расчёты зависимости отношения интенсивности линий $\lambda 388$ нм и $\lambda 707$ нм как функции электронной концентрации; проведены соответствующие измерения n_e на ПН-3.

При диагностике аргона основное внимание уделялось измерениям ионной температуры. Проведено детальное исследование пространственно-временных характеристик $T_i(\text{Ar II})$ частично описанное в [2], в ходе которого был обнаружен аномальный характер нагрева ионов. Для ИТЭРа актуальна проблема измерения *низких* (до 0.3 эВ) температур в диверторной плазме, причём пространственное разрешение должно составлять $\Delta l \approx 3$ мм. В связи с этим на ПН-3 проведены измерения T_i при минимальных мощностях ЭЦР-нагрева (до 4 кВт).

Следует отметить, что все описанные выше измерения на He I и Ar II проведены с использованием той же самой активной среды лазера (раствора красителя). Описанные варианты использования метода лазерной спектроскопии для диагностики плазмы содержащей инертные газы могут быть применены при исследованиях диверторной и пристеночной плазмы в рамках программ УТС, а также в различных прикладных задачах, связанных с применением плазменных технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. Ongena, A.M. Messiaen, B. Unterberg et al. // Plasma Phys. Control. Fusion. 1999. V. 41. P. A379-A399.
2. I.V. Moskalenko, N.A. Molodtsov, V.A. Zhil'tsov., A.A. Skovoroda., D.A. Shcheglov // Plasma Phys. Reports. 2004. V. 30. № 5. P. 432-436.

4.5 ДИАГНОСТИКА ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ В ДИВЕРТОРЕ ТОКАМАКА ИТЭР.

Е.Е. Мухин, Г.Т. Раздобарин, М.М. Кочергин, С.Ю. Толстяков,
В.В. Семенов

ФТИ РАН им. А.Ф. Иоффе, 194021, С.-Петербург, ул. Политехническая, 26.
Россия, e.mukhin@mail.ioffe.ru

В проекте ИТЭР режимы работы дивертора строго регламентированы в соответствии с основным требованием собрать и оптимально рассредоточить поток энергии падающий на диверторные пластины. Ожидаемый поток мощности свыше 10 МВт/м^2 непосредственно на диверторные пластины заведомо недопустим, поэтому предусмотрена организация режимов с полным либо частичным отрывом плазмы от поверхности пластины. Реализация указанных режимов достигается в результате диссипации значительной доли потока мощности на переизлучение примесных атомов и ионов в диверторной плазме. Обеспечение компромиссного ("partially detached") режима с частичным отрывом плазмы от диверторной пластины, способного экранировать основную плазму от воздействия примесей дивертора, требует надежных средств диагностики диверторной плазмы и в первую очередь измерения пространственных распределений электронной температуры и концентрации как во внутренней так и во внешней ноге дивертора¹.

Набор диагностических средств для измерения электронной температуры и концентрации в диверторной плазме ИТЭР весьма ограничен. Остается много нерешенных вопросов с применением рефлектометрической диагностики диверторной плазмы в диапазоне частот от 300 ГГц до 1000 ГГц. Для этого диапазона частот в принципе подходит метод лазерной CO_2 интерферометрии. Известны эксперименты по двухчастотной интерферометрической диагностике диверторной плазмы на токамаках^{2,3} JET (130 / 200 ГГц) и JT60U (183/217 GHz). Однако, выполненные разработки имеют ограниченные возможности для диагностики диверторной плазмы ИТЭР в условиях высокой концентрации электронов при частоте отсечки 300 ГГц. Представляют интерес разработки столкновительно-излучательных моделей населенности возбужденных состояний атомов He и других благородных газов для определения концентрации и температуры электронов в диверторе методом резонансной флуоресценции⁴. В отличие от перечисленных методов диагностика Томсоновского рассеяния предоставляет уникальную возможность измерять локальные значения электронной температуры и концентрации в диапазоне ожидаемых в диверторной плазме значений с помощью современных технических средств и в отсутствие модельных приближений.

Сложная радиационная обстановка и чрезвычайно ограниченный доступ к плазме в диверторной камере ИТЭР создает немало проблем реализации диагностики в условиях, не имеющих аналогов на действующих установках. Мотивированное решение при выборе диагностики Томсоновского рассеяния в диверторе токамака ИТЭР исходит из физической целесообразности, надежности и стоимости диагностической системы. Диагностика наружной ноги дивертора, разработанная наиболее основательно к настоящему моменту времени, представлена системой Томсоновского рассеяния в классическом исполнении. Такая система удовлетворяет требованиям мониторинга режимов работы дивертора, допуская при этом дальнейшее совершенствование параметров в соответствии с проектным заданием ИТЭР. Приоритетность диагностики внутренней ноги дивертора связывают с наличием асимметрии плазмы на внутреннем и наружном обходе камеры. Организация диагностических каналов для измерения температуры и концентрации плазмы во внутренней ноге является наиболее сложной в техническом исполнении задачей.

В представленном докладе обсуждаются возможные схемные решения диагностики плазмы во внутренней ноге с использованием техники ЛИДАР и свойственные им ограничения.

1. L. De Kock, et al., *Diagnostic requirements for the ITER divertor*, in *Diagnostics for Experimental Thermonuclear Fusion Reactors 2*, edited by P.E. Stott et al., Plenum Press, New York and London p.67 (1998).
2. R. Prentice, T. Edlington, R.T.C. Smith, D.L. Trotman et al. *Rev. Sci. Instrum.* 66, 1154 (1995)
3. H. Takenaga, T. Fukuda, S. Sakurai, N. Hosogane et al. *Rev. Sci. Instrum.* 69, 3138 (1998).
4. I.V. Moskalenko, S.I. Vetrov, N.A. Molodtsov, D.A. Shuvaev, D.A. Shcheglov, *Development of laser-induced fluorescence system for diagnosis of ITER divertor plasmas*, *Plasma Devices and Operations*, 12, 247 (2004)

4.6 РАЗРАБОТКА ЛАЗЕРНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ СТЕНОК РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ УСТАНОВОК ТОКАМАК

Е.Е. Мухин¹, Б.В. Кутеев², Г.Т. Раздобарин¹, С.Ю. Толстяков¹

¹ФТИ РАН им.А.Ф.Иоффе, 194021, С.-Петербург, ул.Политехническая, 26, Россия, e.mukhin@mail.ioffe.ru

²РНИЦ Курчатовский институт, 123182, Москва, пл. акад. Курчатова, 1, Россия,

Разработка надежных средств диагностики пылеобразования в процессе плазменной эрозии поверхности стенки является неперенным условием успешной реализации программы исследований на токамаке ИТЭР.^{1,2} На современном этапе развития диагностик проблема исследования плазменного напыления не решена в той мере, как это требуется для определения общего содержания пыли (C, Be, W), а также накопления дейтерия (трития) в углеводородном пленочном конденсате и пылевых частицах. Остается много нерешенных вопросов, связанных с механизмом и скоростью плазменной эрозии, а также с экстраполяцией процессов пылеобразования от действующих установок к установкам токамак следующего поколения. Существующий арсенал диагностических средств включает исследование напыленных образцов во время регламентных работ при вскрытии камеры либо анализ мишеней, извлекаемых с помощью транспортера без нарушения вакуума.^{3,4} Во втором случае удается получить более ценные сведения во взаимосвязи с режимами работы установки, однако с существенным ограничением по пространству. Значительный прогресс в развитии диагностических средств наметился в последнее время с появлением и использованием на действующих установках токамак дистанционных кварцевых кристаллических QCM-датчиков для исследования процессов напыления в реальном времени.^{5,6} В стадии разработки находится спектроскопическая диагностика пыли. На токамаке Tore Supra проводятся исследования спектральных характеристик теплового ИК-излучения нагретого слоя пыли.⁷ На токамаке JET спектральными методами⁸ исследовалось поступление примесей в разряд при испарении лазером слоя пыли со стенки разрядной камеры. В работе⁹ были опубликованы результаты демонстрационных экспериментов по наблюдению молекулярных, атомарных и ионных спектров углерода и бериллия, возбуждаемых в плазме лазерного факела на твердотельной мишени. Использование лазерного индуцированного пробоя представляется перспективным для дистанционного исследования многокомпонентных соединений в продуктах эрозии стенки по излучению характеристических спектральных линий. Измерения могут

производиться без нарушения вакуума в местах недоступных для размещения любых диагностических зондов. В настоящей работе дана краткая сводка полученных ранее результатов⁹ и приводятся новые данные по количественному спектральному анализу углеводородных соединений, образованных при плазменном напылении металлических мишеней.

1. G.Federici et al., "Plasma-Material Interactions in Current Tokamaks and Their Implications for Next-Step Fusion Reactors," Nucl. Fusion, 41, 1965-2137 (2001).
2. G.Janeschitz, "Plasma Wall Interactions in ITER FEAT," J. Nucl. Mater., 290-293, 1 (2001).
3. D. Naujoks, R.Behrisch, V.Philipps, and B.Schweer, "Erosion and Re-Deposition of Carbon Probes in the Boundary Plasma of TEXTOR," Plasma Phys. Control. Fusion, 36, 2021 (1994).
4. D.G.Whyte et al., "DiMES Divertor Erosion Experiments in DIII-D," J. Nucl. Mater., 241-243, 660 (1997).
5. D.Bourgoin, G.G.Ross, S.Savoie, Y.Drolet, and E.Haddad, "Use of a Quartz Microbalance for Plasma-Wall Interaction Studies," J. Nucl. Mater., 241-243, 765 (1997).
6. V.Rohde, H.Maier, K.Krieger, R.Neu, and J.Perchermaier, "Carbon Layers in the Divertor of ASDEX-Upgrade," J. Nucl. Mater., 290-293, 317 (2001).
7. R.Reichle et al., "Thermography of Target Plates with Near Infrared Optical Fibres at Tore Supra," J. Nucl. Mater., 290-293, 701 (2001).
8. D.Summers et al., "In-Situ Measurement of Hydrogen Retention in JET Carbon Tiles," J. Nucl. Mater., 290-293, 496 (2001).
9. G.T.Razdobarin, G.Federici, V.M.Kozhevin, E.E.Mukhin; V.V.Semenov; S.Yu.Tolstyakov. "Detecting dust on plasma-facing components in a next-step tokamak using a laser-induced breakdown spectroscopy technique", *Fusion Science and Technology*, 32-43, 41, (2002).

4.7 ЛАЗЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА ЭВОЛЮЦИИ ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕРОДА, ПРОИСХОДЯЩЕЙ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ

Д.В. Абрамов¹, С.М. Аракелян¹, А.Ф. Галкин¹, И.И. Климовский²,
А.О. Кучерик¹, В.Г. Прокошев¹

¹Владимирский государственный университет, 600027 г. Владимир,
ул. Горького 87, e-mail: laser@vpti.vladimir.ru

²Институт теплофизики экстремальных состояний ОИВТ РАН, Москва.

Уникальные теплофизические свойства графита делают его незаменимым материалом для экспериментальных и промышленных высокотемпературных установок. Однако до настоящего времени не существует единого мнения о процессе плавления графита при воздействии концентрированных потоков энергии.

Цель данной работы заключалась в непосредственной регистрации приборным методом эволюции поверхности углерода, нагреваемого сконцентрированным лазерным излучением в воздухе при атмосферном давлении.

Графитовый образец нагревался сконцентрированным излучением импульсно-периодического YAG:Nd³⁺-лазера (частота повторения импульсов 150 Гц, длина волны излучения 1,06 мкм, длительность импульса излучения 3 мс), именуемого в дальнейшем «силовым лазером». Средняя мощность излучения этого лазера составляла до 60 Вт. Лазерное излучение направлялось на поверхность исследуемого образца двумя способами: перпендикулярно и под углом 60° к поверхности. Во втором случае, давшем наиболее интересные результаты, излучение силового лазера фокусировалось на поверхности графитового образца в пятно в форме неправильного эллипса с размерами 0,15 мм и 0,7 мм. Наблюдение зоны взаимодействия лазерного излучения с поверхностью графитового образца осуществлялось с помощью лазерного монитора, включающего в себя лазерный усилитель яркости на парах меди и регистрирующую цифровую видеокамеру. Поперечные размеры зоны наблюдения составляли около 1,4 мм. Излучения силового лазера и монитора фокусировались на поверхность образца разными объективами, причем излучение монитора направлялось нормально к поверхности образца. Частота регистрации оптических изображений, формируемых лазерным усилителем яркости, составляла 500 кадров в секунду.

На рисунке представлены три (а, б, в) видеокадра, иллюстрирующие эволюцию поверхности графитового образца под действием лазерного излучения. Четвертое изображение (г) получено с

помощью оптического микроскопа после окончания эксперимента. Первоначально на поверхности образца образуется продолговатая каверна. Со временем происходит увеличение размеров каверны и формирование выступающего ободка. Затем в головной части каверны из области фокусировки лазерного излучения происходит вытекание жидкого углерода, приводящее к разрушению соответствующей части ободка (место разрушения обозначено стрелкой). Интервал времени, в течение которого происходит вынос расплава за пределы каверны, не превышал 0,3 с. При продолжении воздействия движение расплава по поверхности прекращается, он кристаллизуется, практически сливаясь с окружающей поверхностью графита. При этом внешний вид каверны претерпевает со временем незначительные изменения и достаточно хорошо сохраняется после прекращения нагрева и охлаждения образца (см. рис. 1).

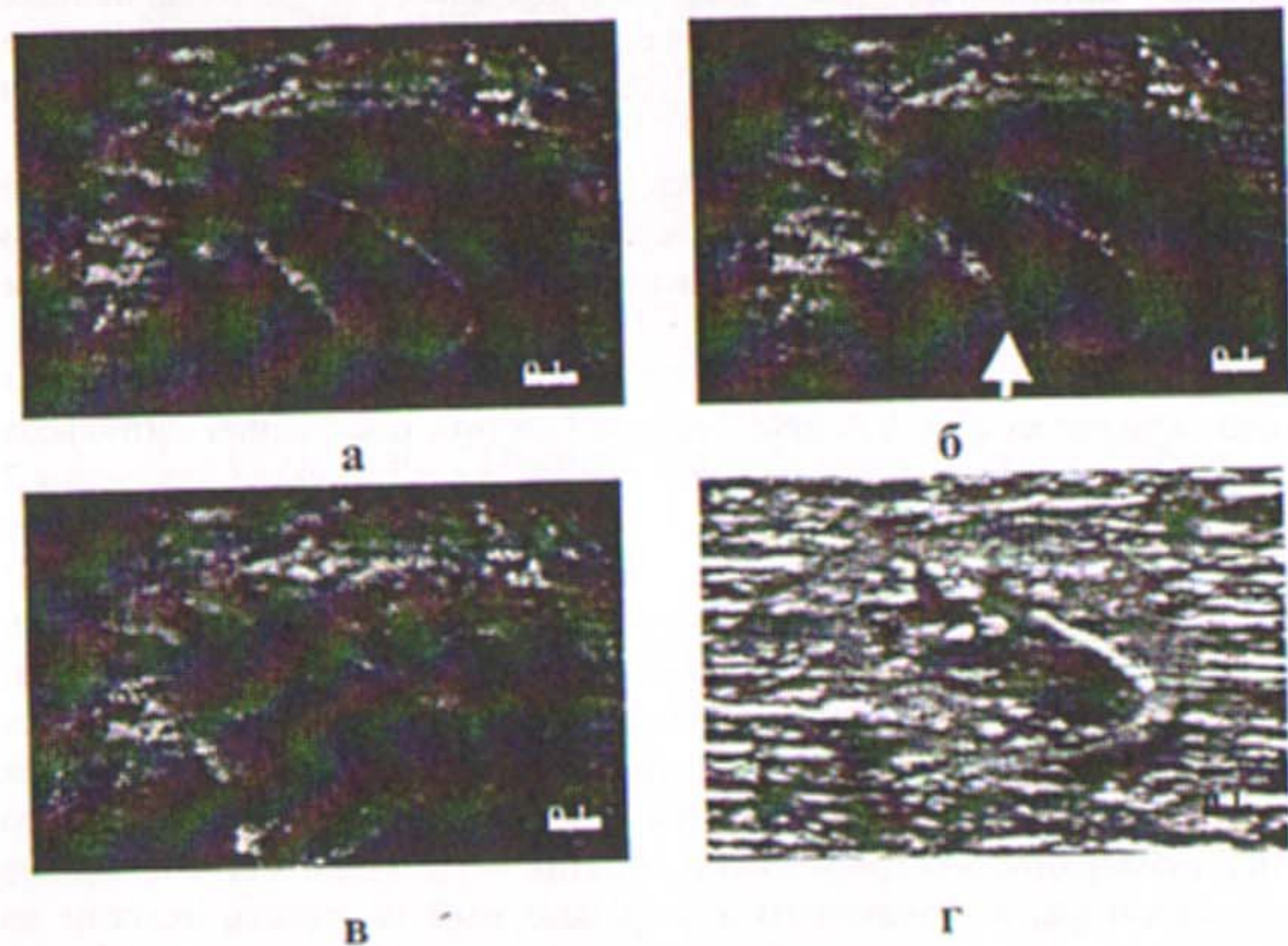


Рис. 1. Изображения поверхности графита, эволюционирующей под действием лазерного излучения со средней мощностью 60 Вт. Полученные с помощью лазерного монитора (а, б, в) и с помощью микроскопа МБС (г): а) время взаимодействия $t=184$ мс; б) время взаимодействия $t=258$ мс; в) время взаимодействия $t=534$ мс; г) после окончания лазерного воздействия.

Наблюдаемую в эксперименте эволюцию поверхности графитового образца можно интерпретировать следующим образом. Образовавшаяся в

области лазерного воздействия жидкая фаза углерода выносится на периферию лазерной каверны за счет термокапиллярного эффекта и давления паров отдачи. Вследствие того, что излучение силового лазера направлено под углом к поверхности образца лазерная каверна также имеет наклонную к поверхности структуру. Таким образом, образуется желоб, имеющий острый угол с поверхностью образца. Именно он определяет направление движения жидкости обратное направлению падения лазерного излучения. Высокотемпературный расплав разрушает на своем пути твердый графит, приводя к разрыву границы каверны, и растекается по поверхности образца на расстояния около 0,2 мм.

Таким образом, исследования процесса взаимодействия лазерного излучения с графитом в реальном времени позволили зарегистрировать образование жидкой фазы углерода при внешнем атмосферном давлении. Расплав образуется на дне каверны, покрывая ее тонкой пленкой, и при прекращении воздействия очень быстро кристаллизуется. Определение параметров, необходимых для поддержания устойчивой жидкой фазы, позволит развить методы управляемого синтеза различных форм углеродных материалов.

5.1 ДИАГНОСТИКА РАДИАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ НА ТОКАМАКЕ T-10

Д.В. Сарычев, Л.Н. Химченко.

*РНЦ «Курчатовский Институт», 123182, Москва, пл. И.В. Курчатова, д.1
Россия E-mail: lkhimch@nfi.kiae.ru*

В настоящее время на токамаке T-10 для измерения суммарных радиационных потерь плазмы используется обзорный пирозлектрический болометр, а профили потерь измеряются многохордовой системой полупроводниковых детекторов AXUV, имеющей 16 каналов с шириной хорды наблюдения канала 4 см в полоидальном сечении плазменного шнура. Детекторы AXUV обладают высоким быстродействием (временное разрешение до 0,1 мкс), высокой чувствительностью к энергии электромагнитного излучения и широким динамическим диапазоном, что позволяет изучать как процессы малой длительности (например, эволюцию профиля излучения при влете в плазму пеллет), так и явления, сопровождающиеся малыми относительными изменениями излучения плазмы (влияние на излучение различных типов МГД-процессов и т.д.).

В то же время детекторы AXUV не чувствительны к энергии нейтральных частиц, а также, что наиболее критично для болометрического применения, они имеют заметную неоднородность на спектральной кривой чувствительности в области энергий квантов менее 50 эВ. Поэтому в режимах, в которых указанные виды потерь энергии могут быть существенными, было необходимо провести проверку радиальных распределений полных радиационных потерь. Для выполнения этой задачи на T-10 опробован коллиммированный (ширина хорды наблюдения около 5 см) пирозлектрический болометр с возможностью сканирования по малому радиусу плазменного шнура от импульса к импульсу. Абсолютная калибровка сканирующего болометра выполнялась с помощью гелий-неонового лазера. Измерения профилей проводились в омическом режиме в сериях импульсов токамака с повторяющимися параметрами; было проведено несколько таких серий для разных значений тока, плотности плазмы, тороидального магнитного поля и радиуса лимитера.

В докладе представлены результаты наблюдения с помощью детекторов AXUV профилей излучения в режимах с инъекцией примесей в плазму (D, Li, C, KCl-пеллеты, напуск аргона).

Также для нескольких режимов разряда приводится сравнение профилей и абсолютных значений мощности радиационных потерь, измеренных полупроводниковыми и пирозлектрическими детекторами, анализируются причины их различий и условия, при которых результаты двух диагностик оказываются близкими. Оценивается возможность влияния на спектральную чувствительность детекторов AXUV поверхностных пленок, возникающих при экспозиции в токамаке. Рассматриваются перспективы модернизации пироболометрической диагностики T-10 (использование многохордовой системы, установка защиты пирозлектрических датчиков от СВЧ-излучения для работы в режимах с электронно-циклотронным нагревом).

5.2 СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВОГО МИКРОСЕКУНДНОГО Z-ПИНЧА.

Г.С. Волков¹, В.И. Зайцев¹, А.В. Карташов¹, Н.И. Лахтюшко¹,
С.В. Захаров¹, А.А. Рупасов², А.С. Шиканов², М.И. Иванов³,
С.Ю. Александрин³,

¹ ФГУП «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», 142190., Троицк, Моск. обл, volkov@triniti.ru

² Физический Институт им. П.Н.Лебедева, 117924, Москва, Ленинский пр., 53

³ ГУП НИИИТ, 115304, Москва, ул. Луганская, 9

Приводятся результаты спектральных измерений излучения микросекундного газового Z- пинча. Ток z-пинча составлял 250 кА со временем нарастания 1 мкс. Спектральные измерения проводились с временным и пространственным разрешением. Обзорные спектры различных газов излучения в спектральном диапазоне 30-1000 эВ измерялись с помощью спектрографа с пропускающей решеткой. Спектральная интенсивность рентгеновского излучения в выбранных спектральных интервалах измерялась с использованием технологии многослойных рентгеновских зеркал. Интенсивность излучения сравнительно далеко разнесенных участков спектра исследовалась полихроматором, где каналы измерения путем выбора типа зеркала и геометрии канала имели "жесткую" привязку к энергии квантов излучения. Распределение интенсивности излучения на достаточно ограниченном участке спектра измерялась с помощью перестраиваемого монохроматора. Конструкция прибора позволяла изменять энергию анализируемых квантов без нарушения вакуума.

В момент максимального сжатия азотного пинча спектр излучения соответствует излучению гелие-, литие- и бериллие-подобных ионов. Максимум спектральной интенсивности приходится на спектральный интервал 15-25 нм, что соответствует переходам 2s-3p Li- и Be-подобных ионов, а также более высоко энергетичным переходам этих ионизационных состояний (2s-4p, 2s-5p, 2s-6p). Спектры измерены в первом, втором и третьем порядках дифракции. Полный выход рентгеновского излучения, измеренный термопарным калориметром, составил 45 Дж при накопленной электрической энергии в конденсаторной батарее 2 кДж. Исследовалась зависимость интенсивности рентгеновского излучения от параметров газовой струи.

Проведено сравнение интенсивности излучения пинча и экспериментально полученных спектров с результатами двухмерного моделирования динамики излучающей плазмы с помощью радиационно-магнитогидродинамического кода ZETA.

Работа поддержана грантом РФФИ №05-02-16343

5.3 МНОГОЭЛЕКТРОДНЫЙ ДЕТЕКТОР РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

И.А. Барыков, Ю.В. Готт, М.М. Степаненко

ФГУ РНЦ «Курчатовский институт» 123182, Москва, пл. Курчатова 1,
E-mail: gott@nfi.kiae.ru

Описан многоэлектродный Вакуумный фотоэмиссионный Детектор (ВЭД) рентгеновского излучения, имеющий высокую чувствительность к фотонам с энергиями менее 100 кэВ и практически нечувствительный к нейтронам и гамма квантам с энергиями более 500 кэВ. Действие ВЭД основано на преобразовании потока фотонов в поток медленных электронов на нескольких фотокатодах. Описываемый вариант ВЭД содержит 58 фотокатодов. Приводятся результаты калибровки детектора на стенде рентгеновского излучения и результаты радиационных испытаний на источнике гамма излучения. Показано, что эффективность регистрации рентгеновских фотонов достигает нескольких десятков процентов. Угловая диаграмма направленности прибора составляет $\pm 20^\circ$ в плоскости, перпендикулярной поверхности электродов и $\pm 10^\circ$ в плоскости, параллельной поверхности электродов. Для работы детектора не требуется никакого источника напряжения. ВЭД удобен для исследования, в частности, теплового излучения плазмы с электронной температурой, превышающей несколько сот эВ.

5.4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВОСТАНОВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М.

А.Е. Шевелев, И.Н. Чугунов, Д.Б. Гин, Д.Н. Дойников, А.Л. Изотов,
И.А. Полуновский, В.О. Найденов, А.И. Чугунов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021,
С.-Петербург, Политехническая ул., 26, Россия, shevelev@cycla.ioffe.ru

Исследование поведения убегающих электронов традиционно осуществляется по жесткому рентгеновскому излучению, индуцированному ими при попадании на диафрагмы камеры токамака. Обычно для этих целей используют сцинтилляционные или полупроводниковые детекторы. Регистрация жесткого рентгеновского излучения осуществляется в токовом, реже - в спектрометрическом режиме работы детекторов. В отличие от токового режима, методика спектрометрического измерения жесткого рентгеновского излучения позволяет проследить изменение в процессе разряда не только интенсивности, но и формы рентгеновских спектров, а также изменение максимальной энергии убегающих электронов, определяемой по граничной энергии спектра. Проведенные в экспериментах на сферическом токамаке Глобус-М /1,2,3,4/ измерения энергетических спектров жесткого рентгеновского излучения позволяют сделать вывод о сложном характере энергетического распределения электронов, выходящих на стенку камеры токамака. Экспериментальное определение эволюции энергетического распределения убегающих электронов позволит существенно продвинуться в объяснении их поведения в процессе разряда. Восстановленные на основе измеренных спектров жесткого рентгеновского излучения спектры убегающих электронов могли бы пролить свет на зависимость скорости генерации убегающих электронов от параметров плазмы (ток, плотность, МГД активность и др.), а также на причины, ограничивающие время жизни пучка убегающих электронов во время разряда.

В докладе представлена методика исследования эволюции энергетических спектров убегающих электронов во время плазменного разряда. Для эффективного выполнения задачи важным условием является модернизация действующего комплекса экспериментальной аппаратуры.

Разрабатываемая методика исследования эволюции энергетических спектров убегающих электронов основана на реконструкции распределения электронов по экспериментально измеренному спектру рентгеновского излучения, индуцированного ими при попадании на диафрагму камеры токамака. В работе используется наш опыт восстановления методом Монте-Карло, с учетом реальной геометрии, энергетического распределения

убегающих электронов в экспериментах, проведенных с помощью двух детекторной установки /1,2/. Детекторы измеряли тормозное излучение с разных диафрагм, разнесенных на угол 135° по тороидальному обходу. Максимальная энергия убегающих электронов на токамаке Глобус-М может достигать значений 10 МэВ. Результаты этой работы были доложены на XXXI-Звенигородской /3/ и 31 EPS конференциях по физике плазмы /4/. Полученные результаты имели скорее качественный характер. Это связано с тем, что математический аппарат такой обработки относится к классу некорректно поставленных обратных задач, которые характеризуются неустойчивостью решения /5/. Для получения устойчивого решения требуется привлечение математических методов регуляризации, а также использование дополнительной экспериментальной информации. Наблюдение рентгеновского излучения исходящего из одного источника (диафрагмы) под несколькими ракурсами даст необходимую дополнительную информацию в силу зависимости углового распределения рентгеновских квантов от энергии электронов. Поэтому, для повышения устойчивости решения, а, следовательно, надежности полученных результатов, мы планируем изготовить и установить еще два спектрометрических детектора помещенных в радиационную защиту, имеющую коллиматоры, направленные на ту же диафрагму.

1. В.К. Гусев, И.Н. Чугунов, А.Е. Шевелев и др. ДВП-10, Тезисы докладов. Троицк, 8-13 июня, 2003 г., стр.3
2. В.К. Гусев, И.Н. Чугунов, А.Е. Шевелев и др. Физика плазмы, т. 30, No. 2, 2004, стр. 180-184.
3. Д.Б. Гин, В.К. Гусев, Д.Н. Дойников и др. Тезисы докладов XXXI Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, 2004 г., стр. 54.
4. A.E. Shevelev, I.N.Chugunov, V.K.Gusev, et al. 31st EPS Conference on Plasma Phys. London, 28 June - 2 July 2004 ECA Vol.28G, P-1.194 (2004)
5. А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин Методы решения некорректных задач. М. «Наука», 1979.

5.5 ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЫ МИКРОПИНЧЕВОГО РАЗРЯДА ПО ОСЛАБЛЕНИЮ ПОТОКА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ФОТОЭМУЛЬСИИ

М.С. Аверин¹, А.Ю. Байков¹, О.А. Башутин¹, Е.Д. Вовченко¹,
А.С. Дмитрусенко¹, Ли Саньвэй², А.С. Савёлов¹

¹Московский инженерно физический институт 115409, Москва,
Каширское ш., 31. savjlov@plasma.mephi.ru

²Институт лазерного синтеза академии инженерной физики КНР 621900,
Мяньян

Несмотря на развитие новых видов детекторов с электронной регистрацией, фотографический метод по-прежнему широко и успешно применяется для исследования коротковолнового излучения благодаря относительно невысокой стоимости фотоматериалов и простоте регистрирующей аппаратуры. В данной работе исследованы пространственная структура и спектральный состав излучения рентгеновских источников в плазме микропинчового разряда с помощью трехканальной камеры – обскуры на фотоэмульсии. Энергетический спектр рентгеновского излучения определялся методом фильтров, причем в качестве фильтров использовалась сама фотопленка ТХJ-III (Китай) с известным составом как подложки, так и эмульсии. Пакет расположенных друг за другом фотопленок состоял из шести слоев.

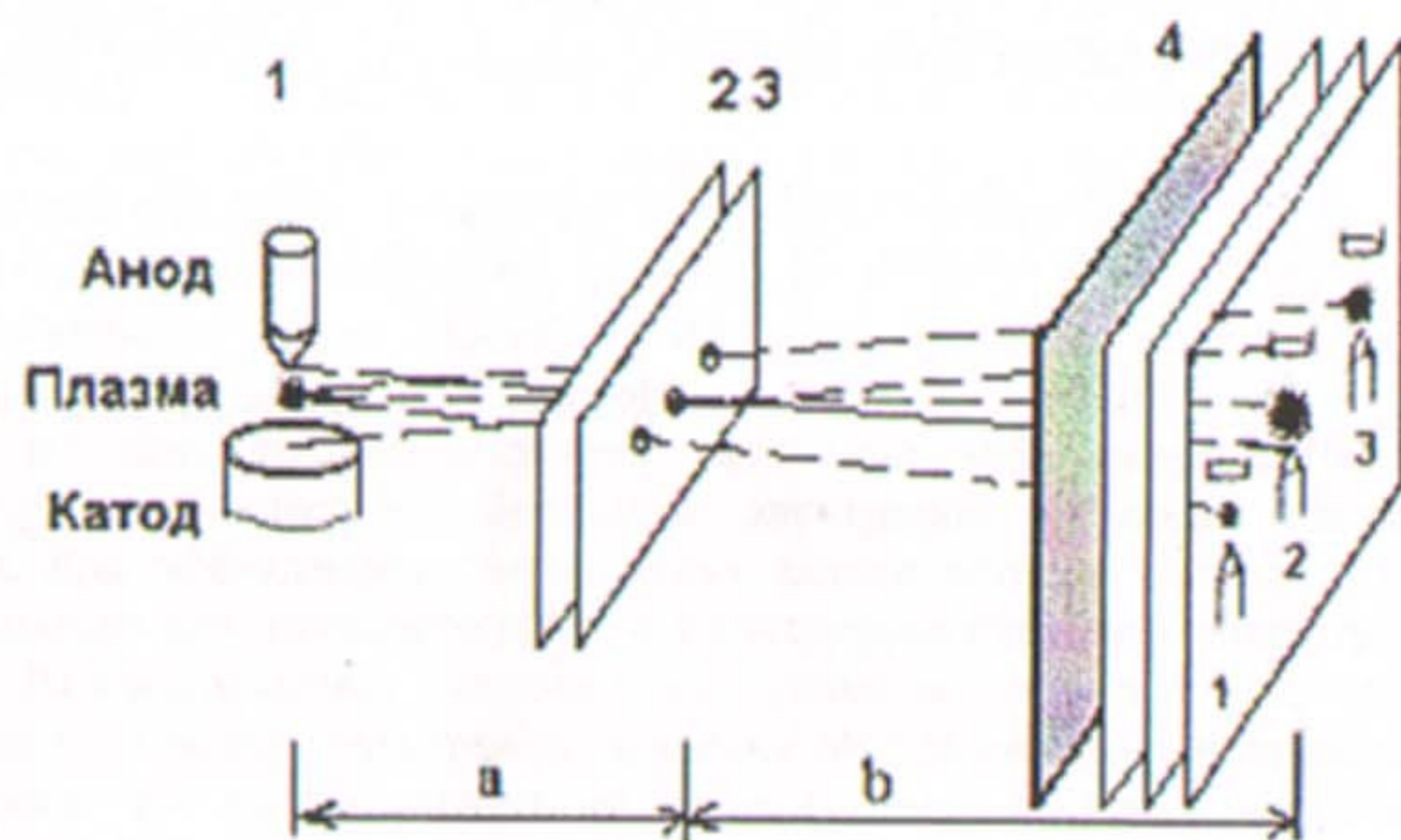


Рис.1. Схема проведения измерений.

Для расчетной оценки спектра использовались данные по ослаблению потока квантов рентгеновского излучения в фотоэмульсии. Каждый слой фотопленки состоял из лавсановой подложки толщиной 175 мкм и чувствительного слоя, содержащего зёрна AgBr в желатине толщиной 24 мкм. Схема эксперимента представлена на рис.1.

Излучение плазмы 1, проходит через диагностическое окно 2 из 50 мкм лавсана и формирует с помощью камеры – обскуры 3 изображение одновременно на шести слоях фотоэмульсии 5, помещенных в пакет из 10 мкм алюминиевой фольги 4. Камера-обскура имела три входных отверстия $\varnothing 200$ мкм, изготовленных в Pb-фольге толщиной 500 мкм. Два крайних отверстия были закрыты Al-фильтрами с толщинами 80 и 40 мкм. Таким образом для получения пространственного распределения электронной температуры используются 18 изображений плазмы в рентгеновских лучах за различными фильтрами.

На обскурограммах выделяются следующие характерные участки свечения: «плазменная точка» (ПТ), формирующаяся вблизи анода, диффузное облако между электродами и поверхность анода. Определение электронной температуры плазмы у поверхности анода не проводилось из-за того, что рентгеновское излучение от анода является совокупностью тормозного излучения и характеристического излучения K-оболочки материала анода (6,4 кэВ для железа).

Сопоставление экспериментальных данных с расчетной кривой ослабления, наиболее близкой к экспериментальным данным, показало, что экспериментальная кривая ослабления соответствует (в предположении максвелловского распределения электронов по скоростям) двухтемпературному режиму с электронными температурами $T_e = 1,9 \pm 0,7$ кэВ для тепловой группы электронов и $T_H = 20 \pm 8$ кэВ для надтепловых электронов в области микропинчевания (плазменной точки).

Спектральные измерения рентгеновского излучения из области разряда с помощью комплекса рентгеновских светосильных спектрографов ФСР-2Д показали, что вблизи от анода в месте расположения плазменной точки зарегистрировано излучение 3^x гелиеподобных линий железа FeXXV с длинами волн $\lambda_1 = 1,8505 \text{ \AA}$, $\lambda_2 = 1,8596 \text{ \AA}$, $\lambda_3 = 1,8681 \text{ \AA}$.

5.6 РАСЧЁТ ОДНОКАНАЛЬНОГО БЫСТРОГО СПЕКТРОМЕТРА ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО КРИСТАЛЛА BaF_2

А.Ю. Байков, В.И. Береснев, Ю.В. Журов, А.С. Савёлов

Московский инженерно-физический институт 115409, Москва,
Каширское ш., 31. savjolov@plasma.mephi.ru

В ходе исследования микропинчевого разряда с помощью сцинтилляционной методики методом поглощающих фильтров был получен спектр рентгеновского излучения плазмы в диапазоне энергий от 1 до 300 кэВ [1]. Авторы данной работы выделяют в спектре три участка: мягкий (1 – 30 кэВ), средний (30 – 100 кэВ) и жесткий (100 – 300 кэВ). Результаты обработки экспериментальных данных по измеренным кривым ослабления в мягкой и средней области хорошо повторяются от опыта к опыту, тогда как интенсивность рентгеновского излучения в жесткой части спектра имеет достаточно большой разброс. Это прежде всего связано с малым числом квантов и ускорительными механизмами возникновения рентгеновского излучения в этой области.

Для более детального исследования спектра рентгеновского излучения плазмы в жесткой области и исключения методической ошибки при обработке спектра предложен быстрый сцинтилляционный спектрометр, схема которого представлена на рис.1. Он состоит из кристалла BaF_2 размером 2x2x2 см и через световоды из LiF просматривается двумя фотоумножителями с Cs-Te фотокатодами.

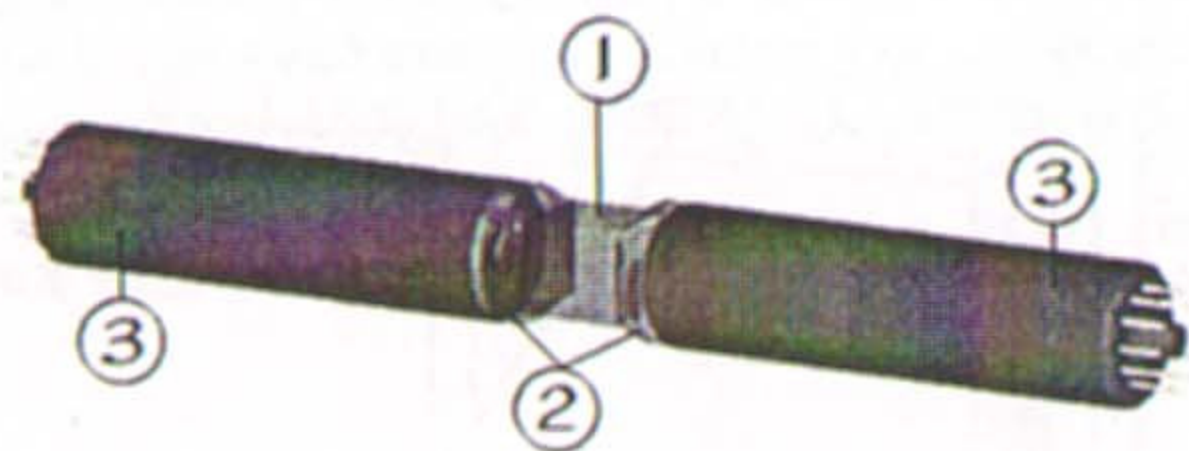


Рис.1 Принципиальная схема детектора: 1 – кристалл (BaF_2);
2 – световоды (LiF); 3 – фотоумножители ФЭУ-142

Спектр высвечивания данного кристалла состоит из быстрой (0.76 нс) и медленной (630 нс) компонент, которые разнесены по длинам волн (220 и 310 нм соответственно) [2,3].

Cs-Te фотокатод регистрирует быструю и подавляет медленную компоненту сцинтилляционной вспышки. Предварительные оценки показывают, что в пределах длительности одного импульса излучения пинча фон от медленной компоненты будет меньше амплитуды импульсов от быстрой компоненты и разрешение детектора для энергии 300 кэВ составит не менее 25%.

Моделирование процесса прохождения рентгеновского кванта через кристалл BaF_2 проводилось с помощью комплекса «РНЗ-3» [4], а моделирование процесса регистрации с помощью написанной под этот комплекс программой.

Расчет показал, что эффективность регистрации рентгеновских квантов с энергией 300 кэВ составит 82%.

Литература:

1. А.Н. Долгов, Н.Н. Кириченко, В.К. Ляпидевский, А.С. Савёлов, Г.Х. Салахутдинов Наблюдаемый спектр излучения микропинча в диапазоне $1 \text{ кэВ} < h\nu < 300 \text{ кэВ}$ и процессы в его плазме // Физика плазмы, 1993, т.19, вып.1, с.97-103.
2. V.Bengston and M.Moszynsky // Nucl. Instr. and Meth., 1970, v.81, p.109
3. M. Laval et al.// Nucl. Instr. and Meth., 1983, v.206, p.169-176
4. Ю.В. Журов, И.Н. Качанов, В.А. Климанов // Комплекс программ РНЗ-3 (Расчет неоднородной защиты). – М.: МИФИ, 1990, ч.1

6.1 ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОВ В ПЛАЗМЕ ПО ПОТОКАМ АТОМОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ В МЭВ ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ.

М.И. Миронов, А.В. Худолеев

*Физико-технический институт РАН им. А.Ф. Иоффе, 194021, С.-Петербург
ул. Политехническая д.26. e-mail maxim@npd.ioffe.rssi.ru*

Для получения термоядерной плазмы, на современных крупных токамаках широко используется дополнительный нагрев. Его применение приводит к образованию существенной надтепловой компоненты плазмы с характерной энергией находящейся в МэВ диапазоне. Знание характеристик надтепловой компоненты, в первую очередь функции распределения ионов (ФРИ) по энергии, позволяет оценивать величину многих эффектов, связанных с взаимодействием высокоэнергичных частиц и основной плазмы – эффективность нагрева, потери быстрых частиц, возбуждение мод и т.д.

Наиболее прямым методом измерения ФРИ в плазме является корпускулярная диагностика. Однако в силу того, что в ходе эксперимента определяется спектр исходящих из плазмы нейтралов, необходимо проводить процедуру восстановления ФРИ плазмы.

Восстановление ФРИ быстрого компонента плазмы обладает рядом особенностей, связанных во-первых с тем, что нейтрализация ионов изотопов водорода и гелия происходит в основном на водородоподобных ионах примесей. Кроме того необходимо учитывать многокомпонентность плазмы и пространственную неравномерность мишени для перезарядки быстрых ионов [1]. В настоящей работе описываются разработанная модель, сочетающая учет элементарных процессов, приводящих к установлению ионизационного равновесия различных ионов примесей, с расчетом движения ионов в конкретной геометрии токамака. Эта модель применена для восстановления функции распределения быстрых ионов на примере термоядерной гелиевой плазмы с комбинированным ионно-циклотронным и пучковым нагревом.

Данная модель может быть использована для определения ФРИ в экспериментах с дополнительным нагревом на современных термоядерных установках, а также на будущей установке ИТЭР, где по восстановленной ФРИ можно оценивать эффективность теплопередачи от продуктов горения к частицам основной плазмы.

Ссылки:

I. M. I. Mironov, A. V. Khudoleev, and Y. Kusama. Formation of a Charge-Exchange Target for Fast Ions in the Plasma of Large-Scale Toroidal Devices under NBI Conditions. Plasma Phys. Rep. 30, 164 (2004)

6.2 ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПЕРИФЕРИИ ПЛАЗМЫ В ИТЭРЕ ПО ПОТОКАМ АТОМОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ.

А.В. Худолеев, М.И. Миронов

Физико-технический институт РАН им. А.Ф. Иоффе, 194021, С.-Петербург
ул. Политехническая д.26. e-mail abx@npd.ioffe.rssi.ru

На современных крупных токамаках с мощным дополнительным нагревом плазмы основным режимом их работы является режим с улучшенным удержанием или так называемая Н-мода. При этом на периферии плазмы, как правило, развиваются МГД-моды локализованные на границе. Переход плазмы в режим улучшенного удержания связан с появлением на ее границе радиального электрического поля. Подобный сценарий развития разряда рассматривается в качестве основного для токамака ИТЭР. В связи с этим представляется необходимым измерение величины электрического поля на границе плазмы с тем, чтобы обеспечить возможность контроля перехода плазмы в режим с улучшенным удержанием.

Существует несколько диагностических методов для определения величины электрического поля на границе плазмы. Однако их реализация достаточно трудоемка, а в условиях ИТЭРа практически невозможна из-за технических ограничений, накладываемых конструкцией установки.

Поскольку в диагностический комплекс ИТЭРа включена корпускулярная диагностика, то представляется интересным изучить чувствительность амплитуды потоков атомов перезарядки к величине электрического поля на границе плазмы. Физически такая возможность обоснована тем, что на границе плазмы ИТЭРа существует значительная по величине гофрировка тороидального магнитного поля. В этом случае траектории запертых ионов, регистрируемых корпускулярной диагностикой, существенно изменяются при появлении радиального электрического поля. При превышении некоторого критического значения, которое можно оценить

как $eE_r \approx \frac{\epsilon}{R_{tor}}$ запертые ионы с энергией ϵ начинают двигаться по

замкнутым траекториям и удерживаться в плазме. Это приводит к изменению функции распределения ионов и, как следствие, к изменению потоков перезарядки атомов с соответствующей энергией.

В настоящей работе проведен анализ чувствительности функции распределения к величине и пространственной зависимости электрического поля. На основании численного расчета траекторий запертых ионов в реальной геометрии токамака ИТЭР получена оценка той области энергий, в которой необходимо проводить измерения потоков атомов перезарядки для

получения оценки величины электрического поля. Показано, что в этом диапазоне энергий величина потоков перезарядки является достаточной, для того чтобы проводить статистически достоверные измерения с высоким временным разрешением. Из расчетов можно определить те требования, которые должны предъявляться к аппаратуре корпускулярной диагностики для реализации данного метода.

6.3 ПРОГРЕСС В РАЗРАБОТКЕ ИНЖЕНЕРНОГО ПРОЕКТА СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ РЕАКТОРА ИТЭР ПО ПОТОКУ АТОМОВ

В.И. Афанасьев¹, Д.Б. Гаркуша², А.И. Кисляков¹, С.С. Козловский³,
Е.Г. Кузьмин², Е. Ламзин², Б.В. Люблин², М.П. Петров¹, С.Я. Петров¹,
Ф.В. Чернышев¹, Г.Е.Шаталов⁴, С.В.Шелудяков⁴

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 194021, С.-Петербург, Политехническая ул., д.26

²НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, 196641, С.-Петербург, дорога на Металлострой, д.3, ljublv@sintez.niiefa.spb.su

³СПБ ГПУ, 195251, С.-Петербург, ул. Политехническая, д.29

⁴РНЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Курчатова, д.1

В настоящее время разработка систем диагностики плазмы реактора ИТЭР переходит от стадии концептуального проектирования и научно-исследовательских работ к стадии инженерного проектирования систем, а также их интеграции с элементами реактора и соседними диагностическими приборами. Все системы должны быть подвергнуты тщательному нейтронному, механическому и электромагнитному анализам, разработаны устройства дистанционного контроля элементов приборов, устройства юстировки и т.д. Настоящая работа, демонстрирующая подобный подход, посвящена описанию очередного этапа инженерного проектирования системы диагностики плазмы по потоку атомов.

Система диагностики плазмы по потоку атомов, разрабатываемая для установки ИТЭР, и первый этап ее инженерного проектирования подробно описаны в [1,2]. Система состоит из двух параллельно работающих атомных анализаторов, предназначенных для измерений параметров ионной компоненты плазмы в диапазоне высоких (HENPA) и низких энергий (LENPA). Одним из критических элементов анализаторов являются тонкие алмазоподобные пленки (100 – 300 Å), предназначенные для обдирки нейтральных атомов, вылетающих из плазмы. Важными вопросами является выяснение времени жизни этих пленок в условиях ИТЭРа, а также разработка систем дистанционного контроля их качества. Проведенный анализ показал, что основным механизмом, определяющим время жизни пленок, является их распыление потоками дейтериевых и тритиевых атомов, причем наиболее интенсивное воздействие оказывают атомы с энергиями 1-2 КэВ. Совместное рассмотрение результатов расчетов испускаемых из плазмы ИТЭР потоков дейтериевых и тритиевых атомов и эффективности распыления пленок дает время жизни одного монослоя пленки $\sim 10^5$ с. Если принять, что критическим событием для пленки является распыление 10 монослоев, то время жизни пленки ожидается $\sim 10^6$ с или 1500 импульсов ИТЭР (20 минут каждый). С целью уточнения данных характеристик в 2005 году на стенде ФТИ

предполагается проведение экспериментов по исследованию параметров распыления пленок в потоках дейтериевых ионов.

Для осуществления дистанционного контроля качества пленок разработана и экспериментально испытана система на основе осветителя (светодиода) и миниатюрной телевизионной камеры (Рис. 1). Система вводится в камеру анализаторов во время паузы между импульсами установки и затем вновь убирается за нейтронную защиту. Фотография пленки, полученная при помощи данной системы, показана на Рис. 2.

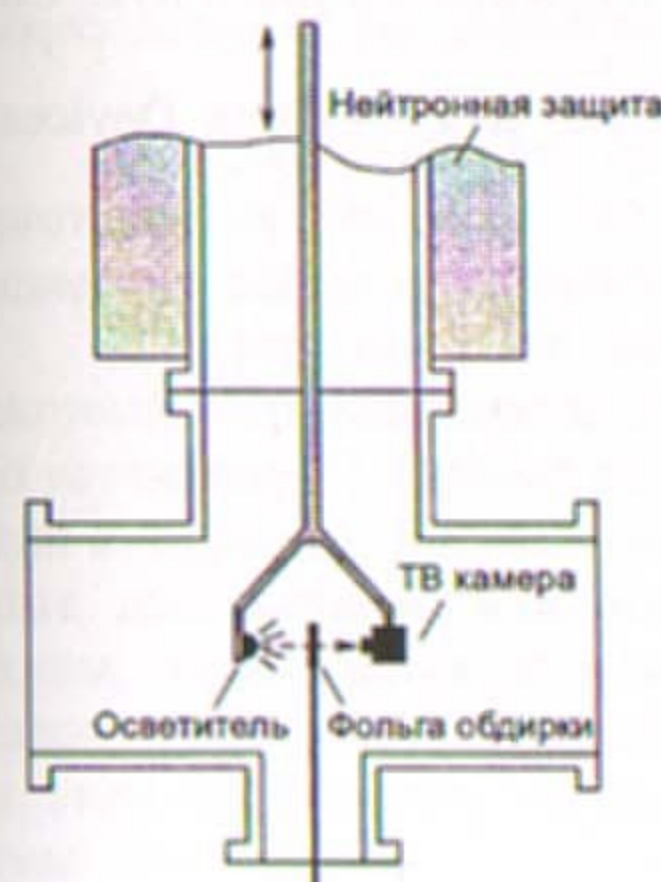


Рис.1

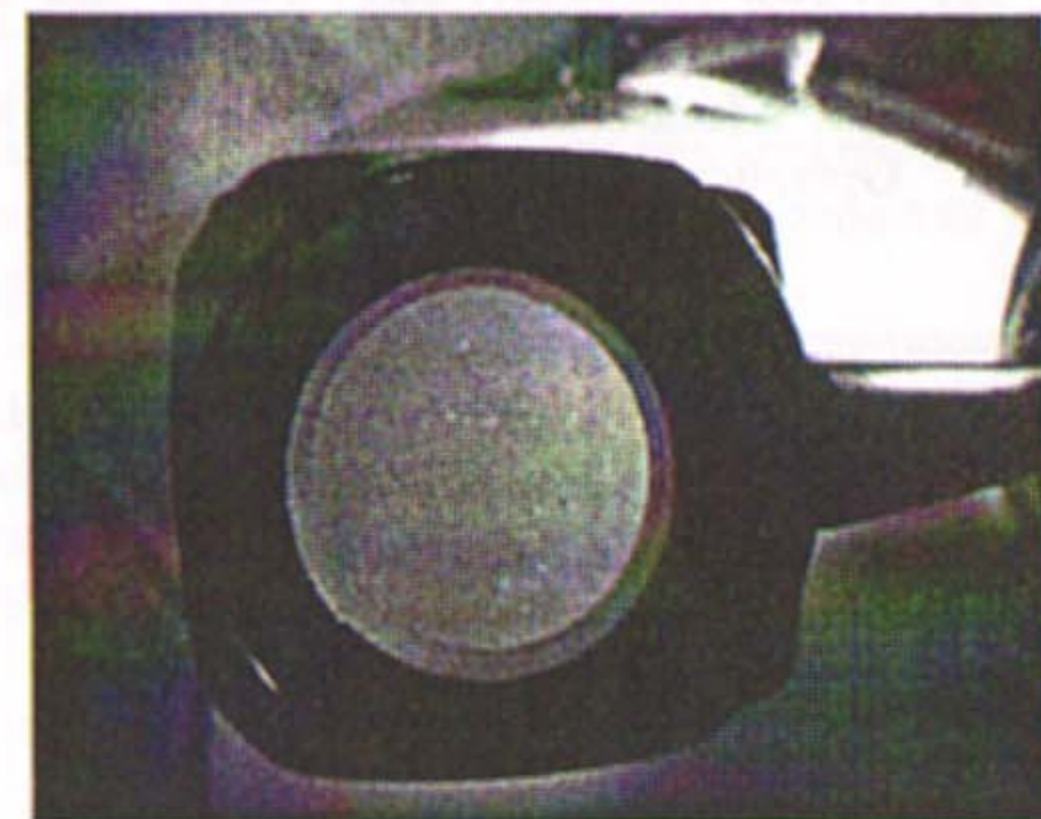


Рис.2

Для определения величины нейтронной нагрузки на систему были проведены подробные нейтронные расчеты. Показано, что нейтронная нагрузка на входную пленку анализаторов составляет $(1-6) \times 10^9$ нейтр./ $(\text{см}^2/\text{с})$. Уровень нейтронных потоков в области расположения детекторов существенно меньше и составляет $\sim 2 \times 10^7$ нейтр./ $(\text{см}^2/\text{с})$, тем не менее для увеличения отношения «сигнал/шум» были внесены некоторые изменения в конструкцию трубы пролета. Разработаны специальные вставки в трубу с внутренним профилем, повторяющим телесный угол регистрации нейтральных атомов, но ограничивающие величину нейтронных потоков, поступающих на вход анализаторов. Кроме того, перед tandemом анализаторов устанавливается блок железо-водной защиты, толщиной ~ 1 м с целью уменьшения нейтронного и гамма-фона. Измененная конструкция вновь будет подвергнута нейтронному анализу.

По выполненным оценкам допустимые величины рассеянных магнитных полей в области анализирующей системы приборов составляет ≤ 300 Гс для HENPA и ≤ 100 Гс для LENPA, следовательно приборы должны быть защищены от рассеянных магнитных полей, превышающих данные величины. Расчеты карты рассеянных полей в области расположения анализаторов показали, что необходимо применение специальных магнитных

экранов, поскольку значения рассеянных полей в данной области лежат в пределах 800 – 1000 Гс. На основе электромагнитных расчетов разработана конструкция охватывающих корпуса приборов экранов, изготовленных из мягкой магнитной стали, например, Ст.10. Толщина экранов – 20мм. Конструкция таких толстостенных экранов также должна учитываться при проведении нейтронных расчетов.

Литература

- [1] I. A.I. Kislyakov, M.P. Petrov and E.V. Suvorkin, *Plasma Phys. Control Fusion*, **43**, 1775-1783 (2001).
- [2] V.I. Afanasiev, A.I. Kislyakov, S.S. Kozlovski et al., *Plasma Devices and Operations*, **12**, 3, 209-215 (2004).

6.4 МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЫ ВСТРОЕННЫМ ФОЛЬГОВЫМ АНАЛИЗАТОРОМ НЕЙТРАЛОВ В УСТАНОВКАХ С МАГНИТНЫМ УДЕРЖАНИЕМ

Д.В. Жинкин, В.А Курнаев

Московский инженерно – физический институт 115409, г. Москва, Каширское шоссе 31, zhuk-@mail.ru

В данной работе предложена концепция измерения распределения энергетических спектров нейтралов перезарядки по радиусу установки для определения профиля ионной температуры плазмы.

Для решения этой задачи предполагается использовать встраиваемый фольговый энергоанализатор нейтралов перезарядки, работающий в собственном поле установки [1]. Прибор располагается между катушками тороидального поля в тени диафрагмы. Близость анализирующей системы прибора по отношению к плазме дает возможность выбрать геометрию, позволяющую регистрировать частицы, относящиеся к разным областям плазменного шнура. Для этого предложено осуществлять сканирование плазмы в течение импульса установки. При этом необходимо, чтобы входная щель прибора двигалась относительно плазменного шнура.

Это может достигаться использованием диафрагм, расположенных друг напротив друга в непосредственной близости. Входная щель прибора представляет собой область перекрытия щелей этих диафрагм. При этом, если диафрагма со щелью в виде дуги будет поворачиваться относительно другой (неподвижной), то входная щель прибора будет перемещаться вдоль диаметра неподвижной диафрагмы (рис.1), пропуская частицы, покинувшие различные области плазменного шнура. Это позволит формировать пучки нейтралов перезарядки с малой угловой расходимостью и пропускать их в область анализа из областей плазмы с различными значениями малого радиуса r в различные моменты времени.



Рис.1. Диафрагмы, формирующие пучок быстрых нейтралов на входе анализатора

Расчеты пространственного разрешения, которое может быть достигнуто при хордовых измерениях показывают, что радиальное разрешение может быть лучше 10%, а за время импульса длительностью 1 с можно просканировать плазменный шнур порядка 10 раз при скорости вращения показанной на рис.1 диафрагмы равной 600 об/мин.

Кроме того, так как каждое взаимное расположение диафрагм однозначно определяет угол падения частиц на фольгу, то, анализируя суммарный ток во всех коллекторах анализатора, можно получить угловое распределение нейтралов перезарядки, бомбардирующих стенку токамака.

1. Е.А. Гриднева, В.А. Курнаев Д.В. Жинкин //Тезисы докладов X Всероссийской конференция по диагностике высокотемпературной плазмы г.Троицк, 8-13 июня 2003 г., с.29

6.5 КОРПУСКУЛЯРНАЯ ДИАГНОСТИКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЦРН

А.М. Белов, А.И. Маркин, В.А. Мыслин

ФГУП «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», 142190, Троицк, Московская обл. Россия

В работе представляется схема и особенности корпускулярных измерений в условиях ионно-циклотронного резонансного нагрева (ИЦРН) компонент H и D. Эксперименты выполнялись на токамаке Т-11М с $R=0,7$ м, $a=0,2$ м, $B_T=1$ Тл, $I_p=70...100$ кА в режимах L, H омического нагрева с $T_i=100...150$ эВ, $T_e=300...450$ эВ, $n_e=1...3 \cdot 10^{19}$ м⁻³ и с включением фазы (на 15...40 мс) ИЦРН в условиях ограничения плазменного шнура графитовой (С) или литиевой (Li) диафрагмой. ИЦРН проводился в условиях удержания плазмы как толстым медным кожухом, так и с применением системы равновесия (без кожуха). На Рис. 1а представлена схема наблюдения.

Для регистрации энергетического спектра потока атомов перезарядки, вылетающих перпендикулярно тороидальному магнитному полю, на Т-11М используется многоканальный анализатор нейтральных атомов "Лакмус" (АН-10), Рис. 1б. АН-10 располагался в экваториальной плоскости тора напротив литиевой диафрагмы и регистрировал энергетическое распределение атомов дейтерия в диапазоне энергий 0,2...2 кэВ со скоростью счета отдельных импульсов до 1МГц. Сепарация атомов H и D в анализаторе выполнялась в магнитном (по импульсу) и в электрических (по энергии) полях. В качестве детектора использовался вакуумный электронный умножитель (ВЭУ-6). Максимальный телесный угол коллиматора АН-10 составлял $3 \cdot 10^{-4}$ стерадиан, а размер пятна, видимый прибором в центре плазмы составлял 5×5 см². Схема регистрации представлена на Рис. 2, где N – количество временных окон, в течение которых осуществляется прием импульсов от АН-10, $t_{рег.}$ – время, в течение которого Счетчики регистрируют импульсы, поступающие от детекторов ВЭУ-6. Параметры регистрации ССД задаются программно. Параметры работы анализатора задаются аппаратно.

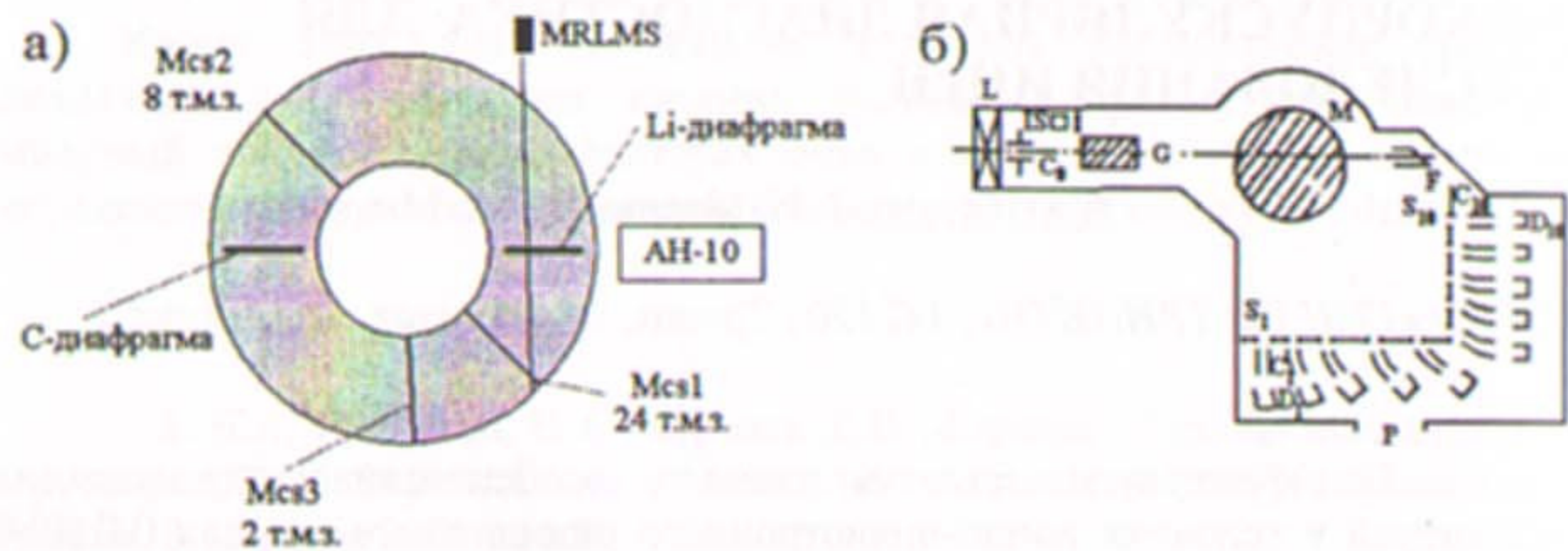


Рис. 1. а) Схема наблюдения. б) Схема АН-10, установленного на токамаке Т-11М. L – шибер, C_0 – конденсатор очистки, IS – система калибровки, G – камера обдирки, M – магнит, F – окно, S_1 – S_{10} – окна для отклоненных частиц, C_1 – C_{10} – калибрующие конденсаторы, D_1 – D_{10} – ВЭУ-6, P – откачной патрубком.

ССД обеспечивает регистрацию потоков нейтральных частиц в однократном и автоматическом режимах регистрации согласно схеме, представленной на Рис. 3. Параметры работы анализатора, параметры регистрации и экспериментальные данные автоматически заносятся в Базу данных Корпускулярной диагностики. Представление исходных и обработанных данных осуществляется в виде 3D и 2D графиков. Результаты обработки также хранятся в БД КД, что обеспечивает их последующий просмотр и при необходимости передачу в другие программные продукты.

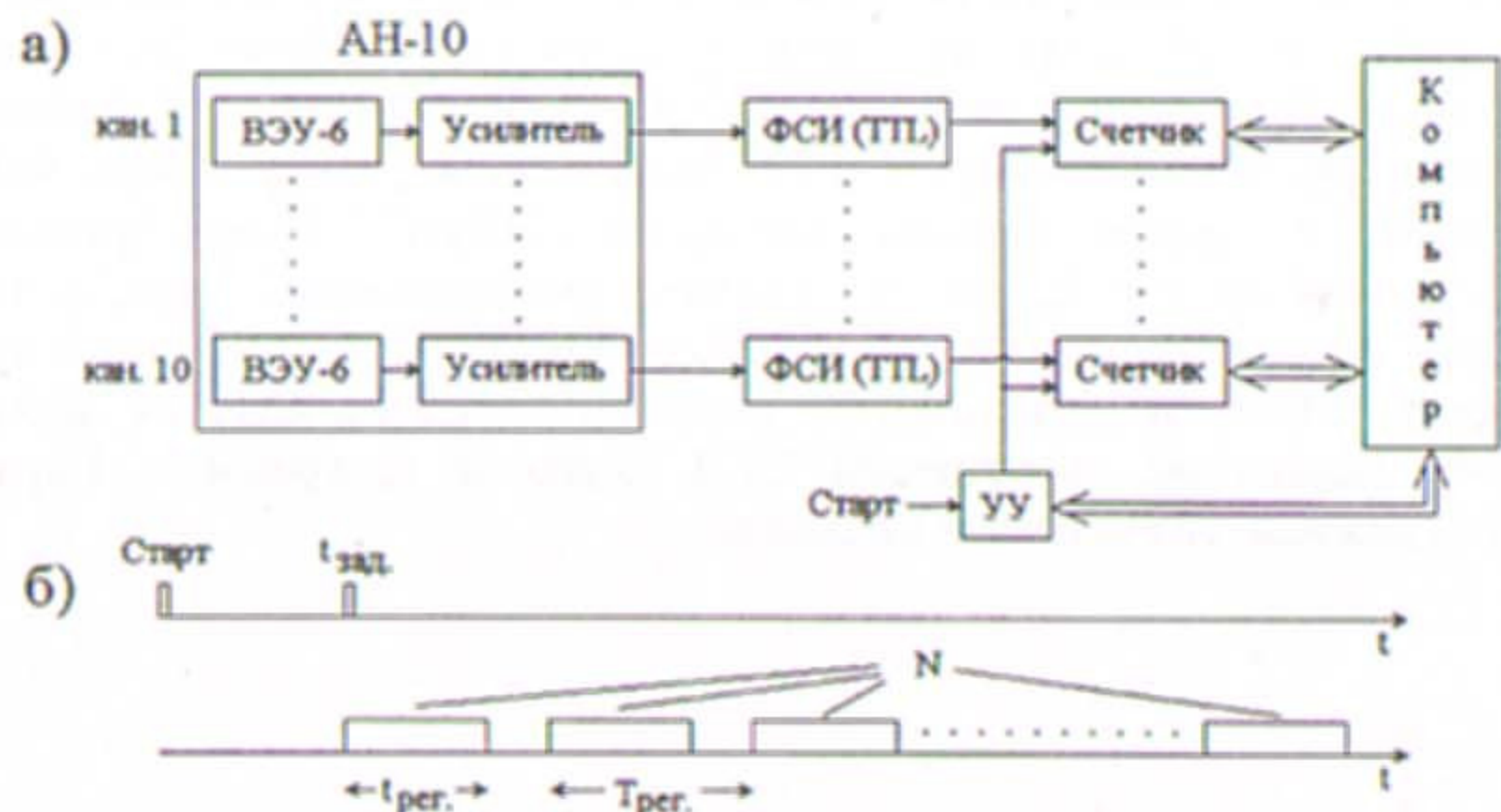


Рис. 2. Блок-схема (а) регистрации данных АН-10, работающего в счетном режиме и временная диаграмма (б) работы устройства управления.

На Рис. 3 представлены результаты ИЦРН плазмы токамака Т-11М, полученные с помощью корпускулярной диагностики. На Рис. 3а,б

представлены результаты нагрева в условиях С-диафрагмы и удержания плазменного шнура медным кожухом, а на Рис. 3в в условиях Li-диафрагмы и с применением системы управления положением плазменного шнура (без медного кожуха).

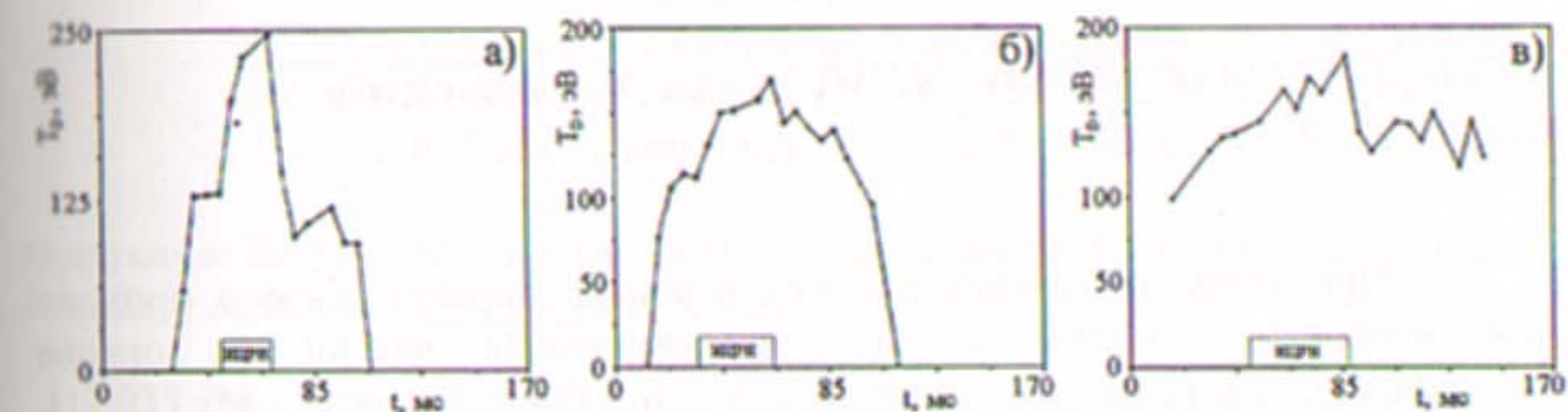


Рис. 3. Временной ход ионной температуры плазмы Т-11М в режиме с ИЦРН.

Литература

1. A.I. Markin, A.G. Alekseyev, A.M. Belov, et.al. 30th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys., St. Petersburg, 2003 ECA Vol. 27A, P-3.161.
2. А.М. Белов, А.И. Маркин, А.Г. Алексеев, и С.В. Мирнов. Физика плазмы. Т.31 (2005), №2, с.126.

6.6 ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ТЕПЛОЙ ДЕТЕКТОР НЕУДЕРЖИВАЕМЫХ АЛЬФА-ЧАСТИЦ

А. Г. Алексеев

ФГУП «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», 142190, Троицк, Московской обл.,
alexag@triniti.ru

Проведены испытания прототипа недавно предложенного прибора для измерения спектра и профиля энергичных частиц на основе многофольгового теплового детектора (multi-foil thermal detector - MFTD) [1]. В его основе лежит идея измерения потерь энергии частиц в нескольких последовательно расположенных тонких фольгах равной или различной толщины, либо измерения мощности пучка частиц, прошедшего параллельно расположенные фольги разной толщины. На ускорителе легких ионов H^+ , D^+ и He^{++} были протестированы три типа поглощающих (фильтрующих) фольг: 1 μm Ni, пленка алмазоподобного углерода (DLC) толщиной 150 нм, и алмазная CVD пленка толщиной 155 нм. Верхний предел энергий ионов составлял 350 кэВ (однозарядные ионы) и 700 кэВ (двухзарядные ионы). Полученные результаты измерений коэффициентов ослабления мощности пучка при прохождении поглощающих пленок в целом хорошо согласуются с расчетными, за исключением области низких энергий, в которой используемый код TRIM имеет ограниченную применимость.

1. A.G. Alekseyev, D.V. Portnov, F.E. Cecil, 30th EPS Conf. on Controlled Fusion & Plasma Phys., July 7-11, 2003, St.Petersburg, Russia, P-1.171.

6.7 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ НЕЙТРОННОЙ ЭМИССИИ В МНОГОПРОВОЧНОЙ ЛОВУШКЕ ГОЛ-3

Ю.С. Суляев, А.В. Аржанников, А.М. Батраков, А.В. Бурдаков,
И.А. Иванов, К.И. Меклер, В.В. Поступаев, А.Ф. Ровенских,
С.В. Полосаткин, В.Я. Сазанский, С.Л. Синицкий.

Институт Ядерной Физики СО РАН им. Г.И. Будкера, 630090 Новосибирск,
Россия, e-mail: Yu.S. Sulyaev@inp.nsk.su

На установке ГОЛ-3 в режиме с многопробочным удержанием плазмы достигнут существенный прогресс в увеличении ионной температуры и времени удержания плазмы. В настоящее время плазма с плотностью $\sim 10^{15}$ cm^{-3} и ионной температурой 1-2 кэВ удерживается в ловушке более 1 мс. Экспериментальное исследование такой плазмы с субтермоядерными параметрами представляет особый интерес с точки зрения эмиссии нейтронов, как продуктов D-D – реакций.

Такие исследования на установке ГОЛ-3 проводятся с помощью комплекса нейтроновых диагностик. Полное число нейтронов за импульс измеряется серебряным активационным детектором и миниатюрными пузырьковыми камерами. С помощью сцинтилляционных детекторов и применения метода цифровой дискриминации гамма-квантов по форме импульса была зарегистрирована длительная (>1 мс) эмиссия нейтронов, рождающихся в D-D реакции. Величина потока нейтронов зависит от условий эксперимента и имеет типичные значения 10^9 - 10^{10} нейтрон $\cdot m^{-1} \cdot сек^{-1}$.

В настоящей работе исследуется динамика нейтронного излучения во время нагрева плазмы релятивистским пучком и в процессе её остывания. Для этой цели была разработана отдельная помехозащищенная нейтронная диагностика – локальные детекторы. Детектор состоит из небольшого сцинтиллятора, органического или кристаллического, и индивидуального световода, соединяющего сцинтиллятор с фотоумножителем, расположенным в удаленной пультной. Локальные детекторы могут быть размещены в любом месте установки, в частности их размеры позволяют поместить между катушками соленоида вплотную к стенке вакуумной камеры. Массивные катушки соленоида в этом случае работают в качестве коллиматора жесткого излучения, таким образом локальные детекторы регистрируют жесткое излучение только в пределах одной ячейки многопробочной ловушки. Свет от сцинтилляторов собирается индивидуальными световодами и транспортируется в многоканальный блок ФЭУ. Детекторы работают в токовом режиме, а для мониторинга фона жесткого тормозного и γ -излучения применяются дополнительные локальные детекторы на основе сцинтилляторов BGO и PWO.

Энерговыделение электронного пучка неоднородно по длине установки. На расстоянии ~1 м от входной пробки формируется область максимального нагрева. В этом же месте наблюдается резкий максимум нейтронной эмиссии. Это означает, что на участке малой длины сосредоточен значительный градиент ионной температуры, который может вызывать макроскопическое течение плазмы вдоль ловушки. Существование максимума ионной температуры согласуется с диамагнитными измерениями поперечного давления плазмы.

В эксперименте с локальными детекторами зарегистрированы интенсивные вспышки и регулярная модуляция потока нейтронов. Такое поведение эмиссии нейтронов начинается через 4-6 мкс после начала инжекции пучка и продолжается в течение 30-60 мкс. Отметим, что частота регулярной модуляции нейтронного потока в соседних ячейках многопробочной ловушки может отличаться в полтора раза, взаимное влияние ячеек невелико. Период модуляции нейтронного потока много больше характерных периодов колебаний плазмы в установке ГОЛ-3. С течением времени период всегда возрастает.

Наиболее вероятный механизм возникновения модуляции нейтронного излучения – это возбуждение колебаний плотности и температуры ионов, запертых в отдельной ячейке гофрированной ловушки, в процессе течения через нее потока горячей плазмы. Этот поток вызван температурными градиентами, которые непосредственно наблюдаются с помощью локальных нейтронных детекторов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 03-02-16271, 04-01-00244.

6.8 КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ДИЗАЙН МОНИТОРА НЕЙТРОННОГО ПОТОКА ИТЭР В ДИВЕРТОРНОЙ ЗОНЕ

Ю.А. Кашук¹, А.В. Красильников¹, Д.В. Просвирин¹, А.Ю. Цуцких¹

C.I. Walker²

¹ФГУП «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», 142190, г. Троицк, Московская обл., Россия

²ITER International Team, Garching, Max-Planck-Institute fur Plasmaphysik, Boltzmanstrasse 2, D-85748 Garching, bei Munchen, Germany

В докладе рассмотрены условия работы систем нейтронной диагностики ИТЭР, отвечающих за измерение нейтронного выхода токамака-реактора. На основании результатов нейтронных расчетов предложена концепция системы мониторинга нейтронного потока, размещенная в диверторной зоне ИТЭР. Предложено устройство диверторного монитора нейтронного потока исходя из требования к нейтронной диагностике ИТЭР и условий эксплуатации. В качестве чувствительных элементов монитора предлагается использовать четыре камеры деления с разной чувствительностью и различными радиаторами. Такая система позволяет обеспечить измерения нейтронного потока во всем динамическом диапазоне нейтронного выхода токамака ИТЭР с погрешностью не более 10% и временным разрешением 1 мсек. Предложены варианты размещения блока детектирования в диверторной кассете и условия его интеграции в существующий проект. Рассмотрены вопросы градуировки диверторного монитора нейтронного протока для определения абсолютного значения нейтронного выхода ИТЭР.

6.9 ПРОГРЕСС В КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ РАЗРАБОТКЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕЙТРОННОЙ КАМЕРЫ ИТЭР

А.Ю. Цуцких¹, Д.В.Просвирин¹, А.В.Красильников¹, Ю.А.Кашук¹,
К.И.Волкер²

¹ ФГУП «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», 142190 г. Троицк, Московская обл. Россия

² International team ITER, Garching

Концептуальная разработка вертикальной нейтронной камеры (ВНК) ИТЭР пришла к заключительной фазе. Определено расположение коллиматоров и детекторов. Решены вопросы интеграции ВНК в конструкцию ИТЭР. В процессе разработки удалось избежать конфликтов с другими диагностиками и конструктивными элементами токамака. Проведен инженерный анализ для конструкционной разработки деталей коллимационного блока ВНК.

Проведены расчеты эффективности нейтронных коллиматоров для всех потенциально возможных вариантов расположения многоканальной коллимационной системы (пробка верхнего патрубка, вне вакуумной камеры в диверторном сечении, в диверторном патрубке с интеграцией в диверторную кассету). Оценивалось отношение количества прямых нейтронов, прошедших через коллиматор к рассеянным нейтронам, образующим фон в измерениях. Для расчетов использовалась программа MCNP версия 4с и библиотеки сечений ENDF/B-VI. Монте-Карло расчёты были проведены для модели нейтронного источника по основным параметрам соответствующей геометрии плазмы шнура токамака ИТЭР. Источник представлял собой набор вложенных тороидов с гистограммным распределением интенсивности по малому радиусу. Потенциальные детекторы – камеры деления с радиатором ^{238}U (порог ~ 1 МэВ) и алмазные детекторы (с порогом регистрации выше 7 МэВ).

Многоканальная система состоит из десяти коллиматоров диаметром 30 мм и длиной 1,5 м. Четыре из них интегрированы в диверторную кассету, остальные шесть являются составной частью съемной детали опорного рельса дивертора. Такая конструкция обеспечит измерения плотности потока нейтронов с магнитных поверхностей с приведённым малым радиусом $\rho = r/r_0 \leq 0,7$.

6.10 ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ДЛЯ ИТЭР

И.Н. Чугунов, А.Е. Шевелев, Д.Б. Гин, Д.Н. Дойников, А.Л. Изотов,
В.О. Найденев, И.А. Полуновский, А.И. Чугунов

Физико-технический институт РАН им.А.Ф.Иоффе, 194021,

С.-Петербург, Политехническая ул., 26, Россия, Chugunov@cycla.ioffe.rssi.ru.

Гамма-спектрометрическая диагностика высоко температурной плазмы основывается на регистрации и анализе спектров гамма-квантов разрядки дискретных уровней ядер, возбуждаемых в ядерных реакциях. Времена жизни возбужденных состояний в интересующей нас области гораздо меньше наносекунды, поэтому излучение гамма квантов происходит практически в том же месте, где произошла реакция. Высокая проникающая способность гамма излучения дает возможность просматривать плазму на всю глубину и не требует выхода диагностических каналов в вакуумный объем. Энергии гамма- переходов измеряются спектрометром по пикам на непрерывном фоне энергетического спектра и с высокой степенью достоверности характеризуют ядро, в котором произошел этот переход. По энергиям гамма линий определяется ядра принимающие участие в реакции. Из площадей пиков $S(E_\gamma)$ в зарегистрированном спектре, используя известные функции отклика детектора $\epsilon(E_\gamma)$, восстанавливается спектр испущенных гамма-квантов и определяются их интенсивности $I(E_\gamma) = S(E_\gamma)/\epsilon(E_\gamma)$. Знание интенсивностей гамма-линий позволяет определить произведение плотностей ядер участвующих в реакциях $(n_A n_a)$ и полное число ядерных реакций: $N(A, \alpha) = (n_A n_a) \langle v \sigma \rangle / (1 + \delta_{A, \alpha})$, где n_A и n_a плотности частиц участвующих в реакции, $\langle v \sigma \rangle$ скорость реакции (сечение реакции усредненное по распределению относительных скоростей взаимодействующих частиц), $\delta_{A, \alpha}$ символ Кронекера. Таким образом гамма диагностика дает возможность различать быстрые частицы (H, D, T, ^3He , ^4He) в плазме и изучать их поведение, а также определять наличие легких примесей.

Частицы, ускоренные до энергий, достаточных для возбуждения ядерных реакций, образуются в плазме токамака при реакциях синтеза, а также могут возникать при ICRF нагреве и в некоторых случаях при NBI нагреве.

Среди важных задач диагностики высокотемпературной плазмы находятся развитие методов измерения энергии и распределения плотности удерживаемых и не удерживаемых (confined and escaping) альфа-частиц и измерение профилей альфа-источников. Томографическая гамма-диагностика напрямую решает вторую задачу. Решение первой задачи гамма диагностикой возможно, если детекторы обладают высоким энергетическим

разрешением, позволяющим по доплеровскому уширению гамма линий определить угловое распределение сталкивающихся частиц /1/.

В настоящее время гамма спектрометрическая диагностика успешно развивается на токамаке ДЖЕТ (см. например /2,3/). В этих экспериментах было показано, что анализ зарегистрированных гамма-спектров и их изменения в процессе разряда позволяет одновременно идентифицировать различные быстрые ионы, вызывающие ядерные реакции сопровождающиеся эмиссией гамма-квантов, включая высокоэнергичные альфа-частицы, оценивать эффективные температуры на хвосте энергетического распределения ионов и их относительные концентрации, а также проводить томографическую реконструкцию радиального профиля источников гамма-эмиссии.

Для томографических гамма-спектрометрических исследований на ИТЭР необходимо минимум два ракурса наблюдений. Такая же задача стоит и для нейтронной томографии. Так как перед гамма-детекторами желательно устанавливать фильтры, ослабляющие поток нейтронов, то гамма-детекторы конструктивно удобно размещать за нейтронными. Единственное условие - чтобы за границей нейтронной камеры было порядка 3м пространства свободного от неподвижных конструктивных элементов токамака.

Важной характеристикой гамма спектрометрической диагностики является временное разрешение, т.е. минимальное время за которое накапливается спектр с достаточной статистической значимостью. Для улучшения временного разрешения необходимо использовать спектрометры с высокой эффективностью регистрации и высокоскоростное электронное обеспечение. Разработанная нами методика спектрометрических измерений, позволяет увеличить предельную загрузку как минимум в 10 раз, по сравнению с обычно используемой, без заметного ухудшения энергетического разрешения. Методика основана на оцифровке с частотой в несколько десятков МГц напряжения поступающего с детектора гамма излучения и последующего анализа полученной осциллограммы с целью построения гамма спектра. В процессе этого анализа производится разделение наложенных друг на друга импульсов, определение их амплитуды и времени регистрации. Тестирование этой методики на циклотроне ФТИ в реакции $^{10}\text{B}(\alpha, \gamma)^{13}\text{C}$ показало, что до нагрузок порядка $5 \cdot 10^5$ имп/с заметного ухудшения разрешения не происходит. Разработанная нами методика в настоящее время устанавливается на ДЖЕТЕ.

Наличие нейтронных потоков, особенно в экспериментах с DT-плазмой, из-за регистрации нейтронов гамма-детектором приводит к увеличению непрерывного фона, что ухудшает отношение пик/фон и, следовательно, качество измерений. Для ослабления нейтронного потока нами разработаны, изготовлены и испытаны на нейтронном DT-генераторе нейтронные attenuаторы, содержащие гидрид лития-6 (^6LiH) /4/.

Нейтронный attenuатор длиной 30 см ослабляет нейтронный поток на порядок, в то время как гамма излучение с энергией 16 МэВ ослабляется всего в 1.8 раза. В экспериментах на ДЖЕТ в DT-серии планируется использование наших ^6LiH attenuаторов.

В дальнейшем планируется испытать в экспериментах на ДЖЕТ, разработанный нами для ИТЭР прототип высоко эффективного гамма-спектрометра полного поглощения GAMMACELL /5/.

Доклад посвящен описанию существующего в настоящее время состояния разработки системы гамма спектрометрической диагностики.

1. V.G., Kiptily, I.N.Chugunov, V.O.Naidenov, et al., *Fusion Technol.* 22,(1992), 454
2. V.G.Kiptily, F.E.Cecil, O.N.Jarvis, et al., *Nucl.Fusion* 42 (2002), 999
3. V.G. Kiptily, Yu.F.Baranov, R.Barnsley, et al., *Phys.Rev.Lett.* 93 (2004). 115002
4. V.G.Kiptily, I.N.Chugunov, V.O.Naidenov, et al., *Plasma Devices and Operations* 7 (1999),255
5. И.Н.Чугунов, А.Е.Шевелев, Д.Н.Дойников и др. ДВП-10. Тезисы докладов. Троицк, 8-13 июня, 2003 г., стр.56.

6.11 ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЯ

Д.Б. Гин, А.Е. Шевелев, Д.Н. Дойников, А.Л. Изотов, И.А. Полуновский,
В.О. Найденев, И.Н. Чугунов, А.И. Чугунов

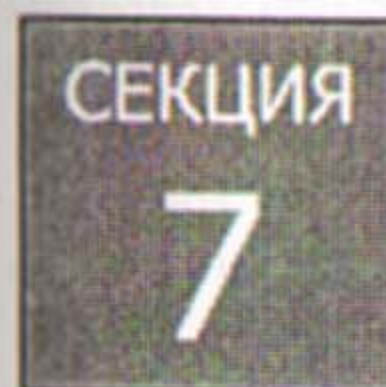
Физико-технический институт РАН им.А.Ф.Иоффе, 194021,
С.-Петербург, Политехническая ул., 26, Россия, ripfa@mail.ioffe.ru

Одной из важных характеристик гамма-спектрометрической диагностики высокотемпературной плазмы является временное разрешение, т.е. минимальное время, за которое накапливается спектр с достаточной статистической значимостью. Для улучшения временного разрешения необходимо использовать спектрометры с высокой эффективностью регистрации и высокоскоростное электронное обеспечение. Обычно используемые для оцифровки амплитуды импульса (зарегистрированной энергии кванта) спектрометрические АЦП ограничивают допустимую загрузку на уровне несколько десятков кГц из-за наложений импульсов друг на друга. Разработанная нами методика спектрометрических измерений, позволяет увеличить предельную загрузку как минимум в 10 раз без заметного ухудшения энергетического разрешения. Методика основана на оцифровке с частотой в несколько десятков МГц напряжения поступающего с детектора гамма-излучения и последующего анализа полученной осциллограммы с целью построения гамма спектра. В процессе этого анализа производится разделение наложенных друг на друга импульсов, определение их амплитуды и времени регистрации. Разработанная методика была применена при исследовании жесткого рентгеновского излучения на токамаке ГЛОБУС-М /1,2/.

На циклотроне ФТИ с целью исследования зависимости энергетического разрешения от загрузки мы провели измерение гамма спектров в реакции $^{10}\text{B}(\alpha, \text{p})^{13}\text{C}$ при разных токах пучка α -частиц. В экспериментах был использован однокристалльный спектрометр NaI(Tl) 150x100. Длительность электрического импульса с анода ФЭУ около 2 мкс. Частота оцифровки была выбрана 30 МГц. Тестирование показало, что до загрузок порядка $5 \cdot 10^5$ имп/с заметного ухудшения разрешения не происходит.

В докладе представлено описание методики измерений и ее тестирования.

1. В.К. Гусев, И.Н. Чугунов, А.Е. Шевелев, и др. ДВП-10 Тезисы докладов. Троицк, 8-13 июня, 2003 г., стр.3
2. В.К. Гусев, И.Н. Чугунов, А.Е. Шевелев и др. Физика плазмы, т. 30, No. 2, 2004, стр. 180-184.



ДИАГНОСТИКА ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЫ

7.1 МНОГОПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЙ ЗОНД ДЛЯ ПЛАЗМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Л.Б. Беграмбеков¹, П.А. Шигин¹, J. Gunn², J. Y. Pascal²,
C. Brosset²

¹Московский инженерно-физический институт, 115409, Москва, Каширское ш, 31, Россия, lbb@plasma.mephi.ru

²Association EURATOM-CEA sur la fusion contrôlée CEA Cadarache², 13108 Saint Paul Lez Durance, France

В работе представлен многопозиционный материаловедческий зонд для термоядерных установок. Зонд предназначен для исследований корпускулярных потоков в плазме, процессов перенапыления, эрозии и т.п. Приводятся первые результаты применения зонда в токамаке Тор Супра.

Материаловедческий зонд (рис.) состоит из двух плат 1, двух поперечных деталей 2, керамического диска 3 и зонда Ленгмюра 4. На каждой плате размером $195 \times 12 \times 4$ мм³ расположено по пять пазов, в которых с помощью прижимных пластин 5 закрепляются образцы 6 размером $9 \times 9 \times 2$ мм³ (всего десять образцов). Температуры первого и третьего образцов (считая от нижней части зонда на рис.), закрепленных на одной из плат, контролируются с помощью термопар (на рис. не видны). Платы 1 установлены параллельно друг другу и соединены между собой через детали 2 и крепятся на керамическом диске 3. На диске расположены электрические вводы, к которым подведены провода термопар. Таким образом, зонд позволяет экспонировать одновременно по пять образцов на ионной и электронной сторонах зонда на разных расстояниях от оси плазменного шнура. Керамический диск 3 служит также для пристыковки зонда к

приводному устройству токамака (см. ниже). Зонд устанавливается в графитовый кожух 7 с отверстиями напротив образцов. Кожух экранирует детали зонда от радиационных и корпускулярных воздействий плазмы.

В токамаке Тор Супра зонд работает совместно с гидравлическим приводом, обеспечивающим его «прыгающий» режим ввода-вывода из плазмы за время порядка 50 мсек.

Проведена первая серия экспериментов с зондом в токамаке. Образцы углеграфитового композита типа CFC N11 вводились в периферийную область плазмы. Расстояние от нижнего образца до оси плазменного шнура при экспонировании достигало 0,4 м при том, что малый радиус токамака Тор Супра равен 0,72 м. Типичное время облучения составляло 50 мсек. После экспонирования в плазме образцы прогревались и измерялись термодесорбционные спектры десорбирующихся газов и количество захваченных частиц.

Обнаружено, что в экспонированные в плазме образцы внедрялись как ионы дейтерия (рабочий газ), так и ионы водорода (примесь). Количество захваченного дейтерия примерно на два порядка величины меньше, чем водорода во всех образцах. Распределения водорода и дейтерия по радиусу плазменного шнура различаются. Захват дейтерия резко уменьшается в периферийных образцах. В то же время, количество водорода во всех десяти образцах остается практически постоянным. Получены свидетельства формирования гидратированного слоя на поверхности графита при облучении плазмой токамака.

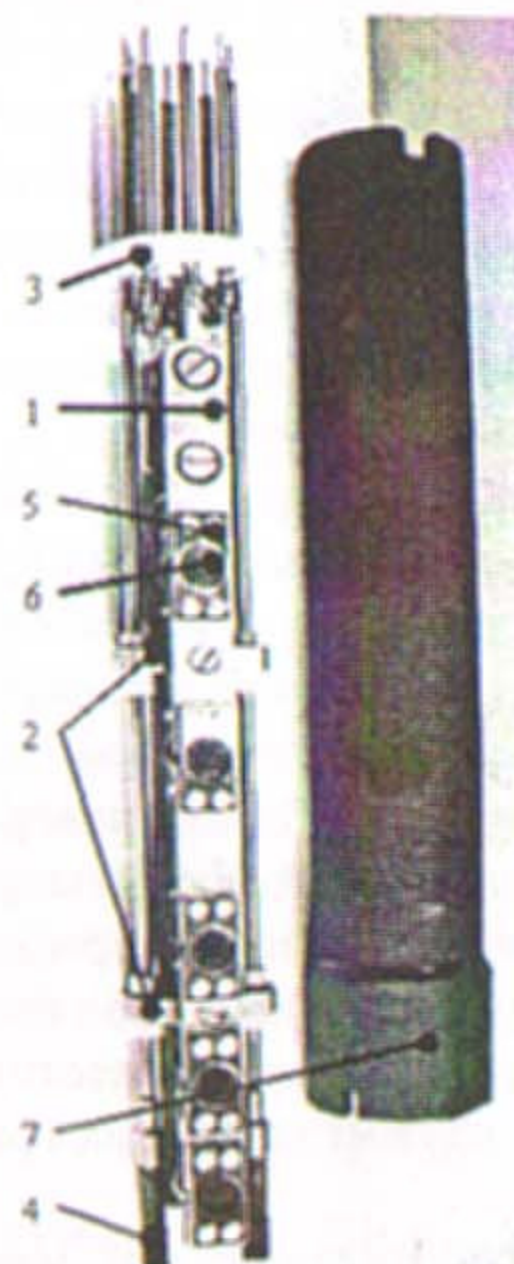


Рис. Многопозиционный материаловедческий зонд. 1 – плата, 2 – поперечная деталь, 3 – керамический диск, 4 – зонд Ленгмюра, 5 – прижимная пластина, 6 – образец, 7 – графитовый кожух.

7.2 ЗОНДОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРАНИЧНО-УСТОЙЧИВОГО ПРОФИЛЯ ПЛАЗМЫ В БИДИПОЛЬНОЙ ЛОВУШКЕ «МАГНЕТОР»

А.М. Вайтонене, В.В. Вайтонис, Д.Е. Вовченко, Г.В. Крашевская,
В.А. Курнаев, Г.В. Ходаченко, М.М. Цвентух

Московский инженерно-физический институт, 115409, Москва, Каширское шоссе 31, krashevskaya-gv@nm.ru

Установка магнитного удержания плазмы в бидипольной конфигурации «Магнетор» [1] относится к роду стационарных магнитных ловушек, основанных на гранично-устойчивых профилях давления Кадомцева [2] с погружёнными в плазму проводниками. «Бидипольность» подразумевает «конкуренцию» двух диполей, когда снаружи преобладает поле внешнего диполя, а внутри сепаратрисы находятся все силовые линии меньшего диполя. Особенность установки состоит в том, что в ней возможно изучение ряда явлений, важных для удержания высокотемпературной плазмы с гранично-устойчивым профилем, таких как, например, МГД стабилизации непараксиальными ячейками или же устойчивости плазмы в пределе нулевого вращательного преобразования [4,3]. Но первоочередной задачей является экспериментальная проверка выполнения критерия Кадомцева.

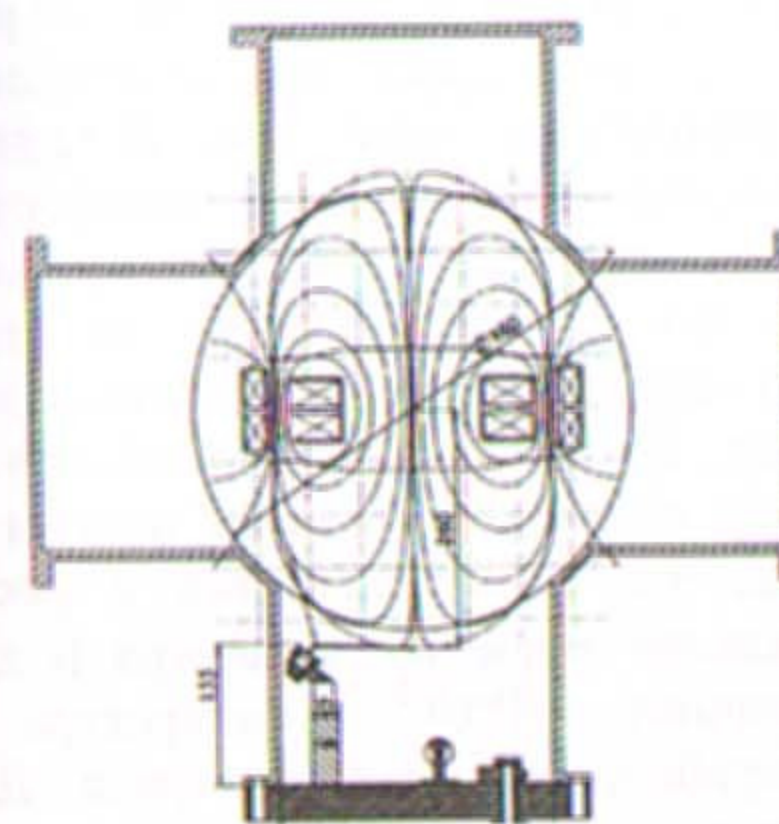


Рис. 1.

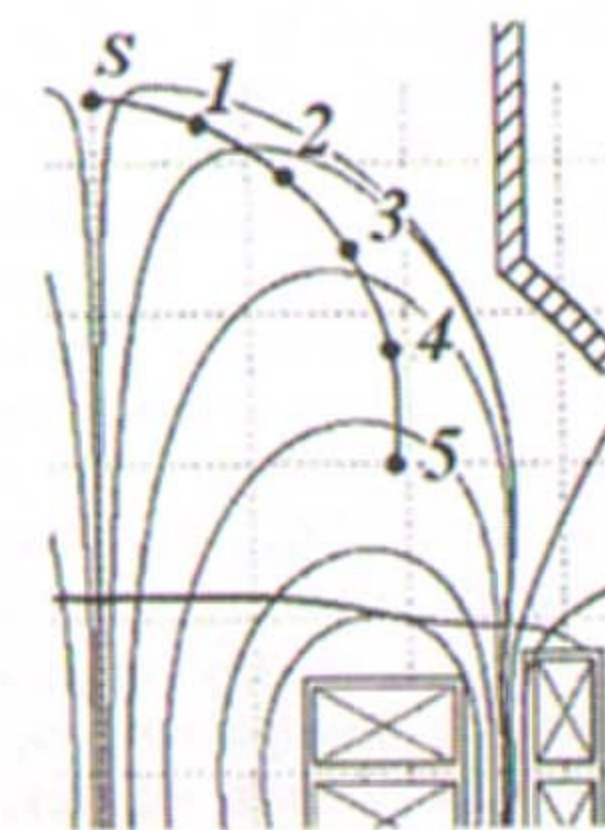


Рис 2.Траектория движения зонда

Магнитная система (рис. 1) состоит из двух коаксиальных катушек, находящихся в одной плоскости, с токами противоположного направления 39 кА и 20 кА во внутренней и во внешней катушке соответственно.

Центральный радиус внутренней катушки 11 см, внешней 18 см. Максимальная напряженность магнитного поля в кольцевой пробке между катушками $B^{\max} \sim 0.2$ Тл. Плазма в установке создается СВЧ полем на частоте 2.45 ГГц при мощности магнетрона ~ 1 кВт.

Для зондовой диагностики плазмы разработан подвижный двойной зонд. Ограничение на величину магнитного поля можно выразить через условие $\rho_{\text{лам}}^i \gg r_{\text{зонд}}$, тогда для полей в установке $H \sim 0.2$ Тл и минимально возможной энергии ионов $T_{\text{min}}^{\text{Ar}} \sim 0.027$ эВ $\rho_{\text{Ar}} \sim 0.8$ мм, что при радиусе зондов $r_{\text{зонд}} = 0.1$ мм удовлетворяет приведенному условию.

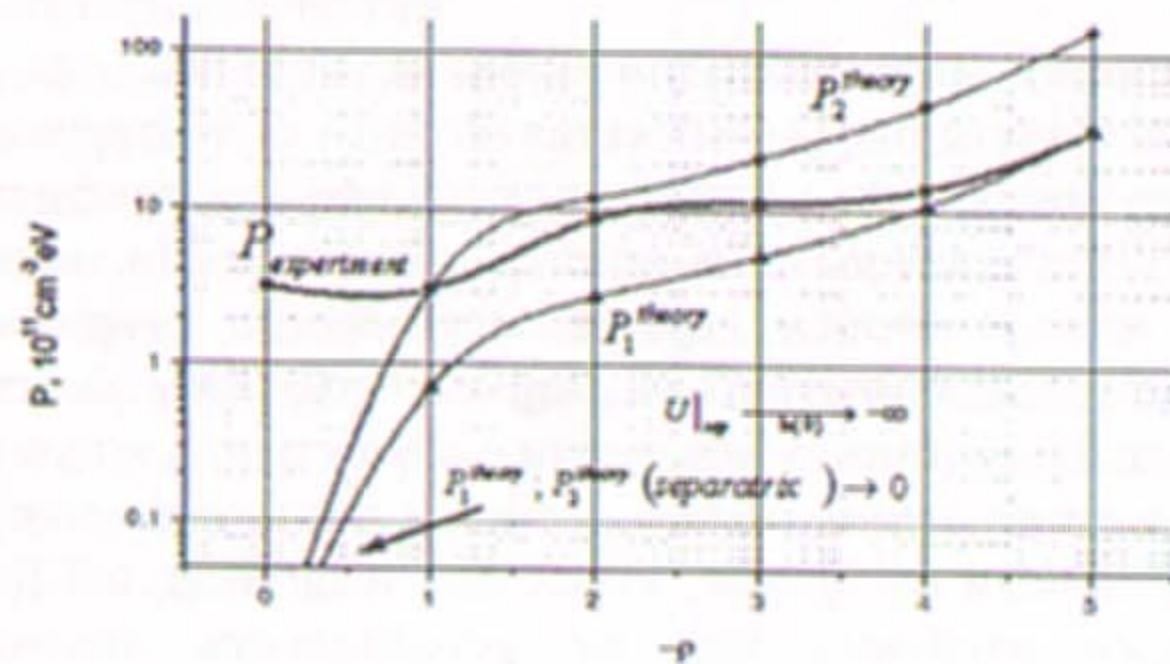


Рис. 3 Давление плазмы на траектории зонда. Эксперимент и теория.

Имеющаяся система зондовой диагностики такова, что позволяет проводить измерения температуры электронов и концентрации плазмы в областях ловушки внутри сепаратрисы вдоль оси пересекающей широкий ряд силовых линий (рис. 2). Как следует из уравнений магнитостатики, плазменное давление должно оставаться постоянным вдоль силовой линии, зондовая система позволяет получать данные параметров плазмы, по которым возможно определить пространственное распределение давления во всем объеме. На траектории движения зонда (рис. 2) был измерен профиль плазменной концентрации и электронной температуры для аргоновой плазмы при давлении нейтрального газа 10^{-5} Тор. Измерения, произведенные в области поля $B/B_{\max} \sim 0.1$, показывают, что степень ионизации плазмы в центральных областях близка к единице, что может говорить о росте температуры к центру ловушки. Минимальное значение параметра β для проведенных измерений составило величину $\sim 7 \cdot 10^{-3}$. Температура и концентрация плазмы падает по мере приближения к сепаратрисе. Для полученных измерений параметров плазмы наблюдается согласие с теоретическими данными величин давления (рис. 3), соответствующих гранично-устойчивому профилю.

Для проведения измерений профиля параметров плазмы в широком пространственном диапазоне, а также для корреляционных измерений был разработан и создан двойной зонд с широким диапазоном перемещения в

ловушке (рис. 4). Этот зонд позволяет измерять параметры плазмы практически во всех характерных точках магнитной конфигурации. Точность его позиционирования ± 1 мм. Обе зондовые системы обладают идентичными электрическими параметрами и подсоединены к одному 4-х каналному цифровому осциллографу TEKTRONIX TDS3054B с частотой дискретизации 1 ГГц.

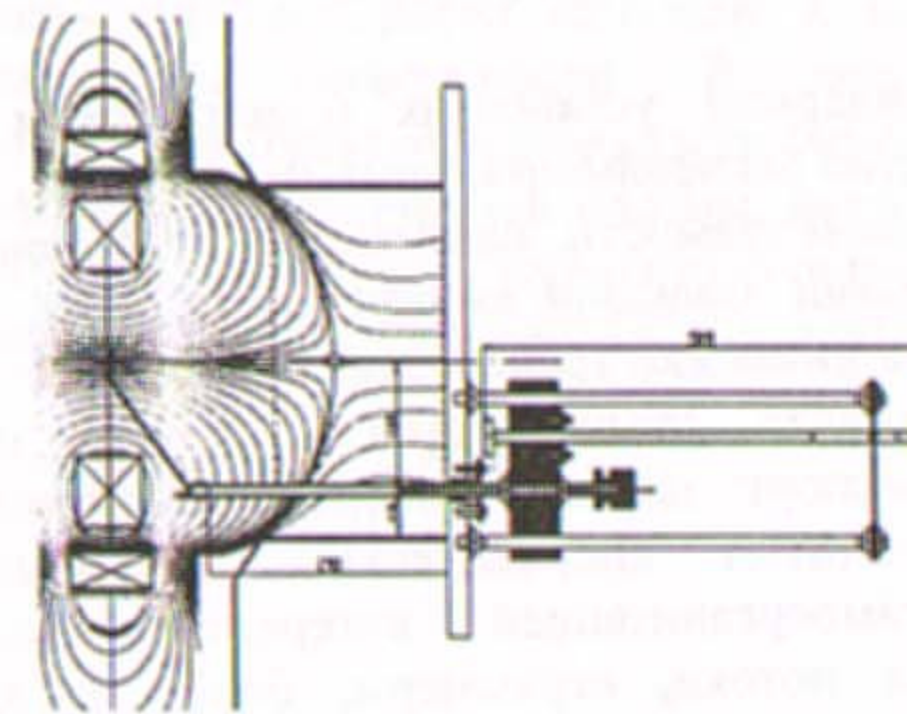


Рис. 4. Второй зонд в ловушке

1. М.М. Бердникова, А.М. Вайтонене, В.В. Вайтонис и др. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. Вып. 1. 2003. С. 22-27.
2. Б.Б. Кадомцев // Физика плазмы и проблема УТР. - М.: изд-во АН СССР, 1958. Т.4. - С.353.
3. А.А. Сковорода // 32-я Звенигородская конференция по физике плазмы и проблеме УТС. Тезисы докладов. М. 2005. С.35.
4. В.В. Арсенин, А.В. Звонков, А.А. Сковорода // Там же. С.40.

7.3 ИССЛЕДОВАНИЕ СУПЕРДИФФУЗИИ В ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЕ

В.П. Будаев

*Институт Ядерного Синтеза, РНЦ Курчатовский институт,
123182, Москва, пл. Курчатова 1, Россия*

В термоядерных установках с магнитным удержанием плазмы получено множество экспериментальных результатов, свидетельствующих о значительной перемежаемости плазменной турбулентности (intermittency). Аномальные события большой амплитуды играют, как хорошо известно, решающую роль в динамике транспорта, в особенности в граничной области плазмы. В токамаках, стеллараторах и других плазменных машинах, аномальный транспорт плазмы поперек магнитного поля является, в основном, результатом спорадических, крупномасштабных событий, сопровождается самоорганизацией и когерентными структурами такими как вихри, зональные потоки, стримеры, блобы и др, явление получило название супердиффузия и аномальный (intermittent) транспорт. Специфическая структура плазмы вблизи стенки термоядерных установок с магнитным удержанием плазмы приводит к крупномасштабной динамике с пролетными траекториями и баллистическим транспортом с негауссовой (неклассической) статистикой.

Полученная в последние годы экспериментальная информация и дальнейшее развитие теоретических представлений, заложенных еще в теории слабой турбулентности, приводят к необходимости фокусировать внимание на вероятностном подходе к описанию турбулентности замагниченной плазмы, а не на традиционном рассмотрении аномальных транспортных коэффициентов. Это позволит рассмотреть наиболее важные вопросы предсказания транспорта и потерь тепла, включая скейлинг самоподобия и нелокальность транспорта, в турбулентной плазме термоядерных установок реакторного масштаба. Турбулентность в установках УТС следует рассматривать как много-масштабное явление, отличающееся от монофрактальной модели турбулентности Колмогорова (K41). Чтобы описать турбулентность замагниченной плазмы, применяется мультифрактальный подход. Он основан на том факте, что неоднородная функция распределения возникает в системе, имеющей богатые свойства самоподобия. Корреляционные функции в мультифрактальном каскадном процессе (в отличие от классической диффузии) спадают не экспоненциально, а по степенному закону с показателем мультифрактальности, который связан с фрактальной размерностью турбулентности.

Мы представляем сравнительный анализ статистики пристеночной турбулентности в токамаке T-10, малом токамаке НУВТОК-II (Япония),

линейной плазменной машине NAGDIS-II (Япония). Несмотря на различные размеры и физические параметры установок, турбулентность пристеночной плазмы в них имеет подобные статистические свойства с признаками мульти-масштабности (мультифрактальности) с типичными интегральными временами когерентных структур ~50-100 микросекунд. Показатель мультифрактальности зависит от условий турбулентной плазмы. В токамаке T-10 мультифрактальность турбулентности исчезала в широм регионе вблизи последней замкнутой поверхности. В целом, отмечается универсальный характер свойств мультифрактальности (многомасштабности) пристеночной турбулентности замагниченной плазмы, некоторые скейлинги структурной функции и свойства мультифрактальности подобны наблюдаемым в гидродинамической турбулентности и других турбулентных средах.

7.4 INFRARED THERMOGRAPHY ON TORE-SUPRA TOKAMAK

D. Guilhem, B. Adjeroud, C. Balorin, C. Desgranges, R. Mitteau, R. Reichle, H. Roche, S. Vallet

CEA-Cadarache 13108 Saint Paul Lez Durance
France dominique.guilhem@cea.fr

In 2001 the Tore-Supra machine (CIEL project) has undergone a complete upgrade of internal components with a heat extraction capability of 25 MW for 1000 seconds. An actively cooled thermography system was developed providing a complete coverage of the main plasma facing components, figure 1. This assembly has been operated since spring 2002, with long discharge achievement of 6 min 10s, with the injection by 5 RF antennas and extraction by the active water loop, of ~ 1 GJ (see Cordier et al., 2003).

Here we present the optical design of the actively cooled thermography system, its built-in calibration devices, an analysis of the performances of the complete system and finally its use in a control feedback loop. The present state is that all 7 endoscopes bodies foreseen are in operation, equipped with 9 infrared cameras ($3-5\mu\text{m}$), ultimately 12. The infrared thermography system, has been designed in order to be able to look at the whole surface of the toroidal pumped limiter ($7,5\text{ m}^2$, 15m long) and to the 5 RF heating antennas. For each optical line, partly under diagnostic vacuum, four sections can be distinguished, 1) The front end-optic, which is equipped with a deflecting Si prism. The purpose of this section is to form the first image of the observed scene. This section is under diagnostic vacuum. The interface between machine vacuum and diagnostic vacuum is provided by a first sapphire window; 2) A 1.5m long relay optic (magnification = 1) constituted with 4 identical individual relays made of 5 lenses each ($\Phi = 35\text{ mm}$, Ge, Si and ZnSe). It is also under diagnostic vacuum. A second sapphire window isolate the diagnostic vacuum from the ambient atmospheric air; 3) The recombining box include for 2 viewing limiter lines, 2 relay optics and 5 flat mirrors among which one is a recombining prismatic (slope = 45°) gold coated stainless steel mirror used to merge the 2 optical lines corresponding to the 2 portion of 35° of the toroidal pumped limiter, or 1 prismatic Si blade for the antenna line; 4) Finally the camera relay optic made of 5 lenses to form the image on the detector (AGATHE 320×256 pixels; pixel pitch = $30\mu\text{m}$; $3-5\mu\text{m}$ from CEDIP). The overall transmission of each line of view is ~ 0,2. This transmission value is rather low, due to the presence of 28 lenses and to 2 sapphire windows, the latest having a transmission < 0,85 when it is brand new and can decrease to 0.4 after an experimental campaign due to deposits from the plasma. One has to note

that this diagnostic is actively cooled (25°C for optical components and 150°C for the external body) since it has been designed for steady state operation. An analysis of the relative accuracy of the diagnostics has been thoroughly done. The main result is that the accuracy is below 8% from 100°C to 1200°C with clean sapphire window, figure 2. In each camera field of view, zones of interest are set-up and temperature thresholds are defined within these zones. When any of the thresholds are crossed (with some integration time to avoid spurious warning), the main feed-back control system switches down gradually additional power. This infrared interlock is being implemented to protect cooled plasma facing components, especially the lower hybrid antenna where arcs are stooped during shots by decreasing temporarily the injected power. The Tore-Supra team has been confronted with such scenarios optimisation and has developed some experience on digital real time feed-back control of long plasma pulses, as well as on safety control to prevent heat flux limits of actively cooled components.

Cordier J.J. and the Tore Supra Team, "Preliminary results and lessons learned from upgrading the Tore Supra actively cooled plasma facing components (CIEL project)" *Fusion Engineering and Design*, Volumes 66-68, September 2003, Pages 59-67



Figure 1 : Infrared surface temperatures maps of 6 actively cooled elements of Tore-Supra (up to 12). Note that each viewing line is equipped with a blackbody to check that the camera is working properly.

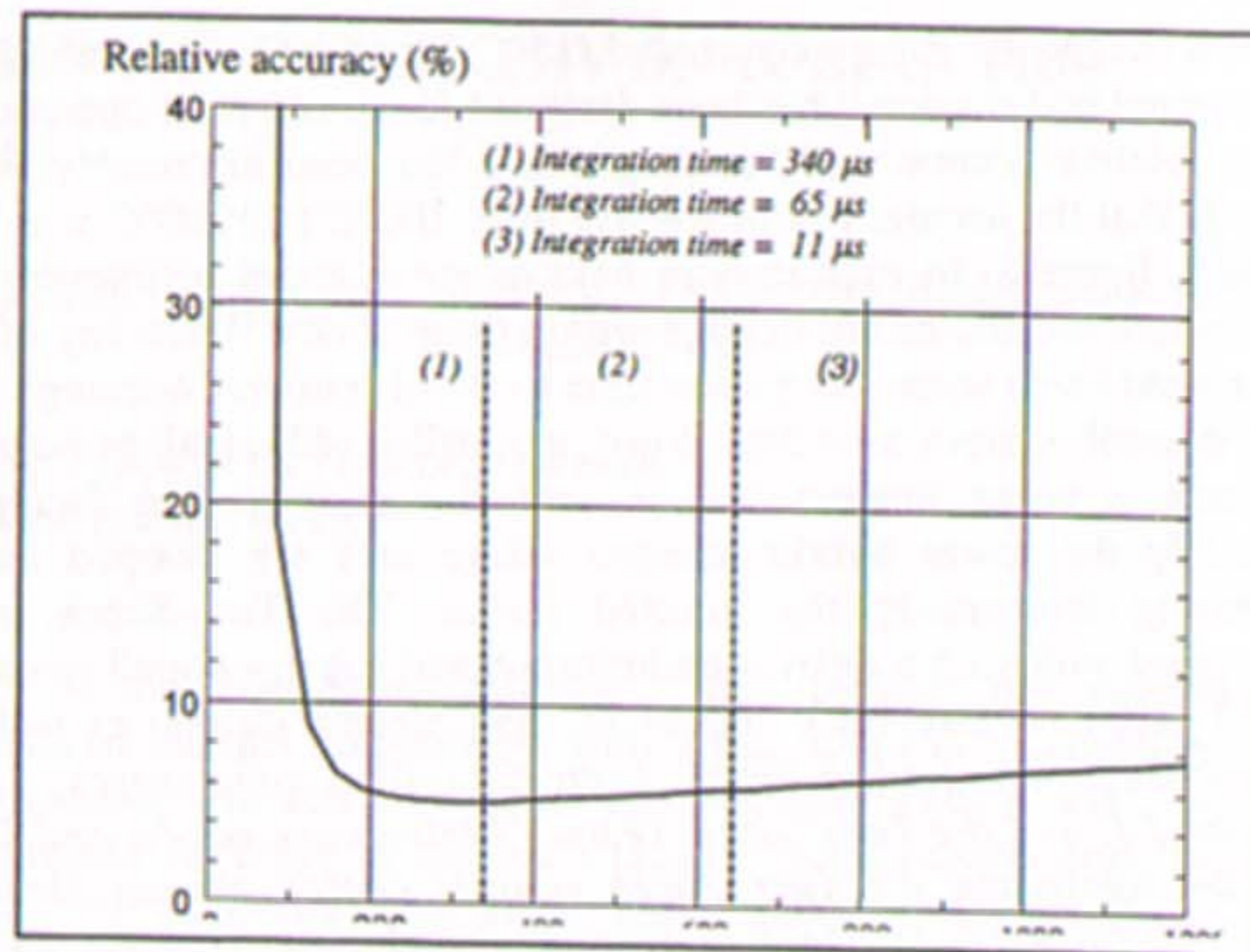


Figure 2 : Relative accuracy of the thermography surface temperature measurement.

СЕКЦИЯ
8

ДИАГНОСТИКА СИСТЕМ
ИНЕРЦИАЛЬНОГО СИНТЕЗА

**8.1 МЕТОД АБСОЛЮТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПОТОКОВ
ЛИНЕЙЧАТОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ НА УСТАНОВКЕ «ИСКРА-5».**

В.П. Лазарчук, А.Н. Мунтян, В.М. Муругов., С.И. Петров, А.В. Сеник

Российский федеральный ядерный центр ВНИИЭФ, 607190, г. Саров,
Нижегородская обл., Россия, E-mail: petrov@otd13.vniief.ru

Докладывается метод абсолютных измерений потоков линейчатого рентгеновского излучения лазерной плазмы из мишеней, облучаемых на установке «Искра-5». Описываются спектрографы на выпуклых и вогнутых кристаллах из кварца, слюды и КАР, разработанные для регистрации линейчатого рентгеновского излучения водородо- и гелиеподобных линий Al, Si, Ag и Fe. Приводятся методики абсолютных калибровок кристаллов, рентгеновской фотопленки и фильтров, использованных в экспериментах. Приводятся методики обработки получаемых в экспериментах спектрограмм с учетом результатов калибровок.

Метод использовался в экспериментах по облучению Al и Fe мишеней излучением второй гармоники установки «Искра-5».

8.2 МЕТОДИКИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЛИНЕЙЧАТОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ НА УСТАНОВКЕ «ИСКРА-5».

В.П. Лазарчук, А.Н. Мунтян, В.М. Муругов, С.И. Петров,
А.В. Сенник

Российский федеральный ядерный центр ВНИИЭФ, 607190, г. Саров,
Нижегородская обл., Россия, E-mail: petrov@otd13.vniief.ru

Описываются три методики пространственно-временных измерений линейчатого рентгеновского излучения (ЛРИ) лазерной плазмы Al и Fe внутри полой сферической мишени, покрытой изнутри слоем исследуемого материала и облучаемой излучением второй гармоники установки «Искра-5».

В первой методике осуществляется регистрация ЛРИ интегрально по пространству, с применением фильтров Росса для выделения спектральных интервалов, и с разверткой во времени при помощи рентгеновской стрик-камеры с временным разрешением 50 пс.

Во второй методике производится пространственно-временная регистрация ЛРИ в трех спектральных интервалах. Изображения мишени в рентгеновском излучении с помощью трех щелевых обскур строятся на входной щели рентгеновской стрик-камеры. Регистрируемые спектральные интервалы выделяются К-фильтрами. В двух каналах используются фильтры, сигналы за которыми определяются преимущественно линейчатым излучением, в третьем канале для учета континуума устанавливается фильтр, отсекающий линейчатое излучение.

Третья методика построена на базе многокадрового рентгеновского регистратора с затвором на основе сформированных на микроканальной пластине полосковых линий и бегущего по ним электрического импульса длительностью ~100 пс. При помощи блока обскур, имеющего набор отверстий диаметром от 10 до 40 мкм, на полосковых линиях строятся до 35 изображений мишени. Общее время регистрации составляет 1нс. На входе регистратора устанавливается фильтр, обеспечивающий проведение регистрации преимущественно в линейчатом излучении.

Приводится описание методик и результаты проведенных с их помощью измерений в экспериментах на установке «Искра-5».

8.3 ИЗМЕРЕНИЕ РЕНТГЕНСПЕКТРАЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ, ОБЛУЧАЕМЫХ МОЩНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ.

И.Н. Бурдонский¹, В.В. Гаврилов¹, А.Ю. Гольцов¹, В.В. Димитренко¹,
Н.Г. Ковальский¹, А.И. Магунов², Б.Н. Миронов¹, Т.А. Пикуз²,
И.Ю. Скобелев², А.Я. Фаенов², И.К. Фасахов¹

¹ ФГУП «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», 142190 Троицк, Московская обл., Россия,
e-mail: vvgavril@triniti.ru

² Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, 141570 Менделеево, Московская обл., Россия,
e-mail: faenov@orc.ru

В экспериментах по облучению мощными лазерными импульсами ($\lambda=1.054$ мкм, $\tau=2.5$ нс, $I=5 \times 10^{13}$ Вт/см²) плоских пористых образцов на основе агара ($C_{12}H_{18}O_9$)_n со средней плотностью 2-10 мг/см³ с помощью сферически изогнутых (фокусирующих) кристаллов слюды и дифракционной решетки скользящего падения регистрировались рентгеновские спектры многозарядных ионов. В агар вносились примеси CuCl₂, KCl, SnO₂ и другие. Анализ экспериментальных данных, полученных при облучении образцов из агара с примесями, позволил определить пространственное распределение основных параметров плазмы, образующейся внутри облучаемых образцов. Проанализированы спектры линейчатого излучения многозарядных ионов олова, зарегистрированные при различных экспериментальных условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 04-02-17335 и 04-02-17336), INTAS (проект № 2001-0572) и Фонда «Научный потенциал».

8.4 РЕНТГЕНОВСКИЕ СПЕКТРЫ МИШЕНЕЙ В УСЛОВИЯХ ОБЛУЧЕНИЯ МОЩНЫМИ УЛЬТРАКОРОТКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Л.В.Антонова, Д.А.Вихляев, А.Л.Запысов, А.Г.Какшин, Е.А.Лобода,
В.А.Лыков, В.Ю.Политов, А.В.Потапов, В.А.Пронин, А.А.Угоденко,
О.В.Чефонов

*РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е.И.Забабихина, 456770. г. Снежинск,
Челябинской обл., Россия,*

На 10-тераваттной пикосекундной лазерной установке СОКОЛ-П [1] при плотности потока лазерного излучения на мишени $\sim 10^{18}$ Вт/см² проведены эксперименты по облучению массивных мишеней из алюминия и мишеней с "захороненным" излучающим слоем. Мишени последнего типа представляли собой тонкий слой алюминия (\sim мкм), зажатый с обеих сторон обкладками из полиэтилена. Основное назначение обкладок – предотвратить разлет нагретого внутреннего слоя и тем самым позволить измерять спектры вещества с почти твердотельной плотностью. Пространственное распределение свечения мишени в нескольких спектральных интервалах изучалось с помощью камер-обскур. Непрерывный спектр рентгеновского излучения в диапазоне энергий квантов $\epsilon=0.8+10$ кэВ измерялся многоканальным полупроводниковым спектрометром с серыми фильтрами. Для исследования линейчатого спектра переходов в гелие- и водородоподобных ионах алюминия применялся фокусирующий спектрограф по схеме Гамоши с кристаллом слюды.

Для интерпретации полученных результатов и понимания деталей формирования рентгеновского спектра проведен цикл расчетно-теоретического моделирования, основанный на последовательности расчетов радиационной газовой динамики [2], поуровневой ионной кинетики и переноса излучения [3]. Моделирование, как континуума, так и линейчатого спектра неплохо согласуется с результатами измерений для массивных мишеней из алюминия. Усредненный по времени спектр континуума в области $\epsilon=2+10$ кэВ соответствует электронной температуре $T_e=0.8$ кэВ, в то время как пиковое значение температуры может достигать величины порядка нескольких кэВ. Для мишеней с "захороненным" излучающим слоем согласие численного моделирования с результатами измерений хуже: расчетные и измеренные величины сигналов детекторов полупроводникового спектрометра различаются в 2+5 раз. Есть отличия и в деталях линейчатых спектров, полученных расчетным путем и в эксперименте. Возможными причинами расхождений расчетов и экспериментальных данных являются: повышенная чувствительность излучательной способности плазмы к

значению коэффициента электронной теплопроводности, а также перенос энергии вглубь мишени за счет быстрых частиц, не учитываемый в настоящее время в расчетах. Следующая серия экспериментов на установке СОКОЛ-П поможет прояснить эти вопросы.

Ссылки:

1. D.A.Dmitrov, L.A.Fomichev, A.H.Kakshin e.a. 10-TWt picosecond Nd:glass laser facility "SOKOL-P". In proceedings of 28th European Conference on Laser Interaction with Matter (XXVIII ECLIM), Roma, 2004.
2. Б.А.Воинов, П.Д.Гаспарян, Ю.К.Кочубей и др. Вопросы Атом. Науки и Техники, сер. Теор., Приклад. Физика, т.2, стр.65, (1993).
3. В.Ю. Политов, А.Н. Шушлебин, Л.В. Антонова. Моделирование спектра излучения лазерной плазмы. В трудах VI конференции "Забабихинские научные чтения", Снежинск, 2003г.

8.5 РЕНТГЕНОВСКИЕ ПЛАЗМЕННЫЕ САТЕЛЛИТЫ В ПИКО - И ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ.

А.Я. Фаенов¹, Т.А. Пикуз¹, И.Ю. Скобелев¹, А.И. Магунов¹,
В.С. Беляев², В.И. Виноградов², А.С. Курилов², А.П. Матафонов²,
В.С. Лисица³, В.П. Гавриленко⁴, С.А. Пикуз мл.⁵, К.Й. Ким⁶,
Г.М. Милчберг⁶

¹Центр данных по спектрам многозарядных ионов ВНИИФТРИ, 141570
Моск. обл., п. Менделеево, Россия, faenov@yahoo.com

²Центральный научно-исследовательский институт машиностроения,
141070, Королев, Московская обл., Россия

³Институт ядерного синтеза Российского научного центра "Курчатовский
институт", 123182 Москва, Россия

⁴Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и
вакуума, ул. Новаторов 40, Корп. 1, 119421 Москва, Россия

⁵МГУ им М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

⁶Мерилэндский Университет, Колледж парк, Мерилэнд 20742, США

Представлены результаты измерений рентгеновских спектров многозарядных ионов в плазме твердотельной фторопластовой мишени, нагреваемой пикосекундными лазерными импульсами умеренной интенсивности (около 10^{17} Вт/см²) и в плазме кластерной N₂O мишени, нагреваемой фемтосекундными лазерными импульсами с интенсивностью около 4×10^{17} Вт/см². В обоих случаях наблюдаемые спектры свидетельствуют о наличии сильных плазменных колебаний с частотами, заметно меньшими частоты лазерного излучения. Наблюдаемые спектры плазменных спутников лаймановских дублетов водородоподобных ионов F IX и O VIII промоделированы теоретически. Показано, что результирующий контур дублетов имеет сложную структуру, нетривиальным образом зависящую как от плотности плазмы, так и от частоты и амплитуды плазменных колебаний. Положение спутников и расстояние между ними позволило связать их с интенсивными электростатическими колебаниями с амплитудой $(4-10) \cdot 10^8$ В/см и частотами порядка $(0,1-1) \cdot 10^{15}$ с⁻¹.

8.6 ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ПЛАЗМЫ, НАГРЕВАЕМОЙ СВЕРХИНТЕНСИВНЫМИ ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ.

И.Ю. Скобелев, А.И. Магунов, Т.А. Пикуз, А.Я. Фаенов

Центр Данных по Спектрам Многозарядных Ионов ВНИИФТРИ, 141570
Менделеево, Московская обл., Россия, skobelev@izmaylovo.ru

Рассматривается использование методов и средств высокоразрешающей рентгеновской спектроскопии для метрологии плазмы, нагреваемой сверхинтенсивными фемтосекундными лазерными импульсами. Приведены результаты экспериментов, выполненных в последнее время сотрудниками Центра Данных по Спектрам Многозарядных Ионов ВНИИФТРИ совместно с различными европейскими, американскими и японскими исследовательскими центрами. Показано, что:

- 1) Рентгеновские эмиссионные спектры фемтосекундной плазмы обладают очень сложной тонкой структурой, и использование спектрографов с высоким спектральным и пространственным разрешениями необходимо для адекватного измерения параметров такой плазмы;
- 2) Рентгеновское излучение плазмы, образующейся при нагреве твердых, аэрогельных, газовых и кластерных сред фемтосекундным лазерным излучением в значительной степени обусловлено переходами с автоионизационных (включая Ридберговские) состояний многозарядных ионов
- 3) Образующаяся фемтосекундная плазма является сравнительно холодной, очень плотной и содержит фракцию горячих электронов, которая заметно влияет на ее ионизационный состав и структуру спектров;
- 4) При взаимодействии фемтосекундного лазерного излучения с кластерными или твердотельными мишенями образуются быстрые ионы с энергиями большими, чем 1 МэВ, что вызывает сильную асимметрию наблюдаемых контуров спектральных линий, и возникают плазменные спутники, обусловленные генерацией сильных осциллирующих электромагнитных полей в плазме.

8.7 ВЛИЯНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА ФОТОКАТОДА НА РАБОТУ ПРИБОРОВ С ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Т.В. Горлов¹, А.М. Тронь²

¹Московский инженерно-физический институт 115477, Москва, Каширское шоссе 31, tim@plasma.mephi.ru

²Физический институт РАН им. П.Н. Лебедева, 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53.

Фотохронография рентгеновского излучения лазерной плазмы с предельным временным разрешением порядка 10 фс становится возможной на основе новых принципов построения времяпреобразующих фотоэлектронных камер и с использованием фотокатодов сферической конфигурации [1]. Одним из факторов, ограничивающих временное разрешение данных измерителей, является микрорельеф поверхности их фотокатодов. Микрорельеф искажает поле при поверхности фотокатода и нарушает независимость преобразования времени выхода фотоэлектрона (в значение одной из его динамических переменных) от его положения на поверхности фотокатода. Основной проблемой при исследовании данного эффекта является высокоточное определение полей вблизи поверхности фотокатода, которая до настоящего времени не решена.

Данное поле, которое для наглядности и простоты рассмотрения положено плоским, определяется из решения краевой задачи для уравнения Лапласа

$$\Delta U(x, y) = 0 \quad (1)$$

со следующими краевыми условиями

$$U(x, f(x)) = U_0$$

$$U(x, L) = 0,$$

где $f(x)$ не совпадает в общем случае с какой-либо из координатных плоскостей, когда разделение переменных возможно. Искомое поле ищется в виде разложения в ряд по собственным функциям оператора Лапласа, определенным в расширенной области вплоть до бесконечности. Например, в декартовой системе координат поле представляется в виде:

$$U(x, y) = \sum_{k=0}^N c_k U_k(x, y) \quad (2)$$

Данное представление будет являться решением исходной задачи, если путем соответствующего подбора коэффициентов c_k этого ряда оно будет удовлетворять ее граничным условиям.

Коэффициенты ряда находятся из условия минимизации среднеквадратического отклонения, определяемого выражением:

$$\int_0^a \left[U_0 - \sum_{k=0}^N c_k U_k \right]^2 dx, \quad (3)$$

что эквивалентно решению соответствующей системы уравнений при исследовании на экстремум значения интеграла (3) от искомых коэффициентов разложения c_k .

Основными процессами, влияющими на временные характеристики приборов, в том числе и на фемтосекундное разрешение фотохронографа, являются процессы, основанные на высокоточном описании динамики фотоэлектронов, стартующих с поверхности фотокатода. В докладе представлены результаты численного расчета динамики фотоэлектронов с учетом высокоточного описания электростатического поля вблизи микрорельефной поверхности фотокатода и их влияние на временное разрешение фотохронографа.

1. Т.В. Горлов, А.Д. Давыдов, А.М. Тронь Труды научной сессии МИФИ-2004. Т.4. С.62-63.

8.8 СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОЗРАЧНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО КОНВЕРТОРА, ОБЛУЧАЕМОГО ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ СУБНАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ.

А.В. Кунин, С.А. Бельков, А.В. Бессараб, С.В. Бондаренко,
Н.В. Жидков, С.В. Калипанов, Е.И. Митрофанов, Н.А. Суслов,
В.А. Токарев

Российский федеральный ядерный центр ВНИИЭФ, 607190, г. Саров,
Нижегородская обл., Россия, e-mail: kunin@otd13.vniief.ru

Представлены спектры рентгеновского излучения плазмы, возникающей при воздействии на тонкопленочную мишень субнаносекундного лазерного излучения установки Искра-5. В экспериментах использовалась вторая гармоника лазерного излучения ($\lambda=0,6575$ мкм) Интенсивность ЛИ варьировалась в диапазоне $q=3 \cdot 10^{13} \div 10^{14}$ Вт/см². Мишень представляла собой органическую пленку толщиной 1 мкм с напыленным на одну сторону слоем золота толщиной 0.1 мкм.

Измерения спектральных характеристик рентгеновского излучения (РИ) с фронтальной и тыльной стороны мишени проводились с помощью многоканального рентгеновского спектрометра на многослойных рентгеновских зеркалах и спектрометра на рентгеновских диодах. Размер источника РИ контролировался с помощью камер обскур, расположенных по обе стороны от мишени.

Показано, что энергия РИ излучаемая со стороны воздействующего излучения в два раза превышает энергию, излученную с тыльной стороны в два раза, при этом форма спектра остается практически неизменной.

8.9 ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ СФЕРИЧЕСКИХ ЛАЗЕРНЫХ МИШЕНЕЙ.

В.Д. Атаманенко, А.В. Бессараб, Г.А. Бондаренко, Г.В. Долголева,
В.А. Жмайло, А.Г. Кравченко, В.В. Мисько, В.М. Муругов, Е.А. Новикова,
А.С. Павлушин, И.В. Попов, В.А. Стародубцев, В.П. Стаценко

Российский федеральный ядерный центр ВНИИЭФ, 607190, г. Саров,
Нижегородская обл., Россия, e-mail: starodub@otd13.vniief.ru

Исследование оптических свойств лазерной плазмы осуществлялось в экспериментах, проводимых на установке МКВ-4 [1]. Облако плазмы образовывалось в результате лазерного разогрева полый сферической мишени, помещенной в разреженный воздух. Мишень имела одно отверстие, через которое вводился один луч с пятном фокусировки, меньшим, чем размер отверстия. В этих экспериментах, помимо измерения световых потоков в оптическом диапазоне [1], были проведены измерения и в инфракрасном диапазоне.

Выполнена теоретическая интерпретация указанных измерений на основе одномерных численных расчётов по методике СНДП [2]. В модели среднего иона, применяемой в СНДП, для описания высокотемпературной плазмы, не учитывается, однако, молекулярное состояние, характерное для поздней, низкотемпературной стадии развития облака плазмы. Вклад в ИК-излучение дают лишь тормозное и связанно-свободное излучение, учитываемое в СНДП моделью среднего иона.

1. Ю.Д. Богуненко, Г.А. Бондаренко, Г.В. Долголева, В.А. Жмайло, А.Г. Кравченко, Е.А. Новикова, В.А. Стародубцев, В.П. Стаценко. «Исследование оптических свойств неравновесной плазмы в опытах на установке МКВ-4» Труды XXX конференции по физике плазмы и УТС, Россия, Звенигород, 2003г.
2. С.А. Бельков, Г.В. Долголева Модель среднего иона для расчета кинетики ионизации, населенностей возбужденных уровней и спектральных коэффициентов переноса излучения в программе СНДП //Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1992. Вып.1. С.59-61.

8.10 ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И СПЕКТРА БЫСТРЫХ ИОНОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ МИШЕНЕЙ УЛЬТРАКОРОТКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ УСТАНОВКИ СОКОЛ-П

А.В. Потапов, А.В. Андрияш, Д.А. Вихляев, Д.А. Дмитров,
А.Л. Запысов, А.Г. Какшин, И.А. Капустин, Е.А. Лобода, В.А. Лыков,
В.А. Пронин, В.Н. Санжин, В.Н. Сапрыкин, А.А. Угоденко,
О.В. Чефонов, М.Н. Чижков.

РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина, 456770. г. Снежинск,
Челябинской обл., Россия,

На лазерной установке СОКОЛ-П [1] проведена серия экспериментов по исследованию спектра и углового распределения быстрых ионов, генерируемых при облучении твердотельных мишеней лазерными импульсами с интенсивностью $(0,5 - 2) \cdot 10^{18}$ Вт/см². Энергия лазерного излучения на мишени составляла 4+7 Дж при длительности лазерного импульса 0.8+1.14 пс. В экспериментах использовались плоские мишени из дейтерированного полиэтилена (CD₂)_n и мишени из TiDT. Энергетический состав и угловое распределение ускоренных ионов в диапазоне энергий 0.2+5 МэВ измерялось времяпролетными спектрометрами на базе полупроводниковых детекторов.

Средняя температура быстрых ионов составила ~400 кэВ. Значение полной энергии ионов порядка 60 мДж, что составляет примерно 1% от лазерной энергии. В угловом распределении потока быстрых ионов с фронтальной стороны мишени, в случае *p*-поляризации, зарегистрирована неизотропность, выраженная преимущественно в области углов близких к направлению нормали мишени, где наблюдается примерно трехкратное увеличение эмиссии ускоренных ионов. Половинный угол раствора распределения ускоренных ионов составил ~ 40+50°. Т.е. предпочтительное направление распространения облака ускоренных ионов сосредоточено вдоль нормали мишени.

Измеренный в этих опытах нейтронный выход для CD₂ – мишеней был сравнен с расчетами, в предположении, что поток дейтронов, идущих в мишень, имеет форму спектра и абсолютную величину такую же, как и экспериментальный. Качественное согласие измеренного и расчетного выхода нейтронов подтверждает наше предположение.

Ссылки:

- 1 Д.А. Дмитров, В.И. Загвоздин, А.Г. Какшин и др. 10 ТВт лазерная пикосекундная установка на фосфатном неодимовом стекле СОКОЛ-П. VII Забабахинские Научные Чтения, г. Снежинск, 8-12 сентября 2003 г. (<http://www.vniitf.ru/rig/konfer/7zst/7zst.html>)

8.11 ПАРАМЕТРЫ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ЛАЗЕРА НА ОСНОВЕ БЫСТРОГО КАПИЛЛЯРНОГО РАЗРЯДА

О.Н. Гилев, В.И. Осташев, В.Ю. Политов, В.И. Афонин,
А.М. Гафаров, А.Л. Запысов, Н.А. Хавронин, Л.Н. Шамраев

РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина, 456770. г. Снежинск,
Челябинской обл., Россия,

В докладе представлены результаты экспериментов по генерации лазерного рентгеновского излучения с длиной волны $\lambda=469$ Å ($\epsilon=26$ эВ) на переходе $3p(J=0)-3s(J=1)$ в *Ne*-подобном ионе Ag.

Эксперименты проводились на электрофизической установке СИГНАЛ [1] с керамическим (Al₂O₃) капилляром диаметром 3,1 мм и длиной 157 мм, заполненными аргоном до давления 0,2÷1,0 торр. Амплитуда разрядного тока составляла $I \sim 25 \div 40$ кА при скорости нарастания $dl/dt \sim 10^{12}$ А/с.

С помощью рентгеновского кадрового хронографа исследована динамика развития плазменного шнура. ВРД-методикой, настроенной на диапазон энергий квантов 10÷40 эВ, зарегистрированы импульсы лазерной генерации длительностью $t_s \sim 1$ нс (FWHM) и максимальной энергией $E_{s,max} \sim 1$ мкДж, генерируемые плазмой капиллярного разряда примерно через 35 нс после начала разрядного тока. При исследовании линейчатых спектров в диапазоне длин волн 150 ÷ 500 Å получена относительно яркая линия $\lambda=469$ Å. Оценена угловая расходимость лазерного рентгеновского пучка $\Delta\theta \sim 2$ mrad.

- [1] А.М. Гафаров, В.П. Ковалев, А.А. Сафронов и др. // Электрофизическая установка СИГНАЛ с индуктивным накопителем энергии и микросекундным плазменным размыкателем // Приборы и техника эксперимента, №1, 2001, с.80-85.

8.12 ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ ИПУЛЬСНЫХ ЛАЗЕРОВ НА ПАРАХ МЕТАЛЛОВ В ДИАПАЗОНЕ 70-140 ГГц

А.А.Исаев.

Физический институт РАН им. П.Н.Лебедева
119991 Москва, Ленинский пр-т, д.53; e-mail: isaev@sci.lebedev.ru

Измерены параметры плазмы активной среды импульсного лазера на парах бромида меди, как типичного лазера на парах металлов, вблизи плазменных частот с использованием метода квазиоптики на частотах 70-142 ГГц. Определены коэффициенты пропускания зондирующего СВЧ излучения как функции времени $K_{12}(t)$ в межрядном интервале поперек разряда лазерной трубки. По этим данным вычислены изменения концентрации $n_e(t)$ и оценены времена релаксации электронов по импульсу, а также температуры $T_e(t)$ электронов. Целью работы являлось, во-первых, установление различия параметров плазмы для лазеров на парах бромида меди с добавками и без добавок водорода. Во-вторых, согласование данных в рамках моделей кинетики в межрядном интервале 2-85 мкс.

Обсуждены возможности данного метода для определения характеристик плазмы технологических установок с большой толщиной разрядов.

8.13 ФОТОХРОНОГРАФИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ИЗУЧЕНИЮ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВ НА ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКЕ «ИСКРА-5».

С.А. Бельков, А.Г. Кравченко, А.В. Кунин, Д.Н. Литвин, В.М. Муругов, А.В. Сеник

Российский федеральный ядерный центр ВНИИЭФ, 607190, г. Саров,
Нижегородская обл., Россия. e-mail: litvin@otd13.vniief.ru

Представлены результаты разработки методики измерения скорости ударной волны в образцах в экспериментах по изучению ударной сжимаемости веществ. Методика основана на применении электронно-оптического фотохронографа. Обсуждаются особенности построения и требования к методике. Параметры методики: пространственное разрешение - 10 мкм, погрешность измерения задержки ударной волны в слоях - 10 пс, погрешность измерения скорости ударной волны - 2.5%, динамический диапазон регистрации ~200. Приведены примеры результатов измерений в экспериментах.

8.14 ФОТОХРОНОГРАФИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ.

А.Г. Кравченко, Д.Н. Литвин, В.В. Мисько, В.М. Муругов,
А.В. Сенник, В.А. Стародубцев

*Российский федеральный ядерный центр ВНИИЭФ, 607190, г. Саров,
Нижегородская обл., Россия. e-mail: litvin@otd13.vniief.ru*

Представлены результаты разработки методики изучения динамики развития плазменных образований. Методика построена на основе электронно-оптических фотохронографов, работающих в многокадровом режиме и в режиме стрип-камеры. Основные характеристики методики: временное разрешение-0.01-1 мкс, пространственное разрешено-1 мм. Приведены примеры результатов регистрации в экспериментах.

СЕКЦИЯ 9

АППАРАТУРА, ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ.

9.1 ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ИЗ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА В УСЛОВИЯХ РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ

А.В. Бондаренко¹, А.П. Дядькин¹, Ю.А. Кашук¹, А.В. Красильников¹,
Г.А. Поляков¹, И.Н. Растягаев¹, Д.А. Скопинцев¹, С.Н. Тугаринов¹,
В.П. Ярцев¹, В.А. Богатырев², А.Л. Томашук², С.Н. Клямкин³,
С.Е. Бендер⁴

¹ФГУП «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», 142190, г. Троицк Московской обл., Россия,
E-mail: bond@triniti.ru.

²Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики РАН
им. А.М. Прохорова, 119991, Москва, ул. Вавилова 38. Россия,

³Химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 119992, Москва,
Воробьевы Горы. Россия,

⁴Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры
им. Д.Ф. Ефремова, 196641, г. С.-Петербург. Россия,

В настоящее время активно обсуждаются перспективные применения волоконной оптики в атомной энергетике (волоконно-оптические датчики [1], системы для передачи изображения из ядерных установок [2], волоконные коллекторы излучения плазмы в системах оптической диагностики плазмы в термоядерных реакторах [3] и др.) В связи с этим является актуальным исследование радиационно индуцированных явлений в оптических волокнах и оптимизация технологии их изготовления с целью обеспечения достаточно высокой радиационной стойкости.

Целью данной работы было сравнение наведенного радиацией поглощения света (НП) и радиолюминесценции (РЛ) в восьми оптических волокнах, изготовленных ведущими зарубежными производителями (немецкой фирмой "Гераус" и японскими фирмами "Фуджикура" и "Мицубиши") и в НЦВО при ИОФ РАН. Требовалось провести испытания в условиях реакторного облучения при параметрах радиационного поля и температурах, характерных для будущих применений волокон в системах

оптической диагностики плазмы реактора ИТЭР. Это потребовало создания экспериментальной установки, позволяющей проводить измерения спектров НП и РЛ в 24 образцах световодов, облучаемых одновременно в идентичных условиях. Насколько нам известно, такое количество волокон исследовано одновременно в сравнительном эксперименте впервые.

Сборка волокон включала по три образца разной длины каждого из восьми наименований, и два не облучавшихся волокна, предназначенных для контроля мощности зондирующего излучения. Участки волокон длиной 0.15, 0.6 и 10 м, подвергавшиеся облучению, были намотаны на алюминиевую катушку диаметром 75 мм, а подводящие концы длиной по 21,5 м были собраны в жгут с наконечниками для стыковки с источником зондирующего излучения и приемным спектрометром. Для уменьшения светорассеяния и подавления возможных эффектов фотолюминесценции зондирующий свет запускался в волокна через двойной монохроматор, собранный по схеме с вычитанием дисперсии. При съемке спектров диапазон от 400 до 1000 нм сканировался с шагом 20 нм зондирующим излучением мощностью 5-10 нВт. Приемный спектрометр был изготовлен на базе призмного монохроматора и цифровой монохромной 10-битной видеокамеры на основе CCD - матрицы SONY ICX423AL. Применявшаяся в эксперименте последовательность регистрации и обработки сигналов позволила расширить до 10^5 динамический диапазон CCD-матрицы.

Эксперимент проходил на исследовательском ядерном реакторе ИР-8 в Институте Реакторных Технологий и Материалов (ИРТМ) при РНЦ «Курчатовский институт». Облучение оптических волокон проводилось до интегрального потока быстрых (с энергией более 0,1 МэВ) нейтронов 10^{18} н/см² и гамма-дозы 16 МГр(Si) при плотности потока до $2,8 \cdot 10^{13}$ н/см² с и мощности гамма-дозы до 400 Гр/с, соответственно. Температура волокон менялась в диапазоне 30 – 270 °С.

Изучена эволюция НП и исследована его зависимость от величины потока ядерного излучения, интегрального потока (флюенса) и температуры. Полученные данные указывают на участие в формировании спектров НП нескольких типов РЦО, относительный вклад которых зависит от содержания примесей гидроксильных групп ОН и хлора в сетке стекла сердцевины волокон.

Интенсивность РЛ в облучаемых участках волокон была измерена с учетом поглощения света в волокнах и люминесценции в подводящих концах. Вид спектров указывает на то, что РЛ в основном обусловлена полосой люминесценции с центром вблизи 460 нм [4]. Установлена связь интенсивности РЛ с примесным составом стекла сердцевины волокон. Показана возможность использования сигнала "синей" РЛ для измерения потока ядерного излучения.

Результаты эксперимента позволяют утверждать, что разработанные в ИЦВО при ИОФ РАН световоды, содержащие молекулярный водород в стекле и имеющие герметичное покрытие, проявляют многократно меньшее НП и РЛ, чем все другие волокна. Возможность подавление с помощью

водорода не только НП, но и РЛ установлена в данной работе впервые и является важным результатом для практических применений волокон в атомной энергетике, в частности в реакторе ИТЭР, и в других оптоэлектронных системах с повышенными требованиями к радиационной стойкости. Установлено, что в таких волокнах зависимость радиационно наведенных эффектов от типа кварцевого стекла в сердцевине очень слаба, что может позволить использовать достаточно дешевые марки кварцевых стекол при промышленном производстве радиационно стойких волокон.

Литература

1. III J.W. Berthold // Proc. SPIE , 1994, V. 2425, pp.74-83.
2. K. Obara, S. Kakudate, K. Oka et al. // Proc. SPIE, 1994, V. 2425, pp. 106-114.
3. T. Kakuta, T. Shikama, T. Nishitani et al. // Journal of Nuclear Materials, 2002, Vols. 307-311, Part 2, pp. 1277-1281.
4. D.L. Griscom, K.M. Golant, A.L Tomashuk, et al. // Appl. Phys. Lett., 1996, V. 69 (3), pp. 322-324.

9.2 ИСПЫТАНИЯ ОПТОВОЛОКОННОГО ДАТЧИКА ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А.В. Бондаренко, А.П. Дядькин, Ю.А. Кашук, А.В. Красильников,
А.А. Олейников, А. Ю. Цуцких., В.П. Ярцев

ФГУП «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» 142190, Троицк, Московской области, Россия

Оптоволоконный датчик ионизирующего излучения предназначен для регистрации нейтронного и гамма излучения в широком диапазоне энергии и плотности потока частиц. Принцип действия датчика основан на регистрации светового сигнала, который индуцируется в сцинтилляторе ионизирующим излучением и по оптическому волокну передается к приемнику. Миниатюрные размеры датчика делают его привлекательным для размещения в труднодоступных местах и позволяют создавать многоканальные системы с высоким пространственным разрешением. Сферы применения датчика – активные зоны ядерных реакторов, системы радиационной безопасности, системы контроля состояния радиоактивных материалов в хранилищах отработанного ядерного топлива и др. Диапазон изменения радиационного поля в приведенных примерах исключительно широк [1-2]. При разработке датчика необходимо установить зависимость его показаний от плотности потока всех составляющих поля ионизирующего излучения и определить чувствительность к каждой из них. На первом этапе проведены исследования этих характеристик прототипа датчика в поле гамма излучения.

Необходимым требованием к датчику является устойчивость его компонент, а именно сцинтиллятора и оптического волокна, к условиям окружающей среды, в первую очередь к самой радиации. Известен ряд сцинтилляторов, световых выходов которых меняется менее чем на 10%, при облучении до гамма дозы ~1МГр. Свойства сцинтилляторов сохраняются в диапазоне температуры 10 – 90 °С, а некоторые материалы (Eu₂O₃, ZnSe(Te)) допускают нагрев до 400 °С. Наведенное в волокне радиацией поглощение света и радиолоуминесценция (РЛ) приводят к ослаблению и искажению передаваемого светового сигнала. Только недавно были разработаны и испытаны волокна, которые остаются достаточно прозрачными 0.5 дБ/м и обладают низкой РЛ при облучении до флюенса быстрых (E>0.1 МэВ) нейтронов выше 10¹⁸ н/см² и гамма дозы ~20МГр [3]. Эти волокна допускают нагрев до 400 °С.

Конструкция датчика разработана с учетом его предполагаемого размещения в специальных каналах реакторов ВВЭР, РБМК и хранилищ отработанного топлива, а также в центральных гильзах ТВС РБМК, предназначенных для размещения датчиков энерговыделения. Габариты чувствительной части датчика не превышают 5 мм в диаметре и 20 мм по длине и могут быть ещё уменьшены. Для измерения пространственного

распределения полей нейтронного и гамма-излучений по высоте канала, возможно изготовление многосекционного датчика.

Датчик состоит из сцинтиллятора, помещенного в корпус из алюминия, к которому пристыковано оптическое волокно. В качестве приемника сцинтилляционного сигнала используется фотоэлектронный умножитель. Электрический сигнал ФЭУ-100 после усилителя с коэффициентом преобразования 1нА/0.1В регистрируется вольтметром. В качестве сцинтилляторов использовались NaI(Tl), CsI(Tl), p-Терфенил в полистироле, Стильбен C₁₄H₁₂, алмаз типа IaB. . Оптоволокно - длиной 20м с сердцевинной из кварца КУ-1 диаметром 500мкм, в защитной алюминиевой оболочке с числовой апертурой ≈0.25, радиационностойкое.

Испытания проводились на радионуклидном источнике Co⁶⁰ ГУТ – 200М (РНЦ «Курчатовский институт»). Датчик размещался в различных точках гамма-поля с мощностью дозы в диапазоне 0,03÷200 Р/с (мощность поглощенной дозы до ~ 2 Гр/с(Si)). В каждой точке расположения датчика измерялись по отдельности интегральные по спектру сигнал сцинтиллятора с волокном и сигнал волокна без сцинтиллятора. Разность сигналов соответствовала полезному сигналу. Зависимость РЛ волокна длиной 3.5м (выбрано условно) от мощности дозы облучения определялась в отдельных измерениях и считалась фоном.

Для всех испытанных сцинтилляторов выходной сигнал прибора линейно зависит от мощности дозы облучения. В сцинтилляторах NaI(Tl) и CsI(Tl) свечение много больше фона. В других образцах фон превышает свечение сцинтиллятора. Однако при использовании дифференциальной схемы регистрации, в которой фон вычитается автоматически, можно обеспечить проведение локальных измерений поля гамма излучения и в этом случае.

Чтобы увеличить отношения сигнал/фон, проводилась оптическая фильтрация сигналов - выделялся спектральный интервал в районе максимума светимости сцинтилляторов. Для CsI(Tl) использовался набор фильтров с максимумом пропускания при λ=560 нм и с полушириной полосы пропускания Δλ=25 нм. Для ZnS(Ag) – λ=450 нм, Δλ=26 нм. Для p-Терфенила в полистироле – λ=400 нм, Δλ=25 нм. Таким образом, отношение сигнал/фон составило: ~100 - для CsI(Tl); ~ 4 - для ZnS(Ag); ~ 0,17 - для p-Терфенила.

Прибор позволяет измерять мощность дозы гамма поля до величины ~10³ Р/с.

Литература.

1. В.Г. Шевченко, Ю.В. Гарусов, А.В. Роботко, М.В. Комаров О распределении и значении плотности потока тепловых нейтронов в подкритических реакторах РБМК-1000 Ленинградской АЭС. Атомные электрические станции: Сб. ст. Вып.9 – М.: Энергоатомиздат, 1987. – с.87
2. В.М. Колабашкин, П.М. Рубцов, П.А. Ружанский, В.Д. Сидоренко Радиационные характеристики облученного ядерного топлива. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1983.- 384с.
3. А.В. Бондаренко, Ю.А. Кащук, А.В. Красильников, и др. «Исследование радиационной стойкости оптических волокон из кварцевого стекла в условиях реакторного облучения», будет опубликовано в «Приборы и техника эксперимента» в 2005 году.

9.3 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ПРОХОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПО КАБЕЛЯМ С МИНЕРАЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ.

С.Е. Бендер¹, П.В. Деменков², В.А. Степанов², П.А. Степанов²

¹ФГУП «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», 196641, г. Санкт-Петербург, п. Металлострой, промзона «Металлострой», дорога на Металлострой, д. 3, benderse@niiefa.spb.su

²ГНЦ РФ ФЭИ, 249020, г. Обнинск, Россия.

Ранее было показано [1], что в результате ряда переходных процессов в кабелях с минеральной изоляцией (МИ-кабелях) под облучением происходит разделение электрического заряда между жилой и оболочкой. Например, в условиях импульсного реакторного облучения с мощностью поглощенной дозы $9 \cdot 10^4$ Гр/с в МИ-кабелях с жилами из никеля и нержавеющей стали происходит положительное заряджение, а при $2,2 \cdot 10^4$ Гр/с - отрицательное заряджение жилы кабелей относительно оболочки. В связи с перспективой использования таких кабелей в системе магнитной диагностики ИТЭР и линиях коммуникаций от датчиков до регистрирующей аппаратуры важно установить влияние радиационно-индуцированного разделения заряда в кабелях на проходящие по ним электрические сигналы. Для этого были проведены измерения временных зависимостей напряжения между жилой и оболочкой МИ-кабелей во время реакторного импульса (реактор Барс-6) при различных амплитудах, частотах и форме периодических проходящих сигналов.

Измерения проводились с гармоническими и импульсными (периодический П-образный сигнал с малой скважностью) сигналами с частотой 1-1000 кГц и амплитудой 20-1000мВ. Обнаружено, что для гармонических сигналов:

- увеличение амплитуды не меняет величину радиационно-индуцированного заряда в МИ-кабеле;
- при увеличении частоты происходит рост радиационно-индуцированного разделения заряда в МИ-кабеле.

Для импульсных прямоугольных сигналов:

- увеличение амплитуды приводит к эффекту подавления радиационно-индуцированного заряда в МИ-кабеле (рис.1);
- при увеличении частоты происходит рост амплитуды радиационно-индуцированного импульса напряжения, и, в отличие от гармонического сигнала, частотная зависимость имеет пороговый характер.

Полученные результаты свидетельствуют о неаддитивном вкладе радиационно-индуцированных токов в проходящие через МИ-кабели

импульсно-периодические токи и влиянии амплитуды, частоты и формы проходящих через МИ-кабели электрических сигналов на амплитуду радиационно-индуцированных токов.

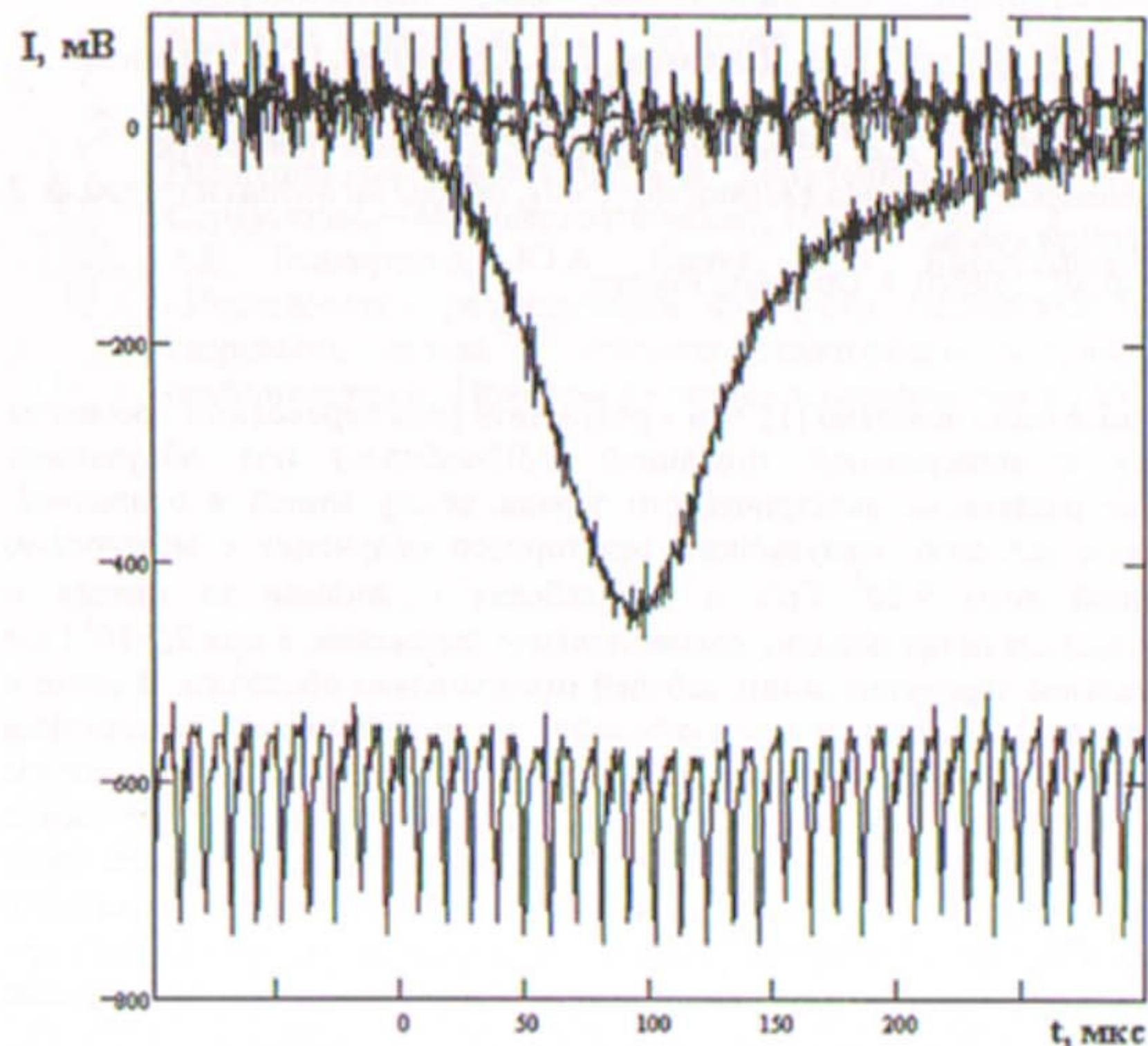


Рис. 1. Временные зависимости напряжения на нагрузочном сопротивлении между жилой и оболочкой МИ-кабеля во время реакторного импульса (длительность импульса 100 мкс, мощность дозы $2 \cdot 10^2$ Гр/с), при различных амплитудах (изменение амплитуды от 30 мВ до 200 мВ) полезного импульсного сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S.E. Bender, V.M. Chernov, P.V. Demenkov, O.A. Plaksin, V.A. Stepanov Plasma Devices and Operations. 2003. V. 11. № 3. P. 185-191.

9.4 О РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ АЛМАЗНЫХ ДЕТЕКТОРОВ.

В.Н.Амосов

ФГУП «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», 142190, г.Троицк, Московской обл., Россия

Детекторы из природного алмаза являются исключительно ценным инструментом в спектрометрии нейтронов в термоядерных исследованиях. В связи с планируемым использованием таких детекторов в нейтронном комплексе установки ИТЭР актуальным становится вопрос о реальной радиационной стойкости таких детекторов. До настоящего времени предел радиационной стойкости алмазных нейтронных спектрометров был установлен на уровне флюенса 14MeV нейтронов порядка $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

В настоящей работе приводится обзор ряда экспериментов по измерению энергии смещения атома E_d в решетке алмаза и приведены некоторые результаты, полученные в ГНЦ РФ ТРИНИТИ при исследованиях на радиационную стойкость детекторов из природного алмаза. Значительная вариация плотности радиационных повреждений в разных образцах при равных флюенсах нейтронов указывает на доминирующее влияние исходного примесного состава этих образцов на результаты облучения. Алмазы типа Па показывают значительно большую радиационную стойкость по сравнению с образцами алмаза других типов. Ранее этот фактор не принимался во внимание при исследовании радиационной прочности алмаза, что приводило к расхождениям в оценках E_d в разы, что указывает на то, что авторы просто исследовали разные материалы.

Сравнительный анализ результатов этих экспериментов позволяет сделать вывод о том, что чистый алмаз обладает значительно большей радиационной прочностью, чем та, которую измеряли до сих пор. Последние успехи в технологии выращивания чистых синтетических алмазных монокристаллов позволяют теперь поставить прямой эксперимент на их радиационную прочность.

9.5 БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ ДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ ГАЗА

И.С. Глушков, Ю.Г. Гендель, Ю.А. Кареев, В.П. Новиков

ФГУП «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» 142190 г. Троицк, Московской области
E-mail: kareev@triniti.ru

Одним из важных условий для инициирования разряда в камере токамака и получения плазмы заданной плотности является обеспечение требуемого расхода изотопа водорода, который необходимо контролировать в течение времени рабочего цикла. Электроимпульсный гидридный инжектор (ЭИГИ) [1], в котором изотопы водорода хранятся в химически связанном состоянии в титановых элементах, генерирующих газ при их нагреве электрическим током, создаёт расход газа требуемой для функционирования токамака величины при давлении торможения потока до 100 Па. Измерение давления торможения газа позволяет решить проблему контроля и управления расходом газа. В указанном диапазоне давлений традиционные методы измерения, например с помощью вакуумметра теплоэлектрического 13ВТЗ-003, обладают инерционностью, исчисляемой секундами.

Нами предложен метод измерения давления газа [2], базирующийся на использовании закона Пашена [3]. Для реализации метода создан датчик давления. В этом устройстве в зазоре между двумя электродами, находящимися в атмосфере исследуемого газа, измеряется напряжение пробоя газа при подаче на них одиночных высоковольтных импульсов с амплитудой до 8 кВ и длительностью полупериода 20 – 80 мкс. Частота зондирования варьируется в диапазоне от 50 до 1000 Гц. Для получения информации о давлении газа используются градуировочные кривые, связывающие напряжение пробоя газа и его давление.

Выполнены эксперименты по генерации дейтерия в ЭИГИ и перетекания газа в вакуумный объём, ёмкость которого примерно в десять раз больше внутреннего объёма инжектора. С помощью датчика давления получена информация о закономерностях изменения расхода газа в процессе перетекания. В одном из экспериментов фронт нарастания давления в объёме инжектора составлял 20 мс, максимум давления, равный 100 Па, был достигнут на 60-ой миллисекунде, на 225-ой миллисекунде установилось равновесие на уровне 50 Па.

Литература.

1. I.S. Glushkov, Yu.A. Kareev, Yu.V. Petrov, A.N. Savotkin, V.V. Frunze, E. Hutter, G. Muller, R. D. Penzhorn, U. Tamm, «Generation of hydrogen isotopes with an electric pulse hydride injector», International Journal of Hydrogen Energy 24 (1999), pp. 105-109
2. Н.А. Ахмеров, Ю.Г. Гендель и Ю.А. Кареев, «Способ динамического контроля импульсного газонапуска», Патент №2077807, 1994.
3. Дж. Мик, Дж. Крэгс, «Электрический пробой в газах», изд. ИЛ, Москва, 1960.

10.1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАБОТ ПО ДИАГНОСТИКЕ ИТЭР

К.Ю. Вуколов, В.С. Заверьяев

ИЯС РНЦ «Курчатовский Институт» 123182 Москва, пл. Курчатова 1
E-mail address: vukolov@nfi.kiae.ru (K.Yu. Vukolov)

В докладе рассмотрены основные проблемы по разработке диагностического комплекса ИТЭР на современном этапе развития работ. Как известно, диагностические методы, применяемые на современных плазменных установках, как правило, не могут быть напрямую применены для диагностики экспериментального термоядерного реактора. Основные проблемы возникают с измерениями в условиях ИТЭР распределения плотности α -частиц и $q(r)$, магнитными измерениями и определением источника нейтронов. В докладе обсуждаются перспективы возможных диагностических методов для этих измерений, а также возможности применений методов диагностики, разрабатываемых в России.

Отдельным направлением работ является конструирование, интеграция в патрубках установки и изготовление диагностических систем для ИТЭР. Инженерные и расчетные работы, которые связаны с решением этих задач, выходят в настоящее время на первый план. Организация этих работ в рамках международного сотрудничества и в домашних командах, основные проблемы и подходы к решению задач рассматриваются в докладе.

Указанные проблемы разработки диагностического комплекса ИТЭР во многом обусловлены нейтронным и гамма излучением, что ставит задачи по радиационной стойкости элементов диагностики и требованиям безопасности. Для их решения развернута программа экспериментальных работ по созданию радиационно-стойких элементов диагностики. В докладе представлен краткий обзор основных достижений и текущих задач в этом направлении.

И, наконец, представлен анализ состояния работ по отдельным диагностикам, разрабатываемым в рамках проекта ИТЭР в России, и выделены критические проблемы на дальнейшем пути по созданию этих диагностик.

Corresponding author. Tel.: + 7-095-196-96-90; fax: + 7-095-943-00-73.

10.2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И РАСЧЕТНО- ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИОННО- ЦИКЛОТРОННОГО НАГРЕВА ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ НА ТОКАМАКЕ T-11M.

Н.Б. Родионов¹, Э.А. Азизов¹, А.Г. Алексеев¹, А.М. Белов¹, В.И. Гудков¹,
А.В. Красильников¹, А.И. Маркин¹, С.В. Мирнов¹, В.А. Мыслин¹,
А.А. Иванов², В.Г. Петров¹, В.П. Родионова¹, С.М. Сотников¹,
С.Н. Тугаринов¹

¹Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований (ТРИНИТИ),
142190, Троицк, Московская область, Россия, E-mail: nbrodrik@triniti.ru

²Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша, Москва, Россия,

В настоящее время существует большой интерес к ионно-циклотронному нагреву водородной плазмы на основной частоте. Нагрев водородной плазмы на частоте ионно-циклотронного резонанса был получен на стеллараторах Л-2 [1,4,5] и Н-Е [3], токамаке ТО-2 [2]. В [4,5] обсуждается механизм, отвечающий за наблюдаемый нагрев ионов в центральных областях плазмы. К настоящему моменту нагрев на фундаментальной частоте не является достаточно изученным и не существует однозначного объяснения механизма этого явления. Поэтому необходимо развитие экспериментальных методик, которые могли бы решить эту задачу. В данной работе проводится экспериментальное и численное исследование возможности ВЧ-нагрева на фундаментальной частоте водорода на установке T-11M. С помощью разработанных диагностик параметров плазмы токамака T-11M проводится исследование возможности нагрева водородной плазмы на фундаментальной частоте. В работе также проведено численное моделирование процессов ионно-циклотронного нагрева в водородной плазме токамака T-11M.

В экспериментах, по нагреву на фундаментальной частоте в водородной плазме, проведенных на токамаке T-11M, был зафиксирован нагрев ионов примесей и основной компоненты плазмы. Эти измерения проведены с помощью таких диагностик как спектроскопия высокого разрешения, так и анализатор нейтральных атомов "Лакмус". Для измерений динамики плотности плазмы используется многоканальный "бессбойный" поляризационный микроволновый интерферометр (МБПИ), а также 16-ти канальная система измерения радиационных потерь (MRLMS) на основе AXUV фотодиодов с временным разрешением не хуже 2 мкс.

В работе проведено численное моделирование сценариев ВЧ-нагрева водородной плазмы на основной циклотронной частоте в токамаке T11-M. Задача о поглощении ВЧ-мощности решалась с помощью двумерной системы уравнений Максвелла для комплексной амплитуды напряженности электрического поля с учетом "холодного" тензора диэлектрической проницаемости. Расчеты возбуждения и затухания волн в ионно-циклотронном диапазоне частот в токамаке проведены с помощью кода [6], основанного на объединении кодов ALTOK [7] и DINA [8].

Расчеты показали, что в плазме токамака T-11M может эффективно возбуждаться БМЗ волна. Проведены расчеты в зависимости от частоты генератора и показано, что максимальное поглощение ионно-циклотронного излучения имеет место, когда циклотронный резонансный слой расположен на краю плазменного шнура со стороны слабого магнитного поля. Если ионно-циклотронный резонанс для БМЗ волны находится в центре плазменного шнура, поглощение меньше, но остается достаточно большим.

Литература

- [1]. V.A. Batyuk, M.A. Blokh, S.E. Grebenshchikov, et al. Proc. 11th Europ. Conf. On Controlled Fusion and Plasma Phys., Aachen 1983, Part 1, C14, p. 373-376.
- [2]. I. J. Artemenkov, N. A. Akhmerov, V. F. Bogdanov, et al. Proc. 10th Int. Conf. On Plasma Phys. and Controlled Nucl. Fus. Research, IAEA, London 1984, Vol.1, p.615.
- [3]. T. Mutoh, O. Motojima, M. Sato, et al. Proc. 11th Int. Conf. On Plasma Phys. and Controlled Nucl. Fus. Research, Kyoto 1984, Vol.3, p.473-480.
- [4]. В.А. Батюк, Г.С. Воронов, Е.Ф. Гиппиус и др. Физика плазмы, 1987 Т.13, вып.3, с.259-267.
- [5]. В.А. Батюк, А.И. Мещеряков Препринт ИОФАН № 10, 1987.
- [6]. R. R. Khayrutdinov, A.A. Ivanov, S.Yu. Medvedev, N.B. Rodionov. 31st European Physical Society Conference on Plasma Physics, June to 2nd 2004, Imperial College London, P1-177. Europhysics Conference Abstracts vol. 28G.
- [7]. S. A. Galkin, A.A. Ivanov, S.Yu. Medvedev, A.G. Elfimov, Computer Physics Communications, 143, (2002), 29-47.
- [8]. R.R. Khayrutdinov, and V.E. Lukash, Journal of Comp. Physics, v.109, (1993), 193.

10.3 ОБ ОТКЛОНЕНИИ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПО СКОРОСТЯМ ОТ МАКСВЕЛЛОВСКОГО ПРИ ЭЦР НАГРЕВЕ ПЛАЗМЫ В СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М РЕЖИМАХ С ВЫСОКИМИ УДЕЛЬНЫМИ ЭНЕРГОВКЛАДАМИ.

А.И. Мещеряков, Д.К. Акулина, И.Ю. Вафин, Г.А. Гладков

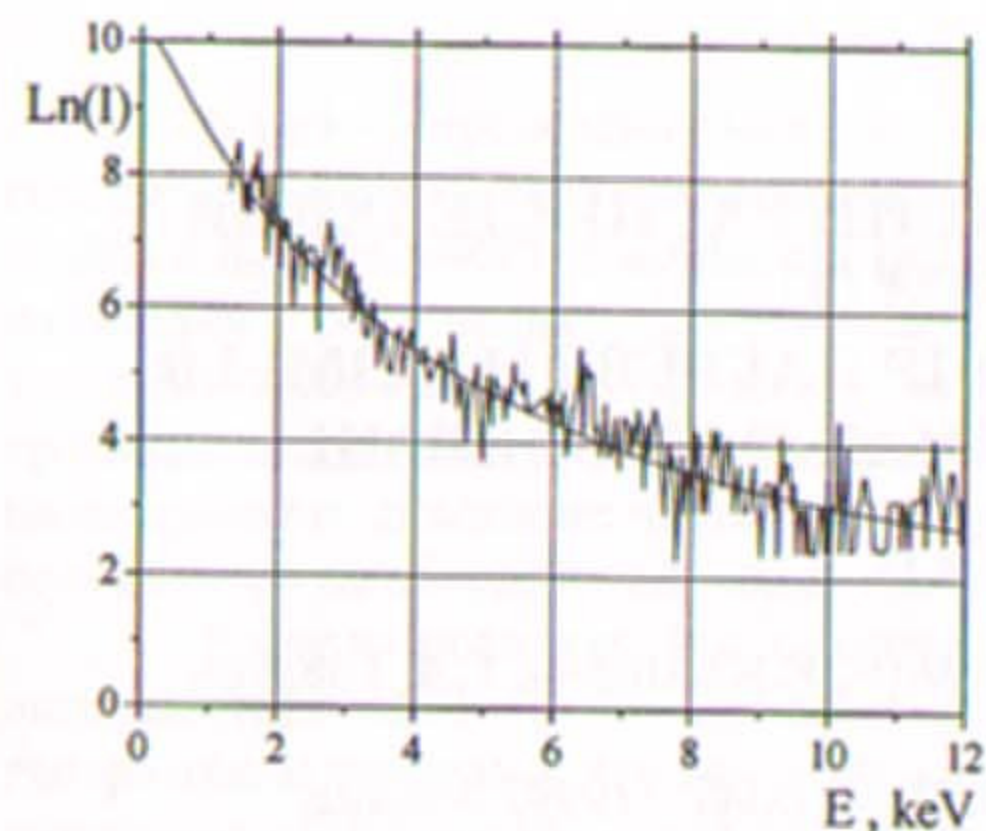
*Институт Общей Физики РАН им А.М. Прохорова, 119991 Москва,
ул. Вавилова 38, E-mail: meshch@fpl.gpi.ru*

Одно из направлений исследований в тороидальных магнитных ловушках, в последние годы является изучение ЭЦР нагрева плазмы в условиях высоких удельных энергокладов. Эти эксперименты, направленные на достижение максимально высоких температур, проводятся как с увеличением мощности нагрева, так и с понижением средней плотности плазмы. Проведенные в течение ряда лет в этом направлении эксперименты выявили несколько интересных эффектов: появление внутреннего транспортного барьера, искажение профиля электронной температуры измеренного по циклотронному излучению и различие значений температур измеренных по томсоновскому рассеянию и по циклотронному излучению для центральной области плазмы [1]. Однако исследование функции распределения электронов по скоростям не проводилось.

Такого рода исследования велись и на стеллараторе Л-2М [2] в ходе которых обнаружено асимметрия профиля электронной температуры измеренного по циклотронному излучению плазмы, а так же завышенное значение T_e , по сравнению с тем, которое можно ожидать из измерений энергосодержания [3]. Зависимость $T_e = f(P/n_e)$ имеет излом при $P/n_e > 300$ кВт/10¹⁹ м⁻³ [4]. В работе было выдвинуто предположение о том, что эти эффекты были вызваны отклонением основной части функции распределения электронов по скоростям от максвелловского.

Таким образом, целью настоящей работы было выяснение характера искажения спектра электронов в условиях высокого удельного энергоклада $P/n_e > 300$ кВт/10¹⁹ м⁻³.

Эксперименты проводились на стеллараторе Л-2М в режиме ЭЦР нагрева плазмы. В течение эксперимента мощность гиротрона поддерживалась равной $P = 200$ кВт, а электронная плотность $n_e = 0.5 \cdot 10^{19}$ м⁻³. В этих условиях был измерен спектр мягкого рентгеновского излучения в диапазоне энергий: $3 \text{ кэВ} < E < 12 \text{ кэВ}$ (рис.1).



В интервале энергий от 1.2 кэВ до 5 кэВ наклон спектра соответствует температуре 1170 эВ, в интервале от 5 кэВ до 9 кэВ температуре 2670 эВ, а в интервале от 9 кэВ до 12 кэВ температуре 7000 эВ.

В аналогичных условиях была предпринята попытка определить температуру и по электронному-циклотронному излучению [4], для центра было получено значение

6 кэВ. Из рисунка следует, что спектр не максвелловский и приведенное значение не является температурой. Таким образом, эксперимент подтвердил гипотезу об отклонении распределения рентгеновских квантов от экспоненциальной зависимости на всем интервале энергий – от 1.2 кэВ до 12 кэВ.

Результаты исследования позволяют сделать следующие выводы: 1) при высоких удельных энергозатратах распределение электронов по скоростям отклоняется от максвелловского распределения, причем это отклонение затрагивает в том числе и основную т.е тепловую часть функции распределения электронов по скоростям 3) в этих условиях из измерений на второй гармонике электронной-циклотронной частоты невозможно определить электронную температуру.

1. T.Shimozumi, S.Kubo, et.all, Plasma Phys. Control Fusion 45 (2003) 1183-1192.
2. Д.К.Акулина, Г.А.Гладков, Ю.И.Нечаев, О.И.Федянин, Физика плазмы т.23, №1, стр.32-36, 1997
3. Д.К.Акулина, Г.М.Батанов, М.С.Бережецкий и др, Физика плазмы т.29, №12, стр.1108-1113, 1997
4. Д.К.Акулина, Г. М. Батанов и др., Физика плазмы т.12, 2003

10.4 АППАРАТУРА РЕГИСТРАЦИИ ДАННЫХ ДЛЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПЛАЗМЕННЫХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ИЯФ СО РАН

А.Д. Хильченко, В.Ф. Гурко, П.В. Зубарев, А.Н. Квашнин,
Д.В. Моисеев, В.А. Хильченко

Институт ядерной физики СО РАН им. Г.И. Будкера, 630090, Новосибирск.

Разработка аппаратуры регистрации формы импульсных сигналов, использующей методику А-Ц преобразования текущих значений амплитуды с высоким значением частоты дискретизации и накопления отсчетов АЦП в буферных ЗУ относительно большой емкости, была инициирована в ИЯФ СО РАН в начале 80-х годов прошлого века в связи с острой потребностью оснащения подобной аппаратурой бурно развивающегося диагностического комплекса установки ГОЛ-1. Начальный этап работ по созданию подобной аппаратуры был связан с разработкой одноканальных приборов, способных фиксировать динамику изменения плотности, интенсивности рентгеновского излучения и диамагнетизма плазмы, температуры ее электронной и ионной компонент, а так же параметров РЭП. В его рамках, на доступной в то время микроэлектронной элементной базе малой степени интеграции, разрабатывались первые быстродействующие АЦП, обладавшие адекватными параметрам сигналов указанных диагностик динамическим диапазоном, частотой дискретизации и полосой рабочих частот. В процессе опытного производства аппаратуры регистрации на основе этих АЦП, а так же ее эксплуатации на установке, отработывалась базовая схема построения приборов этого класса, схемотехника их ключевых элементов, создавались необходимые для их настройки и поверки метрологические методики и стенды. В этот же период была решена очень важная задача системного плана – был осуществлен переход от опытных образцов аппаратуры с разнородными интерфейсами и конструктивами к приборам, выполненным в виде модулей КАМАК. Унификация механики, а так же интерфейса сопряжения регистраторов с вычислительной техникой уже в то время позволила в полной мере воспользоваться преимуществами, свойственными магистрально-модульному принципу построения многоканальных систем сбора данных. В этом стандарте были разработаны и выпущены относительно большими партиями линейка одних из наиболее быстродействующих в то время регистраторов серий "Импульс", регистраторы среднего быстродействия АЦП101 и АЦП850, а так же анализаторы формы импульсных сигналов АФИ-16 и АФИ-39. Указанные приборы стали ключевыми элементами первых автоматизированных систем регистрации, сбора и отображения экспериментальных данных, развернутых в ИЯФ СО РАН в период с 1978 по 1986 год на установках ГОЛ-1, ГОЛ-М и У-1. Логическим продолжением работ первого этапа стала последующая

разработка модулей регистрации серий Ц9107 – Ц9109, использующих в качестве своей основы первое поколение однокристалльных быстродействующих АЦП, выпуск которых был освоен отечественной микроэлектронной промышленностью. В 1986 году эти приборы, вместе с настроечными и метрологическими методиками и стендами, были переданы Чебоксарскому ПО “Электроприбор” для промышленного производства. Вплоть до 1991 года они, под индексами Ф4224, Ф4225, Ф4226, а так же многоканальные синхронные системы регистрации данных ФК4225 и ФК4226, построенные на их основе, выпускались указанным объединением серийно и широко использовались не только в ИЯФ, но и практически на всех экспериментальных импульсных электрофизических установках страны. Последующие этапы развития аппаратуры “цифровой” регистрации данных в ИЯФ СО РАН были связаны с улучшением ее динамической точности, расширением полосы частот обрабатываемых сигналов и функциональных возможностей. В плазменных подразделениях, наряду с решением указанных задач и разработкой регистраторов нового поколения в стандарте КАМАК, был сделан акцент на разработку многоканальных функционально законченных систем регистрации и сбора данных как универсального, так и специализированного назначения. Среди них следует выделить:

- три вида “встраиваемых” одно и многоканальных систем на основе гальванически изолированных регистраторов, предназначенных для фиксации с 12-ти разрядной точностью и временным разрешением в 1мкс сигналов с датчиков, находящихся под высоковольтным импульсным или “плавающим” потенциалом относительно земли установки,

- три модификации многоканальных синхронных систем регистрации на базе 12-ти разрядных АЦП с частотой дискретизации до 50МГц и буферных ЗУ объемом до 32М отсчетов/канал, ориентированных на решение задач, связанных с восстановлением пространственных распределений параметров плазмы, спектров ее излучения, а так же их временной динамики,

- многоканальные системы сбора данных с “on line” обработкой экспериментальных данных, способные формировать в режиме реального времени линеаризованные результаты измерений, пригодные, например, для использования в управляющих подсистемах с обратной связью, стабилизирующих положение плазменного шнура в магнитной ловушке, или решения иных подобных задач технологического характера. К числу систем такого рода следует отнести многоканальную систему регистрации для гетеродинного интерферометра, аналогичную систему для дисперсионного интерферометра на основе СО₂ лазера, многоканальную систему регистрации ВУФ излучения, находящиеся на стадии разработки многоканальные спектрометры гамма и нейтронных потоков с возможностью восстановления пространственных распределений последних.

В силу ограничений, свойственных существующим стандартным магистрально-модульным архитектурам, все указанные многоканальные системы регистрации были выполнены на базе специализированной межмодульной шины. Конструктив исполнения систем (за исключением

гальванически изолированных) – крейт Евромеханики 19” (3U*84HP). Их управляющим модулем является интеллектуальный контроллер, ядро которого построено на 32-х разрядном процессоре ARM7TDMI, оснащенный, помимо стандартной стандартного набора периферии, каналом связи Ethernet-100. Этот канал используется для сопряжения систем с консолью оператора, строящейся на компьютере класса IBM PC. Многоканальные модули АЦП, входящие в состав систем регистрации, помимо трактов преобразования и фиксации данных, содержат достаточно мощное логическое ядро, построенное на основе перепрограммируемых матриц. Именно это ядро и используется для обработки информации, поступающей от АЦП, в режиме “on line” в специализированных системах.

11.1 КОМПЛЕКС АППАРАТНЫХ И ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКИ ГДЛ

А.В. Анисеев, П.А. Багрянский, В.Ф. Гурко, П.В. Зубарев,
А.Н. Квашнин, А.А. Лизунов, Д.В. Моисеев, Д.Н. Степанов,
А.Д. Хильченко, В.А. Хильченко

Институт ядерной физики СО РАН им. Г.И. Будкера, 630090, Новосибирск.

Газодинамическая ловушка (ГДЛ) представляет собой пробкотрон со специальной конфигурацией магнитного поля, обеспечивающей МГД стабилизацию плазмы. Начальная плазма, полученная при помощи дугового разряда в плазменной пушке, во время рабочего импульса нагревается мощными атомарными пучками. В ловушке образуется популяция горячих плещущихся ионов, концентрирующихся в областях магнитных пробок. При определенных параметрах плазмы и инжектируемых пучков в этих областях может протекать D-D реакция, сопровождающаяся выходом термоядерных нейтронов. Указанное обстоятельство делает установки данного класса перспективными для проведения материаловедческих исследований, ориентированных на решение проблемы выбора конструкционных материалов для опытного термоядерного реактора.

Эксперименты на установке ГДЛ проводятся в импульсном режиме с периодичностью 2+4 мин. Длительность импульса (т. н. «выстрела») составляет ≈ 0.3 сек. В течение «выстрела» с заданными задержками должны запускаться системы генерации магнитного поля, источники плазмы, инжекторы атомарных пучков и другое оборудование. В промежутках между «выстрелами» производится вакуумная откачка камеры, напыление титановой пленки на поверхность первой стенки, с заданной частотой периодически запускаются диагностические и нагревные инжекторы, работающие в режиме тренировки.

В состав ГДЛ входит разнородный набор технологических подсистем: емкостные накопители энергии для системы формирования магнитного поля, нагревные, диагностические инжекторы, «титановые пылители», комплекс различных блокировок и защит, система напуска рабочего газа, вакуумная система, система охлаждения конструктивных

элементов и т.д. Для решения задач, связанных с обеспечением надежной и взаимосогласованной работы всего оборудования, контроля за состоянием технологических подсистем и для формирования нужной структуры рабочего цикла во время импульса на установке развернута система автоматизированного управления. Аппаратно она обладает средствами проверки состояния различного оборудования (сборщик двоичных состояний), измерения текущих значений подлежащих контролю параметров в контрольных точках (напряжений, температур, давлений и т.д.) с помощью АЦП, формирователями управляющих сигналов (управляющий регистр, преобразователь код-скважность) и импульсов синхронизации (генератор временных интервалов).

Территориально оборудование установки ГДЛ располагается в двух помещениях, что исходно предопределило разбиение системы управления на две локальных, взаимно связанных подсистемы. Поскольку каждая из этих подсистем выполняет сходные задачи, структура их построения одинакова. Небольшие различия заключаются лишь в наборе используемой аппаратуры. По логике работы, одна из подсистем, ответственная за корректную работу системы формирования магнитного поля ловушки, является ведущей, а другая, управляющая работой инжекторов, – ведомой. Обе подсистемы связаны с консольной машиной класса IBM PC, на которой реализована консоль оператора, посредством Ethernet-100. В качестве протокола обмена использован TCP/IP, что подразумевает наличие в каждой из подсистем собственного интеллекта, способного поддерживать обмен информацией по каналам связи с консольной машиной. В качестве интеллектуального ядра подсистем использован процессорный модуль IP-302, построенный на базе процессора MC68EN302 и оснащенный встроенным ОЗУ объемом 1Мб и набором интерфейсов. Процессорный модуль работает под управлением ОС RTEMS. В качестве стандарта для построения периферийных модулей управления и контроля, размещаемых вместе с процессорным модулем каждой подсистемы в крейте Евромеханики (82HP*3U), а так же для реализации межмодульной шины обмена данными внутри крейта был выбран стандарт Industry Pack (IP). Функционально набор IP модулей, входящих в состав каждой подсистемы, состоит из набора:

- 64-х канальных генераторов временных интервалов, формирующих необходимую временную диаграмму для импульсов запуска и управления оборудованием установки,
- 48-ми канальных модулей формирования и контроля дискретных сигналов с программно модифицируемой структурой построения,
- 16-ти канальных 16-ти разрядных модулей АЦП с программно модифицируемыми режимами работы.

Логическое ядро всех указанных модулей построено на базе микроконтроллеров и перепрограммируемых логических матриц. Исполняемые микроконтроллерами прикладные программы написаны на языке C, а их сегменты, требующие исполнения в режиме, приближенном к режиму реального времени, - выполнены в виде ассемблерных вставок.

Кроме решения задач взаимодействия с консольной машиной процессорные модули обеспечивают автономную работу каждой подсистемы во время «выстрела». Для этого на стадии подготовки в оперативную память процессоров загружаются опорные значения временных интервалов и карта состояния контрольных точек системы. Далее подсистемы работают самостоятельно, передавая консольной машине информацию о текущем состоянии установки и обмениваясь между собой синхронизирующими сигналами. В случае возникновения нештатных ситуаций во время проведения экспериментов в алгоритмах обеих подсистем предусмотрены возможности отката для выхода из аварийной ситуации.

Описанная система управления эксплуатируется на установке ГДЛ в течение двух лет и за указанный период продемонстрировала достаточно высокую степень надежности и помехоустойчивости..

11.2 АППАРАТУРА РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ИОННЫХ И АТОМАРНЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ ДАТЧИКОВ НА БАЗЕ ОДНО И МНОГОСЕКЦИОННЫХ ПРИЕМНИКОВ-КОЛЛЕКТОРОВ

В.Ф. Гурко, П.В. Зубарев, А.Н. Квашнин, С.Г. Константинов,
Д.В. Моисеев, А.Д. Хильченко, В.А. Хильченко.

Институт ядерной физики СО РАН им. Г.И. Будкера, 630090, Новосибирск

Инжекторы атомарных пучков широко используются в технике плазменного эксперимента, как для диагностических целей, так и для нагрева плазмы. Как правило, они строятся по перезарядной схеме, основанной на вытягивании из низкотемпературной плазмы ионного пучка, его ускорения до требуемой энергии в электронно-оптическом тракте и перезарядки на газовой мишени. Качество как атомарных, так и исходных ионных пучков характеризуют несколько ключевых параметров – их энергосодержание, характер распределения плотности тока по сечению и угловая расходимость, обусловленная хоть и малым, но конечным значением поперечной энергии частиц. Обычно для измерения этих параметров используются либо наборы диафрагм с калиброванным сечением отверстий, либо многоканальные торцевые датчики-приемники тока, в том числе и вторично эмиссионные. Применительно к этой номенклатуре датчиков и разрабатывался рассматриваемый в данной работе комплект регистрирующей аппаратуры. Этот комплект содержит:

- двухкоординатный анализатор плотности тока, энергии и углового разброса ионов,
- 64-х канальную систему регистрации сигналов с многоканального приемника ионного пучка на основе микроколлекторов,
- 32-х канальную систему регистрации сигналов с вторично эмиссионного многосекционного приемника-коллектора.

В анализаторе роль приемника тока пучка выполняет малогабаритный коллектор, перемещаемый в обоих поперечных относительно пучка направлениях с помощью управляемого электропривода. Между входным отверстием анализатора и коллектором расположены отклоняющие пластины, формирующие поперечное электрическое поле, величина которого может изменяться программно. В процессе работы прибора, после перемещения датчика электроприводом по одной из поперечных координат в очередную точку, напряжение на отклоняющих пластинах анализатора изменяется в диапазоне от -128 до +128В (с шагом 1В), что позволяет оценить энергию и угловой разброс принимаемых ионов. После каждого изменения величины отклоняющего напряжения, текущее значение тока коллектора измеряется 12-ти разрядным АЦП и фиксируется в

буферном запоминающем устройстве (БЗУ) анализатора. После перемещения датчика в следующую точку процедура измерений повторяется. Этот процесс продолжается до достижения датчиком последней рабочей точки по первой поперечной координате. Далее следует поворот измерительного узла на 90 градусов и производится следующий цикл измерений, но уже по другой поперечной координате. По окончании всего цикла измерений, данные, накопленные в БЗУ анализатора, передаются в консольный компьютер диагностики для математической обработки и отображения в удобном для анализа виде. Электроника анализатора построена на основе однокристальной системы сбора данных и управления ADuC842 производства Analog devices, включающей в себя, помимо микроконтроллера с системой команд процессора 8052, необходимы набор измерительных и управляющих устройств: АЦП, ЦАП, регистров ввода-вывода и таймеров. Для сопряжения с компьютером использован входящий в состав микроконтроллера последовательный интерфейс (UART), дополненный, с целью гальванической изоляции прибора, оптоволоконными приемопередатчиками.

32-х и 64-х каналные системы регистрации построены по одной и той же базовой схеме. Логическим и измерительным ядрами этих приборов являются микроконтроллеры AT90S8535 фирмы Atmel, программируемые логические матрицы и 16-ти каналные 12-ти разрядные АЦП AD7890 от Analog devices. Отличия регистраторов заключаются лишь в количестве используемых АЦП, а так же в построении входных усилительных каскадов их измерительных трактов. Конструктивно оба прибора состоят из основной платы, содержащей 16-ти каналный измерительный узел, всю логику управления, буферное ЗУ, узел связи с консольной машиной и встроенный источник питания, а так же из мезонинных плат расширения, содержащих лишь 16-ти каналные АЦП с соответствующим набором входных масштабирующих усилителей. В отличие от 64-х канальной системы, потенциал земли которой жестко привязан к потенциалу земли датчиков, в 32-х канальной предусмотрена возможность ее "подвески" на потенциал до 500В относительно потенциала земли, что важно, например, для вторичноэмиссионных датчиков, на коллектора-приемники которых обычно подается смещающее напряжение до нескольких сотен вольт.

В обоих приборах 16-ти каналные измерительные узлы в режиме регистрации работают параллельно, обеспечивая минимальную длительность цикла измерения текущих значений тока по всем коллекторам в 32 микросекунды. Поскольку количество каналов каждого измерительного узла может изменяться программно, в регистраторах реализуется возможность уменьшения указанной длительности за счет соответствующего сокращения числа опрашиваемых АЦП каналов. Оба прибора имеют объем встроенных буферных ЗУ, позволяющий фиксировать от 4К до 512К результатов измерений. Причем, выбранный оператором системы объем БЗУ всегда равномерно распределяется лишь между теми каналами, работа которых разрешена в очередном цикле регистрации. В приборах так же реализована

возможность запуска процесса регистрации, как по команде консольного компьютера, так и по внешнему синхронимпульсу.

Прикладные программы, управляющие работой микроконтроллеров анализатора и описанных выше регистраторов, написаны на языке С. Критические к временным параметрам участки кода этих программ выполнены в виде ассемблерных вставок. При разработке программного обеспечения, реализующего работающую под ОС Windows консоль оператора, как для анализатора, так и для систем регистрации, использовались С+ и пакет Delphi фирмы «Borland».

11.3 КОНТРОЛЛЕР НАГРЕВНОГО ИНЖЕКТОРА ТОКАМАКА ГЛОБУС-М

В.Ф. Гурко, П.В. Зубарев, А.Н. Квашнин, Д.В. Моисеев,
А.Д. Хильченко, В.А. Хильченко.

Институт ядерной физики СО РАН им. Г.И. Будкера, 630090, Новосибирск.

Нагревной инжектор токамака Глобус-М, разработанный ИАЭ имени Курчатова, предназначен для генерации пучка нейтральных атомов с энергией до 35 кэВ при импульсной мощности до 1.2 МВт. Инжектор представляет собой автономную установку. Его подготовка к работе производится независимо от токамака. Синхронизация работы нагревного инжектора и токамака осуществляется только в момент рабочего импульса.

Принцип получения пучка нейтральных атомов в инжекторе основан на ускорении ионов с последующей их перезарядкой в атомы на газовой мишени.

В состав оборудования инжектора входят: ионный инжектор, вакуумная и газонапускная система, устройство прогрева азотита, система управления и сбора информации, система водяного охлаждения, а также источники электропитания: накала катодов, разряда, газового клапана, эмиссионного электрода, отрицательного электрода, дугового испарителя, отклоняющего электромагнита.

Для управления инжектором, а также контроля параметров пучка и сбора данных о состоянии элементов инжектора, напряжениях и токах на его электродах, был разработан специализированный контроллер. Он выполнен на основе Еврокрейта и набора встроенных и выносных модулей ввода/вывода, а также модулей регистрации данных. Ядром оборудования Еврокрейта является контроллер системной шины, который построен на базе 32-х разрядного процессора семейства ARM7TDMI. В крейте размещаются модули ввода/вывода: два многоканальных генератора временных интервалов (ГВИ), модуль дискретного ввода/вывода (УР/СДС), а также модули универсальных четырехканальных асинхронных передатчиков (UART) к которым подключаются специализированные выносные измерительные и управляющие устройства. Для сопряжения выносных модулей с модулями UART используются оптоволоконные линии связи.

Контроллер системной шины Еврокрейта является его интеллектуальным ядром и функционально состоит из:

- процессорного модуля WebNet ARM, использующего для сопряжения с удаленной консолью оператора на базе PC, канал связи Ethernet-10/100,

- узла приемников глобальных сигналов синхронизации и разрешения,
- логического ядра на базе программируемой логической матрицы, обеспечивающего сопряжение процессора с системной магистралью Еврокрейта.

Два 32-х канальных модуля ГВИ с оптическими формирователями выходных сигналов используются для формирования временной диаграммы работы как оборудования токамака Глобус-М, так и инжектора. ГВИ могут работать в двух режимах: в режиме формирования синхроимпульсов и в режиме формирования таймирующих сигналов.

В качестве внешних управляющих устройств совместно с ГВИ используются:

- одноканальные приемники-формирователи импульсов запуска тиристоров,
- двухканальные приемники-формирователи импульсов запуска тиристоров со "старт-стопной" схемой включения,
- одноканальные приемники-формирователи на базе твердотельных реле, обладающие способностью коммутации напряжения сети (220В, 1А).

32-х канальный модуль УР/СДС ответственен за управление процессом заряда емкостных накопителей энергии. Часть каналов сконфигурированы как контролируемые (СДС). Во всех этих каналах используются входные формирователи на основе оптронов. Остальные каналы сконфигурированы как управляющие. Их выходные формирователи построены либо по схеме с открытым коллектором и используются для сопряжения с выносными управляющими устройствами с помощью соединения типа "токовая петля", либо на базе твердотельных реле, которые используются для управления сильноточными нагрузками.

Для подключения периферийных модулей в контроллере используются четыре модуля UART. К каждому каналу этих модулей посредством последовательных оптоволоконных линий связи подключаются как выносные измерительные устройства, так и локальные устройства управления и контроля, имеющие автономный алгоритм работы, реализуемый управляющим узлом на базе микроконтроллеров. К числу таких модулей относятся периферийные многоканальные подсистемы дискретного и пропорционального управления и контроля, подсистема управления прогревом вакуумной камеры, подсистема управления газовым хозяйством установки, контроля вакуумных условий и управления насосами, управления энергетикой.

Применительно к решению задач, связанных с регистрацией сигналов в контрольных точках и управлением элементами инжектора, в состав выносных устройств, подключаемых к модулям UART Еврокрейта, включены следующие модули:

- одноканальные 10-разрядные АЦП на базе микроконтроллера AT90S8535, имеющего встроенный UART. Длительность цикла измерения АЦП данного модуля не превышает 100мкс,
- четырехканальный АЦП на базе ADUC816. Разрядность АЦП - 16 бит, длительностью цикла измерения - 20мс, минимальная длительность цикла сканирования всех каналов не более 80мс,
- модуль АЦП для регистрации характеристик распределения плотности тока пучка, прошедшего через плазму. Количество каналов - 32. Минимальная частота дискретизации - 2мкс,
- трехканальный ЦАП, используемый для управления мощными источниками питания,
- многоканальный электронный клеммник. Этот модуль дублирует кнопки и индикаторы ручного пульта управления установки.

В настоящий момент контроллер прошел тестовые испытания на инжекторе. Окончательный запуск нагревного инжектора с новой системой управления совместно с токамаком Глобус-М планируется на середину этого года.

11.4 СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ СТАЦИОНАРНОГО НЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ НА БАЗЕ ВАКУУМНОГО ТАНДЕМА

А.Д. Хильченко, В.Ф. Гурко, П.В. Зубарев, А.А. Иванов,
А.Н. Квашин, Д.В. Моисеев, В.А. Хильченко

Институт ядерной физики СО РАН им. Г.И. Будкера, 630090, Новосибирск.

Функционально нейтронный источник состоит из: стационарного источника пучка однозарядных отрицательных ионов водорода с током до 20mA при энергии до 25KeV, тракта транспортировки пучка отрицательных ионов, ускорителя на энергию 2MeV на базе вакуумного тандема с перезарядной газовой мишенью, находящейся под потенциалом в 1MV, тракта транспортировки протонного пучка, нейтроннообразующей литиевой мишени.

Подобно многим другим аналогичным электрофизическим установкам нейтронный источник содержит классический набор базовых технологических подсистем: – электропитания, обеспечения требуемых вакуумных условий, напуска газа в рабочие объемы, охлаждения конструктивных элементов, а так же подсистему блокировок и защит, обеспечивающую требуемый уровень безопасности при эксплуатации.

Управляющий комплекс нейтронного источника - трехуровневый. Его основой являются сервер и консольные машины класса IBM PC, расположенные в пультовом помещении, выносной коммуникационный узел, а так же набор периферийных управляющих и измерительных устройств (локальных контроллеров) размещаемых в экспериментальном зале. Сервер, консольные машины и модуль контроллера коммуникационного узла связаны между собой локальной сетью на базе Ethernet-10/100, работающей в рамках протоколов TCP/IP и UDP. В состав коммуникационного узла, помимо модуля контроллера на базе процессора семейства ARM7TDI, работающего под управлением ОС uCLinux, входят модули четырехканальных асинхронных приемопередатчиков (UART) с оптическими входами и выходами. К ним посредством последовательных оптоволоконных линий связи производится подключение периферийных локальных контроллеров. Реализуемые топологии линий связи – радиальная и кольцо. В качестве вспомогательных модулей общесистемного назначения в состав коммуникационного узла включены многоканальные модули: формирования синхроимпульсов (ГВИ/Таймеры), дискретного ввода-вывода (УР/СДС), ЦАП и АЦП различной разрядности и различного быстродействия,

Модули UART и локальные периферийные контроллеры оснащены унифицированным интерфейсом (RS232), адаптированным для работы с оптоволоконными линиями связи.

Функции, исполняемые коммуникационным узлом, сводятся к обеспечению надежного командного и информационного обмена между сервером и консольными машинами пультной с одной стороны, а так же периферийными контроллерами и вспомогательными управляющими и измерительными модулями коммуникационного узла – с другой. Наряду с решением указанных процедур, коммуникационный узел обеспечивает исполнение и прикладных задач, ответственных за сбор информации о состоянии периферии и общесистемных блокировок и защит, а так же за формирование безопасных алгоритмов включения/выключения как оборудования отдельных подсистем нейтронного источника, так и всей установки в целом.

Набор периферийных контроллеров системы управления нейтронного источника можно подразделить на два класса: встраиваемые контроллеры общего назначения, встраиваемые специализированные контроллеры и измерительные модули.

К числу контроллеров общего назначения, используемых для управления энергетикой различных подсистем установки, ее вакуумным и газовым хозяйством, а так же для контроля температуры конструктивных элементов и значений напряжений и токов в цепях питания оборудования, относятся два прибора, измерительным и управляющим ядром которых являются микроконтроллеры фирмы Analog Devices ADuC836/842. Контроллеры общего назначения отличаются друг от друга лишь общим числом каналов дискретного и аналогового ввода/вывода (таблица 1), а так же разрядностью встроенных АЦП.

К числу специализированных контроллеров относятся: унифицированные встраиваемые контроллеры источников питания, гальванически изолированный двухканальный измеритель температуры элементов источника отрицательных ионов (нагревного катода и источника паров цезия), бесконтактный измеритель тока пучка, контроллер перезарядной мишени, размещенный под потенциалом перезарядной газовой мишени, одно и многоканальный измерительные модули, предназначенные для фиксации пространственного и углового распределения плотности тока пучка отрицательных ионов, многоканальный модуль АЦП для тракта регистрации параметров протонного пучка, анализатор энергетического спектра тормозного гамма-излучения.

В состав аппаратных средств системы управления нейтронным источником входят различные интеллектуальные компоненты – микроконтроллеры серий ADuC и MEGA, процессор ARM коммуникационного узла и X86-совместимые процессоры консольных машин верхнего уровня. Микроконтроллеры как правило исполняют прикладные «stand-alone» программы, зашитые в их Flash память. Процессоры узлов более

высокого уровня работают под управлением стандартных операционных систем uCLinux и Windows.

Прикладные коды, управляющие работой микроконтроллеров, написаны на языке С. Критические к временным параметрам участки кода выполнены в виде ассемблерных вставок. При разработке программ для микроконтроллеров серии ADuC8xx фирмы «Analog Device» использован пакет μ Vision2 фирмы «Keil Elektronik GmbH», а при разработке программ для микроконтроллеров MEGA фирмы «Atmel» – пакет IAR AVR фирмы «IAR System». Программное обеспечение коммуникационного узла состоит из драйверов, обеспечивающих взаимодействие с внешними устройствами, и прикладных задач, которые по командам от консольных машин выполняют одну из ветвей рабочего алгоритма. Драйверы и прикладные задачи написаны на языке С с помощью стандартных средств, входящих в состав ОС uCLinux.

В качестве окончательного варианта среды разработки базового ПО для консольных машин планируется использовать LabView фирмы «National Instruments». Однако, на первом этапе работ, с целью сокращения временных затрат, необходимых для создания ПО, обеспечивающего стендовую проверку основных элементов нейтронного источника, нами были использованы уже существующие наработки для консольных программ, написанные ранее на основе IDE Delphi фирмы «Borland», исполняемые в рамках ОС Windows.

11.5 СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ДАННЫХ В УСТАНОВКЕ ТЕРМОДЕСОРБЦИОННОГО АНАЛИЗА

Н.В. Титов, П.А. Шигин

Московский инженерно-физический институт 115409, Москва, Каширское ш., 31.

Целью работы было усовершенствование системы регистрации данных установки термодесорбционного анализа (ТДС, описание установки см. [1]). Модернизация системы заключалась в существенном увеличении скорости записи массовых спектров и увеличении количества одновременно регистрируемых масс.

Электронные системы регистрации и управления современных масс-спектрометров построены на базе компьютера, что обеспечивает удобство и высокую скорость работы анализатора. Эти системы позволяют непрерывно выводить массовые спектры на экран монитора и записывать данные измерений в файл. Быстродействие современных спектрометров, например фирмы Файфер-вакуум, находится на уровне 20 мсек/массу.

Блоки управления и регистрации старых приборов выполнены как отдельные модули на устаревшей аналогово-цифровой элементной базе, не обеспечивающей требуемого быстродействия. В тоже время, сами газоанализаторы, как старого, так и нового образцов, практически не отличаются по своим характеристикам, таким как чувствительность и разрешающая способность.

Система регистрации установки ТДС анализа состоит из монопольного масс-спектрометра МХ-7304 и компьютера с платой аналогово-цифрового преобразователя (АЦП). В состав масс-спектрометра входят собственно монопольный масс-анализатор, его блок управления, усилитель сигнала (усилитель постоянного тока – УПТ) и генератор высокочастотного напряжения (ГВЧ). От скорости работы блока управления масс-анализатора зависит скорость регистрации физических данных в экспериментальной установке.

Для увеличения быстродействия и удобства работы с масс-спектрометром МХ-7304 выпуска 1985 г. была спроектирована и изготовлена система управления и регистрации на современной элементной базе с применением микроконтроллера и цифро-аналогового преобразователя.

Система управления масс-спектрометром образована программируемым и управляемым компьютером микроконтроллера (МК) и цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП). Результаты измерений выводятся на экран монитора и записываются в файл данных.

Методика управления анализатором заключается в подаче суммы постоянного и линейно-растущего управляющих напряжений на блок ГВЧ, а от него на электроды анализатора масс-спектрометра. Результирующее

управляющее напряжение описывается зависимостью $U=U_M+\alpha \cdot t$, где U_M – напряжение, соответствующее номеру массы, α – константа, зависящая от разрешающей способности анализатора, t – время. Управляющее напряжение вырабатывается ЦАП, связанным с компьютером посредством МК. В свою очередь, компьютер задает параметры U_M , α , t . Формируя ступенчатое линейно-растущее напряжение можно регистрировать частицы различных масс, причем количество регистрируемых масс можно выбрать любым, исходя из требуемого быстродействия регистрации.

Регистрация данных ведется компьютером, который через АЦП записывает усиленный ионный ток, регистрируемый анализатором. Как известно, процесс регистрации частиц определенной массы масс-анализатором носит статистический характер, и пик, соответствующий этой массе, может быть приближенно описан распределением Гаусса, в котором по оси абсцисс отложено напряжение U , а по оси ординат – ионный ток. В процессе измерений спектров масс обычно не требуется видеть форму пика каждой регистрируемой массы, а достаточно лишь знать высоту пика. С этой целью компьютер проводит поиск максимума пика на заданной массе, и выводит на экран только величину максимума. В тоже время, с целью настройки или отладки анализатора имеется возможность записывать спектры масс в обычном виде, как с возможностью выборки нескольких масс, так и в обзорном виде (от массы с номером N неразрывно до массы с номером $N+\delta$, где δ – ширина обзорного спектра).

Таким образом, модули управления и регистрации масс-спектрометром управляются компьютером, и с помощью программного обеспечения, объединены в единый блок. Такая схема позволяет проводить измерения со скоростью до 50 мсек/массу.

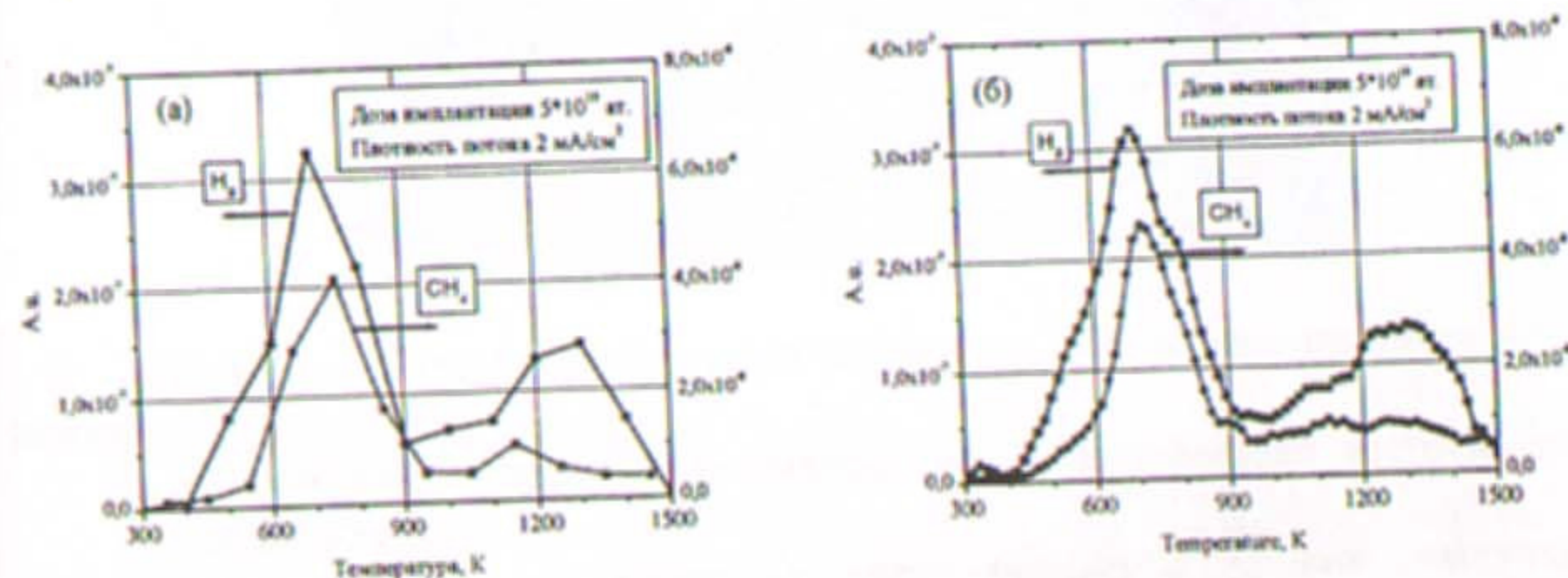


Рис. Термодесорбционные спектры, измеренные с разной скоростью записи, (а) – 1,5 сек/массу, (б) – 200 мсек/массу.

Система была успешно испытана и работает с анализатором МХ-7304 в составе действующей термодесорбционной установки. Увеличение скорости записи термодесорбционных спектров водорода и метана (см. рис.), полученных в установке термодесорбционного анализа, дало возможность увидеть «тонкую структуру» двух основных пиков, такую как появление «наплывов» на склонах 700К-пика и отдельного низкого пика на 1100 К.

[1] L. Begrambekov, O. Buzhinsky, A. Gordeev, E. Miljaeva, P. Leikin and P. Shigin. *Physica Scripta*, 2004, Vol. TXX, 1–4.

11.6 СИСТЕМА КОНТРОЛЯ, РЕГИСТРАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Ю.П. Арефьев, Р.П. Васильев, Л.Н. Любенко, М.М. Мурачев,
В.П. Романок, С.М. Сотников, И.Г. Стрижова

ФГУП «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» 142190, Троицк, Московской обл.,
E-mail: rpvasil@triniti.ru

Для электроснабжения крупных электрофизических установок (типа токамак и др.) используются мощные электромашинные агрегаты с синхронными генераторами кратковременного действия.

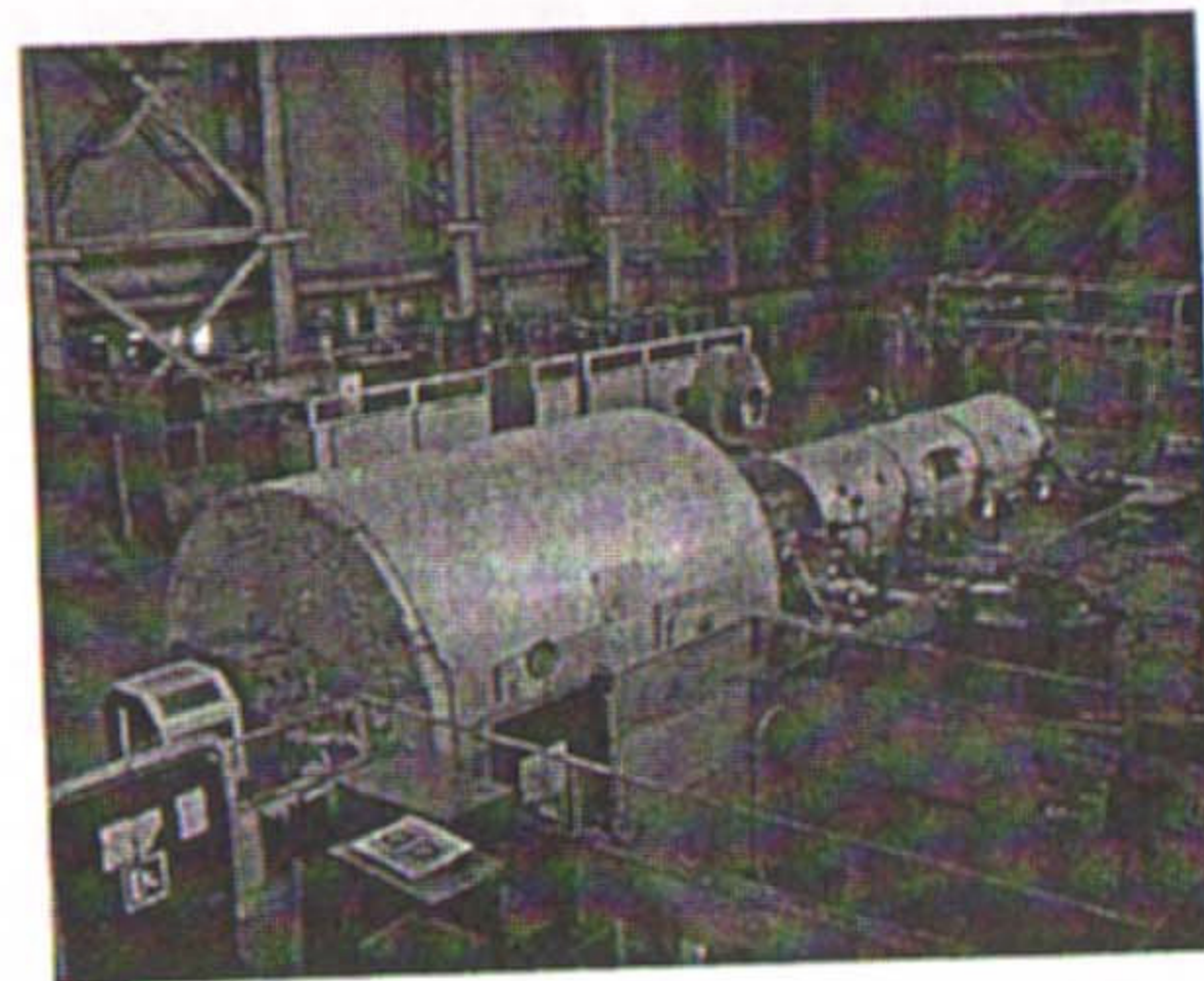


График работы такого агрегата осуществляется в многоступенчатом режиме:

- включение и разгон с применением преобразователя частоты до 3000 об/мин;
- поддержание на холостом ходу заданного уровня частоты вращения;
- кратковременный набор нагрузки до 200 МВА в течение нескольких секунд и снижение частоты вращения до 50% номинальной;
- включение генератора в режиме синхронного двигателя и снова накопление энергии до 100%.

Для безопасной и безотказной работы и предотвращения возникновения нештатных и аварийных ситуаций необходим мониторинг большого количества параметров, включая параметры обеспечивающих систем и агрегатов, а также быстрая диагностика, анализ и оперативные действия по их предотвращению. Практика использования таких установок показала недостаточную надежность контроля процесса работы оператором в лице обслуживающего персонала.

В докладе представлены материалы по разработке системы контроля с использованием серийных датчиков, других средств автоматики и компьютерного наблюдения за процессом работы электромашинного агрегата и, в частности, за электрической частотой генератора - f и частотой вращения валопровода - ω .

Предложенные методы контроля позволят снизить техногенную опасность, повысить надежность и безопасность работы сложного силового электротехнического оборудования.

12.1 ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ РАБОТЫ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ РАЗЛИЧНЫХ УСТАНОВОК УТС

Г.Б. Игонькина, М.М. Соколов

РИЦ «Курчатовский институт» 123182, г. Москва, пл. Курчатова 1

Для работы с экспериментальными данными различных установок на этапах хранения, передачи, обработки и представления результатов для анализа разработаны программные средства, позволяющие создать хранилище экспериментальных данных и унифицированную программную среду для проведения мультимашинных исследований УТС [1]:

- Специализированная БД DASSQL и локальные архивы DASFile для хранения разнообразной диагностической информации (временные ряды, таблицы, описательные параметры и видео) для установок с импульсно-циклическим режимом работы;
- Сетевые сервисы DASTCP, DASWeb и SigmaWeb для удаленного доступа к экспериментальным данным и средствам их обработки;
- Кросс-платформенная библиотека DASAccess для создания пользовательских приложений в среде MS Windows и Linux, имеющих доступ к БД DASSQL и ресурсам сервера приложений;
- Многофункциональная графическая оболочка DAS Tools с набором средств математической обработки DAS Processing для работы с экспериментальными данными.

В настоящее время в ИЯС в БД DASSQL представлены записи 9-ти установок и стендов УТС. В том числе данные установок и стендов ИЯС (Т-10, ПН-3 и др.), а также отдельные импульсы установок ФТИ им. Иоффе (Туман-3М и Глобус-М) и ИОФ РАН (Ливень-2М), всего около $4 \cdot 10^6$ записей, 200 Гб данных. Для работы с данными стеларатора Ливень-2М в ИОФ РАН также установлена БД DASSQL.

При работе с экспериментальными данными реализованы возможности:

- Унифицированный формат и подход при работе с разнотипными данными.
- Выбор данных по критериям средствами SQL, сжатие данных в 3-6 раз при хранении и передаче по сети Интернет.

- Многопользовательская работа с данными многих установок и стендов.
- Специализированная обработка и унифицированное представление результатов.
- Возможность последующей интеграции с инфраструктурой Grid.

Сетевой сервис DASWeb обеспечивает формирование запросов к БД через Интернет браузер одновременно с указанием способов обработки данных и вывода результатов. Для доступа к БД ИЯС и ИОФ РАН на сайте www.fusion.ru созданы разделы «Объединенная БД ИВК ИЯС» и «БД Ливень-2М ИОФРАН». На основе DASWeb для студентов профильных кафедр МИФИ и МВТУ им. Баумана реализован удаленный лабораторный практикум [2].

Сетевой сервис SigmaWeb используется для запуска кодов на сервере приложений в среде MS Windows 2000 server и получения результатов вычислений в Интернет браузере. Платформа протестирована с транспортными кодами Sigma+, и AT_Light [3]. Сервис доступен по адресу: www.fusion.ru, раздел «Транспортные коды». При запуске на платформе SigmaWeb код, представляющий собой простое консольное приложение, работающее с файлами, становится многопользовательским и получает графический интерфейс в виде Интернет браузера.

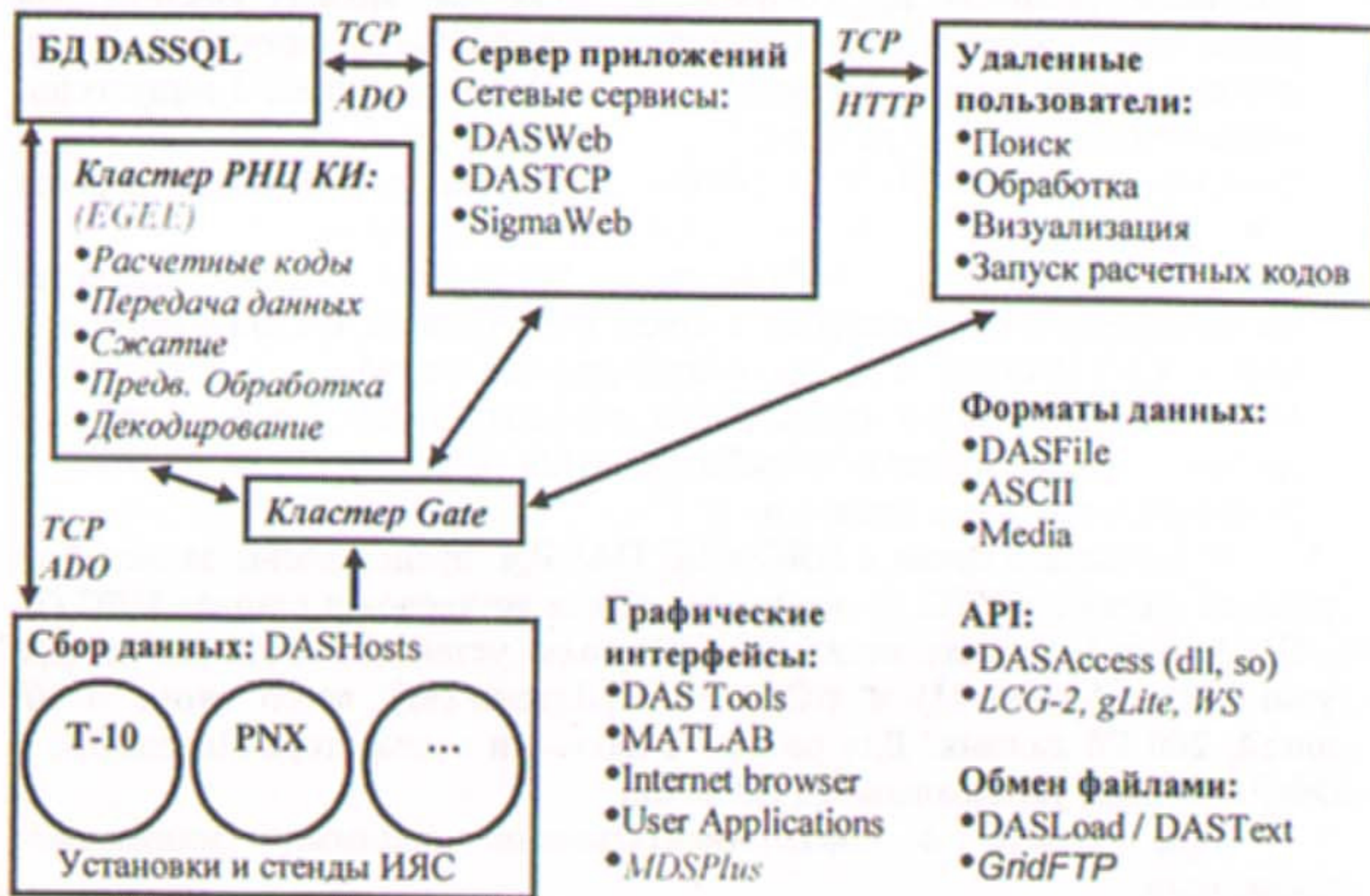


Рис. Перспектива использования Grid инфраструктуры для установок ИЯС.

Для создания пользовательских приложений (в том числе в среде MATLAB и MDSPlus [4]) работающих с БД DASSQL, созданы сетевой сервис DASTCP и кросс платформенная библиотека DASAccess. Обмен данными между приложением и БД происходит по цепочке: *{Application - DASAccess}-Интернет-{DASTCP - DASSQL}*. Наличие сетевых сервисов в созданной для работы с экспериментальными данными UTC информационной системе, облегчает ее последующую интеграцию с активно развиваемой в Европе инфраструктурой Grid для научных исследований EGEE [5].

1. М.М. Соколов Возможность применения измерительно-вычислительного комплекса Токамака-10 на других экспериментальных установках. ВАНТ, серия Термоядерный Синтез, 2003 (№ 4) с.73-78.
2. М.М. Дремин, Г.Б. Игонькина, М.М. Соколов Определение температуры электронов в токамаке Т-10 с использованием удаленного доступа. <http://cpunfi.fusion.ru/dassql/htm/DaswebLab.htm>
3. В.Г. Мережкин <http://tokamak.fusion.ru>
4. В.А. Вознесенский, И.Б. Семенов, М.М. Соколов Организация обмена экспериментальными данными с использованием системы MDSPlus. ВАНТ, серия Термоядерный Синтез, 2003 (№ 4) с. 68-72.
5. Enabling Grids for E-sciencE <http://www.eu-egee.org>

12.2 ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И СБОРА ДАННЫХ УСТАНОВКИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ ЛОВУШКА (ГДЛ ИЯФ СО РАН)

А.В. Аникеев, П.В. Зубарев, А.А. Лизунов, Д.В. Моисеев,
Д.Н. Степанов, А.Д. Хильченко

*Институт ядерной физики СО РАН им. Г.И.Будкера, 630090, г. Новосибирск
пр. акад. Лаврентьева, 11, www.inp.nsk.su, email: D.N.Stepanov@inp.nsk.su*

В последнее время на установке ГДЛ проведен ряд работ по улучшению систем автоматизации. В частности, внедрена новая система управления установкой, произведены доработки системы сбора данных.

Аппаратный комплекс системы управления базируется на двух интеллектуальных контроллерах, построенных на базе процессорного модуля IP302 [1] под управлением ОС RTEMS. Первый контроллер отвечает за систему формирования магнитных полей на установке (зарядка и контроль конденсаторных батарей, генерация цепочек запусков), второй контроллер занимается генерацией импульсов для управляющих механических узлов установки (заслонки, зонды, дуговые испарители титана и т.п.), системы атомарной инжекции, диагностик системы сбора данных; также отслеживается существенная информация о состоянии установки (контроль безопасности, вакуумных условий). Контроллеры обладают сетевым интерфейсом Ethernet 10baseT, что позволяет организовать общение с ними при помощи обычного сегмента Ethernet-сети. Такая организация предопределяет структуру программного комплекса системы управления установкой.

Программный комплекс системы управления ГДЛ включает в себя базу данных параметров эксперимента, сервисные процессы, работающих в интеллектуальных контроллерах непосредственно на установке, графический интерфейс оператора, систему управления атомарной инжекцией. Внутренняя организация системы управления использует двухуровневый способ описания аппаратуры: аппаратные каналы приборов (АЦП, ГВИ, вспомогательных) отображаются на логические каналы. Оба варианта описания и соответствия между ними сохраняются в базе данных эксперимента, построенной на основе СУБД PostgreSQL. Логические каналы группируются в наборы, описывающие ту или иную диагностику или узел установки. Для базы данных эксперимента существует визуальный редактор параметров эксперимента, позволяющий оперативно изменять и дополнять характеристики используемого оборудования.

Сервисные программы в контроллерах состоят из нескольких параллельно работающих потоков. В их задачи входят мониторинг характеристик установки, проведение процесса выстрела и общение по сети с программами верхнего уровня. Верхний уровень системы управления

располагается на серверной машине класса PC под управлением ОС Linux; на ней находится база данных параметров эксперимента и интерфейс оператора. Графический пользовательский интерфейс представляет данные об установке в виде иерархической структуры, что позволяет быстро ориентироваться в различных узлах и подсистемах. Кроме основного режима производства выстрела доступен ряд отладочных режимов, имеется возможность вручную управлять отдельными узлами установки.

Система управления атомарной инжекцией также является распределенной и использует общую с системой управления ГДЛ базу данных. Нижний уровень системы управления атомарной инжекцией составляют КАМАК-крейты, обслуживаемые инструментальной машиной PC-класса под управлением ОС Linux непосредственно на установке. Собранные информация передается по локальной сети в пультовую для визуализации и контроля. Система управления атомарной инжекцией обслуживает 6 синхронно работающих инжекторов СТАРТ-3 суммарной мощностью около 4 МВт. В ходе недавних экспериментов с SHIP (Synthesised Hot-Ion Plasmoid [2]) под управление системы были введены два атомарных инжектора SHIP, при этом практически не потребовалось изменений в программном коде системы.

Система сбора данных установки по организации сходна с системой управления атомарной инжекцией; она базируется на нескольких инструментальных машинах, размещенных в различных местах зала установки. На каждой машине запущен сервисный процесс, обеспечивающий работу непосредственно с измерительной аппаратурой. Сама аппаратура включает в себя широкую номенклатуру КАМАК-блоков, а также гальванически изолированные АЦП [3], разработанные в ИЯФ СО РАН. Собранные информация по локальной сети отправляется на головную машину системы сбора данных, на которой она сохраняется в архив эксперимента, обрабатывается и визуализируется. Существует возможность как онлайн-, так и оффлайн-обработки данных. В распоряжение операторов предоставляется графический интерфейс для удобного конфигурирования набора диагностик и обслуживающих их измерительных приборов. Среда обработки и хранения данных организована на базе программного пакета ROOT [4], разработанного в ЦЕРН. Для обработки данных применяются программы, выполняющиеся в интерпретаторе ROOT.

Дальнейшее развитие системы сбора данных включает в себя поддержку новых типов приборов, например, многоканальных синхронных систем регистрации, разрабатываемых в ИЯФ СО РАН.

Описанный программный комплекс рассматривается как базовый при построении в будущем систем управления и сбора данных для проектируемого в институте источника 14 МэВ нейтронов на основе ГДЛ.

Литература:

5. В.Р. Мамкин, А.Н. Селиванов Разработка контроллера ввода-вывода с поддержкой TCP/IP. Препринт ИЯФ СО РАН № 2001-55, Новосибирск, 2001. С. 5-19.
6. P.A. Bagryansky, A.V. Anikeev, A.A. Ivanov et al. First results from SHIP experiment. Transactions of Fusion Science and Technology, vol. 47, n. 1T, Novosibirsk, 2005. P.59-62.
7. П.В. Зубарев, А.Н. Квашнин, А.Д. Хильченко, В.А. Хильченко ПТЭ, 2001, № 4, С. 75.
8. R. Brun, F. Rademakers ROOT - an object oriented data analysis framework. Proceedings ALENP'96 Workshop, Lausanne, Sep. 1996, Nucl. Inst. & Meth. in Phys. Res. A 389. 1997. P. 81-86.

12.3 ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПОДБОРА В РЕШЕНИИ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ РАДОНА ДЛЯ НЕЙТРОННОЙ ТОМОГРАФИИ ИТЕР.

А.В. Хованский, Д.А. Скопинцев, С.А. Кузьмина

ФГУП «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» 142190, Троицк, Московской обл., Россия

Метод представляет собой решение обратной двумерной задачи Радона в эллиптической области инспекции с двумя ракурсами и малым числом каналов в каждом ракурсе. Отмечено, что классические методы решения данной задачи, такие как методы Гревилля, Хуанга, SVD и др. не всегда применимы. Это объясняется спецификой данной задачи (малое число ракурсов (2) и каналов (до 16), а также большая погрешность входных данных: гауссовский шум с дисперсией до 10%).

Другие методы типа метода Кормака, точной формулы Абея, Готтарди работают на слишком узких классах.

Применение метода подбора, учитывает максимум априорной информации о решении. Решение $F(x,y)$ ищется на параметрическом компакте, заданном в конечномерном пространстве. Этот компакт представляет собой множество функций, определенных внутри области инспекции и представимых в виде разности 2-х эллиптических гауссиан с параметрами в ограниченном диапазоне:

$$F(x, y) = G_1(x, y) - G_2(x, y),$$

$$G_k(x, y) = A(k) \cdot \exp\left\{-\left[\frac{(x - P_x(k))^2}{\sigma_x(k)^2} + \frac{(y - P_y(k))^2}{\sigma_y(k)^2}\right]\right\}, k = 1, 2.$$

Где A – амплитуда, P_x, P_y – положение, и σ_x, σ_y – ширины гауссиан.

Это хорошо известная функция DOG (difference of gaussians) в обработке изображений.

В целях уменьшения перебора местоположение «DOG» находится с помощью пересечения прямых, соединяющих пинхолы с центрами тяжести распределений в проекциях Радона. Затем, решается прямая задача Радона, дихотомически подгоняются амплитуды и ширины гауссиан так, чтобы получить минимальное отклонение от правых частей в обеих проекциях Радона в метрике L2. Параметры гауссиан полученного решения, не обязаны совпадать с параметрами модельных гауссиан, т.к. нас интересует лишь хорошая аппроксимация решения в метрике L2, а таковая не однозначна.

Решение обратной задачи Радона свелось к серии прямых задач, что гораздо устойчивее (интегрирование сглаживает шумы), чем решение обратной задачи. Сложность алгоритма есть $O(MN^2 \ln^3 N)$, где $N \times N$ –

пространственное разрешение, $\ln^3 N$ – число дихотомических примерок параметров, $M \sim 10^p$ (p – число параметров) – число решений прямой задачи Радона. Возможна дальнейшая оптимизация с помощью таблиц одномерных гауссиан.

Классические универсальные методы имеют коэффициент устойчивости порядка $N/2$ при разрешении $N \times N$, что ограничивает их применение при погрешности измерения более 3%. Есть надежда, что в новом методе коэффициент устойчивости не больше 3 при разрешении 13×21 (181 точка внутри области инспекции), вместо 5-7. Для контроля применялся классический метод Гревилля, который вполне может работать в случае пуассоновского (а не гауссовского) шума с уровнем 3-5%.

Приведены результаты моделирования в геометрии двухракурсной томографической системы регистрации нейтронов предлагаемой для установки ИТЕР.

12.4 РЕКОНСТРУКЦИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППАРАТА МНОГОМЕРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ.

Е.А. Драпико², К.И. Байструков², В.М. Павлов²,

Л.Н. Тихомиров¹, И.Л. Тажибаева¹

¹Национальный ядерный центр Республики Казахстан,

²Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина 30

E-mail: zap@phtd.tpu.edu.ru

Специфика измерений на термоядерных установках заключается в том, что контактные методы для измерения параметров горячей плазмы, либо не возможны, либо не приемлемы по ряду причин. Следует отметить, что в независимости от дальнейшего использования информации, а именно для управления плазмой (оперативного, неоперативного) или для исследовательских целей, недостаточно знания только интегральных характеристик. Большое количество плазменно-физических процессов до сих пор остаются неисследованными только потому, что причины их возникновения, либо сами процессы протекают в центре плазменного шнура. К таким процессам относятся например: появление и транспорт примесей, МГД процессы, перезамыкание силовых линий и т.п. Следует также отметить, что управление такими параметрами как форма и положение плазменного шнура, невозможно в отсутствие данных о распределении плотности тока, внутренней структуре магнитной конфигурации, наличии и структуре магнитных островов внутри плазменного шнура. Таким образом, одной из главных задач возникающих в процессе обработки измерительной информации, является определение пространственно-временных распределений физических полей внутри плазменного шнура, на основе измерений, выполненных на измерительном контуре, расположенном вне объема занимаемого плазмой на элементах конструкции (снаружи либо внутри) вакуумной камеры.

Данные задачи относятся к классу некорректных обратных задач и их решение является достаточно сложным, требуют наличия априорной информации и специализированного алгоритмического обеспечения. Подходы к решению таких задач достаточно подробно рассмотрены в специальной литературе и к настоящему времени и достаточно четко сформулированы. Однако алгоритмическая реализация конкретного подхода может быть различной. Следует отметить, что любая подобная реализация является достаточно ресурсоемкой, откуда следует, что реализация эффективного алгоритма, лаконичного и без элементов избыточности является весьма критичной задачей.

Можно выделить ряд современных тенденций используемых для решения сложных вычислительных задач: это в первую очередь,

использование параллельных вычислений и соответствующих аппаратных средств, а также использование специализированных алгоритмов, использующих аппарат искусственного интеллекта.

Так, для решения задач реконструкции физических полей может быть применен аппарат многомерной оптимизации неунимодальных функций. Если исходная задача может быть параметризована конечным набором характеристик, то ее можно будет свести к поиску параметров минимизирующих определенный функционал, отражающий близость решения к экспериментальным данным. В данной постановке, задача реконструкции решается с использованием так называемых генетических алгоритмов, суть которых заключается в следующем. Определенным образом (случайно, с использованием некоторого шаблона) сгенерированный набор различающихся друг от друга вариантов решений рассматривается как поколение, каждое отдельное решение в котором, называют особью. Для каждой особи возможно рассчитать значение функционала отражающее ее близость к решению, удовлетворяющему измерительным данным. Для электромагнитной диагностики, в частности, функционал может выглядеть следующим образом

$$Q(I_1, I_2, \dots, I_n) = \sum_{i=1}^{N_B} \left\{ \left[B_i - \sum_{j=1}^n B_{i,j} I_j \right]^2 + \left[B_i^c - \sum_{j=1}^n B_{i,j}^c I_j \right]^2 \right\} + \left[\Psi_i - \sum_{j=1}^n \Psi_{i,j} I_j \right]^2 \quad (1)$$

Где B_i , Ψ_i - диагностические данные; $B_{i,j}$, $\Psi_{i,j}$ - поле создаваемое j -тым токовым элементом в месте расположения i -го датчика, I_j - величина тока в j -ом токовом элементе, N_B - количество датчиков. Параметрами в данном случае могут выступать значения величин токов в токовых элементах или (и) варианты их расположения. Если исходное количество особей в популяции было равно 1, то без изменений в следующее поколение перейдут (1- k - m) лучших с точки зрения функционала (1), где k - есть коэффициент, определяющий количество особей обменивающихся частью своих параметров для получения нового варианта решения, m - количество особей подвергаемых процедуре мутации, или, иначе случайному изменению одного или нескольких параметров. Полученные в результате обмена особи вытесняют из популяции наименее приспособленных (худшие варианты решения) особи. Процедура мутации используется во избежание вырождения поколения, то есть появления поколений состоящих из одинаковых особей. Таким образом, при увеличении количества поколений, лучшая особь в нем будет стремиться к истинному решению, наиболее точно удовлетворяющему текущему вектору диагностических данных.

В докладе рассмотрены подходы к реализации генетических алгоритмов для поля радиационных потерь и формы внешней магнитной поверхности. Предложены варианты реализации данных алгоритмов с возможностью распараллеливания с использованием кластерной архитектуры.

12.5 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ УНИФИЦИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ЗОНДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРОФИЛЯ ПУЧКОВ В ИНЖЕКТОРАХ УСТАНОВОК Т-10, ТУМАН-3М, ГЛОБУС-М

Г.Б. Игонькина, М.М. Соколов, Г.Н. Тилинин

РНЦ «Курчатовский институт», 123182, г. Москва, пл. Курчатова 1, Россия

В ИЯС РНЦ КИ и ФТИ им. Иоффе на токамаках Т-10, Туман-3М и сферическом токамаке Глобус-М для нагрева или активного зондирования плазмы используются инжекторы нейтральных атомов [1-3], требующие специального анализа получаемой диагностической информации.

Для работы с данными различных экспериментальных установок и стендов UTC целесообразно иметь высокоэффективные инструментальные средства с унифицированным пользовательским интерфейсом и широким набором специальных возможностей. Таким инструментом является графическая оболочка DAS Tools, обеспечивающая навигацию по объединенной базе данных (БД) DASSQL и локальным архивам, быструю специализированную обработку DAS Processing и интеграцию с внешними кодами [4]. В DAS Tools реализован набор декодеров для записи данных различных установок в унифицированный формат. Данные в унифицированном формате сохраняются в БД DASSQL или в локальный архив DASFile. Пакет математической обработки DAS Processing обеспечивает сглаживание данных, подавление случайных выбросов, вычитание постоянной составляющей наводки, инвертирование и нормирование сигнала, выделение его положительной составляющей, фильтрование данных и восстановление основного сигнала на фоне помех. Специально для анализа данных зондовых измерений профилей ионных и атомных пучков инжекторов нейтральных атомов был разработан и интегрирован в DAS Tools код DAS Function Minimize. Этот код осуществляет многопараметрический поиск подходящего профиля пучка, приближенного к экспериментальному набору данных системы вторично-эмиссионных зондов, установленных на приемнике пучка. В основе поиска использован метод Хука-Дживса. Код выполнен на языке Free Pascal, это позволяет использовать его в программах, запускаемых в различных операционных системах. Входными данными для кода являются:

- функция приближения с набором изменяемых параметров;
- функция оптимизации;
- диапазоны изменяемых параметров;
- набор экспериментальных данных (координаты зондов и значения сигналов зондов с их весами).

В качестве функции приближения к экспериментальным данным можно использовать любую непрерывную в заданной области функцию с одним минимумом. Применительно к задаче математической обработки данных с зондов инжектора рассматриваются функции двумерного гауссова распределения:

$$F1(x, y, A, \sigma, x0, y0) = A \exp\left(\frac{-(x-x0)^2 - (y-y0)^2}{2\sigma}\right)$$

$$F2(x, y, A, \sigma, x0, y0) = A \exp\left(\frac{-(x-x0)^2}{2\sigma_x}\right) \exp\left(\frac{-(y-y0)^2}{2\sigma_y}\right)$$

$$F3(x, y, A, \sigma, x0, y0) = A \exp\left(\frac{-(x-x0)^2}{2\sigma_x}\right) \exp\left(\frac{-(y-y0)^2}{2\sigma_y}\right) \left(1 + \frac{(y-y0)^2}{2\sigma_y} \exp\left(\frac{-(y-y0)^2}{2\sigma_y}\right)\right)$$

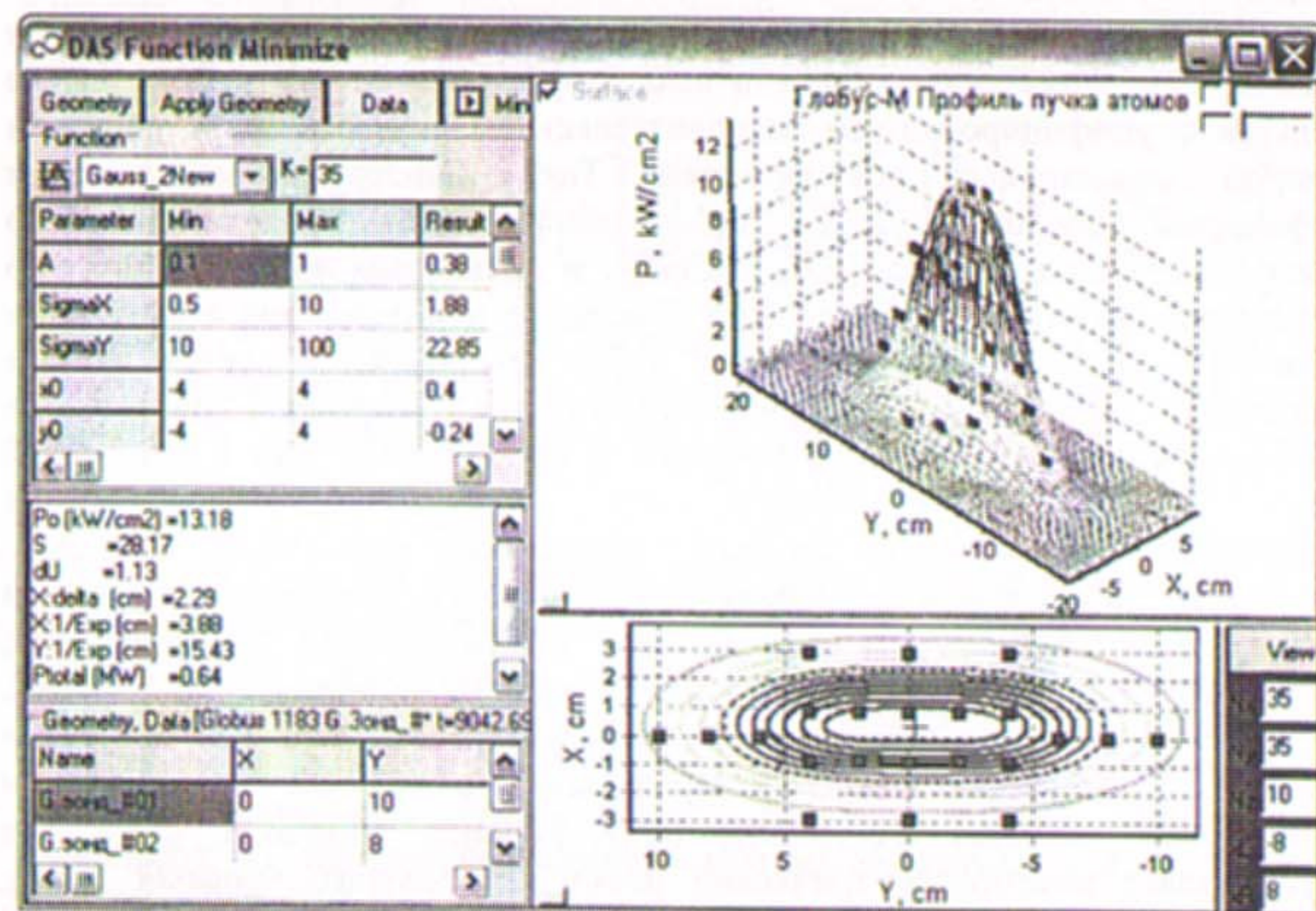


Рис. Профиль атомного пучка ИПМ-2 мощностью 650 кВт. Рабочий газ - водород.

Для анализа зондовых измерений из DAS Tools в код передаются значения, полученные с детекторов в выбранный момент времени, координаты зондов, а также тип функции $F1, F2$ или $F3$ и допустимые границы параметров $A, \sigma_x, \sigma_y, x0, y0$. По результатам вычислений строятся графики приближенной функции профиля пучка, выводятся

полученные значения параметров функции и рассчитанные величины пучка (плотность тока, общий ток, мощность и др.).

1. В.И. Давыденко, А.Г. Барсуков, Г.Н. Тилинин и др. Диагностический инжектор «ДИНА-6» для активного зондирования плазмы в установке «Токамак-10», Препринт ИАЭ 6328/7, Москва 2004.
2. Л.Г. Аскинази, А.Г. Барсуков, Г.Н. Тилинин и др., Подготовка экспериментов по нагреву плазмы в токамаке ТУМАН-3М путем инжекции пучка нейтральных атомов, Санкт-Петербург, 2003, ФТИ, Препринт 1763.
3. V.K. Gusev, A.G. Barsukov, G.N. Tilinin et al., Plasma Heating and Fuelling in the Globus-M Spherical Tokamak. Proc. of 20th IAEA Fusion Energy Conf. Vilamoura, Portugal 2004 EX/P4-24.
4. М.М. Соколов Возможность применения измерительно-вычислительного комплекса Токамака-10 на других экспериментальных установках. ВАНТ, серия Термоядерный Синтез, 2003 (№ 4) с.73-78.

12.6 МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ С ДВУХЧАСТОТНОГО ИМПУЛЬСНОГО РАДАР- РЕФЛЕКТОМЕТРА НА ТЕРМОЯДЕРНОЙ УСТАНОВКЕ ТИПА ТОКАМАК В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ.

А.В. Шарнин², Ю.Н. Голобоков², А.А. Мезенцев²,
К.И. Байструков², В.М. Павлов², Л.Н. Тихомиров¹, И.Л. Тажибаева¹.

¹Национальный ядерный центр Республики Казахстан,

²Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина 30

E-mail: san@phtd.tpu.edu.ru

Получение достоверной информации о плотности электронов в плазме с высоким временным и пространственным разрешением является важной практической задачей, востребованной как с точки зрения управления плазмой, так и с точки зрения проведения послезекспериментальных испытаний. Разрабатываемый в ТРИНИТИ для токамака КТМ двухчастотный импульсный радар-рефлектометр (ДИРР) будет иметь временное разрешение 1мкс и должен иметь пространственное разрешение 1см. Следует отметить, что в результатах измерений с радаров, работающих на термоядерных установках типа токамак, присутствует существенный уровень шумов, вследствие высокой чувствительности методики измерения к локальным флуктуациям плотности электронов и локальным распределениям магнитных полей. Вместе с этим, основной задачей использования ДИРР на токамаке КТМ является не исследование флуктуаций, а определение смещений профиля плотности электронов (условно принимаемого за границу плазмы) в реальном масштабе времени и последующее использование этих данных в системе управления плазмой. В работе определены параметры для оценки уровня флуктуаций и формы профиля плотности электронов при которых фильтрация шумов в результатах измерения с ДИРР позволит вычислить положение граничного слоя плазмы с требуемой точностью. Показано, что при невыполнении перечисленных условий однозначная интерпретация результатов измерений сильно усложняется. С учетом рассматриваемых ограничений к уровню флуктуаций определены требования к алгоритмам обработки, архитектуре и вычислительной мощности системы сбора и обработки данных с ДИРР.

Алгоритмы обработки включают фильтрацию шумов в результатах измерения и вычисление в каждом цикле управления средневзвешенного положения отражающего слоя. При разработке алгоритмов фильтрации шумов на первом этапе работы использовалось предположение о выполнении условий геометрической оптики, учитывалась априорная информация о

динамике профиля плотности электронов на термоядерных установках типа токамак, а также размеры вакуумной камеры. Это позволило оценить диапазон изменения положения соответствующего отражающего слоя в процессе разряда и ожидать, что спектр полезного сигнала будет сосредоточен в полосе частот 0-2кГц, что является в данном случае критерием фильтрации шумов.

Реализация и использование алгоритмов цифровой фильтрации, таких как цифровой ФНЧ, алгоритм экспоненциального сглаживания, алгоритм медианной фильтрации, алгоритм на базе быстрого преобразования Фурье, а также Вейвлет-алгоритм фильтрации показало, что во многих случаях обработка экспериментальных данных не дает приемлемых результатов для описания смещений профиля плотности электронов. Это свидетельствует о том, что условия геометрической оптики при распространении зондирующего излучения в плазме не выполняются и на этот процесс могут оказывать существенное влияние такие факторы как флуктуации плотности электронов, форма профиля плотности и радиус кривизны профиля плотности. Для проверки справедливости этой гипотезы и поиска новых критериев фильтрации было проведено численное моделирование процессов прохождения и отражения зондирующего излучения в плазме с учетом двухмерного случая распространения электромагнитных волн. Результаты моделирования подтвердили справедливость гипотезы. Найдены количественные оценки уровней флуктуаций, при которых интерпретация результатов осуществима. Учитывая то, что при обработке данных в реальном масштабе времени априорно следует ориентироваться на наихудший случай в смысле зашумленности сигнала, нужно осуществить реализацию достаточно сложных алгоритмов обработки измерительной информации в реальном масштабе времени. Проведенные исследования позволили определить требования к архитектуре подсистемы сбора и обработки данных с ДИРР. Стенд рассматриваемой подсистемы сбора данных был создан в Томском политехническом университете.

Основой стенда является шасси промышленного компьютера IPC-6606 (Advantech) с шиной PCI 32Бит/33МГц. В шасси установлены одноплатная ЭВМ PCA-6180 (Advantech), плата сбора и цифровой обработки сигналов ADP60PCI с мезонином ADM212x40M/2 (ЗАО «Инструментальные системы»), локальный модуль синхронизации LMS-v.1 (Томский политехнический университет). Отладка режимов передачи данных в систему управления плазмой осуществляется с использованием сети Ethernet 100BaseTX и дополнительной ПЭВМ.

Стенд позволяет обрабатывать в реальном масштабе времени не только задачи сбора и обработки данных, но и задачи буферизации измерительной информации в оперативной памяти одноплатной ЭВМ, а также передачу данных в систему управления плазмой с циклом 100мкс. Проведение испытаний ДИРР на токамаке КТМ в настоящее время не осуществимо, т.к. и радар, и токамак еще только разрабатываются. Поэтому для проверки работоспособности алгоритмов обработки используются

экспериментальные данные с радар-рефлектометра, являющегося прототипом ДИРР и работающего на токамаке Глобус-М. Имеющиеся экспериментальные данные заранее записываются в память платы ADP60PCI. При отладке режима сбора данных быстродействующий ЦАП платы ADP60PCI в реальном времени проведения измерений (цикл 1мкс) формирует аналоговые сигналы, имитирующие сигналы с выхода время-амплитудного преобразователя (ВАП) существующего радара. После этого, данные поступают на вход submodule АЦП типа ADM212x40M, установленного на плате ADP60PCI. Данные с АЦП записываются в память данных DSP-процессора ADSP-21062L и обрабатываются программой фильтрации шумов. Цикл сбора и обработки данных составляет ~50мкс. Рассчитанное для текущего цикла положение граничного слоя плазмы передается по шине PCI в одноплатную ЭВМ и, далее, по сети Ethernet 100BaseTX в ПЭВМ, где выполняется измерение реальной длительности цикла обновления информации о положении отражающего слоя.

Предлагаемые технические решения и методики цифровой обработки сигналов позволяют существенно повысить точность нахождения искомого параметра – положения отражающего слоя плазмы, и обеспечивают возможность использования этой информации в системе управления плазмой на термоядерной установке типа токамак в реальном масштабе времени.

Всероссийская конференция

«Диагностика высокотемпературной плазмы»

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Подписано в печать 27.05.05

Формат 60x84/16 Гарнитура Times New Roman

Уч. изд. листов . Тираж 100экз.

Подготовлено к изданию в ФГУП «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»
142190, г. Троицк, Моск. обл.

Отпечатано в РИЦ «Курчатовский институт»
123182, Москва, пл. Академика Курчатова