

## Диагностика сильной ленгмюровской турбулентности

Л. Н. Вячеславов, В.С.Бурмасов, В. Ф. Гурко, В. Ф. Жаров, И. В. Кандауров, Э. П. Кругляков, О.И. Мешков, А.Л.Санин.

ГНЦ РФ "Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН", Новосибирск, Россия

Разработан диагностический комплекс для исследования сильной ленгмюровской турбулентности (СЛТ), возбуждаемой электронным пучком в магнитоактивной плазме. Базовым методом служит лазерное рассеяние как на коллективных плазменных колебаниях для исследования их  $\omega$ - и  $\mathbf{k}$ -спектров так и на независимых плазменных электронах для изучения динамики их функции распределения по координатам и скоростям. В качестве источника излучения для измерения спектров ленгмюровских волн выбран ТЕ  $\text{CO}_2$  лазер, позволивший перекрыть весь интересующий диапазон в  $\mathbf{k}$ -спектре:  $0,1\omega_p/c < k_{\perp} < 30\omega_{pe}/c$ . Режим видеодетектирования и эффективное ( $10^{-13}$ ) подавление фонового рассеяния значительно упростили многоканальную (до 12-ти каналов) регистрацию  $\mathbf{k}$ -спектров.

СЛТ в неизотермической плазме сопровождается интенсивными звуковыми колебаниями, генерирующимися на заключительных стадиях коллапса ленгмюровских волн и играющими важную роль в турбулентном переносе энергии. Система рассеяния на основе  $\text{CO}_2$  лазера после существенной модификации была применена для изучения  $\omega$ - и  $\mathbf{k}$ -спектров коротковолновой ионно-звуковой турбулентности, возникающей при СЛТ.

Рассеяние излучения Nd-лазера (1058 нм, 40 Дж, 0,3 мрад) на угол  $8^\circ$  применено для измерения динамики высокоэнергичных "хвостов" электронной функции распределения (0,4-10 кэВ). Разработана 25-ти канальная система регистрации рассеянного на  $90^\circ$  ИК излучения с пространственным разрешением до 150 мкм и временным до 4 нс, предназначенная для исследования микроскопических характеристик турбулентной плазмы, в частности, для непосредственного наблюдения явления коллапса.

Помимо лазерного рассеяния в экспериментах используется монохроматор на  $\lambda = 470$  мкм на основе сеточных фильтров для наблюдения спонтанного излучения плазмы на частотах вблизи  $2\omega_{pe}$  и многофольговый анализатор ускоренных плазменных электронов. Из традиционных для подобных экспериментов методик применяется штарковская спектроскопия турбулентных микрополей в плазме.

## Приборы высокого разрешения на основе многослойных рентгеновских дифракционных решеток.

Н.В.Коваленко, Э.П.Кругляков, О.К.Мыскин, Н.И.Чхало  
 Институт Ядерной Физики им. Г.И.Будкера, 630090, Новосибирск 90,  
 пр. Лаврентьева 1, E-mail: e.kruglyakov@inp.nsk.su

В работах по инерциальному термоядерному синтезу из-за высокой плотности плазма является оптически толстой даже в области ультромягкого рентгеновского излучения. В этом случае для измерения электронной температуры по соотношению интенсивностей K-линий ионов с различной кратности ионизации выбирают элементы с энергией  $\approx 1$  кэВ и выше (Na, Mg, Al и др.) [1,2]. Для разрешения этих линий необходимо спектральное разрешение  $\lambda/d\lambda$  порядка 1000. Из-за сферических aberrаций традиционных дифракционных решеток скользящего падения такое разрешение практически невозможно получить. Кристаллы с большим  $2d$  (CaF<sub>2</sub>, RbAP берилл и др.) имеют невысокий интегральный коэффициент отражения и, как следствие, приборы на их основе имеют низкую светосилу. Применение многослойных рентгеновских зеркал (МРЗ) дает некоторые преимущества при создании спектрометров мягкого рентгеновского диапазона, но недостаток таких спектрометров малое спектральное разрешение  $\lambda/d\lambda \approx 100$ .

Новые возможности в создании светосильных приборов с высоким разрешением открывают многослойные рентгеновские дифракционные решетки (МДР) [3]. МДР представляют собой в общем случае многослойные рентгеновские зеркала микроструктурированные с периодом решетки. Основными достоинствами таких решеток являются: большие рабочие углы и высокие коэффициенты отражения во всем диапазоне мягкого рентгеновского излучения (как следствие большая светосила, меньше сферические aberrации). Большая разрешающая способность обусловлена числом работающих штрихов, как для обычной дифракционной решетки. Для МДР практически отсутствует проблема высших порядков дифракции, меньше чувствительность к загрязнению поверхности.

В работе приводятся расчетные и экспериментальные коэффициенты отражения ряда решеток для различных спектральных линий. Предлагается схема четырехканального спектрометра с разрешением  $\lambda/d\lambda \approx 1000$ , приводится сравнение его светосилы с аналогичными приборами на кристаллах и традиционных решетках скользящего падения.

### Литература:

1. E.Nardi and Z.Zinamon, J. Appl. Phys., 52 (1981) 7075.
2. J.J.MacFarlane and P.Wang, Laser and Particle Beams, 10 2 (1992) 349.
3. E.Spiller, AIP Conf. Proc. 75 (1981) 24

**Система некогерентного лазерного рассеяния ( $\lambda=1058$  нм) для исследования нелинейных эффектов при пучково-лазерном взаимодействии.**

Л. Н. Вячеславов, В. Ф. Гурко, В. Ф. Жаров, И. В. Кандауров,  
Э. П. Кругляков, О.И. Мешков., А. Л. Санин  
Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

На установке ГОЛ-М проводятся эксперименты по изучению турбулентности, возникающей при взаимодействии мощного релятивистского электронного пучка (РЭП) с плазмой [1]. Инжекция РЭП приводит к развитию в магнитоактивной плазме сильной ленгмюровской турбулентности с уровнем  $W/n_e T_e$  (10-20 проц.) . В результате нелинейной трансформации энергии ленгмюровских колебаний и их поглощения у функции распределения электронов плазмы возникают надтепловые "хвосты". Имеющиеся экспериментальные результаты косвенно свидетельствуют в пользу коллапса ленгмюровских волн как важного элемента в механизме передачи энергии от ленгмюровских колебаний к электронам плазмы. Поскольку не существует теоретических предсказаний относительно начального масштаба, динамики и частоты возникновения коллапса широкого спектра ленгмюровских волн в магнитоактивной плазме, то представляется интересным получить эту информацию экспериментально. Для исследования этих нелинейных эффектов на установке "ГОЛ-М" применяется система томсоновского рассеяния на основе мощного неодимового лазера [2]. Параметры надтепловых "хвостов" функции распределения электронов плазмы определяются по излучению, рассеянному под углом 8 градусов. Для регистрации света используются лавинные фотодиоды.

Прямое наблюдение ленгмюровского коллапса предполагается провести путем измерения динамики плотности электронов в коллапсирующей каверне. Для этого излучение лазера, рассеянное под углом 90 градусов, регистрируется 25-канальной линейкой лавинных фотодиодов. Временное и пространственное разрешение диагностики позволяет, по оценкам, регистрировать схлопывание отдельной каверны.

Для подавления паразитного рассеянного света в обеих системах регистрации используются высококонтрастные интерференционные фильтры, работающие в первом случае на пропускание, а во втором-на отражение.

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. Burmasov V.S., Kandaurov I.V., Kruglyakov E.P., Meshkov O.I., Sanin A.L., and Vyacheslavov L.N., in Proc. XXII International Conference on Phenomena in Ionized Gases, Hoboken, USA, August 1995, v.3, pp.13-14.
2. L.N. Vyacheslavov, V.F. Gurko, I.V. Kandaurov, E.P. Kruglyakov, O.I. Meshkov, A.L. Sanin and V.F. Zarov., in Proc. 11th International Conference on High Power Particle Beams, Czech Republic, 1996, p.327.

## Универсальный сверхмалошумящий мощный ик/субмиллиметровый лазер и его использование в диагностике плазмы

В.В.Кубарев, Е.А.Куренский  
Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН  
Новосибирск 630090, пр. Лаврентьева 11, Россия  
e-mail: kubarev@inp.nsk.su

В докладе описывается универсальный мощный ик/субмилли-метровый лазер, способный генерировать различные линии в диапазоне  $\lambda=10\div 400$  мкм, имеющий, благодаря использованию ВЧ накачки, отношение сигнал/шум  $\geq 10^4$ , которое минимум на два порядка превышает аналогичный параметр для лазеров на постоянном токе. Лазер позволяет создавать на его основе различные оптимальные (с максимальным отношением сигнал/шум) высокочувствительные интерферометры, поляриметры, системы коллективного рассеяния для токамаков, стеллараторов и открытых ловушек. В таблице приведён перечень наиболее интересных для диагностики плазмы линий этого лазера и уровень их непрерывных мощностей.

Излучающая молекула	HCN	DCN	H <sub>2</sub> O	
Длина волны, мкм	337	190	119	28
Выходная мощность, мВт	190	430	60	90

В многоканальном HCN-интерферометре на установке ПСП-2 была достигнута чувствительность измерений профиля плотности плазмы  $(n_{el})_{min} \approx 10^{11}$  см<sup>-2</sup>. Рассматриваются HCN-, DCN-, H<sub>2</sub>O-интерферометры для различных частей установки Водородный Прототип Нейтронного Источника.

### Литература

1. Кубарев В.В., Куренский Е.А., Квантовая электроника, 1995, 22, 1179.
2. Кубарев В.В., Квантовая электроника, 1996, 23, 197.
3. Кубарев В.В., Куренский Е.А., Квантовая электроника, 1996, 23, 311.
4. Kubarev V.V., Kurensky E.A., Proc. of International Symposium "Modern problem of laser physics", Novosibirsk, 1996, 637.

## Использование прецизионных импульсных атомарных пучков для диагностики плазмы в магнитных ловушках

В.И. Давыденко, А.А. Иванов  
ГНЦ РФ «Институт ядерной физики им Г.И.Будкера СО РАН»  
Новосибирск, Россия

В работе исследуется возможность использования инъекции субмикросекундных атомарных пучков для диагностики плазмы в системах с магнитным удержанием. В результате инъекции в плазме создается пространственно локализованный сгусток пробных ионов, изучение движения которого позволяет определить структуру магнитного поля, измерять величины электрического и магнитных полей, электронную температуру и другие важные характеристики. В настоящее время развита конкретная схема определения радиального электрического поля в плазме токамака, основанная на измерении скорости тороидального дрейфа короткого ионного сгустка, захваченного вблизи экваториальной плоскости. Рассматривается вариант измерения радиального электрического поля на токамаке TEXTOR, в котором предлагается инжектировать пучок атомов гелия и наблюдать за дрейфом сгустка однократно ионизированных ионов гелия, имеющих водородоподобный спектр, по излучению в оптическом диапазоне.

Для формирования необходимых импульсных диагностических пучков предложен и экспериментально исследован метод сеточной модуляции плазменного эмиттера ионного источника диагностического инжектора. При использовании сеточного модулятора в диагностическом инжекторе ДИНА-4А получен пучок с длительностью фронта  $\sim 0.5$  мкс. В случае необходимости формировать более короткие сгустки предложено использовать обдирку пучков отрицательных ионов водорода в импульсной лазерной мишени.

## Спектры лазерного рассеяния на сильноточном РЭП

А.В.Аржанников, В.С.Бурмасов, С.А.Кузнецов, С.Л.Синицкий  
Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия  
e-mail: sinitsky@inp.nsk.su

Эффективность накачки электромагнитных волн в вакууме и плазме с помощью сильноточных пучков релятивистских электронов существенным образом определяется шириной функции распределения этих частиц по скоростям. В связи с этим регистрация функции распределения электронов в таких пучках приобретает несомненный интерес. Такого рода измерения по рассеянию излучения  $\text{CO}_2$  лазера ( $\lambda=10.6\text{мкм}$ ) на ленточном пучке мэвных электронов с регистрацией рассеянного излучения в оптическом диапазоне обсуждалось в работе [1]. Реализацию этих измерений планируется осуществить в ИЯФ СО РАН в ходе экспериментов текущего года.

В докладе приводятся результаты расчетов спектров рассеяния излучения  $\text{CO}_2$  лазера в условиях планируемого эксперимента при различном характере функции распределения электронов пучка по продольным скоростям. Прослежена зависимость ширины спектров рассеяния от углового разброса электронов, а также изменения в форме спектров, связанные с влиянием на движение со стороны собственных электрического и магнитного полей пучка. Провисание потенциала в сечении пучка, создаваемое объемным зарядом электронов, понижает продольную скорость в большей мере в плоскости симметрии ленточного пучка. В свою очередь, дрейфовое движение электронов в скрещенных  $E \perp H$  полях и прокручивание силовых линий магнитного поля за счет собственного поля пучка снижают продольную скорость электронов преимущественно вблизи его границы. Проявление этих эффектов в характере спектров рассеяния существенным образом связано с выбором схемы постановки эксперимента и его условиями, что и обсуждается в данной работе.

Работа поддержана РФФИ, грант № 95-02-04620.

1. А.В.Аржанников. Препринт ИЯФ СО РАН 91-102, Новосибирск, 1991.

**Метод коллективного рассеяния  
для исследования коллапса ленгмюровских волн**

В.С.Бурмасов, Л.Н.Вячеславов, Э.П.Кругляков, А.Л.Санин

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН

Пр. Лаврентьева 11, Новосибирск, 630090, Россия,

e-mail: burmasov@inp.nsk.su

Повышение эффективности нагрева плазмы релятивистским электронным пучком в открытых ловушках во многом зависит от понимания физики развитой ленгмюровской турбулентности плазмы в сильном магнитном поле. Особый интерес представляет исследование заключительной стадии процесса - коллапса ленгмюровских волн. В этот момент происходит ускорение электронов плазмы полем кавитонов, при последующем схлопывании которых генерируются ионно-звуковые волны. В настоящем сообщении описывается модифицированный метод коллективного лазерного рассеяния созданный для исследования интенсивности, частоты и длины волны вышеупомянутых ионно-звуковых колебаний.

Использовался ТЕА СО<sub>2</sub> лазер (R14,  $\lambda = 10.288$  мкм, 10 Дж). Для подавления паразитного излучения частота генерируемого лазером излучения совмещалась с одиночной линией поглощения аммиака asR (1,1) с помощью встроенного в резонатор лазера эталона Фабри-Перо. Кювета с аммиаком применялась также для определения частоты ионно-звуковых флуктуаций по поглощению лазерного излучения. Одновременно с наблюдением ионно-звуковых колебаний регистрировались ленгмюровские волны, интенсивность которых значительно превышала порог модуляционной неустойчивости. Наблюдалась хорошая корреляция сигналов рассеяния на ионном звуке с сигналами в «ленгмюровском» канале. В качестве детектора в обоих каналах применялись фотосопротивления на основе Si:B, охлаждаемые жидким гелием. Пространственный спектр ионно-звуковых флуктуаций исследовался методом двухканальной регистрации, что позволило значительно снизить погрешность измерения.

Существенно надтепловой уровень ионно-звуковых колебаний ( $W/nT \approx 10^5$ ) и вид пространственного спектра позволяют сделать вывод, что источником возбуждения звука является коллапс ленгмюровских волн. Пространственный спектр флуктуаций плотности позволил оценить характерный размер кавитона в момент остановки:  $l_{\min} \leq 30r_D$ .

## Система томсоновского рассеяния на установке ГОЛ-3-II

А.В.Бурдаков, П.В.Денисенко, П.И.Мельников,  
А.Ф.Ровенских, Е.П.Семенов  
ГНЦ РФ «Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН»,  
Новосибирск, Россия

Описывается диагностическая система, основанная на томсоновском рассеянии второй гармоники неодимового лазера. Лазерный луч с энергией  $\sim 10$  Дж и длительностью  $\sim 10$  нсек фокусируется в центр плазменного шнура установки ГОЛ-3-II. Рассеянное излучение регистрируется одновременно в направлении перпендикулярном зондирующему лучу и под малым ( $8^\circ$ ) углом. Излучение, принимаемое под углом  $90^\circ$ , используется для определения температуры и плотности в одной точке и одновременно – для измерения радиального профиля плотности. Малоградусная система дает возможность одновременной регистрации спектра излучения для четырех направлений волнового вектора  $\Delta k$ , позволяя измерять анизотропию функции распределения электронов с энергией до  $\sim 10$  кэВ. В докладе содержится описание диагностической аппаратуры и приведены результаты экспериментов по измерению параметров горячей плазмы.



## Статический фурье-спектрометр и его применение в исследовании плазмы

Бурмасов В.С., Дорошкин А.А., Князев Б.А.,  
Матвеевко А.Н., Мельников П.И., Федотов М.Г.

Новосибирский государственный университет, Новосибирск

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

В последние годы в связи с появлением эффективных позиционно-чувствительных детекторов, ПЧД, и персональных компьютеров стала возможной реализация схемы «статического» фурье-спектрометра, применение которого в исследованиях плазмы представляется весьма перспективным. Спектрометр состоит из интерферометра Саньяка с обратно-круговым ходом лучей, обеспечивающего преобразование волновое число-координата (и не требующего в связи с этим наличия движущихся элементов), и ПЧД, регистрирующего интерферограмму. В данной работе проведен сравнительный анализ всех ключевых характеристик «динамического» (с движущимся зеркалом), ДФС, статического, СФС, фурье-спектрометров и дисперсионных приборов с одноканальной и многоканальной регистрацией. Анализ показал, что для большинства применений СФС имеет преимущество. Он компактен, имеет высокую светосилу, как ДФС, а при слабых световых сигналах (когда источником флуктуаций является статистика фотонов) и существенно лучше, по сравнению с ДФС, отношение сигнал-шум. В отличие от ДФС, применяемого, как правило, в ИК области спектра, СФС используется в диапазоне 200-1100 нм. Существенным достоинством прибора является то, что запись полной интерферограммы происходит «в параллель», в течение всей длительности экспонирования. Это дает возможность, используя, например, ПЗС-камеры, регистрировать спектры за очень короткие времена. Система обладает повышенной помехоустойчивостью, поскольку накопление информации происходит локально в фотоприемнике, а ее передача осуществляется по окончании процесса. Нами разработано (см., например, [1]) несколько модификаций статического фурье-спектрометра. Работа с ними показала, что интерферометр малочувствителен к вибрациям, устойчиво держит юстировку и прост в эксплуатации. Измерены основные характеристики спектрометров. Показано, что для СФС, в отличие от ДФС, имеется возможность численной коррекции возникающих из-за несовершенства оптических элементов погрешностей интерферограммы. Это дает потенциальную возможность создания дешевых СФС широкого применения. В докладе представлены примеры спектров, полученных на плазменных установках. Работа поддержана грантами 95-0-5.2-185 Минобразования РФ и U.S. CRDF RP1-239.

1. В.С.Бурмасов, Б.А.Князев, Г.А.Любас, М.Г.Федотов. Приборы и техника эксперимента, 1994, В.6, С.178.

## Восстановление распределения показателя преломления в анодной плазме ионного диода COBRA по отклонению лазерного луча и хронограмме его фурье-образа

Дж.Б. Гринли, Д.А. Хаммер, Б.А. Князев, В.С. Черкасский  
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия  
Лаборатория плазменных исследований, Корнельский университет, Итака, США

Измерение градиента показателя преломления по отклонению лазерного луча является простым, но эффективным методом исследования плазмы. Используя одну из модификаций этого метода на основе новой оптической системы, состоящей из трех телескопов и позволяющей получить хорошее пространственное разрешение в протяженных объектах, была исследована динамика расширения анодной плазмы ионного ускорителя COBRA и восстановлено распределение градиента показателя преломления для нескольких моментов времени при регистрации отклонения дифференциальным фотодиодом [1]. Дополнительным преимуществом данной оптической системы является возможность одновременно регистрировать как отклонение луча, так и его фурье-образ. Эта особенность схемы была использована в упомянутых выше экспериментах, и в нескольких выстрелах фурье-образ пучка был зарегистрирован в хронографическом режиме электронно-оптической системой Hamamatsu C2830 с ПЗС-камерой на выходе.

Система позволяла регистрировать в фокальной плоскости одной из линз квадрат модуля фурье-образа пространственного распределения лазерного пучка, прошедшего через градиентный слой. Хронограмма регистрировала фурье-образ как до момента генерации плазмы (невозмущенный пучок), так и в течение рабочего импульса. Это позволяет из хронограммы, полученной в одном импульсе, путем решения обратной задачи найти распределение сдвига фазы в прошедшем пучке (а, следовательно, и показателя преломления в слое) от координаты по модулям фурье-образов невозмущенного и возмущенного лучей. При этом, для устранения неопределенности в абсолютном значении восстановленной фазы могут использоваться данные, полученные с фотодиодом. В данной работе приводится пример обработки данных, полученных описанным методом, а также рассматривается модификация метода для измерений с широким лазерным пучком, что позволит получать информацию об анодном слое за один импульс.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов Sandia National Laboratories AF-1660 и U.S. CRDF RP1-239.

1. B.A.Knyazev, D.A.Hammer, J.B.Greenly, E.G.Krastelev, M.Cuneo. Submitted to Review of Scientific Instruments, 25 p. (1996).

## Томография плазмы на установке АМБАЛ-М по излучению линии $H_{\alpha}$

В.С.Белкин, В.Г.Соколов, Ю.С.Храмов  
Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН  
630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 11  
e-mail: sokolov\_v@inp.nsk.

В медианной плоскости концевой пробкотрона ловушки АМБАЛ-М плазма плотностью  $n \sim 10^{13} \text{cm}^{-3}$ , электронной температурой  $T_e = 10\text{-}50 \text{eV}$  имеет характерный диаметр  $\sim 20$  см. Из этой области принимается излучение на линии  $H_{\alpha}$  (656.3 нм) по 16 параллельным хордам, расположенным через 2 см. Применена модифицированная система регистрации излучения [1]. В качестве фотоприемников используются кремниевые фотодиоды с усилителями, спектральная линия выделяется интерференционным фильтром.

Для осесимметричного случая радиальная зависимость восстанавливается из хордовых измерений интегральным преобразованием. Гладкие функции для интеграла Абеля подготавливались специальным пространственно-временным сглаживанием экспериментальных данных. Исходные осциллограммы с АЦП "очищаются" от шума фурье-фильтрацией высоких гармоник. Из обработанных дискретных хордовых измерений для одного момента времени путем интерполяции сглаживающим сплайном по 16 пространственным точкам получается непрерывная функциональная зависимость измеряемой интенсивности излучения от радиуса. Применялись сплайны 3- 5 порядков с интерполяцией по 5-9 точкам.

Из восстановленной пространственно-временной зависимости интенсивности свечения  $I(r,t)$  можно получить эволюцию радиального распределения электронной температуры  $T_e(r)$ , если известны распределения плотности плазмы  $n_e(r)$  и нейтральных атомов водорода  $n_H(r)$ .



Временное разрешение используемой аппаратуры регистрации  $\sim 10$  мкс позволяет наблюдать МГД колебания плазменного шнура.

- [1] В.С.Белкин, В.Г.Соколов, И.Я.Тимошин V Всесоюзное совещание по диагностике высокотемпературной плазмы. Минск, 1990. 88с.

## Оптимизация оптических элементов спектрометров на основе многослойных рентгеновских зеркал.

Э.П.Кругляков, Е.П.Семенов, Н.И.Чхало

Институт Ядерной Физики им. Г.И.Будкера, 630090, Новосибирск 90,  
пр. Лаврентьева 1, E-mail: e.kruglyakov@inp.nsk.su

Многослойные рентгеновские зеркала (МРЗ) все шире применяются в современных спектрометрах мягкого рентгеновского излучения для диагностики высокотемпературной плазмы. Это объясняется существенно более высокими интегральными и пиковыми коэффициентами отражения МРЗ по сравнению с традиционными диспергирующими элементами. Благодаря простоте, компактности и относительной дешевизне этого типа приборов, на их основе создаются многоканальные системы, позволяющие изучать излучательные характеристики плазмы с пространственным разрешением одновременно на нескольких длинах волн. Спектральное разрешение МРЗ на уровне 100 вполне достаточно для разрешения К-линий легких ионов примесей различной кратности ионизации.

При разработке спектрометров на основе МРЗ возникает проблема оптимального выбора рентгенооптических элементов спектрометра для решения конкретных спектроскопических задач. В данной работе изложены основные принципы, применяемые авторами при разработке спектрометров. Кратко излагается теория МРЗ, приводятся перспективные типы МРЗ для наиболее интересных для целей диагностики высокотемпературной плазмы спектральных линий. Обсуждаются основные типы коллиматоров, критерий выбора материала отрезающего фильтра, детектора. Приводятся данные по спектральным характеристикам МРЗ, полученным в последнее время. Описывается двухканальный перестраиваемый спектрометр, созданный авторами на основе МРЗ.

## Resonant Plasma Converter for Atomic Particles Analyzer

A.A. Kabantsev, G.N. Sankin

The Budker Institute of Nuclear Physics, SB RAS

11, Lavrentiev str., 630090, Novosibirsk, Russia

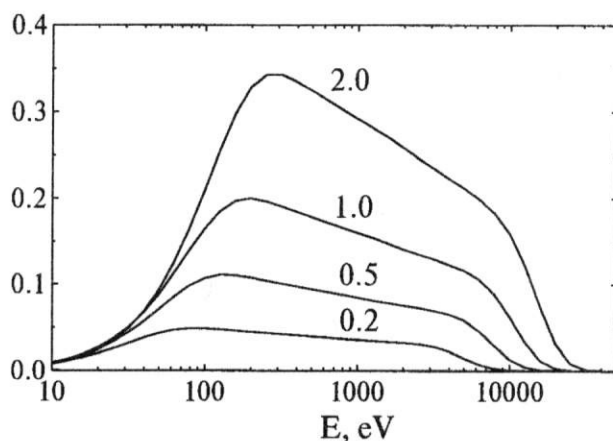
e-mail: kabantsev@inp.nsk.su

The doubtless interest at plasma study the charge-exchange atoms energy analysis presents, which distribution function is connected to ions distribution function. This element of diagnostics is widely applied on modern plasma installations for uncontacted measurements of ion temperature. However the energy analysis of low-energy atoms ( $\sim 100$  eV) is integrated with certain difficulties, as for the majority of usually used charge conversion methods the atoms into ions transformation efficiency drops with energy reduction and becomes unacceptably small in the range 100 eV.

In the report a resonant plasma converter for atomic particles, created for opened magnetic trap AMBAL-M is submitted. Charge-exchange atom flow from main plasma pass through a hydrogen plasma target, where partially resonant charge-exchange and are transformed into positive ions. High efficiency of charge conversion in a wide energy range is thus reached, pollution of a main plasma by heavy impurities is excluded, the analyzed particles do not lose energy on reception of electric charge. The formed ions are analyzed on energy by a  $30^\circ$  electrostatic analyzer, and after acceleration are registered by a detector on the MCP basis.

In the work requirements to a plasma target are analyzed in details, on which basis the suitable plasma source choice is made.

Conducted experimental researches of the plasma converter have shown, that the chosen plasma source provides controlled change of target linear density in the range  $(0.2 \div 2) \cdot 10^{14}$  cm $^{-2}$  at low own ions temperature and Frank-Condon atoms concentration of a hydrogen. It permits to reach high transformation efficiency of atoms in positive ions in the energy range  $20 \div 20\,000$  eV, limited from below by ions scattering process in plasma target.



Conversion factor of plasma target.  
Numbers on schedules -  $\langle n_i \rangle$  in units  $10^{14}$  cm $^{-2}$

## Диагностические инжекторы пучков быстрых атомов водорода - ДИНА-6 и ДИНА-7

Е.Д. Бендер, С.А. Вибе, В.И. Давыденко, Г.И. Димов,  
Ю.В. Коваленко, В.Я.Савкин, Г.И. Шульженко  
ГНЦ РФ «Институт ядерной физики им Г.И.Будкера СО РАН»  
Новосибирск, Россия

Для диагностики плазмы в токамаках средних размеров и открытых ловушках разработаны и испытаны диагностические инжекторы ДИНА-6 и ДИНА-7. Инжектор ДИНА-6 обеспечивает пучок атомов водорода с энергией 30 кэВ с эквивалентным током 1.4 А, инжектор ДИНА-7 - пучок атомов с энергией 40 кэВ и эквивалентным током 0.7 А. В течение рабочего цикла инжекторы выдают серию из 20 миллисекундных импульсов с промежутками между импульсами не короче 15 мс. В ионном источнике инжекторов плазменный эмиттер создается дуговым генератором плазмы с быстрой подачей газа и формирование пучка осуществляется многоапертурной четырехэлектродной ионно-оптической системой со сферической геометрической фокусировкой. Для откачки ионного источника и перезарядной трубки используется встроенный сорбционный насос с импульсным электро-дуговым распылением титана. Инжекторы оборудованы автономной системой электропитания и компьютерной системой управления и контроля.

## Диагностический инжектор атомов для крупных термоядерных установок.

Г.Ф.Абдрашитов, В.И.Давыденко, П.П.Дейчули, А.А.Иванов, В.А.Капитонов,  
А.А.Подминогин, А.И.Рогозин, В.Я.Савкин, Н.В.Ступишин, И.В.Шиховцев  
Институт ядерной физики им.Г.И.Будкера СО РАН,  
630090, Новосибирск, Россия

Для пучково-спектроскопической диагностики плазмы в крупных термоядерных установках в ИЯФ им.Г.И.Будкера разрабатывается инжектор атомов водорода со следующими параметрами: энергия атомов - до 50кэВ, ток пучка атомов водорода - до 1 экв.А, длительность импульса - до 10сек. Инжектор включает в себя ионный источник с системой питания и инжекционный тракт с криогенной откачкой. В докладе представлены результаты испытаний основных систем инжектора и первых экспериментов по формированию ионного пучка.

**Измерение пространственного распределения плотности плазменного шнура по наблюдению линии  $H_{\alpha}$  атомов водорода, инжектированных в плазму на установке ГДЛ.**

П.А.Багрянский, П.П.Дейчули, А.А.Иванов, С.А.Корепанов,  
А.А.Лизунов, В.В.Максимов, Н.В.Ступишин  
Институт ядерной физики им.Г.И.Будкера СО РАН,  
630090, Новосибирск, Россия

На установке газодинамическая ловушка (ГДЛ) разработана и установлена диагностическая система для измерения распределения плотности плазменного шнура по интенсивности свечения пересекающего плазму ленточного пучка атомов водорода. Ранее сходный способ был реализован с помощью литиевого пучка на установке ASDEX. Пучок атомов водорода возбуждается при столкновениях с электронами и ионами плазмы. В широкой области параметров плазмы ( $n_e \leq 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и  $T_e = 50\text{-}500\text{эВ}$ ) при энергии инжектируемых атомов  $E \geq 15\text{кэВ}$  эффективный коэффициент возбуждения атомов слабо зависит от плотности и температуры плазмы и интенсивность излучения возбужденных атомов пропорциональна локальной плотности. Пространственное разрешение  $\approx 2\text{см}$  для линии  $H_{\alpha}$  ограничивается произведением времени жизни возбужденного состояния на скорость атомов пучка и конечной шириной ленточного пучка. На установке ГДЛ установлен специально разработанный инжектор атомов водорода «ДИНА-5», который позволяет получать пучки с энергией до  $30\text{кэВ}$ , эквивалентным током около  $1.5\text{А}$  и длительностью  $5\text{мс}$ .

Оптическая система собирает излучение под углом  $39^\circ$  к оси пучка и строит изображение изучаемой зоны на торце световодного коллектора с шириной канала  $1\text{мм}$ , присоединенного к 10-и канальному блоку ФЭУ-79. Далее сигналы регистрируются на АЦП-101 SK и передаются в общую систему сбора и обработки данных.



## Измерение параметров быстрых ионов на установке ГДЛ методом искусственной мишени.

В.И.Давыденко, А.А.Иванов, А.Н.Карпушов, А.И.Рогозин,  
Н.В.Ступишин, И.В.Шиховцев  
Институт ядерной физики им.Г.И.Будкера СО РАН,  
630090, Новосибирск, Россия

Для измерения параметров быстрых ионов на установке газодинамическая ловушка (ГДЛ) широко используются корпускулярные методы диагностики. В данной работе описывается диагностический комплекс, позволяющий локально измерять функцию распределения ионов по энергии и питч углу. Инжекция импульсного атомарного пучка с высокой эквивалентной плотностью тока создает в плазме локальную мишень, на которой происходит перезарядка быстрых ионов. Параметры возникающего потока вторичных атомов перезарядки измерялись с помощью сканирующего электростатического анализатора. Плотность потока атомов в искусственной мишени составляла до  $0.8 \text{ экв./см}^2$ , что обеспечило проведение измерений при инжекции нагретых атомарных пучков с энергией 14-16кэВ и суммарной мощностью до 4МВт.

## Измерение распределения амбиполярного потенциала в расширителе газодинамической ловушки методом локальной газовой мишени.

П.П.Дейчули, А.А.Иванов, Н.В.Ступишин  
Институт ядерной физики им.Г.И.Будкера СО РАН,  
630090, Новосибирск, Россия

Особенностью газодинамической ловушки (ГДЛ) является то, что плазма, вытекающая в запорочную область, где силовые линии имеют благоприятную кривизну, вносит стабилизирующий вклад в МГД-устойчивость системы в целом. Поэтому изучение течения плазмы в расширителе ГДЛ необходимо для правильных расчетов устойчивости плазмы в ловушке.

В данной работе описана методика и представлены первые результаты измерений профиля амбиполярного потенциала в запорочной части ГДЛ. Данные о полном перепаде и распределении амбиполярного потенциала вдоль оси расширителя также важны для определения механизмов продольных потерь энергии и частиц из ловушки.

Для измерения профиля потенциала вдоль оси расширителя был использован метод локальной газовой мишени. На оси расширителя импульсным газовым напуском через стеклянный капилляр создавалось водородное облачко с размерами (на момент измерения) около 5 см. В результате перезарядки на газе ионов, покидающих центральную ячейку через пробку, образовывались холодные ионы, которые затем ускорялись амбиполярным электрическим полем. Их энергетический спектр, измеряемый на стенке с помощью электростатического анализатора, позволял определить потенциал в точке перезарядки. Перемещая капилляр вдоль оси расширителя можно было определить требуемый профиль потенциала.

Для пучково-спектроскопической диагностики плазмы в крупных термоядерных установках в ИЯФ им.Г.И.Будкера разрабатывается инжектор атомов водорода со следующими параметрами: энергия атомов - до 50кэВ, ток пучка атомов водорода - до 1 экв.А, длительность импульса - до 10сек. Инжектор включает в себя ионный источник с системой питания и инжекционный тракт с криогенной откачкой. В докладе представлены результаты испытаний основных систем инжектора и первых экспериментов по формированию ионного пучка.