

В333
Д.44



ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Троицк, 8-13 июня 2003г.

Б1. ИЗМЕРЕНИЕ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ В ТОКАМАКЕ Т-11М С ПОМОЩЬЮ МИКРОВОЛНОВЫХ МЕТОДОВ

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

ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований

Проведение физических исследований на современных токамаках (исследование срывов, режимы с быстрым нарастанием плотности с пеллет-инъекцией, МГД-колебания, режимы с длинным импульсом, и т. п.) требует надежных измерений плотности плазмы. Обычные фазовые интерферометры подвержены так называемым фазовым «сбоям». Поэтому задача разработки и развития надежных и простых методов измерения плотности плазмы представляется достаточно актуальной.

Описаны «бесбойные» микроволновые методы диагностики плазмы, разработанные в ГНЦ РФ ТРИНИТИ для измерений динамики электронной плотности и мониторинга средней по хорде плотности плазмы.

Для измерений динамики плотности плазмы на установке «Токамак Т-11М» используется многоканальный «бесбойный» микроволновый интерферометр (МБИ), принцип действия которого основан на использовании эффекта Коттон-Муттона. В приборе измеряется разность фаз между обыкновенной волной ($\mathbf{E} \parallel \mathbf{V}$) и необыкновенной волной ($\mathbf{E} \perp \mathbf{V}$), прошедших через плазму по одной и той же хорде [1], [2].

В результате увеличения числа одновременно работающих каналов интерферометра и увеличения чувствительности измерений стало возможным измерение динамики профиля плотности плазмы на токамаке Т-11М. Приводятся первые результаты таких измерений, проведенных в различных режимах работы установки Т-11М. Описана методика измерений и обработки данных, проводятся анализ ошибок измерений, анализ и обсуждение результатов.

Для мониторинга средней плотности плазмы на токамаке Т-11М предложено использовать импульсный

времяпролетный рефрактометр (ИВР), т. е. импульсный рефлектометр, излучающий микроволновые импульсы наносекундного диапазона длительности и работающий в режиме на «просвет», когда несущая частота зондирующей волны больше плазменной частоты [3], [4]. Разработан вариант прибора с частотой несущей 140 ГГц, достаточной для измерений средней плотности в режимах номинальной плотности токамака Т-11М: $(3-5) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Приводятся результаты первых измерений средней плотности с помощью ИВР на токамаке Т-11М при просвечивании плазмы в экваториальном направлении, с отражением излучения от внутренней стенки вакуумной камеры.

1. Шевченко В. Ф., Петров А. А., Петров В. Г., Чаплыгин Ю. А. Поляризационный СВЧ-интерферометр с однозначным отсчетом фазы. Физика Плазмы. № 1. Т. 22. С. 32. 1996.

2. Петров В. Г., Петров А. А. Микроволновые методы диагностики плазмы на установке Т-11М. В сборнике: ТРИНИТИ. Отделение физики токамаков-реакторов. Теоретические и экспериментальные исследования, выполненные в 2001 г. С. 116—119. Троицк, 2002.

3. Петров А. А., Петров В. Г., Малышев А. Ю., Марков В. К., Бабарыкин А. В. Измерения электронной плотности на токамаке Т-11М с помощью импульсной времяпролетной рефрактометрии плазмы. Физика Плазмы, № 10, том 28, 2002 г., стр. 877—885.

4. Petrov V., Petrov A. Time-of-Flight Refractometry for Robust Line-Averaged Density and Plasma Vertical Position Measurements on the T-11M Tokamak. 29 EPS, P-4.127.

Б2. ИК ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМОНАПОЛНЕННОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО ДИОДА

Бурмасов В. С., Кандауров И. В., Кругляков Э. П., Попов С. С., Санин А. Л.

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

В результате исследования механизмов коллективного взаимодействия РЭП с плазмой на установке ГОЛ-М [1] показано, что уровень возбуждаемой ленгмюровской турбулентности в значительной степени определяется параметрами инжектируемого в плазму пучка [2]. В связи с чем по-

требовалось изучить генерацию РЭП и поведение плазмы в используемом нами плазмонаполненном релятивистском диоде. Способ заполнения диода плазмой и результаты интерферометрического исследования динамики плотности плазмы в диоде были описаны ранее в [3].

Отличительной особенностью настоящего сообщения является то, что измерения плотности плазмы в диоде проведены в отсутствие традиционной для коротковолновой интерферометрии рамы (станины), и, следовательно, в условиях значительного уровня вибропомех. Это объясняется тем, что с учетом специфики высоковольтного генератора и его плазмонаполненного диода монтаж фиксирующей рамы оказался практически невыполнимой задачей. Решение использовать метод интерферометрии плазмы в подобных условиях принято на основании анализа вибропомех на установке и, несмотря на трудности расшивки интерферограмм, оказалось в результате оправданным.

Погрешность, обусловленная вибрацией, при регистрации сдвига фаз в присутствии плазмы

$$\eta = \delta\varphi_{\text{вibr}} / \delta\varphi_{\text{плаз}}$$

прямо пропорциональна амплитуде вибраций ΔL , но обратно пропорциональна квадрату используемой длины волны λ , размеру плазмы a и максимальной плотности $n_{e,\text{max}}$: $\eta \sim \Delta L / \lambda^2 a n_{e,\text{max}}$. Амплитуда вибраций элементов здания, в которых обычно размещаются крупные экспериментальные установки, составляет величину $\Delta L \sim 1\text{--}10$ мкм с характерной частотой $f \sim 10$ Гц [4]. Однако смещения элементов и конструкций самой установки могут значительно отличаться в сторону больших величин, особенно в случае значительного на них силового воздействия. Так, например, стенка вакуумной камеры в токамаке JET смещалась во время работы установки на 1 см [5], а измеренное в [6] импульсное продольное перемещение торца соленоида установки ГОЛМ достигало 4 мм.

Если время существования плазмы в установке $\tau > 1/f$, то в коротковолновой интерферометрии ($\lambda \sim \Delta L$) применяются, как правило, два достаточно эффективных способа снижения вибропомех: использование массивных рам для фиксации оптических элементов (например, 52-тонная станина на установке JET [5]) и метод двухволновой (двухцветной) интерферометрии, впервые примененный в токамаке DIII [7]. Для импульсной плазмы с $\tau \sim 1/f$ достаточно эффективным может оказаться более простой метод частичной фиксации оптических элементов интерферометра, когда один из них монтируется на колеблющемся элементе установки. В нашем случае оказалось возможным использовать в качестве источника излучения CO_2 лазер.

Все оптические элементы (две светоделительные пластины, четыре поворотных зеркала, две фокусирующие линзы) настоящего CO_2 интерферометра ($\lambda = 10,6$ мкм) рас-

полагались на конструкциях установки без применения дополнительных мер фиксации или демпфирования. Амплитуда вибраций элементов интерферометра составляла $\Delta L \sim 10$ мкм, частота $f \sim 100$ Гц. Смонтирован интерферометр по схеме Маха-Цендера с длиной плеча, равной примерно 20 м.

Интерферометр использовался для исследования динамики плотности плазмы ($a \approx 1\text{ см}$, $n_{e,\text{max}} \sim 10^{15}\text{ см}^{-3}$) в релятивистском плазмонаполненном диоде. Экспериментально оцененная чувствительность интерферометра составляла $n_e \approx 10^{13}\text{ см}^{-2}$, что соответствует $\eta \approx 10^{-3}$ интерференционной полосы.

Применялся CdHgTe детектор с временным разрешением ~ 10 нс. В работе подробно описаны схема интерферометра и метод определения фазы интерференционного сигнала, представлены основные результаты исследования, демонстрирующие возможности ИК интерферометра без рамы при работе на крупной экспериментальной установке.

Для решения аналогичной задачи в работе [8] применялся более сложный двухцветный интерферометр.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ – гранты № 01–02–17492, № 0–02–16352.

1. Arzhannikov A. V., Astrelin V. T., Avrorov A. P. et al. // Nucl. Fusion, Supplement, P. 323, 1987.
2. Vyacheslavov L. N., Burmasov V. S., Kandaurov I. V. et al. // Plasma Phys. Control. Fusion, 44, P. B279, 2002.
3. Бурмасов В. С., Кандауров И. В., Кругляков Э. П., Тисленко И. В. // Физика плазмы, Т. 20, С. 84; Burmasov V. S., Kandaurov I. V., Kruglyakov E. P., and Meshkov O. I. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1995, V. 23, P. 952, 1994.
4. Orliinskij D. V., Magyar G. // Nuclear Fusion, V. 28, P. 611, 1988.
5. Braithwaite G., Gottardi N., Magyar G., O'Rourke J., Ryan J., and Véron D. // Rev. Sci. Instrum., V. 60, P. 2825, 1989.
6. Бурмасов В. С., Кругляков Э. П. Метод исследования деформации соленоида в импульсном магнитном поле. // Препринт ИЯФ СО АН СССР, № 86–96. Новосибирск, 1986.
7. Baker Dan R. and Lee Shu-Tso. // Rev. Sci. Instrum, V. 49, P. 919, 1978.
8. Weber B. V. and Fulghum S.F. // Ibid, V. 68, P. 1227, 1997.

Б3. ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИАГНОСТИКИ МИКРОТУРБУЛЕНТНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ИЗОБРАЖАЮЩЕЙ ИК ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Вячеславов Л. Н.*, Танака К. **, Санин А. Л.*, Акияма Т.***, Кавахата К.**,
Окаджима С.****,

*Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера, Россия

**National Institute for Fusion Science, Japan

***Tokyo Institute of Technology, Japan

****Department of Applied Physics, Chubu University, Japan

На примере изображающего CO_2 интерферометра, смонтированного на установке LHD в Институте термоядерного синтеза (NIFS) в Японии [1, 2], рассматриваются возможности увеличения чувствительности и получения пространственного разрешения вдоль линии наблюдения при исследовании плазменной микротурбулентности. Идея увеличения чувствительности состоит в примене-

нии пространственной фильтрации в фокальной плоскости изображающей оптической системы. Ослабление пучка нулевого порядка с помощью простейшего фильтра в виде малого отверстия и одновременное поднятие мощности исходного лазерного пучка увеличивает отношение амплитуды дифрагированного на неоднородностях плазмы излучения к амплитуде излучения, прошед-

шего плазму без изменения. При сложении амплитуд в плоскости изображения возрастает фазовый сигнал, вызванный плазменной турбулентностью. При этом требуемое увеличение мощности лазера квадратично зависит от необходимого роста фазового сигнала. При использовании коммерческих охлаждаемых приёмников излучения и лазеров таким способом возможно повысить чувствительность интерферометров на порядок величины и более.

Для получения пространственного разрешения вдоль линии наблюдения предполагается использовать как модификации уже известных способов, так и новую методику. К двум первым относятся подходы, использующие перекрещенность (shear) магнитных силовых линий [3, 4] и корреляцию сигналов в пересекающихся лазерных пучках [5]. Модификации этих методов позволяют получить, в отличие от первоначально предложенных вариантов, многоканальную регистрацию распределения флуктуаций в аксиальном направлении. Это может быть достигнуто применением изображающей многоканальной интерферометрии вместо двухканальных систем коллективного рассеяния, а также использованием двумерной матрицы детекторов в методе с перекрещенностью силовых линий. Оригинальным способом получения пространственного разрешения в аксиальном направлении является одновременная регистрация фазы и амплитуды в расфокусированном изображении микрофлуктуаций. Метод использует достаточно хорошо известное явление возникновения паразитного амплитудного изображения и возрастания его интенсивности по мере удаления фазового объекта от плоскости предмета. Если с помощью пространственного фильтра выделить одну спектральную компоненту турбулентных колебаний, представляющую из себя гармоническую фазовую решётку с длиной волны Λ , то преобразование излучения с расстоянием будет соответствовать эффекту Тальбота [6, 7]. Поперечное распределение излучения трансформируется из фазового, расположенного непосредственно за решёткой, в амплитудное при удалении

на расстояние $L = \frac{\Lambda^2}{2\lambda}$ от решётки, где λ – длина волны освещающего коллимированного излучения. Отношение амплитудной и фазовой компонент позволяет определить положение отдельной фазовой решётки в пределах расстояния L , которое для $\lambda = 10$ мкм и $\Lambda = 0,5$ см составляет 125 см. Для более реального случая заполнения турбулентностью всей области длиной L предлагается сопоставить

временные частотные спектры амплитудной и фазовой компоненты. Предполагая, что вращение плазмы определяет регистрируемый частотный спектр, из отношения спектральных плотностей можно найти не только распределение интенсивности флуктуаций плотности с выделенным k , но и аксиальное распределение скорости вращения плазмы.

Описаны тестовые эксперименты с изображающим интерферометром на основе CO_2 лазера и ультразвуковой волны в воздухе в качестве фазового объекта. Частота ультразвука составляет 33,6 кГц, ($\Lambda = 1$ см), а величина фазовой модуляции ($3 \cdot 10^{-4}$ рад.) соответствует модуляции плотности плазмы $4 \cdot 10^{11}$ см $^{-3}$ при длине области турбулентности 10 см. Получено увеличение сигнала фазовой модуляции более чем на порядок величины с помощью предлагаемой методики. Кроме того, продемонстрировано определение аксиального положения ультразвуковой волны с точностью не хуже 10 см. В тестовых экспериментах также проходил испытания прецизионный цифровой фазометр [8], который показал разрешение 10^{-3} рад., что примерно на порядок превышает чувствительность аналоговых фазометров, применяющихся в гетеродинной интерферометрии. Предложенные методики применены также в плазменном эксперименте на установке LHD.

1. Akiyama T., Tanaka K., Vyacheslavov L. N., Tokuzawa T., Y. Ito, Tsuji-ii S., Okajima S., Kawahata K., Rev. Sci Instrum., 74, 1638, 2003.

2. K. Tanaka, L. N. Vyacheslavov, T. Akiyama, A. Sanin, K. Kawahata, T. Tokuzawa, Y. Ito, S. Tsuji-ii, S. Okajima, Rev. Sci Instrum., 74, 1633, 2003.

3. Devynck P. et al, Plasma Phys. Control. Fusion, 35, 63, 1993

4. Kado S. et al, Jpn. J. Appl. Phys. 34, 6492, 1995.

5. Surko C. M. and Slusher R. E., Phys. Fluids, 23, 2425, 1980.

6. Солимено С., Крозиньяни Б., П. Ди Порто, Дифракция и волноводное распространение оптического излучения, Мир, 1989.

7. Westerholm J., Turunen J., Huttunen J., J. Optical Soc. Amer., 11, 1283, 1994.

8. Гурко В. Ф., Зубарев П. В., Квашнин А. Н., Хильченко А. Д., Многоканальная система сбора данных для гетеродинной интерферометрической методики измерения плотности плазмы, Препринт ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН, ИЯФ 2003—10, 2003.

Б4. НОВЫЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК НАДТЕПЛОЙ КОМПОНЕНТЫ ЭЛЕКТРОНОВ ПЛАЗМЫ ПО ЕЕ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЮ НА ТОКАМАКЕ Т-10

Позняк В. И.*, Блудов А. В.**, Ермишкина Ю. К.*, Зоренко А. В.**,
Калинин А. И.*, Коротков В. К.***, Кучеренко И. Ю.*, Морозов Е. П.*,
Питерский В. В.*, Плоскирев Г. Н.*, Плоскирев Е. Г.*,
Савостьянов С. А.*, Соколов М. М.*, Степанов А. П.***

*РНЦ Курчатовский Институт, Россия

**НИИ «Орион», Украина;

***НИИ «Салют», Россия

На токамаке Т-10 разработан и применен комплекс СВЧ-аппаратуры для диагностики ЭЦ-излучения плазмы на I (О-мода, 37—78 ГГц) и II (Х-мода, 78 – 178 ГГц) гармониках, а также в диапазоне замагниченных ленгмюров-

ских колебаний плазмы (0,5—24 ГГц). Используются некоторые особенности ЭЦИ, практически не реализуемые в современной диагностической аппаратуре. Излучательная способность Х-моды определяется только попереч-

Е1. МНОГОКАНАЛЬНЫЕ СИНХРОННЫЕ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ФОРМЫ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ

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

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

Среди множества диагностик, используемых на плазменных установках, существует ряд многоканальных, требующих применения достаточно широкополосных и синхронных каналов регистрации данных. К их числу следует отнести диагностику температуры и плотности электронной компоненты плазмы методом Томпсоновского рассеяния, тракты регистрации спектра и интенсивности рентгеновского излучения, тракты регистрации диамагнетизма, интенсивности нейтронных потоков и ряд других диагностик. На первый взгляд, задачи регистрации экспериментальных данных в таких диагностических трактах должны легко решаться с помощью стандартной цифровой осциллографии. Однако цифровым осциллографам даже такой ведущей фирмы, как Tektronix, присущи некоторые недостатки, ограничивающие сферу их применения. В основном они проявляются при попытке построения синхронных многоканальных систем регистрации в силу практической невозможности жесткой синхронизации разверток нескольких осциллографов. Аналогичные проблемы возникают и при построении обзорных каналов регистрации с длинной разверткой. В этом случае сказывается малый объем буферного ЗУ осциллографа – при увеличении временной шкалы вы вынуждены пропорционально уменьшать и частоту дискретизации базового АЦП, что приводит к потере информации при регистрации коротких импульсных сигналов. Амплитудный же динамический диапазон цифровой осциллографии обычно не превышает 8-9 двоичных разрядов, что во многих случаях неприемлемо.

Указанные обстоятельства инициировали разработку в ИЯФ СО РАН многоканальных синхронных систем регистрации данных с расширенным амплитудным динамическим диапазоном. В качестве базового конструктива использовалась Евромеханика, а структура построения систем была унифицирована. Их основой были многоканальные модули регистрации:

- 4-канальный с частотой дискретизации АЦП до 50 МГц и объемом буферного ЗУ в $32 \cdot 10^3$ отсчетов/канал,
- 4-канальный с частотой дискретизации АЦП до 50 МГц и объемом буферного ЗУ в $32 \cdot 10^6$ отсчетов/канал,

- 8-канальный с частотой дискретизации АЦП до 4 МГц и объемом буферного ЗУ до 10^6 отсчетов/канал.

Тракты аналого-цифрового преобразования всех модулей регистрации строились на базе 12-разрядных АЦП и включали в свой состав в качестве вспомогательных элементов входные усилители с программно изменяемым коэффициентом передачи, а так же ЦАП смещения шкалы преобразования, используемые для адаптации параметров измерительного тракта к характеристикам обрабатываемых сигналов. АЦП всех трактов преобразования работали параллельно, обеспечивая синхронность измерений по всем каналам. Значение частоты дискретизации АЦП, объем буферного ЗУ и режим работы модулей регистрации задавались программно.

На базе этих модулей регистрации строились следующие синхронные системы сбора данных:

- 32-канальная с объемом буферного ЗУ до 32 К отсчетов/канал при частоте дискретизации АЦП до 50 МГц (ADC1250/32),
- 16-канальная с объемом буферного ЗУ до $32 \cdot 10^6$ отсчетов/канал при частоте дискретизации АЦП до 50 МГц (ADC1250/16),
- 128-канальная с объемом буферного ЗУ до $1 \cdot 10^6$ отсчетов/канал при частоте дискретизации АЦП до 4 МГц (ADC1204/128).

Управляющий модуль каждой системы – контроллер ее системной магистрали. С его помощью, на этапе подготовки системы к работе, осуществляется выбор пределов по амплитуде и величины сдвига нуля шкалы преобразования в каждом канале регистрации, определяется значение единой для всех каналов частоты дискретизации АЦП и используемого объема буферных ЗУ, задается мода записи данных в ЗУ: непрерывная, страничная, непрерывная с предисторией или страничная с предисторией, выбирается внутренний или внешний источник опорных синхроимпульсов, а так же импульсов запуска. В режиме регистрации данных контроллер формирует единую для всех модулей регистрации последовательность сигналов управления и синхронизации. По окончании процесса регистрации он передает информационные массивы из ЗУ регистраторов базовому компьютеру диагностического комплекса.

В качестве ядра контроллера (последней версии) используется 32-х разрядный процессор семейства ARM7TDI S3C4530 со встроенным сетевым интерфейсом Ethernet-10/100. Процессор, работая под управлением ОС uCLinux, обеспечивает приемлемую скорость взаимодействия с базовым компьютером (2,5 Мб/с) в рамках протокола TCP/IP, поддерживающего процедуры контроля корректности пересылок длинных информационных массивов. Цифровой узел контроллера, взаимодействующий с модулями регистрации, построен на базе программируемой матрицы семейства ACEX и включает в себя набор служебных регистров, управляющий автоматом, а так же приемники внешних импульсов синхронизации, генератор сетки частот дискретизации АЦП и формирователи сигналов системной магистрали.

Программное обеспечение систем сбора данных выполнено по клиент-серверной технологии.

Задача "сервер", исполняемая процессором контроллера, загружается из встроенного Flash ЗУ сразу же

после включения питания системы регистрации и инициализации операционной системы. Она принимает и обрабатывает запросы, поступающие по каналу связи Ethernet от компьютера, загружает служебные регистры контроллера, разрешает запуск системы сбора данных и пересылает компьютеру накопленные в буферных ЗУ модулей регистрации информационные массивы.

Программа "клиент" работает в базовом компьютере диагностического комплекса. Она включает в себя графическую панель оператора системы, отображаемую на экране монитора. С помощью панели производится выбор режима работы системы, задаются мода запуска и характеристики трактов регистрации, производится отображение данных и их запись на диск.

Системы регистрации данных с описанной структурой аппаратных и программных средств уже более года работают без каких-либо замечаний в составе диагностических комплексов установок ГОЛ-3 (ИЯФ СО РАН) и Глобус (ФТИ им. Иоффе РАН).

Е2. ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА Т-10 НА ДРУГИХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ

Соколов М. М.

РНЦ Курчатовский институт

Измерительно-вычислительный комплекс Т-10 (ИБК Т-10) обеспечивает работу Диагностического комплекса Т-10 и проведение экспериментальных кампаний на установках ИЯС: Т-10, «Гиротронном комплексе» и Плазменном нейтрализаторе PNX.

Диагностическая информация, получаемая на различных установках УТС схожа по типу данных, общими являются многие методы математической обработки. Очевидно желание создание унифицированной, комплексной системы сбора и обработки экспериментальных данных, пригодной к использованию на различных установках УТС. Кроме того, с увеличением объемов диагностической информации актуальным становится повышение эффективности анализа уже накопленной информации. Для этого необходима единая информационная среда, обеспечивающая комплексное исследование экспериментальных данных, получаемых с различных установок УТС и доступ к этой информационной среде всех заинтересованных исследователей через Интернет.

В докладе рассматриваются:

- ИБК Т-10 как комплексное решение для многоканальной регистрации аналоговой и видео информации в условиях физического эксперимента с последующей обработкой и анализом параметров плазменного режима,

а так же перспектива объединения ее возможностей с системой MDSPlus для включения ИБК Т-10 в среду «Fusion Grid».

- Возможности ИБК Т-10:

- Многоканальная регистрация аналоговой и видео информации для диагностических и телеметрических систем.

- Эффективное хранение и доступ к диагностическим данным с различных установок для комплексного анализа, сжатие данных в 3—6 раз, поиск средствами SQL.

- Экспресс-обработка данных.

- Подключение внешних программ и математических пакетов.

- Удаленный доступ к базе данных и методам обработки, а также управление диагностическими подсистемами и сбором данных через Интернет.

- Масштабирование и тиражирование комплекса или отдельных компонентов.

- Проблемно ориентированная база данных «DASSQL» (содержащая более 2,5 млн. записей с различных экспериментальных установок ИЯС) и возможность создания на ее основе хранилища данных по тематике УТС.

ЕЗ. СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ И СБОРА ДАННЫХ УСТАНОВКИ ГОЛ-3 НА БАЗЕ НОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Бурдаков А. В., Квашнин А. Н., Койдан В. С., Поступаев В. В.,
Ровенских А. Ф., Хильченко А. Д.

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

Измерительный комплекс установки ГОЛ-3 в течение длительного времени развивался с использованием стандарта КАМАК как единой аппаратной среды автоматизации эксперимента. Постепенная модернизация комплекса производилась как за счет замены устаревших модулей на модули новой разработки с улучшенной функциональностью, так и за счет оптимизации архитектуры комплекса (переход с управляющих компьютеров семейства LSI-11 на компьютеры архитектуры x86, переход к гибкой трехуровневой системе организации аппаратуры). В то же время постепенно стали очевидны некоторые недостатки архитектуры КАМАК в целом, которые мешали развитию современных средств измерения.

В составе измерительного комплекса в настоящее время используются аналого-цифровые преобразователи, имеющие разную частоту дискретизации. Основная часть диагностик использует массовые АЦП с частотой дискретизации 20—50 МГц и разрешением 8—10 двоичных разрядов. Сигналы, требующие более высокого временного разрешения (системы томсоновского рассеяния, измерение нейтронного и γ -излучений), используют 8-разрядные АЦП с частотой дискретизации 100—500 МГц. Часть сигналов использует более медленные каналы регистрации (10—12 бит, 1—2 МГц). Помимо АЦП диагностический комплекс включает в себя вспомогательные блоки (управляемые стабилизированные источники питания, таймеры и т. п.).

При выборе возможных путей развития измерительного комплекса в качестве основных критериев рассматривались следующие требования:

- возможность создания сложных распределенных модульных измерительных систем;
- гальваническая развязка отдельных элементов комплекса;
- возможность синхронного измерения сигналов многоканальных диагностик;
- достаточный динамический диапазон (12 двоичных разрядов);
- увеличение надежности и упрощение конструкции за счет использования современных конструктивов и элементной базы;
- высокоскоростная передача данных;
- возможность использования стандартных сетевых средств для удаленной работы с аппаратурой;
- максимально возможное снижение стоимости новой аппаратуры.

В качестве механического конструктива были выбраны корзины «Евромеханика» высотой 3U. В этом конструктиве для объединения модулей внутри крейта используются надежные разъемные соединения. Связь контроллера крейта с управляющим компьютером происходит по радиационно-стойкому оптоволокну длиной 60—

80 м. На первом этапе модернизации, реализация которого начата в настоящее время, каждый крейт подключен к индивидуальной плате ISA, расположенной в управляющем компьютере. На втором этапе модернизации предполагается использование контроллеров, использующих встроенный сетевой интерфейс Ethernet-10/100 и протокол TCP/IP. При достаточно высокой реализованной скорости обмена (~2,5 Мб/с) такое решение включает контроль правильности передачи данных, что является важным при больших объемах передаваемой информации. Дополнительными плюсами использования стандартных протоколов связи является легкость интегрирования новой измерительной аппаратуры в диагностический комплекс на основе решений типа клиент-сервер и независимость от аппаратной платформы используемых управляющих компьютеров.

На первом этапе модернизации измерительного комплекса начат постепенный перевод диагностик (в частности, измерителей диамагнетизма плазмы и системы томсоновского рассеяния на длине волны 1,06 мкм) на новую аппаратуру. В качестве базового измерительного прибора выбрана 32-канальная синхронная система сбора данных ADC1250/32 [1], имеющая следующие характеристики:

- 12-разрядный АЦП с возможностью программного сдвига шкалы преобразования для измерения однополярных сигналов;
- максимальная частота дискретизации 40—50 МГц, программная установка делителя частоты с коэффициентом 2^K , где $K = 0...7$;
- буферное запоминающее устройство 32K слов на канал (разработаны также АЦП с объемом внутренней памяти 1M слов на канал);
- программный выбор уровня чувствительности каждого канала (1,25 В; 2,5 В; 5 В; 10 В);
- разброс времени измерения разными каналами в пределах одной системы ~200 пс;
- энергопотребление не более 70 Вт (блок питания с линейной схемой стабилизации).

Каждая такая система занимает $\frac{1}{2}$ ширины стандартной корзины «Евромеханика» и состоит из системного контроллера и четырехканальных модулей АЦП (от 1 до 8 шт. на систему). Таким образом, поскольку в габаритах крейта КАМАК можно разместить две корзины «Евромеханика», то при переходе на новые АЦП появляется возможность создания диагностик с большим числом каналов (десятки и сотни) — например, томографические системы или системы магнитной диагностики плазмы. Дополнительным плюсом выбранной системы является то, что конструктив является достаточно гибким (выпускаются корзины разных геометрических размеров, в т. ч. небольшие), что позволяет при необходимости достаточ-

но просто организовать измерения сигналов, требующих нестандартного подхода, например, с датчиками, находящимися под высоким потенциалом или требующими усиленной электромагнитной и радиационной защиты оборудования.

Новая система регистрации значительно уменьшает потребность установки в измерительных приборах класса 1 МГц. В то же время пока предусмотрена параллельная работа новой измерительной системы и аппаратуры КАМАК. Для новой системы со временем планируется

расширение номенклатуры (более быстродействующие АЦП, вспомогательные модули).

Программное обеспечение работает под ОС Windows, формат базы данных оставлен совместимым с тем, который используется для оборудования КАМАК. Это дает возможность совместной обработки сигналов диагностик, использующих разные системы.

1. Гурко В. Ф. и др., Препринт ИЯФ 2002—49, Новосибирск, 2002.

Е4. МНОГОКАНАЛЬНАЯ СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРА С ГЕТЕРОДИННОЙ СХЕМОЙ ВЫДЕЛЕНИЯ ФАЗОМОДУЛИРОВАННОЙ НЕСУЩЕЙ

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

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

64-х канальная система регистрации глубины фазовой модуляции выходных сигналов интерферометра с гетеродинной схемой выделения несущей исходно разрабатывалась для установки LHD (Нака, INF, Япония) с целью исследования микро турбулентности плазмы. Система строилась по модульному принципу и включала в свой состав:

- до 8-ми восьмиканальных модулей регистрации, построенных на основе оригинальной схемы фазового детектора с разрешением менее 10^{-4} радиан, практически неограниченным динамическим диапазоном и широкой полосой рабочих частот (до $\frac{1}{2}$ от частоты несущей);

- модуль управления,
- коммуникационный модуль "Fast Ethernet switch", обеспечивающий сопряжение модулей регистрации по оптоволоконному каналу Ethernet-FX (1 Гбит/с) с базовым компьютером диагностического комплекса.

Основа системы - модули регистрации. Каждый из них содержит по 9 идентичных трактов обработки входных сигналов. Первые восемь трактов предназначены для обработки фазомодулированных сигналов, а девятый - для обработки опорного сигнала, представляющего собой немодулированную синусоидальную несущую. Результаты измерений в виде текущих значений набега фазы входных сигналов первых восьми каналов относительно нуля фазы каждого периода сигнала опорного канала накапливаются в буферном ЗУ регистратора объемом до 256 Мб, а затем передаются базовому компьютеру диагностического комплекса.

Ключевой элемент каждого тракта регистрации - прецизионный фазовый детектор, построенный на базе 12-ти разрядного АЦП с частотой дискретизации в 40 раз превышающей частоту несущей входного сигнала (1 МГц), а также счетчика количества периодов частоты дискретизации. Для детектора на каждом периоде входного сигнала информативны только два отсчета АЦП, содержащие результаты измерений мгновенных значений амплитуды в точке, предшествующей переходу входного сигнала через ноль, и в точке следующей за ней. Временная координата истинной точки пересечения сигналом нулевой линии определяется в виде суммы:

- целого числа периодов частоты дискретизации, подсчитанного счетчиком к моменту первого информативного отсчета АЦП,

- длительности интервала между точкой взятия этого отсчета и точкой истинного пересечения входным сигналом нулевой линии, определяемой по результатам измерений АЦП в виде дробной части периода частоты дискретизации.

Нетрудно заметить, что результаты измерений по всем каналам, относящиеся к первому после запуска модуля регистрации переходу входных сигналов через ноль, содержат информацию о исходном фазовом сдвиге этих сигналов относительно стартовой точки. Результаты же, относящиеся ко второй и последующим точкам перехода, содержат интегральное значение набега фазы для каждого из этих сигналов. Для восстановления характера поведения набега фазы в каждом сигнальном тракте относительно нуля фазы сигнала опорного канала используется вспомогательная схема вычитания. С ее помощью, перед записью результатов измерений в ЗУ, производится вычитание из текущего интегрального значения фазы каждого сигнального тракта соответствующего ему по номеру отсчета опорного канала, содержащего результат измерения набега фазы в опорном канале. Как следствие указанной процедуры, из результатов измерений исключаются изменения фазы, связанные с механическими и тепловыми воздействиями на интерферометр, а так же с нестабильностями частоты гетеродина.

В качестве элемента управления и сопряжения с компьютером в каждом модуле регистрации используется процессор серии ARM7TDI S3C4530A со встроенным сетевым интерфейсом Ethernet-10/100. Он обеспечивает приемлемую скорость передачи данных (2,5 Мб/с) в рамках протокола TCP/IP, поддерживающего процедуры контроля корректности пересылок длинных информационных массивов. Процессор оснащен оперативным ЗУ на основе SDRAM объемом 16 Мб и энергонезависимым ЗУ на базе Flash объемом в 4 Мб. Предустановленная операционная система uCLinux и прикладная программа-сервер загружаются в оперативную память процессора сразу же после включения источника питания.

Коммуникационный модуль «Fast Ethernet switch» используется в системе в качестве средства сопряжения нескольких Ethernet-абонентов (модулей регистрации) с оптоволоконным каналом связи системного уровня (Ethernet-FX). Помимо взаимного преобразования электрических и оптических сигналов, этот модуль обеспечивает уплотнение информационного потока в канале связи, сопрягающем систему регистрации с базовым компьютером.

Модуль управления содержит единый для всей системы прецизионный генератор синхросигнала, задающий частоту дискретизации всех АЦП. Здесь же производится привязка внешнего запускающего импульса к синхроимпульсам этого генератора и формирование выходных импульсов запуска, поступающих далее на все модули регистрации. Аналоговый же узел модуля управления содержит размножитель опорного сигнала несущей, обеспечивающий передачу последнего с малыми фазовыми искажениями на входы опорных трактов всех регистраторов.

Программа-клиент базового компьютера диагностики включает в себя графическую панель оператора системы, отображаемую на экране монитора. С помощью

этой панели производится выбор режима работы системы (режим цифрового осциллографа, либо режим измерения разности фаз), задается мода запуска (внешний/программный), интервал между измерениями, 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 – интерферометра, гетеродина, смесителя, датчиков, усилителей, кабельных трасс, а так же трактов обработки сигналов самих модулей регистрации.

Уникальные характеристики системы (многоканальность, фазовое разрешение в 10^{-4} радиан в полосе рабочих частот 0—0,5 МГц, практически неограниченный динамический диапазон и способность работы в режиме реального времени) делают возможным ее применение не только для фиксации динамики поведения интегральных значений плотности плазмы по разным хордам и восстановления ее локальных флуктуаций, но и для построения систем обратной связи, использующихся в контурах стабилизации положения плазменного шнура магнитных ловушек.

Е5. ГАЛЬВАНИЧЕСКИ ИЗОЛИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ФОРМЫ ОДНОКРАТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ

Хильченко А. Д., Квашнин А. Н., Хильченко В. А.

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

При практической реализации многих диагностик, в частности – корпускулярных, зондовых, пучковых, часто возникает необходимость проведения измерений на фоне больших импульсных потенциалов или в среде с высоким уровнем уравнительных токов и электромагнитных наводок. В этих случаях для корректной фиксации динамики поведения исследуемых параметров плазмы или пучков приходится прибегать к применению дорогостоящих аналоговых гальванических развязок на основе импульсных трансформаторов или оптронов.

Более привлекательный подход к построению систем регистрации данных для указанных условий на наш взгляд связан с использованием «встраиваемых» регистраторов приборов, представляющих собой функционально завершённую измерительную систему, состоящую из трех основных элементов:

- малогабаритного модуля регистрации с импульсным питанием,
- цифровой двунаправленной оптоволоконной линии связи,
- интерфейсного модуля.

Модуль регистрации такой системы, содержащий АЦП, буферное ЗУ, схему управления, кодек последовательного канала связи и импульсный источник питания, физически располагается рядом с датчиком под потенциалом его "локальной" земли, обеспечивая оптимальные условия для корректной обработки входного сигнала. Проблема гальванической развязки решается за счет применения цифровых оптоволоконных трасс, а задача сопряжения с системной шиной и с подсистемой синхронизации установки возлагается на интерфейсный модуль, размещаемый в каком-либо крейте-концентраторе. Ключевая особенность

описанной схемы построения системы регистрации связана с малым значением средней мощности, потребляемой ее модулем регистрации от встроенного источника импульсного питания, что позволяет использовать в качестве базового источника энергии обычный химический элемент (батарейку или малогабаритный аккумулятор). Причем, ресурс такого источника, в силу импульсного режима работы регистратора, достаточно велик.

Разработка систем регистрации с описанной структурой была начата в ИЯФ СО РАН в 1998 г. Она стала возможной благодаря появлению на рынке комплектующих широкополосных однокристалльных АЦП с малым токопотреблением, относительно дешевых цифровых линий связи на основе органического оптоволокна и программируемых логических матриц на базе КМОП логики.

Системы регистрации первого поколения были многоканальными. В ADC1200 модули регистрации строились на базе однокристалльной 12-разрядной системы сбора данных AD7891 и были предназначены для регистрации сигналов в полосе частот от 0 до 250 КГц (в одноканальном варианте). Встроенный аналоговый мультиплексор обеспечивал в режиме циклического сканирования входных сигналов измерение их текущих значений каждые 16 микросекунд (в восьмиканальном варианте). Буферное ЗУ регистратора имело организацию 32К 12-разрядных слов. Схема управления и кодек строились на базе программируемой матрицы EPМ7064. В качестве приемника внешних синхросигналов, предназначенных для включения импульсного источника питания и запуска регистратора, использовались pin-фотодиод SFN250V и усилитель-формирователь с малым токопотреблением в дежурном режиме ($5 \cdot 10^{-5}$ А), а в качестве оптопередатчика – светодиод HFBR1524.

Модуль более широкополосного регистратора ADC800 содержал аналоговый тракт, построенный на базе четырехканального мультиплексора видеосигналов AD8174, буферного усилителя с дифференциальным выходом и 12-разрядного АЦП ADU800 с максимальным значением частоты дискретизации 40МГц. Цифровой узел регистратора включал в себя буферное ЗУ объемом 32К слов, схему управления и кодек, выполненные на матрице EPM7064. Схемотехника приемопередатчиков канала связи была аналогична описанной ранее.

Интерфейсный модуль систем регистрации был унифицирован и мог обслуживать до четырех модулей ADC1200 или ADC800. Он обеспечивал управление регистраторами и передачу поступающих от них данных на системную шину ISA персонального компьютера.

Структура построения систем второго поколения, разработка которых была начата в текущем году, была немного изменена. Прежде всего, был модифицирован интерфейсный модуль. Его ядром стал процессор семейства ARM7TDI S3C4530A со встроенным сетевым интерфейсом Ethernet-100, предназначенным для сопряжения с базовым компьютером диагностического комплекса в рамках протокола TCP/IP.

Для построения же коммуникационных узлов, связывающих интерфейсный модуль с регистраторами (до 16-ти модулей), были использованы матрицы серии ACEX и опто-

волоконные приемопередатчики производительностью до 20 Мбит/С.

Номенклатура модулей регистрации была расширена. Появились «клипсы» одноканальные 12-разрядные регистраторы с частотой дискретизации до 1 МГц с упрощенной схемотехникой. Они не имеют собственного встроенного буферного ЗУ, а передают результаты измерений в режиме реального времени через последовательный оптоволоконный канал связи непосредственно в ЗУ интерфейсного модуля.

Многоканальные регистраторы (4-х и 8-ми канальные) с частотой дискретизации от 1 до 50 МГц строятся по старой схеме, но с использованием новой элементной базы и более производительных оптических приемопередатчиков. В отличие от регистраторов предыдущего поколения, в новых исключен узел входного аналогового мультиплексора, а многоканальность обеспечивается применением нескольких АЦП, работающих параллельно. Объем буферного ЗУ регистраторов увеличен до 1 Мб. В качестве источников энергии встроенного источника импульсного питания используются NiCa и Li аккумуляторы. В настоящее время прорабатываются схемы «удаленной» подзарядки аккумуляторов, основанные на применении фотоэлементов с внешней засветкой и фотодиодов с лазерной накачкой энергии по вспомогательному оптоволокну.

Е6. ОРГАНИЗАЦИЯ ОБМЕНА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ MDSPLUS

Вознесенский В. А., Семёнов И. Б., Соколов М. М.

РНЦ Курчатовский институт

Эффективность использования информации исследовательских установок в области УТС может быть повышена путём предоставления ученым из разных научных центров и учащимся ВУЗов прозрачного доступа к удалённым базам данных, высокопроизводительным вычислительным ресурсам и вычислительным кодам. Для этой цели создаются специализированные информационные сети - так называемые GRID-сети (например, в США – FUSION GRID), позволяющие организовать виртуальные исследовательские коллективы. В настоящее время одним из ключевых компонентов FUSION GRID является SCADA-система (System Control And Data Acquisition) MDSPlus, применяемая более чем на 30 установках по всему миру.

MDSPlus – это набор программных средств для организации управления экспериментом на средних и больших импульсных установках, а также сбора, обработки, визуализации и обмена экспериментальными данными. Кроме того, MDSPlus предоставляет возможности удобного и быстрого удалённого доступа к данным уже существующих систем сбора в едином стандарте. Разра-

ботку MDSPlus ведут Massachusetts Institute of Technology, Center for Nuclear Research (Падуя, Италия), и Los Alamos National Lab. В настоящее время ряд прикладных кодов (TRANSP, EFIT) работает в FUSION GRID на основе MDSPLUS.

В докладе описывается структура системы MDSPlus, её возможности, в том числе методика представления внешних по отношению к системе источников данных. В качестве примера приводится интерфейс к существующей системе сбора установки T-10 DASSQL.

Внедрение MDSPlus на российских установках в области ядерного синтеза даст научному сообществу единую среду обмена экспериментальными данными.

1. Вознесенский В. А., Семёнов И. Б.. Международная система управления и сбора данных (SCADA) MDSPlus и возможности её использования на российских токамаках. Препринт Курчатовского Института, ИАЭ-6249/14, 2002.

2. <http://www.mdsplus.org>.

Е11. ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ АВТОМАТИЗАЦИИ УСТАНОВКИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ ЛОВУШКА (ГДЛ ИЯФ СО РАН)

Степанов Д. Н.

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

ГДЛ – установка для исследования плазмы среднего масштаба с невысокой частотой генерации данных. На установке имеется ряд диагностик (измерение профиля плотности плазмы, электронных и ионных температур, энергосодержания, радиационных потерь и др.), данные с которых необходимо собирать и аккумулировать в едином месте для дальнейшей обработки. Датчики диагностик распределены по всей площади установки (~100 м²) и обслуживаются несколькими десятками измерительных приборов (измерительная база ~150 каналов АЦП). Режим работы установки представляет собой короткие периоды (~5 мс) активного накопления данных (выстрелы), перемежаемые подготовительными периодами длительностью 5–10 мин. Общий объем данных, собираемых в одном выстреле, составляет от сотен килобайт до нескольких мегабайт.

В настоящее время на установке ведутся активные работы по автоматизации измерительно-контрольного процесса и совершенствованию существующего программно-аппаратного комплекса. Эти работы идут параллельно по нескольким направлениям и включают в себя как замену и расширение аппаратной подсистемы, так и модернизацию используемого программного обеспечения.

Программный комплекс установки состоит из системы сбора данных и системы управления. Диагностики системы сбора данных базируются на приборах конструктива САМАС, а также на разработанных в ИЯФ СО РАН гальванически развязанных цифровых регистраторах (IADI-4). Система сбора данных является трехуровневой: нижний уровень составляют собственно измерительные приборы, на среднем уровне находятся мало-мощные ЭВМ общего назначения (на базе i486), стоящие в непосредственной близости от измерительных приборов на установке. Сырые сигналы, собираемые машинами среднего уровня, по сети Ethernet передаются

на головную ЭВМ верхнего уровня, производящую унификацию и обработку данных и запись в архив эксперимента. Полученная информация в необходимой мере сразу же визуализируется, позволяя судить о ходе эксперимента и вносить необходимые корректировки. Система сбора данных позволяет одновременно работать нескольким экспериментаторам – ведущему эксперимента и операторам диагностик; им предоставляется удобный графический интерфейс для изменения параметров приборов и их тестирования, управления ходом сбора и предварительного обзора собранных данных. Программный комплекс построен на базе распространенных современных продуктов: ROOT (среда для обработки и хранения данных, разработка CERN) и СУБД PostgreSQL (база данных параметров приборов и конфигурации эксперимента) под управлением ОС Linux. Описанное построение системы сбора данных достаточно дешево и универсально, обладает легко заменяемой и наращиваемой модульной структурой и применимо к другим системам с аналогичными временными характеристиками. В настоящее время ведутся работы по интегрированию в систему цифровых осциллографов фирмы Tektronix.

В качестве применения аналогичного подхода можно рассмотреть разработанную в этом году систему управления нагревными инжекторами. Поскольку заметная часть ее сходна по функциям со сбором данных (сбор импульсных сигналов, контроль напряжений зарядки), то систему управления инжекторами удалось с минимальными изменениями построить поверх описанной системы сбора с использованием существующей программно-аппаратной базы.

В данный момент с учетом накопленного опыта также ведется разработка новой версии общей системы управления установки ГДЛ.

Ж1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ МОЩНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ПО ТЕПЛОВОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ КАЛОРИМЕТРА

Астрелин В. Т., Бурдаков А. В., Заболотский А. Ю., Койдан В. С.,
Меклер К. И., Полосаткин С. В., Поступаев В. В., Ровенских А. Ф.,
Синицкий С. Л., Чеботаев П. З.

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

Физика многих процессов, изучаемых в экспериментах с мощными импульсными электронными и ионными пучками, существенно зависит от локальных параметров таких пучков. Одной из актуальных задач становится определение пространственного распределения энергии по сечению пучка. В этой работе рассматриваются условия с высоким удельным энерговыделением (вплоть до порога разрушения приемника пучка), в которых стандартные калориметрические методики уже не могут быть использованы.

Для экспериментов на установке ГОЛ-3 [1] разработана методика оптической калориметрии, основанная на измерении мощности теплового излучения нагретой поверхности приемника пучка. В экспериментах электронный пучок генератора У-2 (~1 МэВ, ~200 кДж, ~8 нс) используется для быстрого нагрева плазмы в длинном солениоиде с магнитным полем 5 Тл. Для точного определения пространственных характеристик электронного пучка на входе в магнито-плазменную систему он направлялся на графитовый калориметр. Для снижения удельной тепловой нагрузки калориметр располагался в области пониженного до 2 Тл магнитного поля. При таком расположении удельная нагрузка на поверхность калориметра доходит до ~1 кДж/см². При этом пиковая температура поверхности может достигать до порога "взрывного" разрушения графита. Такие условия нами ранее изучались в связи с проблемой стойкости диверторов токамаков класса ITER [2].

В экспериментах измерялось двумерное распределение яркости по поверхности графитового калориметра в видимой и ближней ИК области при помощи цифровой фотокамеры. Используя специальную методику абсолютной калибровки, можно по измеренному распределению яркости рассчитать двумерное распределение пиковой температуры поверхности. Сильная зависимость регистрируемого уровня сигнала от температуры позволяет регистрировать небольшие колебания температуры.

Для калибровки использовалась лампа накаливания СИ8-200 с ленточным вольфрамовым излучателем. Температура излучателя определялась при помощи оптического пирометра ОПИИР-20. Калибровка проводилась при температуре излучателя, лежащей в пределах от 800 до 3000°К. Из-за небольшого динамического диапазона цифровой камеры указанный температурный интервал разбивался на несколько перекрывающихся более узких интервалов, в каждом из которых производилась калибровка камеры совместно с набором серых светофильтров, подобранных для конкретного поддиапазона. При дополнительной калибровке были определены кривые спектральной чувствительности для всех четырех

«цветовых плоскостей» ПЗС камеры, проверена линейность отклика камеры в зависимости от яркости объекта. Поскольку в реальном эксперименте максимальная температура поверхности выше, чем достижимая при калибровке, и поверхность приемника пучка изготовлена из графита, а не из вольфрама, то полученные при калибровке данные были пересчитаны для реальной постановки эксперимента.

В экспериментах производилось фотографирование собственного теплового излучения поверхности приемника пучка. Одновременно при помощи термодатчиков измерений определялась интегральная величина энергии, выделенной пучком в калориметре (которая при больших удельных нагрузках несколько меньше энергосодержания пучка). Изменялись также параметры электронного пучка (ток пучка, кинетическая энергия электронов по напряжению на катоде ускорителя), мощность жесткого тормозного излучения с приемника пучка (для контроля степени компенсации тока пучка встречным током, текущим по нейтрализующей плазме) и динамика интегральной яркости поверхности приемника пучка (эти данные требуются при обработке для учета изменения температуры поверхности в течение длительности экспозиции цифровой камеры). Полученное распределение яркости по поверхности приемника пересчитывалось сначала в распределение температуры, а затем – в распределение удельного энерговыделения по сечению пучка.

Обработка экспериментальных результатов проходила в несколько этапов. Сначала по измеренным в каждом импульсе току пучка и напряжению на катоде генератора пучка рассчитывался интегральный за импульс спектр электронов по энергии. Затем с помощью программ ESMH [3] методом Монте-Карло определялась зависимость удельного энерговыделения электронного пучка с таким спектром по глубине калориметра (относительно небольшая по энергосодержанию часть пучка, генерируемая при снижающемся со временем напряжении на катоде ускорителя, имеет меньший пробег в веществе и вносит, таким образом, более высокий удельный вклад в температуру поверхности).

После этого при помощи программы DISWALL, используя полученный результат как функцию источника нагрева, рассчитывалась динамика температуры на поверхности и в объеме калориметра. В расчетах учитывались: нагрев графита, фазовые переходы, тепловое излучение, теплопроводность вглубь графита, потери тепла за счет приповерхностной плазмы (теплопроводность и конвекция), изменение поверхностной температуры за время экспозиции цифровой камеры.

В результате обработки для каждого импульса пучка получалась функциональная зависимость между измерен-

ной температурой поверхности приемника и величиной удельного энерговыделения.

Описываемая диагностика позволяет получать интегрированное по времени импульса двумерное распределение энерговыделения пучка с пространственным разрешением $\sim 2\%$ по радиусу пучка и детектируемой неоднородностью температуры $\sim 1\%$. Абсолютная величина энергозапаса пучка определялась с точностью $\sim 15\%$. Приведены примеры использования описанной диагностики и для решения

других задач, связанных с воздействием мощных электронных и плазменных потоков на конструкционные материалы.

1. A. V. Arzhannikov, et al., Transactions of Fusion Technology, 39, № 1Т, 17, 2001.

2. V. T. Astrelin, et al., Nuclear Fusion, 37, 1541, 1997.

3. В. А. Таюрский, Препринт ИЯФ СО АНР 89—16, Новосибирск, 1989.

Ж2. ДИАГНОСТИКА НЕЙТРОННОГО И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА МНОГОПРОБОЧНОЙ ЛОВУШКЕ ГОЛ-3

Бурдаков А. В., Поступаев В. В., Ровенских А. Ф., Суляев Ю. С.

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

На установке ГОЛ-3 проводятся эксперименты по изучению нагрева и удержания плазмы в многопробочной ловушке. В настоящее время дейтериевая плазма с плотностью $\sim 10^{15}$ см⁻³ и ионной температурой около 1 кэВ удерживается в ловушке около 0,5 мс. Для регистрации продуктов термоядерных реакций и сопутствующих жестких излучений на установке ГОЛ-3 создан комплекс специализированных диагностик. Нейтронные и гамма-детекторы расположены в защищенном зале вблизи установки. Запись информации с детекторов осуществляется аппаратурой, расположенной в защищенных боксах. Управление аппаратурой и обработка сигналов производится на ЭВМ, расположенных в пультовой на удалении 60 м от установки.

Полное число нейтронов за импульс определяется при помощи активационных детекторов. Эти детекторы состоят из пропорционального счетчика, окруженного серебряной фольгой, и помещенного в замедлитель нейтронов. Сигналы со счетчика регистрируются интегрирующим АЦП (16 разрядов, 20 мс/отсчет, 15 мкВ/квант) в реальном времени, что позволяет записывать фон до импульса, а затем определять изменение величины наведенной активности серебра во времени. Чувствительность детектора была прокалибрована в реальной геометрии с помощью Pu- α -Be источника в режиме насыщения.

Временной ход интенсивности нейтронного и гамма излучения определяется с помощью сцинтилляционных детекторов. Быстрый детектор нейтронов имеет временное разрешение 2,5 нс и предназначен для анализа отдельных частиц. Свечение сцинтиллятора регистрируется при помощи фотоумножителя Philips 58DVP с фотокатодом диаметром 127 мм. Регистрация сигналов производится быстродействующим АЦП с памятью 128 Кб, а затем каждый импульс обрабатывается специальной программой для разделения импульсов от нейтронов и гамма-квантов по их форме. Так как анализ импульсов ведется после окончания записи всей информации в выстреле, то практически нет ограничений по скорости сче-

та вплоть до частоты, соответствующей времени высвечивания сцинтиллятора. В результате возможно получение спектра нейтронов и временного хода интенсивности излучения. Детектор расположен в свинцовом коллиматоре с толщиной стенки 10 см и в магнитной защите на расстоянии 3 м от оси установки.

Другой детектор со сцинтиллятором на основе полистирола установлен на подвижную платформу, которая перемещалась вдоль установки, что позволило определить пространственные характеристики излучения. Сцинтилляционные вспышки от протонов отдачи в полистироле регистрировались с помощью электронного фотоумножителя ФЭУ-110. Сигнал с фотоумножителя через длинный согласованный кабель подавался на вход АЦП (8 разрядов, 10 нс/отсчет). Сцинтиллятор и фотоумножитель защищены от электрических наводок и рассеянных магнитных полей вложенными друг в друга медным и пермаллоевым лайнерами. Детектор закрыт свинцовой защитой толщиной 5 см.

Детекторы жесткого гамма – излучения состоят из свинцовой защиты толщиной 7 см, аналогичного блока регистрации, в качестве сцинтиллятора используются кристаллы NaI(Tl) и BGO. В свинцовой защите имеется окно над сцинтиллятором, закрытое 1 см свинца. Детектор мог устанавливаться под установкой на уровнях $-2,5$ м или -5 м. Предварительно все детекторы были прокалиброваны с помощью нейтронного Pu- α -Be источника и гамма-источника Co⁶⁰. Свинцовая защита была экспериментально подобрана таким образом, чтобы сцинтилляционные детекторы не чувствовали тормозного излучения электронного пучка с приемника.

Результаты измерений с помощью детекторов нейтронов и гамма излучения показывают, что данные активационных и сцинтилляционных детекторов согласуются между собой. Измеренные потоки нейтронов соответствуют параметрам плазмы, полученным из измерений другими диагностиками.

К1. ИЗМЕРЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ

Щеглов Д. А., Москаленко И. В., Шуваев Д. А.,

РНЦ Курчатовский институт

Проведен анализ возможности применить метод лазерной флуоресценции (ЛФ) для измерения концентрации электронов. Принцип метода заключается в лазерном возбуждении одного из триплетных уровней атома гелия с главным квантовым числом $n = 3$; соударения с электронами приводят к заселению других уровней с $n = 3$ (рис. 1).

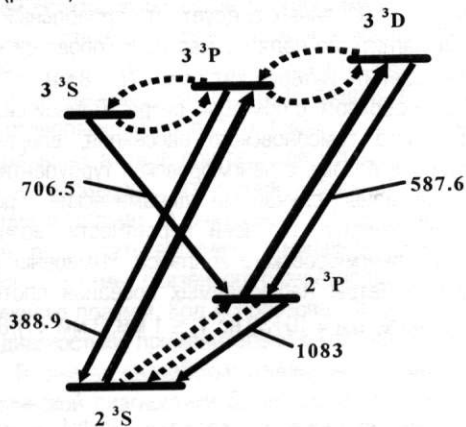


Рис. 1. Частичная схема триплетных энергетических уровней атома гелия (--- → столкновительный перенос возбуждения).

В данном случае используется одна из схем применения которых планируется для измерения концентрации атомов гелия в диверторной плазме ITER, но для оценок N_e требуется измерять отношение интенсивностей линий $\lambda 588$ нм и $\lambda 707$ нм. Результат расчета при $T_e = 10$ эВ показан на рис. 2.

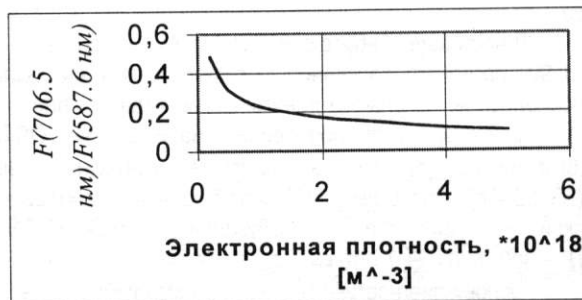


Рис. 2. Зависимость отношения интенсивностей сигналов флуоресценции линий $\lambda 707$ нм и $\lambda 588$ нм от электронной плотности при $T_e = 10$ эВ.

Рассмотренный вариант оптимален для низкой плотности ($N_e < 5 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$); для расширения диапазона рассматриваются схемы, включающие столкновительные переходы $\Delta n = 1$.

Таким образом, ЛФ-система разрабатываемая для измерения концентрации и температуры гелия, а также «внешних» примесей (Ne, Ar, Kr) в диверторной плазме ITER [2], может быть применена и для оценок плотности электронов.

1. Shevelko V. P., Tawara H.// Research Report NIFS-DATA-28. Nagoya, Japan, 1995.

2. Donne A. K. J., Buzhinskij O., Costley et al.// Proc. 11th Intern. Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics. Fukuoka, Japan, p. 389, 2001.

К2. СИСТЕМА ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ДЛЯ ПРЯМОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЛЕНГМЮРОВСКИХ КАВЕРН

Бурмасов В. С., Вячеславов Л. Н., Кандауров И. В.,
Кругляков Э. П., Мешков О. И., Попов С. С.

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

Одним из наиболее важных эффектов в плазме с высоким уровнем ленгмюровской турбулентности ($W/nT_e/krd^2$) является волновой коллапс, предсказанный

В. Е. Захаровым в 1972 г. [1]. С тех пор этому явлению было посвящено большое количество теоретических публикаций и работ по численному моделированию (см.

обзор [2]). Несмотря на это, экспериментальное исследование этого явления существенно отстает от теории. В связи с чем высказывалось даже предположение [3], что ленгмюровский коллапс наблюдается лишь при определенных специфических условиях таких, например, как в [4]. Действительно, параметры эксперимента [4] позволяли получать, как правило, единичный волновой коллапс, строго детерминированный в пространстве и времени.

Однако, картина многочисленного и случайного возникновения коллапса (как в пространстве объема плазмы, так и во времени ее существования) более адекватна теории сильной ленгмювской турбулентности (СЛТ). Поэтому, прямое наблюдение и исследование случайно возникающего ленгмювского коллапса в лабораторной плазме имеет большое значение. Одним из путей решения этой задачи представляется исследование каверн плотности, образующихся в процессе коллапса.

В настоящей работе описана система некогерентного 90° лазерного рассеяния, с помощью которой были исследованы локальные динамические провалы плотности [5]. Эксперименты проводились на установке ГОЛ-М [6] с плотной ($n_e \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$) плазмой в магнитном поле ($B = 25 \text{ кГс}$) с высоким ($W/nT_e > 0,2$) уровнем ленгмювской турбулентности [7], возбуждаемой мощным РЭП ($E \approx 300 \div 500 \text{ кВ}$, $I \approx 10 \text{ кА}$, $\Delta t_{\text{рэл}} \approx 100 \text{ нс}$).

Основу диагностики составлял неодимовый лазер с параметрами: $E \approx 20 \text{ Дж}$, $\Delta t_{\text{лаз}} \approx 60 \text{ нс}$, $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$. Лазерный луч, пересекавший плазму перпендикулярно магнитному полю, фокусировался линзой ($F = 50 \text{ см}$) на ось плазменной камеры и выводился через окно, установленное под углом Брюстера. Изображение сфокусированного лазерного пучка в рассеянном на 90° излучении проецировалось телескопическим объективом ($F = 13 \text{ см}$, $\varnothing = 5,5 \text{ см}$) на торцы световодов сечением 1 мм^2 для последующей передачи на лавинные фотодиоды С30955Е (35 А/Вт, 500 МГц). Калибровка системы регистрации производилась по релейскому рассеянию на элегазе (SF_6) при давлении 0,05 атм. Паразитное излучение на несмещенной лазерной частоте подавлялось интерференционным фильтром с полосой пропускания равной 40 нм.

Контур сигнала рассеянного излучения сравнивался с формой лазерного импульса, вводимого в плазму. Для этой цели блик лазерного импульса от поворотной призмы направлялся в систему регистрации с задержкой 200 нс. Сравнение формы регистрируемых таким образом импульсов позволяло определять динамику плотности плазмы в течение импульса генерации лазера $\Delta t_{\text{лаз}}$ с точностью 5–10%. Для проверки того, что изменения формы импульса рассеянного излучения не связаны с электромагнитными помехами, которые могли возникнуть в системе регистрации при генерации РЭП, использовалось оптическое дублирование регистрируемого сигнала с задержкой 40 нс по так называемой «схеме совпадений». Сравнение осциллограмм основного и дублирующего каналов позволяло с уверенностью отделять особенности, связанные с динамикой плотности плазмы от электромагнитных помех, которые совпадали бы по времени на обоих каналах «схемы совпадений».

В результате использования такой методики были зарегистрированы динамические провалы плотности плазмы (каверны) глубиной до 40% и длительностью $\tau_{\text{кав}} = 10 \div 30 \text{ нс}$.

Для измерения поперечного к магнитному полю размера каверн l_\perp , изображение каустики зондирующего лазерного пучка направлялось на линейку из четырех фотодиодов. Как правило, динамический провал плотности плазмы в этом случае регистрировался только в одном из четырех каналов. Следовательно, поперечный размер каверны составляет величину $l_\perp \approx 1 \text{ мм}$.

Для определения продольного к магнитному полю размера каверны l_\parallel вводимое в камеру излучение лазера с помощью разрезанной входной линзы делилось на два разнесенных в пространстве сфокусированных пучка. Фокусы этих пучков выставлялись на одной магнитной силовой линии. Выставление нужного расстояния между фокусами L достигались путем смещения половинок линзы. Изображение фокусов проецировалось в два независимых канала регистрации.

В проведенных экспериментах при $L = 3 \text{ мм}$ имело место полное совпадение во времени наблюдаемых провалов плотности в обоих каналах, а при $L = 8 \text{ мм}$ провалы плотности наблюдались только в одном из каналов регистрации. Из этих данных следует, что продольный относительно магнитного поля размер ленгмювской каверны можно оценить интервалом $3 \text{ мм} < l_\parallel < 8 \text{ мм}$.

Таким образом, с помощью разработанной системы некогерентного томсоновского рассеяния, впервые, в лабораторной плазме с ленгмювской турбулентностью зарегистрированы случайные динамические провалы плотности, которые, по всей вероятности, возникают вследствие ленгмювского коллапса. Измерены характерные параметры наблюдаемых провалов плотности: $\delta n/n = 10 \div 40\%$, $\tau_{\text{кав}} = 10 \div 30 \text{ нс}$, $l_\perp \leq 1 \text{ мм}$, $3 \text{ мм} < l_\parallel < 8 \text{ мм}$.

Работа частично поддержана РФФИ – гранты № 01–02–17492 и № 03–02–16352.

1. Захаров В. Е. // Журн. эксперим. и теорет. физики, Т. 62, С. 1745, 1972.
2. Robinson P. A. // Rev. Mod. Phys., V. 69, P. 507, 1997.
3. Карфидов Д. М., Рубенчик А. М., Сергейчев К. Ф., Сычев И. А. // Журн. эксперим. и теорет. физики, Т. 98, С. 1592, 1990.
4. Wong A. J., Cheng P. J. // Phys. Rev. Lett., T. 52, P. 1222, 1984.
5. Vyacheslavov L. N., Burmasov V. S., Kandaurov I. V. et al. // Plasma Phys. Control. Fusion, V. 44, P. B279, 2002
6. Arzhannikov A. V., Astrelin V. T., Avrorov A. P. et al // Nucl. Fusion, Supplement, P. 323, 1987.
7. Vyacheslavov L. N., Burmasov V. S., Kandaurov I. V. et al. // Phys. Plasma, V. 2, P. 2224, 1995.

Н1. ШТАРК-ЗЕЕМАНОВСКИЙ ЭФФЕКТ В ПУЧКЕ АТОМОВ ВОДОРОДА И ДИАГНОСТИКА ПОЛОИДАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ В ТОКАМАКЕ

Туганов В. Ф., Тугаринов С. Н.

ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований

Пучок атомов водорода в магнитном поле испытывает совместное воздействие, как электрического поля Лоренца, так и самого магнитного поля. Как показано в [1], суть возникающего при этом шарк-зеемановского эффекта сводится прежде всего не в какому-то дополнительному (по магнитному полю) расщеплению шарковских уровней. Суть его – в повороте соответствующей оси квантования (оси, определяющей направление вектора поляризации π -компоненты) на некий угол относительно вектора электрического поля, который является осью квантования в чисто шарковском эффекте.

Этот угол оказывается сравним по величине с теми углами поворота магнитного поля, что возникают при появлении полоидальных полей тока плазмы, и любая из известных методик шарковской пучковой диагностики в токамаках обычно их и измеряет.

Однако используемая при этом интерпретация направления этой оси исключительно лишь направлением электрического поля Лоренца может оказаться неадекватной физической реальности проводимых измерений. Так вблизи центра шнура плазмы, где поворот оси квантования наиболее существен, угол «поворота» этой оси

может превысить углы «поворота» силовой линии магнитного поля, обусловленные появлением его полоидальной компоненты при включении тока.

Это касается всех используемых пучковых методик измерения полоидального поля: и по направлению вектора поляризации излучения [2], и по отношению интенсивностей π и σ компонент [3].

На основе полученных в [1] общих формул шарк-зеемановского эффекта рассчитан лишь самый простой случай линии Лаймана. Предполагается расчет этого эффекта для линий Бальмера и интерпретация экспериментальных данных.

1. Туганов В. Ф. «Шарк-Зеемановский эффект и диагностика полоидальных магнитных полей в токамаках», Физика Плазмы, 1996, т. 22, № 2, с 190—192.

2. Wroblewski D., Lao L., 9-th Topical Conference on High Temperature Plasma Diagnostics, March, 1992, Santa Fe, New-Mexico.

3. Jaspers R., et. al., Rev. Sci. Instr., vol. 71, № 1, 1018, 2001.

Н2. СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЫ НА УСТАНОВКЕ ГОЛ-3

Акентьев Р. Ю., Бурдаков А. В., Иванов И. А., Полосаткин С. В.,
Поступаев В. В., Ровенских А. Ф., Шошин А. А.

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

Для многопобочной ловушки ГОЛ-3 [1] разработан набор спектральных диагностик для комплексного исследования параметров плазмы. На установке исследуется удержание горячей плазмы в многопобочной открытой ловушке. Нагрев плазмы производится релятивистским электронным пучком с полным энергосодержанием 100—200 кДж и длительностью 6—8 мкс. Плазма имеет следующие характерные параметры: $T_e \sim 2$ кэВ, $T_i \sim 1$ кэВ, $n_e \sim 10^{20}—10^{21}$ м⁻³, $\tau_e \sim 0,3$ мс. В состав спектральной диагностики входит несколько отдельных систем, позволяющих проводить измерения спектра с пространственным разрешением в видимом диапазоне.

Обзорная картина спектра свечения плазмы в видимом диапазоне регистрируется при помощи изобра-

жающего спектрометра. Обзорный спектрометр выполнен на базе сферической дифракционной решетки с переменным шагом от монохроматора МУМ и снабжен регистрирующей системой с цифровой камерой. Пространственное разрешение составляет несколько миллиметров при поле зрения в радиальном направлении 8 см (что соответствует диаметру плазменного шнура в установке). Этот спектральный прибор используется в диапазоне 380—680 нм (ограничение по области спектральной чувствительности цифровой камеры), имеет ширину спектрального окна 35 нм и разрешение 6,3 нм. Основное назначение обзорного спектрометра – оценка спектральной обстановки в районе выбранной для более подробного анализа спектральной линии, поиск линий, излучаю-

щих из нужной области плазмы, грубый контроль стабильности плазмы по отсутствию «залпового» выброса примесей на периферии.

Спектральная система высокого разрешения выполнена с использованием изображающего двойного монохроматора ДФС-24 [2]. Эта система используется для точного измерения контура спектральных линий. Линейная дисперсия прибора равна 0,45 нм/мм. Разложенное в спектр излучение делится на две части и направляется на два независимых приемных узла. Один использует электронно-оптический преобразователь (ЭОП) с микроканальной пластиной (МКП) в качестве затвора и усилителя яркости, изображение на люминофоре ЭОП регистрируется при помощи цифровой камеры. Типичное время экспозиции составляет 1 мкс. Спектральное разрешение определяется аппаратной функцией ДФС-24 и составляет 0,04 нм. Использование этой системы совместно с поляризационными фильтрами на окне вакуумной камеры позволяет одновременно получать изображение плазмы в свете π и σ компонент выбранной линии.

На второй приемный узел может устанавливаться один из двух детекторов. Первый из них состоит из 10-канального блока ФЭУ, к которым сигнал передается при помощи оптоволоконного коллектора. Ширина каналов коллектора равна 200 мкм, она определяет полуширину аппаратной функции, равную 0,05 нм. Оцифровка сигналов производится на частоте 1 МГц. Данный детектор позволяет измерять изменение во времени контуров спектральных линий с хорошим временным и умеренным спектральным разрешением. Вместо волоконного коллектора на второй приемный узел может устанавливаться диссектор. Регистрация проводится АЦП с тактовой частотой 10 нс. Частота сканирования спектра определяется задачей эксперимента и варьируется в пределах 100—500 кГц. Ширина аппаратной функции этого прибора составляет 0,04 нм.

Излучение плазмы фокусируется на входную щель прибора зеркально-линзовой системой с диаметром входного зеркала 30 см. Для независимого измерения компонент излучения, поляризованных вдоль и поперек магнитного поля (π - и σ -компоненты) вблизи плазмы на пути излучения друг над другом установлены поляризационные фильтры, пропускающие лишь одну (π - или σ -) компоненту излучения. Оптическая система настроена таким образом, что в вертикальной плоскости точка расположения фильтров изображается в плоскости приемников излучения. Таким образом, на экран ЭОП одновременно проецируются смещенные по вертикали спектры π - и σ - компонент излучения плазмы. Детектор на основе волоконно-оптических коллекторов и диссектор устанавливаются так, что регистрируется излучение только с одной выбранной поляризацией. Использование одновременного измерения спектров излучения с разной поляризацией двумя разными системами (одноканальной и с временным разрешением) позволяет более точно разде-

лять влияние на профиль линии разных факторов (температуры и плотности плазмы, магнитного и электрического полей).

Обзорный спектрометр и спектрометр с высоким разрешением стационарно размещены на установке в одном сечении вакуумной камеры. Для измерения спектра излучения в разных точках по длине вакуумного столба используется еще одна спектральная система, расположенная в пультовой. Свет передается по гибким оптоволоконным линиям, которые, в зависимости от задачи, могут на установке присоединяться к выбранному диагностическому окну. Эта система использует монохроматор МДР-23, который снабжен решеткой 1200 штрихов/мм и имеет два выходных узла. На одном из них установлен диссектор с параметрами, близкими к описанному выше. Другой выходной узел предназначен для детектора МАСИ с фотодиодной линейкой (1024 элемента размером 200 × 15 мкм). В качестве оптического затвора и усилителя яркости изображения совместно с МАСИ используется ЭОП с МКП и выходом на волоконную шайбу.

В докладе приводится описание аппаратуры, способы калибровки, методика и результаты экспериментов по измерению различных параметров плазмы (плотности, ионной температуры, изменение изотопного состава водородно-дейтериевой плазмы в ходе разряда, определение β по величине магнитного поля внутри плазмы и в пристеночной области, определение состава и пространственного распределения примесей). Основными примесями являются поступающие с ситалловых лимитеров в плазму ионы углерода, лития, натрия и кремния. Обнаружено поступление в дейтериевую плазму в течение разряда значительного количества водорода, что указывает, видимо, на существование на стенке камеры стабильных водородных соединений. В отдельных экспериментах измерялось изменение магнитного поля между плазмой и стенкой вакуумной камеры. Для этого в указанную область вводилась малогабаритная разрядная трубка с неоном, в котором зажигался тлеющий разряд. По зеemannовскому расщеплению линии (разрешались все 10 компонент желтого дублета Na I) было измерено увеличение пристеночного магнитного поля в месте расположения диагностики и определена средняя по сечению плазмы величина $\beta \sim 12\%$, что согласуется с данными диамагнитных измерений.

Работа выполняется при частичной финансовой поддержке РФФИ, проект 03—02—16271.

1. Arzhannikov A. V., et al., Transactions of Fusion Technology, 39, No.1T, 17, 2001.

2. Akentjev R. Yu., et al, Proc. 29th EPS Conf., Montreux, P-5.057, 2002.

Н3. ПОРОГ ЛАЗЕРНОГО РАЗРУШЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛЬФРАМОВЫХ ЗЕРКАЛ

Бельбас И. С., Вуколов К. Ю., Горшков А. В., Маслов М. В., Санников В. В.

РНЦ Курчатовский институт

Первое зеркало является одним из наиболее критических элементов диагностик ITER. Первое зеркало должно работать в экстремальных условиях, сохраняя при этом хорошие оптические свойства. В особенности это касается первых зеркал лазерных диагностик. Из-за высокой частоты лазерных импульсов тонкий поверхностный слой зеркала подвергается кратковременным тепловым ударам, что приводит к эффекту, очень похожему на усталостную деформацию. Измерения деградации различных прототипов первого зеркала под воздействие импульсного YAG лазера были проведены в Курчатовском институте.

В предыдущих работах [1] были изучены различные типы молибденовых зеркал. Наилучшие результаты были получены для монокристаллических зеркал.

В данной работе приведены результаты измерений порогов лазерного разрушения для зеркал из монокристаллического вольфрама под воздействием частотного YAG лазера ($\lambda = 1,06 \mu\text{m}$, $\tau = 12 \text{ нс}$, энергия – 30 мДж, $F = 12,5 \text{ Гц}$). Выходной пучок лазера, работающего в основной моде (TEM_{00}) имеет гауссовский профиль. Плотность энергии на поверхности зеркала изменялась с помощью различных поглощающих фильтров. Пороги измерялись для одного и после более чем 10^5 лазерных импульсов.

1. Gorshkov A., Bel'bas I., Sannikov V., Vukolov K. Frequency laser damage of Mo mirrors. – Report on 22nd Symposium on Fusion Technology. Helsinki. Sept. 2002. Book of Abstracts. p. 237.

Н4. ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС УСТАНОВКИ ГДЛ ДЛЯ ЛОКАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПЛАЗМЕ

Багрянский П. А.* , Иванов А. А.* , Корепанов С. А.* , Лизунов А. А.* ,
Савкин В. Я.* , D. Den Hartog** , G. Fiksel**

*Институт ядерной физики СО РАН, Россия,

**University of Wisconsin-Madison, USA

Одним из наиболее надежных методов бесконтактного измерения магнитного поля в горячей плазме является регистрация штарковского расщепления в спектре излучения мультиплета H_{α} (или D_{α}) атомарного пучка, возникающего под действием лоренцевского электрического поля в сопутствующей системе отсчета (motional Stark effect, MSE). Данный метод широко применяется на многих современных системах для магнитного удержания плазмы (см., например, [1, 2]). На установке газодинамическая ловушка (ГДЛ) при помощи MSE-диагностики были проведены измерения абсолютной величины магнитного поля в эксперименте по удержанию ионно-горячей плазмы [3].

В измерениях применялся сфокусированный диагностический пучок атомов водорода с энергией 40 кэВ и током до 5 экв. Ампер. При плотности тока $\approx 0,25 \text{ A/cm}^2$ в плоскости фокуса диаметр пучка равнялся 4 см, что позволило получить пространственное разрешение диагностики 4,5 см. Временное разрешение 200 мкс определялось длительностью пучка. Излучение атомов пучка регистрировалось спектрометром с цифровым CCD детектором.

Приведенные параметры диагностической системы вполне удовлетворяют требованиям, выдвигаемым спецификой эксперимента на ГДЛ. Основной задачей измерения магнитного поля в газодинамической ловушке является вычисления локального значения параметра β ;

это важно для изучения физики анизотропных быстрых ионов [4].

Для обработки экспериментальных данных была разработана численная модель спектра мультиплета H_{α} с учетом тонкой структуры уровней и других поправок. Относительно небольшие магнитные поля, характерные для центральной части ГДЛ ($2\pm 5 \text{ кГс}$), делают такие расчеты существенными для получения требуемой точности измерений.

При помощи MSE диагностики в эксперименте на ГДЛ был измерен радиальный профиль магнитного поля в области пикировки плотности быстрых ионов. Максимальная величина диамагнетизма, связанного с давлением быстрой компоненты плазмы, составляет по результатам измерений $\Delta B/B = 0.2$ на оси установки.

1. Levington F. M., Rev. Sci. Instr., 70, No. 1, p. 810, Jan 1999.

2. Soetens T., Jaspers R., Desoppere E., Rev. Sci. Instr., 70, No. 1, p. 890, Jan 1999.

3. Bagryansky P. A., Den Hartog D. J., et. al., Proc. Of the 28th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys. Funchal, 18–22 June 2001 ECA, 25A, p. 1217, 2001.

4. Anikeev A. V., Bagryansky P. A., et. al., Nuclear Fusion, 40, No. 4, p.753, Apr. 2000.

Н5. ИЗОБРАЖАЮЩИЕ ДИАГНОСТИКИ ВАКУУМНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНА МНОГОПРОВОЧНОЙ ЛОВУШКИ ГОЛ-3

Бурдаков А. В.* , Вайнцеттл В.** , Пиффл В.** , Полосаткин С. В.* , Поступаев В. В.*

*Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Россия;

**Институт физики плазмы, Республика Чехия

Анализ пространственного распределения собственного излучения является эффективным средством контроля и диагностики параметров плазмы. В субтермоядерной плазме ($T_e \sim 0,1-10$ кэВ) значительный интерес представляет исследование излучения в вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) области спектра, содержащей яркие спектральные линии ионов основных примесей. Комплекс изображающих ВУФ диагностик установки ГОЛ-3 состоит из спектрального прибора, выполненного по схеме Сейя-Намиока, однокадровой ВУФ обскуры и двух однотипных 16-канальных хордовых ВУФ обскур.

Применительно к экспериментам на многопробочной ловушке ГОЛ-3 изображающие ВУФ диагностики использовались для определения размеров области горячей плазмы, для изучения ограничений параметров для макроскопической устойчивости плазмы, для исследования динамики плотных плазматидов, возникающих при пеллет-инжекции, для оценки радиационных потерь. Кроме того, в сочетании со спектроскопическими системами, эти диагностики позволяют определять коэффициенты диффузии примесей, эффективный заряд ионов, электронную температуру плазмы.

Для хордовых измерений интенсивности ВУФ излучения на установке ГОЛ-3 применяется 16-канальная камера-обскура. Излучение регистрируется с помощью набора вакуумных фотодиодов с алюминиевыми фотокатодами, чувствительными к излучению с длиной волны короче ~ 120 нм. Фотодиоды работают в токовом режиме, регистрация производится синхронными АЦП с частотой дискретизации 20 МГц. Пространственно расположение фотокатодов и их форма зависит от конкретной задачи. Подготовлено несколько сменных катодных узлов с линейным или крестообразным расположением детекторов. Обскура используется для определения поперечных размеров нагревающей плазму электронного пучка, для обнаружения макроскопических неустойчивостей плазменного шнура, для изучения динамики образования и распада плотного плазматоида при пеллет-инжекции. При помощи этого датчика изучалось также распространение плотной холодной плазмы, возникающей на первой стенке камеры при моделировании условий большого срыва в токамаках.

Для исследования динамики плотных плазменных сгустков при пеллет-инжекции также была разработана двумерная камера-обскура, работающая в кадровом режиме. В этой диагностике излучение детектируется открытым электронно-оптическим преобразователем (ЭОП), фотокатодом в котором служит внешняя поверхность микроканальной пластины (МКП). ЭОП выполняет функции конвертера излучения в видимую область спектра, усилителя и электронного затвора; импульс напряжения на МКП определяет длительность кадра. Изображение, возникающее на люминофоре ЭОП, регистрируется ПЗС камерой и передается в компьютер. Данный

прибор имеет поле зрения ~ 6 см при пространственном разрешении ~ 1 мм, типичная длительность экспозиции составляет ~ 1 мкс (используемое пространственное разрешение и длительность экспозиции определяются уровнем сигнала).

Спектр ВУФ излучения в диапазоне 50—250 нм исследовался с помощью изображающего спектрометра, разработанного для использования на многопробочной ловушке ГОЛ-3 (ИЯФ, Новосибирск). Аналогичный прибор был подготовлен для токамака CASTOR (IPP, Prague). В качестве основы для создания спектрометра используется модифицированный вакуумный монохроматор ВМ-3 разработки ЛФТИ. Монохроматор собран по схеме Сейя-Намиока с углом между падающим и дифрагированным излучением $70^\circ 15'$. В приборе используется сферическая дифракционная решетка с радиусом кривизны 50 см и шагом 1200 штрихов/мм.

Этот прибор имеет сменный регистрирующий узел. При измерении ВУФ спектра с пространственным разрешением в качестве детектора излучения используется открытый электронно-оптический преобразователь с двумя последовательно установленными МКП. Длительность кадра задается импульсом напряжения на микроканальных пластинах, изображение регистрируется ПЗС матрицей. Другие узлы регистрации служат для измерения динамики яркости выбранной спектральной линии. Для работы в диапазоне 112—365 нм используется ФЭУ-142, для более коротковолновой области — детектор с алюминиевым фотокатодом.

Для получения пространственного разрешения в этом спектральном приборе используется значительный астигматизм, присущий оптической схеме Сейя-Намиока. Астигматизм не позволяет получать в плоскости регистрации изображение входной щели. Вместе с тем, если на некотором расстоянии перед входной щелью существует протяженный в сагитальном направлении линейный источник, то спектр его свечения будет изображаться в плоскости регистрации в виде тонкой линии, при этом будет обеспечиваться полное заполнение решетки излучением. В случае источника, имеющего пространственную структуру в меридиональной плоскости, в плоскости изображения будет наблюдаться соответствующее распределение яркости. Поскольку в экспериментах по магнитному удержанию плазмы изменение параметров плазмы вдоль магнитного поля обычно невелико, то, располагая входную щель прибора перпендикулярно к магнитному полю, можно получить распределение спектра по радиусу.

Исходя из этого, спектрометр был установлен так, что расстояние между решеткой и плазмой составляло 1300 мм. Были изготовлены оптический тракт и новая входная щель высотой 70 мм, что позволило регистрировать излучение из области высотой 90 мм. Получено

пространственное разрешение не хуже 3 мм во всем рабочем диапазоне длин волн.

Спектральное разрешение прибора измерялось с помощью ртутной лампы. На длине волны Hg I 185 нм ширина аппаратной функции вблизи оптической оси прибора равна 0,45 нм при ширине входной щели 100 мкм. В спектре излучения плазмы разрешается дублет литиеподобного кислорода O VI 103,2 нм и 103,7 нм. На краях кадра, вследствие непараксиальности оптики, линия заметно уширена, и спектральное разрешение составляет 1,2 нм.

Исследовался также вопрос о получении высокого спектрального разрешения при регистрации излучения в высоких порядках дифракции. При этом наблюдался дублет O VI (103,2 нм и 103,7 нм) в пятом порядке дифракции, а также линия Hg I 185 нм в третьем порядке.

Ширина аппаратной функции составляет в этом случае 0,1 нм, то есть спектральное разрешение прибора равно $\Delta\lambda/\lambda = 5 \times 10^{-4}$.

С помощью изображающего ВУФ спектрометра измерен спектр излучения плазмы, определен профиль яркости линий основных примесей. В экспериментах с пеллет-инжекцией по отношению линий ионов углерода различной зарядности найдена электронная температура в плазменном сгустке. Кроме того, в экспериментах на токамаке CASTOR обнаружено влияние напряжения, подаваемого на лимитеры, на профили яркости линий ионов примесей. Сравнение получаемых профилей с результатами численного моделирования позволяет определять скорость диффузии примесей.

Н6. РАЗРАБОТКА И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ ОПТИЧЕСКОЙ ГОЛОВКИ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ H α -ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ

Александров Е. В., Васильев Н. Н., Медведев А. А., Шпанский Ю. С.

РНЦ Курчатовский институт

Одной из подсистем системы диагностики ITER является система измерений интенсивности и формы бальмеровских линий водорода (H α Spectroscopy). Критическими компонентами этой системы являются малоапертурные охлаждаемые оптические головки (входные устройства) с металлическими зеркалами, расположенные вблизи первой стенки реактора и подвергающиеся, вследствие этого, мощному тепловому и радиационному воздействию. Благодаря малой апертуре зрачка деградация отражающей поверхности зеркал вследствие эрозии и осаждения пленок сводится к минимуму и основным требованием, предъявляемым к конструкции таких головок, становится требование их размерной стабильности – температурные деформации и вибрации не должны приводить к существенной деградации формируемого оптической системой головок изображения.

В докладе приводится описание варианта конструктивного исполнения оптической головки, устанавливаемой

в центральный порт ITER. В этом варианте головка спроектирована как разъемный блок, с жестким креплением зеркал без юстировочных узлов. Рассмотрена проблема выбора конструкционных материалов, некоторые аспекты изготовления.

Выполнены подробные расчеты температурных полей, напряженно-деформированного состояния компонентов конструкции головки и ее динамических (вибрационных) характеристик. В результате определены линейные и угловые перемещения зеркал, а также изменение их формы.

Показано, что рассматриваемый вариант конструкции головки обладает достаточной прочностью и жесткостью и обеспечивает малость перемещений и деформаций зеркал, так что существенной деградации изображения, формируемого оптической системой головки, не ожидается.

Н7. ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ОБЛУЧЕННЫХ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ОКОН ITER

Молодцов Н. А., Москаленко И. В.

РНЦ Курчатовский институт

Целью данной работы являлось изучение зависимости величины сигналов фотолюминесценции облученных и необлученных оптических материалов от величины падающего УФ-излучения. Излучение из плазмы ITERa в УФ-диапазоне возбуждает фотолюминесценцию в окнах оптических диагностик и увеличивает фон при оптических измерениях. Для оценки фона была разработана методи-

ка определения величины сигналов фотолюминесценции и проведены эксперименты на образцах оптических материалов, принятых в качестве кандидатов оптических материалов окон ITER.

Работа состояла из двух этапов. На первом этапе УФ-излучение имитировалось с помощью импульсного перестраиваемого по длинам волн лазера в спектраль-