

Учреждение Российской академии наук
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

УДК 533.9

На правах рукописи

Толстяков Сергей Юрьевич



**РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ
ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ**

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2008

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Гусев В.К.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Сергеев В.Ю.
кандидат физико-математических наук,
Смирнов В.Г.

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук
Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

Защита состоится 04 декабря 2008 г. в 15-00 часов на заседании
Диссертационного Совета Д 002.205.03 при Учреждении Российской
академии наук Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской
академии наук Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Автореферат разослан «31» октября 2008 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
кандидат физико-математических наук  Красильщиков А.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Исследование физики процессов удержания, нагрева и устойчивости плазмы на токамаках невозможно без развития методов лазерной диагностики плазмы. Бесконтактность и локальность – вот два основных достоинства лазерной диагностики, делающие её незаменимой при измерениях в высокотемпературной плазме токамака.

Исследование поведения нейтрального компонента в плазме также является чрезвычайно важной диагностической задачей. Эту задачу частично, с большими ограничениями, решает эмиссионная спектроскопия плазмы токамаков и, в частности, спектроскопия атомов водорода и дейтерия, которые играют важную роль как источники частиц и радиационных потерь в плазме. Для исследования эффективности различных методов подачи топлива и для анализа удержания частиц и энергии необходимы измерения пространственных профилей нейтрального компонента. Для детального описания механизмов потерь энергии и частиц требуются сведения о радиальном распределении источников ионизации. Такие сведения возможно получить из экспериментов по измерению локальных значений концентрации атомов водорода методом резонансной флуоресценции [1]. В методе резонансной флуоресценции используется эффект усиления свечения линии, излучаемой атомом под воздействием облучения атома монохроматическим источником с частотой, точно подстроенной под частоту перехода. Метод требует применения перестраиваемых по длине волны источников излучения с очень высокой спектральной яркостью, как правило, лазеров на красителях. Технические характеристики лазеров ограничивают чувствительность на определенном уровне, примерно соответствующем $5 \cdot 10^{14}$ атомов/м³ для плазмы токамака. Для дальнейшего развития методов диагностики нейтрального компонента высокотемпературной плазмы установок типа токамак необходимо поднять чувствительность метода. Для решения этой задачи было актуальным разработать новые методы и подходы, менее чувствительные к характеристикам лазерного излучения. Измерения пространственного распределения атомов водорода и дейтерия оказались возможными с использованием принципиально нового, локального диагностического метода, основанного на лазерной фотоионизации атомов из возбужденных состояний. Новый метод обладает существенными преимуществами по сравнению с действующими методами исследования нейтрального компонента плазмы, главные из которых: 1. отсутствие требований резонансной настройки частоты лазерного излучения на частоту перехода, 2. возможность применения относительно простых твердотельных лазеров, 3. большая разница длин волн зондирующего и детектируемого излучения, позволяющая легко решать проблему паразитно-рассеянного света

и 4. независимость трактовки данных диагностики от вспомогательных моделей в широком диапазоне параметров плазмы.

Метод томсоновского рассеяния (ТР) является уникальным инструментом для определения температуры и концентрации электронов. Без преувеличения можно сказать, что многие достижения последних лет в осуществлении программы управляемого термоядерного синтеза на установках с магнитным удержанием связаны с успехами освоения и применения этого метода диагностики [3, 4]. Расширение круга решаемых задач стимулирует создание новых, всё более сложных и совершенных диагностических систем, вобравших в себя все современные научно-технические достижения. Хотя построение таких систем ТР базируется на общих, детально изученных принципах, не существует и, по-видимому, не может существовать единого рецепта построения диагностического комплекса. Каждый диагностический комплекс представляет собой неотъемлемую часть конкретной плазменной установки и строится, исходя из решаемой задачи. В материалах, представленных в диссертации, методу ТР отводится важное место. Главное внимание уделено исследованиям плазмы в режимах омического нагрева, дополнительного нагрева с инъекцией нейтрального пучка, а также при инъекции водорода плазменной пушкой, как альтернативы стандартной методике газонапуска. Успешные эксперименты последних лет на токамаках с малым аспектным отношением продемонстрировали ряд характерных особенностей сферического токамака, таких как большой ток плазмы в низком магнитном поле и повышенная МГД устойчивость плазмы. При этом удержание энергии оказалось близким к значениям, предсказываемым скейлингами для обычных токамаков. В экспериментах была получена плазма в диапазоне плотностей, превышающих 10^{20} м^{-3} . Применение дополнительного нагрева методом инъекции нейтрального пучка позволило получить высокие значения давления плазмы, соответствующие β_T (отношение кинетического давления плазмы к давлению тороидального магнитного поля) превышающим 30%, что является абсолютным рекордом для плазмы токамаков. Исследование параметров плазмы на установках с малым аспектным отношением расширяет существующую базу экспериментальных данных для тороидальных магнитных плазменных конфигураций. Развитие лазерных методов диагностики плазмы сферических токамаков является важным этапом в решении данной задачи.

Цели работы

Целью данной работы является разработка методов и систем лазерной диагностики нейтрального и электронного компонентов плазмы и их применение для исследования физических процессов в плазме токамака. Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

- Разработка принципов построения высокоэффективных диагностических систем для исследования электронного и нейтрального компонентов плазмы токамака, включая многоимпульсную лазерную систему с программно-управляемой частотой следования импульсов,
- Разработка схемы, совмещающей принципы многопроходного и многоимпульсного зондирования плазмы,
- Разработка нового метода диагностики, основанного на фотоионизации возбужденных атомных состояний для измерения локальных значений плотности атомов водорода,
- Проведение измерений новым методом радиальных распределений плотности нейтральных атомов водорода в плазме токамака,
- Исследование режимов с предельно низкими и высокими плотностями плазмы и определение границ рабочих параметров сферического токамака Глобус-М,
- Исследование процессов формирования профилей плотности и давления плазмы при инжекции плазменной струи и пилообразных колебаниях.

Новизна работы

Разработан принципиально новый метод диагностики плазмы на основе лазерной фотоионизации атомов водорода и дейтерия, предназначенный для локальных измерений плотности нейтральных атомов в плазме токамака. Разработаны физические основы такой диагностики.

Впервые в программе термоядерных исследований методом лазерной фотоионизации проведены измерения пространственного распределения атомов водорода в плазме токамака.

Применение двадцатиимпульсного лазера с различной частотой следования импульсов (до 2 кГц) в составе диагностической системы ТР позволило исследовать процессы формирования профилей плотности и давления плазмы под воздействием как длинных импульсов нагрева плазмы, так и коротких импульсов инжекции струи газа в плазму. Впервые на сферическом токамаке на основе данных ТР определён источник генерации убегающих электронов.

Впервые методом ТР получены данные о глубине проникновения высокоскоростной плотной плазменной струи в плазменный шнур.

Достоверность научных результатов

Полученные в ходе работы результаты экспериментально подтверждены и теоретически обоснованы. Их достоверность обеспечена сопоставлением с данными измерений, выполненных различными диагностическими средствами и построенных на других физических принципах.

Практическая значимость работы

состоит в том, что разработанные принципы построения аппаратуры высокой чувствительности для диагностики электронного и нейтрального компонентов плазмы могут быть использованы для других сферических и обычных токамаков, а также в других плазменных экспериментах (открытые ловушки, сферомаки, пинчи с обращённым полем, стеллараторы и т.д.). Полученные физические результаты имеют практическое значение для разработки методов нагрева и исследования их особенностей и формирования плазмы в установках токамак сферической конфигурации.

Личное участие автора

Все представленные в диссертации результаты получены непосредственно автором или при его активном участии. Лично автором выполнены оценки пределов применимости диагностики лазерной фотоионизации; сформулированы основные требования к лазерной и детекторной аппаратуре; разработана и изготовлена лазерная и детектирующая аппаратура; проведены эксперименты по апробации метода, а также по измерению пространственного распределения атомов водорода в плазме токамака ФТ-1. Автор принимал активное участие в создании концепции комплекса диагностики ТР на токамаке Глобус-М, а также в разработке и изготовлении его компонент. Под руководством автора было подготовлено программное обеспечение для решения широкого круга задач: управление системами диагностики, автоматическая обработка данных эксперимента, создание базы данных томсоновских измерений.

Автор принимал непосредственное участие в подготовке и проведении многочисленных экспериментов на токамаке Глобус-М по исследованию пограничных по плотности режимов как с низкой, так и высокой плотностью, по оптимизации дополнительных методов нагрева. Автор рассчитал распределения скорости генерации убегающих электронов во времени и пространстве, опираясь на данные собственных измерений электронной температуры и плотности. Автором выполнены измерения по исследованию нового метода формирования профиля плотности с помощью плазменной пушки.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработка нового метода диагностики высокотемпературной плазмы, основанного на принципах лазерной фотоионизации атомов из возбужденных состояний. Разработка теоретических принципов лазерной фотоионизации в приложении к диагностике плазмы токамаков;
2. Измерение пространственного распределения локальных значений концентрации водородных атомов на установках токамак с помощью разработанной диагностической системы на основе метода лазерной

фотоионизации с использованием внутрирезонаторного многопроходного зондирования;

3. Разработка диагностической системы томсоновского рассеяния для измерения временной эволюции профилей температуры и концентрации электронов в плазме в импульсно-периодическом режиме в плазме сферического токамака Глобус-М;

4. Систематические (мониторинговые) измерения временных и пространственных распределений температуры и концентрации электронов в различных режимах токамака Глобус-М и создание на их основе базы данных параметров электронного компонента плазмы;

5. Определение области рабочих концентраций плазмы в сферическом токамаке Глобус-М и результаты исследования предельных по плотности режимов сферического токамака Глобус-М;

6. Демонстрация глубокого (за сепаратрису) проникновения высокоскоростной (100 км/с) и плотной (10^{22} м^{-3}) плазменной струи в плазммишень сферического токамака.

Апробация работы и публикации

Результаты, вошедшие в диссертацию, были получены в период 1986 – 2007 гг. и представлялись на 25-и российских и международных совещаниях и конференциях и опубликованы в 14-и статьях в реферируемых журналах. Результаты диссертации неоднократно представлялись на Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, на семинарах лаборатории Физики высокотемпературной плазмы ФТИ им. А.Ф.Иоффе (Санкт-Петербург), представлялись на международных конференциях, на совместных симпозиумах, проводимых Калэмским (Culham) научным центром (Великобритания) и ФТИ им. А.Ф. Иоффе и проводимых Helsinki University of Technology (Финляндия) и ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем работы составляет 176 страниц печатного текста, в том числе: 47 рисунков, 2 таблицы и список литературы, состоящий из 146 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Содержание и выводы работы изложены в 4-х главах и заключении. **Первая глава** содержит материалы, посвящённые разработке физических основ нового метода диагностики нейтрального компонента плазмы токамака, основанного на фотоионизации возбуждённых атомных состояний. В основе разработанного нового метода диагностики плазмы лежит принцип

фотоионизации лазерным излучением возбужденных атомных состояний. Для ионизации атома лазерным излучением не требуется точного совпадения энергии фотона и соответствующего энергетического зазора между уровнями (в данном случае энергии фотона и потенциала ионизации). Необходимым условием ионизации атома, находящегося в возбужденном состоянии с главным квантовым числом i , является превышение энергии фотона излучения лазера над потенциалом ионизации этого уровня. При этом устраняются основные сложности диагностики резонансной флуоресценции, связанные с необходимостью точной частотной настройки лазера. Твердотельный лазер с фиксированной частотой генерации может быть использован для ионизации различных атомных состояний, расположенных выше уровня i . Кроме того, ввиду большого отличия длин волн зондирующего излучения и наблюдаемого свечения существенно упрощается проблема подавления паразитного рассеянного света на длине волны лазера. Изменение населённости уровня i может быть записано как $dn(i) = n(i) (t_i S_{\text{фотоион}} F_{\text{лаз}} / hn_{\text{лаз}}) / (1 + (t_i S_{\text{фотоион}} F_{\text{лаз}} / hn_{\text{лаз}}))$, где $n(i)$ - населённость i -го уровня, $hn_{\text{лаз}}$ - энергия фотона, $S_{\text{фотоион}}$ - сечение фотоионизации, $t(i)$ - время жизни возбужденного уровня $F_{\text{лаз}}$ - плотность мощности лазерного излучения. При $\Phi_{\text{лаз}} > hn_{\text{лаз}} / tS_{\text{фотоион}}$ для плазмы токамака происходит практически полное опустошение уровня что, как было показано для уровня $i=4$, достигается при плотностях мощности лазерного излучения несколько МВт/см². Достижение условий насыщения является существенным требованием, позволяющим устранить многие неопределенности, связанные с неточностью модельных предположений и скоростных коэффициентов в уравнениях баланса населенностей. В этом случае регистрируемое уменьшение интенсивности собственного свечения плазмы соответствует локальной светимости, а измеряемый сигнал пропорционален исходной плотности заселенности i -го уровня. Локальность метода обеспечивается за счет применения традиционной для лазерной диагностики плазмы схемы эксперимента, когда излучение регистрируется из объёма на пересечении оси наблюдения и лазерного пучка. В стационарном приближении населенности основного $n(1)$ и возбужденного $n(i)$ уровней связаны для высокотемпературной плазмы как $n(i) = r_1(i) i^2 n(1)$, где $r_1(i)$ табулированные для широкого диапазона плазмы значения.

Проанализирован нижний предел измеримых атомных концентраций в плазме токамака для метода лазерной фотоионизации, который определяется статистическими флуктуациями сигнала. Кроме того, существенным фактором ограничения чувствительности диагностики являются флуктуации собственного свечения плазмы, обусловленные МГД колебаниями. Рассмотрены применяемые методы для минимизации их вклада, а также предложен другой подход дискриминации МГД-шумов, состоящий в зондировании плазмы лазерным излучением, представляющим собой

множество относительно коротких и мощных импульсов, каждый из которых приводит к насыщению сигнала фотоионизации. Длительность отдельного импульса должна быть в пределах 100-1000 нс, удовлетворяя условию максимальной отстройке частотных полос сигнала и МГД-шума.

Во второй главе приведено описание первых экспериментов по обнаружению эффекта фотоионизации возбуждённых атомов водорода в плазме токамака, когда требовалось надёжно зарегистрировать изменение собственного излучения плазмы под воздействием мощного лазерного импульса, и исследовать зависимость сигнала от мощности источника. Особое внимание уделялось явлению насыщения сигнала при полной фотоионизации возбужденного уровня. Эксперименты проводились на токамаке ФТ-1 ФТИ им.А.Ф.Иоффе. Установка ФТ-1 представляет собой токамак с большим радиусом $R=62,5$ см, малым радиусом камеры 20 см и радиусом диафрагмы, ограничивающей размер плазменного шнура $r=15$ см. В экспериментах показана принципиальная возможность использования диагностики в типичных условиях разряда токамака. Исследован эффект насыщения, проявляющийся в постоянстве амплитуды измеряемого сигнала с ростом плотности мощности зондирования. В условиях насыщения отпадает необходимость калибровки абсолютной интенсивности лазерного источника, что позволяет существенно упростить аппаратную часть диагностики и увеличить точность экспериментальных результатов. Как показали выполненные эксперименты, для надёжных измерений плотности водородных атомов в плазме токамака ФТ-1, значения плотности мощности зондирующего излучения должны быть несколько $\text{МВт}/\text{см}^2$.

Для оптимального выбора лазерного источника в плазменном эксперименте испытывались зондирующие системы на основе рубинового лазера, неодимовых лазеров на алюмо-иттриевом гранате и на силикатном стекле. В этой серии экспериментов впервые удалось продемонстрировать принципиальную возможность применения диагностики лазерной фотоионизации для локальных измерений плотности атомов в плазме токамака. Было показано, что лазер на неодимовом стекле способен обеспечить наибольшую чувствительность и помехоустойчивость диагностики к паразитно-рассеянному излучению. Были выяснены основные способы по увеличению чувствительности разработанного метода с переходом к большей длительности импульса зондирования.

В ходе экспериментов по измерению плотности нейтрального водорода в плазме токамака ФТ-1, чувствительность метода была улучшена за счёт применения внутррезонаторного зондирования плазмы с использованием различных резонаторных конфигураций. Рассматриваются различные осуществленные варианты схем лазерных резонаторов, прошедшие испытания на специальных стендах, включая эксперименты с плазмой токамака, и приводятся их сравнительные характеристики.

В конце главы приведены результаты измерений пространственного распределения возбуждённых атомов в плазме токамака методом лазерной фотоионизации в различных условиях разряда, выполненные впервые в мировой практике. На основании данных измерений проведены расчёты пространственного распределения атомов водорода в основном состоянии в плазме токамака ФТ-1 (Рис.1). Продемонстрирована точность измерений, достаточная для исследования пространственных распределений атомов на других плазменных установках.

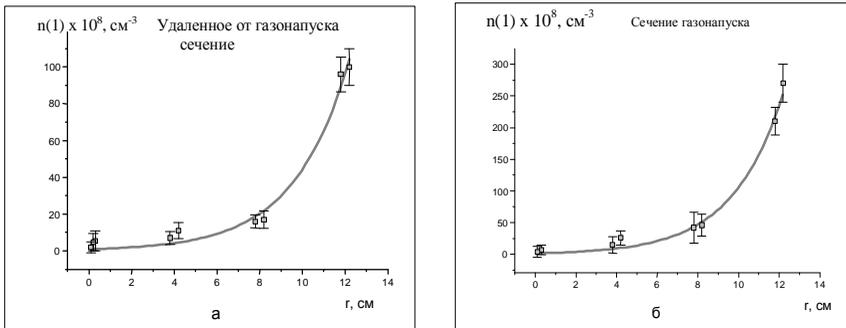


Рис.1. Радиальные распределения плотности атомов в удаленном от газонапуска сечении (а) и в сечении газонапуска (б).

Аналогичные результаты были получены при измерении распределения нейтрального водорода в плазме токамака ФТ-1 в омическом разряде методом резонансной флуоресценции [2]. Качественным же преимуществом новой диагностики по сравнению с флуоресцентной оказалась существенно более простая и надёжная аппаратура, в основе которой лежал лазер на неодимовом стекле с пассивной модуляцией добротности.

Последующие разделы посвящены подготовке и проведению экспериментов по измерению временной эволюции пространственных распределений электронной концентрации и температуры в плазменных разрядах сферического токамака Глобус-М. **Третья глава** включает описание разработанной автором диагностической системы томсоновского рассеяния для токамака Глобус-М. В начале главы изложены основные положения теории томсоновского рассеяния и технические ограничения диагностических систем. Проанализирована чувствительность диагностики, сделан краткий обзор диагностических систем томсоновского рассеяния на сферических токамаках MAST и NSTX [3, 4]. Поставлены задачи и сформулированы требования к системам диагностики томсоновского рассеяния с учётом специфики сферического токамака Глобус-М. Разработаны принципы построения диагностики томсоновского рассеяния на токамаке Глобус-М – проработана архитектура диагностики, сформулированы требования к

диагностической аппаратуре в соответствии с решаемыми задачами исследования плазмы.

Схема размещения диагностического оборудования ТР 1-го этапа (5 пространственных точек), включающей согласующую оптику и спектрометры, а также диагностических и нагревных систем токамака Глобус-М, изображена на Рис.2. Зондирующий лазерный пучок по экваториальной плоскости токамака проходит через патрубки 1 и 2. Измерения производятся с пространственным разрешением ~ 20 мм пространственных точках по большому радиусу тора в средней плоскости токамака в точках с

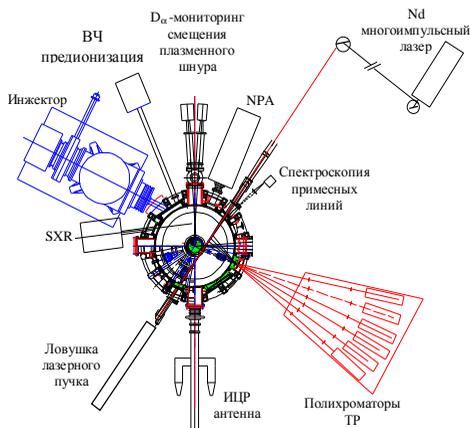


Рис.2. Общий вид расположения диагностики ТР по отношению к другим системам и диагностикам токамака.

несколько джоулей и программно управляемой частотой следования импульсов. Задержка между каждой из пар импульсов выставляется от 0,3 мс и более, обеспечивая произвольное распределение импульсов по времени в течение разряда.

Для сбора рассеянного излучения из ряда точек на отрезке пучка длиной ~ 21 см от внутренней границы плазмы до середины шнура используется диагностическое окно камеры токамака, расположенное на расстоянии ~ 60 см от источника рассеянного излучения.

Требования к спектральным приборам диагностики томсоновского рассеяния чрезвычайно высоки из-за того, что 1) регистрация спектров чрезвычайно малой интенсивности 2) происходит на фоне мощной монохроматической засветки на длине волны лазера. В этой связи для надёжной регистрации сигнала необходимо обеспечить максимальный поток собираемого света. Кроме того, приборы должны иметь чрезвычайно низкую чувствительность на длине волны лазера, т.е. спектрально-селективные

координатами $R=0,176, 0,211, 0,256, 0,306$ и $0,386$ м. Последняя точка лежит снаружи относительно геометрического центра плазменного шнура ($R=0,33-0,35$ м), однако в большинстве разрядов центр магнитной конфигурации оказывается практически в точке измерений $R=0,386$ м из-за шафрановского сдвига магнитной оси разряда.

В рамках создания диагностики был разработан лазер на неодимовом стекле с длиной волны генерации 1,055 мкм, предназначенный для генерации 20 импульсов с энергией

элементы должны обеспечить высокий уровень контраста для подавления паразитно-рассеянного излучения.

При подготовке диагностики были разработаны приборы на основе интерференционных фильтров в силу следующих их преимуществ: высокие значения светосилы и светопропускания, высокий контраст до 10^5 , возможность применения дискретных фотоприёмников, которые способны регистрировать периодические сигналы с частотой следования выше 1 кГц (лавинные фотодиоды), простота и надёжность конструкции.

При формировании спектральной характеристики фильтровых полихроматоров был использован способ разбиения регистрируемого спектра на неравные промежутки, возрастающие от максимума спектра к его крылу. Это позволяет перекрыть широкий диапазон измеряемых температур электронов небольшим числом каналов. При оптимизации спектральных характеристик приборов ширины каналов варьировались таким образом, чтобы получить минимальную ошибку измерения во всём рабочем диапазоне температур. Были отработаны алгоритмы определения температуры и плотности на основе метода наименьших квадратов.

Для калибровки детектирующей аппаратуры был разработан и изготовлен стенд на основе сканирующего полихроматора, обеспечивший возможность проведения оперативных измерений. Это позволило контролировать чувствительность аппаратуры при изменении условий работы – изменении температуры в экспериментальном зале, рабочей переюстировки и пр., с возможностью проверки корректности проведённой операции. Была разработана методика калибровки абсолютной чувствительности аппаратуры на основе рассеяния лазерного излучения на газовой мишени. В силу того, что для экспериментов на токамаке Глобус-М характерен аномально высокий уровень паразитно-рассеянного излучения на длине волны лазера, традиционно используемая калибровка по релеевскому рассеянию невозможна. Единственно возможным методом калибровки в таких сложных условиях было рамановское рассеяние. Несмотря на малое значение сечения рамановского рассеяния, удалось отработать методику калибровки с использованием сдвинутого по длине волны в коротковолновую часть сигнала рассеяния на азоте, попадающего в первый измерительный канал.

В **четвёртой главе** приведены основные данные по исследованию режимов плазмы на токамаке Глобус-М. Исследования плазмы с предельными параметрами и, в первую очередь, разрядов с высокой плотностью, представляют большой интерес для программы термоядерных исследований в связи с тем, что выделяемая энергия D-T синтеза пропорциональна квадрату плотности при постоянной ионной температуре. Для определения области рабочих параметров также необходимо исследование разрядов с низкой плотностью. В таких режимах в силу малой частоты столкновений возникают условия для «убегания» электронов. При определённых условиях ток

убегающих электронов может частично или полностью замещать ток, переносимый тепловыми электронами и вносить заметный негативный вклад в энергобаланс, а также создавать угрозу токамаку при нарушении равновесия и устойчивости. Кроме того, по поведению убегающих электронов можно получить представление о топологии магнитного поля (качестве магнитной ловушки). В этом плане исследование условий генерации убегающих электронов представляет собой важную задачу для изучения физики систем с магнитным удержанием плазмы.

Как показали результаты измерений с применением аппаратуры и методов ТР, диапазон рабочих концентраций (среднее значение) на токамаке Глобус-М лежит в пределах $3 \cdot 10^{18} - 1.2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Как правило, в режимах с высокой плотностью значения электронных температур ниже, чем в режимах с низкой плотностью, однако полное энергосодержание в режимах с высокой плотностью достигает своих максимальных значений.

Согласно результатам измерений, приведённых в диссертации, появление условий для генерации убегающих электронов в разрядах с низкой плотностью не приводит к катастрофическим последствиям на Глобусе-М, как это происходит на токамаках с большим аспектным отношением. При низкой плотности температура плазмы в центре шнура в омическом разряде достигает почти 1 кэВ. Понижение температуры фиксируется лишь на самой периферии шнура, что свидетельствует об умеренном вкладе тока убегающих электронов в энергобаланс. При росте плотности выше $3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ убегающие электроны перестают влиять на энергобаланс плазменного шнура.

В настоящей работе рассмотрение режимов с низкой плотностью ограничено рассмотрением локальных эффектов, связанных с генерацией убегающих электронов. Разумно предположить, что эти эффекты во многом определяются профилями плотности и температуры плазмы, т.к. скорость генерации убегающих электронов имеет сильную экспоненциальную зависимость от критического поля Драйзера E_{cr} , пропорционального отношению $n_e(r)/T_e(r)$. В токамаках с большим аспектным отношением локальные эффекты генерации убегающих электронов определяются параметрами пикированности профилей плотности и температуры, а электрическое поле можно считать слабо меняющимся в пределах плазмы. В таких токамаках генерация убегающих электронов происходит в основном в приосевой области плазмы, что существенно увеличивает их время удержания и, соответственно, набираемую энергию [5]. В сферических токамаках действует сильный фактор неоднородности вихревого электрического поля по большому радиусу ($E(R) \sim R^{-1}$). Так, в геометрии токамака Глобус-М, вихревое электрическое поле меняется в пределах плазмы в $(A+1)/(A-1) \approx 5$ раз (где $A \approx 1,5$ - аспектное отношение). Это смещает зону ускорения электронов к внутренней границе плазмы. Более того, как показали

эксперименты и модельные расчёты по определению $\Gamma(R)$, эффект сохраняется не только при различных соотношениях параметров пикированности профилей плотности и температуры, но и при непараболических профилях, характерных для начальной фазы разряда («провальный» для $T_e(r)$). В сферическом токамаке смещение источника генерации к внутренней границе плазмы, вызванное неоднородностью радиального электрического поля по большому радиусу должно сохраняться и при усреднении движения убегающего электрона вдоль силовой линии. Структура магнитной силовой линии на периферии плазмы в сферическом токамаке сильно отличается от силовой линии на токамаке с большим аспектным отношением - линия делает несколько оборотов вокруг центрального столба на один оборот по внешнему обходу. При этом электрон, двигаясь по сложной траектории, находится большую часть времени в области с максимальной напряжённостью поля. Это должно приводить к тому, что локализация области генерации убегающих электронов будет сохраняться у границы плазменного шнура. В работе модельно исследовался также вопрос о радиальной зависимости скорости генерации при $\alpha_n \geq \alpha_T$, в сферическом токамаке в этом случае скорость генерации $\Gamma(R)$ достигает максимума при $r/a \approx 0,7-0,8$ на периферии шнура, что удовлетворительно совпадает с результатами экспериментов, описанных в данной главе.

Как показали данные томсоновских измерений в омических разрядах при газонапуске со стороны внутренней границы, линейно-усреднённая плотность плазмы приближалась к пределу Гринвальда. Величина объёмно-усреднённой плотности в этих экспериментах достигала $0,9 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, что близко к пределу Мураками. Это позволяет утверждать, что предел по плотности для омических разрядов с использованием газонапуска в сферических токамаках достигнут. Этому способствовала система мер, проводимых при подготовке разрядов. В целом систему таких мер можно назвать разработкой технологии получения разрядов с предельно-высокими плотностями в условиях близко расположенной стенки вакуумной камеры. Напомним, что зазор между плазмой и наружной стенкой вакуумной камеры в Глобус-М не превышает 3-5 см. Измерения высокой концентрации методом ТР позволило обойти сложности измерения концентрации с помощью интерферометра.

В экспериментах по дополнительному нагреву плазмы с помощью пучка нейтральных атомов высокой энергии удалось еще более увеличить плотность плазмы. Увеличение энергии пучка с 24 до 29 кэВ и мощности до 0,6 МВт значительно улучшило эффективность нагрева. Доля мощности нейтральной инжекции, поглощаемой электронами, стала заметной по отношению к омической мощности. Эволюция энергосодержания в электронном компоненте для диапазона плотностей $> 6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ по данным

диагностики Томсоновского рассеяния, приведена на Рис.3, при этом наблюдается эффективное поглощение энергии пучка в соответствии с

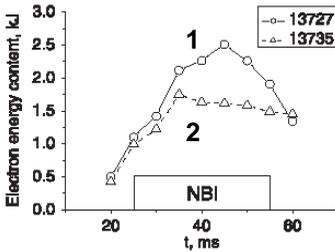


Рис. 3. Эволюция энергосодержания в электронном компоненте.

1- разряд с нейтральной инжекцией, 2- омический разряд.

изменения параметров наиболее заметны в центральной области плазмы. На Рис.4 приведены данные измерений различных диагностик – на верхнем графике представлена эволюция давления электронного компонента ($n_e(R) \cdot T_e(R)$), измеренная диагностикой TP для точек с координатами по большому радиусу $R=0,386$ м и $R=0,211$ м, на среднем – данные микроволнового интерферометра для хорд по большому радиусу плазмы $R=0,42$ м и $R=0,24$ м, и на нижнем – результаты измерений интенсивности мягкого рентгеновского излучения. Как видно, при пилообразных колебаниях происходит сильное изменение профиля давления – на фазе роста интенсивности мягкого рентгена профиль пикируется, в момент сброса – уплощается. Интегральные параметры плазмы при пилообразных колебаниях изменяются незначительно. На основе

расчётом. При уменьшении плотности примерно на 25% эффективность нагрева электронного компонента существенно снижается. Режимы с инжекцией нейтрального пучка в плазму с относительно высокой начальной плотностью сопровождаются дальнейшим ростом плотности до $1,2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-2}$, обеспечивая преодоление предела Гринвальда. При инжекции пучка нейтральных атомов в плазму с умеренной плотностью возможна раскачка релаксационных пилообразных колебаний. Согласно томсоновским измерениям, локальные

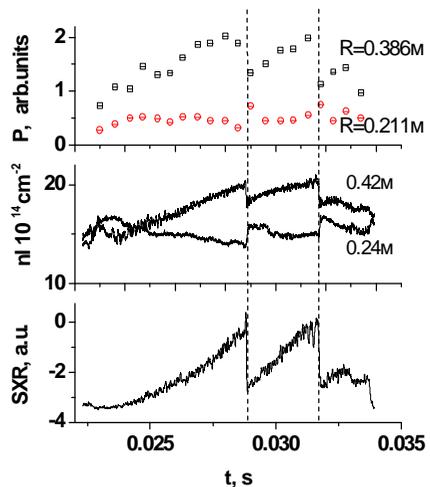


Рис.4. Изменение давления по данным томсоновских измерений для $R=0,386$ и $0,211$ м (вверху), линейно-усреднённой плотности (в середине) по хордам $0,42$ и $0,24$ м, интенсивность SXR (внизу) во время развития пилообразных колебаний.

интерферометрических и томсоновских измерений определена точка переворота фазы пилообразных колебаний по большому радиусу, которая имеет координату $R \approx 0,32$ м, что соответствует радиусу магнитной поверхности $q=1$, $r \approx 0.04$ м, отсчитанному от магнитной оси. Изменение параметров плазмы за пределами $q=1$ незначительны.

В конце главы описаны эксперименты с инъекцией высокоскоростной (100 км/с), плотной (10^{22} м⁻³) плазменной струи в плазму-мишень токамака Глобус-М. Была показана большая эффективность метода по сравнению с обычным газонапуском. Около 50% от полного количества частиц, инжестрированных в плазму токамака Глобус-М, эффективно удерживалось в шнуре. По данным интерферометрических измерений нарастание плотности при инъекции происходило за $\sim 2 - 3$ мс, что заметно меньше времени нарастания плотности при газонапуске $\sim 6 - 10$ мс. Более подробно временная эволюция профилей плотности при инъекции плазменной струи была изучена методом ТР. Проведенные измерения, показали, что уже через 0,3 мс после инъекции струи плотность увеличивалась даже вблизи оси шнура, что позволяет утверждать, что при инъекции плазменной струи профиль концентрации формируется за времена, меньшие характерных времён диффузии частиц с периферии плазмы, а плазменная струя проникает глубоко за сепаратрису.

В **Заключении** изложены основные результаты работы и содержащиеся в ней выводы.

Основные выводы и результаты работы

В представленной к защите работе изложены материалы по разработке современных методов лазерной диагностики плазмы – лазерной фотоионизации и томсоновского рассеяния с использованием мощных твердотельных лазеров.

1. В диссертации изложены результаты разработки принципиально нового, локального диагностического метода, основанного на лазерной фотоионизации атомов из возбужденных состояний. Данный метод обладает существенными преимуществами по сравнению с методом исследования нейтрального компонента плазмы, основанного на резонансном возбуждении атомов, поскольку:

- Отсутствует необходимость точного согласования длин волн лазерного излучения и радиационного перехода,
- Для лазерной фотоионизации можно применять относительно более простые твердотельные лазеры,
- Большая разница длин волн зондирующего и детектируемого излучения позволяет легко решать проблему паразитно-рассеянного света

- Интерпретация сигнала не требует привлечения сложных моделей в широком диапазоне параметров плазмы.
2. Для увеличения чувствительности диагностики были разработаны эффективные лазерные системы зондирования плазмы, основанные на оптимальном сопряжении лазерного резонатора и многопроходной зеркальной системы. Это позволило добиться наибольшей чувствительности в конкретных экспериментальных условиях, что было доказано в измерениях на стенде и в экспериментах на плазме.
 3. Впервые в мировой практике проведены измерения пространственного распределения возбуждённых атомов в плазме методом лазерной фотоионизации. На основании данных измерений проведены расчёты пространственного распределения атомов водорода в основном состоянии в плазме токамака ФТ-1. Продемонстрирована точность измерений, достаточная для исследования пространственных распределений атомов на других плазменных установках.
 4. Разработаны принципы построения диагностики томсоновского рассеяния на токамаке Глобус-М – проработана архитектура диагностики, сформулированы требования к диагностической аппаратуре в соответствии с решаемыми задачами исследования плазмы. Для калибровки абсолютной чувствительности аппаратуры был разработан и изготовлен экспериментальный стенд, разработана методика калибровки. Отработанные принципы построения аппаратуры высокой чувствительности, могут быть использованы в качестве прототипов для других сферических и обычных токамаков, а также в других плазменных экспериментах (открытые ловушки, сферомаки, пинчи с обращенным полем, стеллараторы и т.д.).
 5. При определяющем участии автора создан, отлажен и введён в эксплуатацию комплекс диагностики томсоновского рассеяния на сферическом токамаке Глобус-М, обеспечивающий мониторинг измерения временной эволюции пространственных распределений температуры и плотности электронов. За каждый разряд токамака получают 10-20 профилей $n_e(R)$ и $T_e(R)$. На основании проведённых измерений была сформирована база данных из нескольких тысяч разрядов;
 6. Проведены измерения в режимах с низкой плотностью в разрядах, сопровождающихся генерацией убегающих электронов. Измерения методом Томсоновского рассеяния профилей плотности и температуры позволили локализовать как по времени, так и в пространстве зону максимальной скорости генерации убегающих электронов. Проведённые измерения и моделирование показали, что в отличие от токамаков с большим аспектным отношением, на токамаке Глобус-М зона генерации убегающих электронов локализована ближе к периферии шнура;

7. Измерение плотностей методом ТР составило важную часть методики увеличения плотности плазмы до предельных величин. В результате применения комплексной методики удалось преодолеть предел Гринвальда;
8. Существенной МГД неустойчивостью, возбуждаемой в разрядах с высокой плотностью были пилообразные колебания. С помощью диагностики томсоновского рассеяния удалось отследить эволюцию пространственного распределения давления электронов в процессе развития неустойчивости и оценить радиус переворота фазы «пилы» (ширину зоны магнитной поверхности с $q=1$);
9. Томсоновские измерения временной эволюции плотности и температуры показали, что при применении нагревного пучка атомов с энергией 29 кэВ и мощностью 0,6 МВт происходит эффективный энергоклад в электронный компонент плазмы и предел Гринвальда может быть преодолен.
10. Измерения динамики профилей плотности методом Томсоновского рассеяния во время инъекции высокоионизованной струи водородной плазмы с плотностью $\sim 10^{22} \text{ м}^{-3}$, скоростью $\sim 100 \text{ км/с}$ показали быстрый рост плотности не только на периферии, но и в центральной области плазменного шнура, что свидетельствует о глубоком проникновении струи в плазму токамака.

Список литературы

- [1]- Раздобарин Г.Т., Фоломкин И.П., Диагностика плазмы методом рассеяния света на атомах, ЖТФ, 1979, т.49, в.7, с.1353-1372;
- [2]- Петров Ю.В. Исследование поведения нейтрального водорода в токамаке методом резонансной флуоресценции, диссертация на соиск. уч. ст. канд.ф.-мат. наук, 1990, ФТИ им.А.Ф.Иоффе
- [3]- M.J. Walsh, N.J. Conway, M. Dunstan, M.J. Forrest, R.B. Huxford, Interactive optical and realization of an optimized charge coupled device Thomson scattering system for the spherical tokamak START, , Rev.Sci.Instrum., Vol. 70, 743,(1999);
- [4]- D. Jhonson, N.Bretz, B. LeBlanc, R. Palladino, D. Long and R. Parsells, Multipulse Thomson scattering system for the National Spherical Torus Experiment, , Rev.Sci.Instrum., Vol. 70, 776, (1999);
- [5]- V.K.Gusev, I.N.Chugunov, A.V.Dech et al, Runaway Electrons Acceleration in Globus-M Spherical Tokamak, proc. 29th EPS Conference on Plasma Phys. and Contr. Fusion Montreux, 17-21 June 2002 ECA Vol. 26B, P-4.104 (2002)

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих статьях:

1. Вуль А.Я., Гусев В.К., Минин К.Н., ..., Толстяков С.Ю. и др. Перспективы использования фотодетекторов на основе твердого раствора Ga-As-Sb в лазерной диагностике плазмы //1988 препринт ФТИ 1261 с. 1-15;

2. Вуль А.Я., Вуль С.П.,..., Толстяков С.Ю., Разработка и экспериментальная проверка на токамаке спектрально-селективных Ga-As-Sb фотодетекторов для полихроматора томсоновского рассеяния // Физика плазмы т.18, с.195, 1992;
3. Гладущак В.И., Гусев В.К., Кантор М.Ю., ..., Толстяков С.Ю., Разработка и применение фотоионизационного метода для измерений плотности атомов водорода в плазме токамака // Письма в ЖТФ 1993, т 19, 5 вып 12 с. 18-22;
4. Гусев В.К., Деч А.В., Толстяков С.Ю., Абсолютные измерения радиального распределения плотности нейтрального водорода в плазме токамака ФТ-1 методом лазерной фотоионизации // Письма в ЖТФ 1995, т 21, вып. 18 с. 32-37;
5. Gladuschak V.I., Gusev V.K., ..., Tolstyakov S.Yu. An absolute measurement of the fusion neutral density profile in the tokamak plasma on the principle of laser induced ionization phenomena // Nuclear Fusion vol.35, n.11, 1995 1385-1390;
6. Петров Ю.В., Раздобарин Г.Т., Толстяков С.Ю., Испытание систем внутриврезонаторного многопроходного зондирования для диагностики плазмы токамака методом лазерной фотоионизации // Письма в ЖТФ 1999, т 25, вып. 3, 60-65;
7. Петров Ю.В., Раздобарин Г.Т., Толстяков С.Ю., Применение широкоапертурных резонаторов с малыми дифракционными потерями для диагностики плазмы токамака методом лазерной фотоионизации // ЖТФ, 2000, том 70, выпуск 1, с.27-31;
8. V. V. Bulanin ; I. N. Chugunov ; ... S. Yu Tolstyakov ; et al. The Globus-M diagnostics design, Plasma Devices and Operations, volume 9, issue 1 & 2 2001 , p. 129 – 142;
9. Забродский В.В., Калинина Д.В., Мухин Е.Е., ..., Толстяков С.Ю., Тукачинский А.С., Результаты испытаний кремниевых фотодиодов в диагностических экспериментах по томсоновскому рассеянию на токамаке 'Туман-3М' и в стендовых экспериментах, ЖТФ, том 73, выпуск 8, с.118-122, 2003;
10. Voronin A.V., Gusev V.K., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Abramova K.B., Sklyarova E.M., Tolstyakov S.Yu., High kinetic plasma jet generation and its injection into Globus-M spherical tokamak, Nuclear Fusion, 45, 1039–1045 (2005);
11. Толстяков С.Ю., Гусев В.К., Кочергин М.М., и др., Разработка диагностики томсоновского рассеяния на токамаке Глобус-М //ЖТФ, том 76, выпуск 7с. 27-33, 2006
12. Gusev V.K. , Chernyshev F.V. , Golant V.E. , ... Tolstyakov S.Yu. , et al , Density limits and control in the Globus-M spherical tokamak, Nuclear Fusion, **46** (2006) 1–8;
13. Гусев В.К., Толстяков С.Ю., Варфоломеев В.И., Воронин А.В. и др. Исследование электронного компонента плазмы на сферическом токамаке Глобус-М в условиях предельных плотностей с помощью диагностики томсоновского рассеяния // ВАНТ Серия термоядерный синтез 2007, В.1, с.39-56;
14. Б.Б.Аюшин, А.Г.Барсуков, В.К.Гусев,...С.Ю.Толстяков, и др. «Исследование нагрева плазмы в разрядах с нейтральной инжекцией на сферическом токамаке Глобус-М»// Физика плазмы, т.34, №2, 2008, 99-113.