

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

На правах рукописи

Мухин Евгений Евгеньевич

РАЗРАБОТКА ДИАГНОСТИКИ ДИВЕРТОРНОЙ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА
ИТЭР МЕТОДОМ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЙЯНИЯ

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт Петербург

2007

Работа выполнена в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе
Российской Академии Наук

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Раздобарин Г.Т.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Петров М.П.
кандидат физико-математических наук
Вуколов К.Ю.

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет


Защита состоится “ _____ ” _____ 2007 г. в “ _____ ” часов на заседании
диссертационного совета Д. 002.205.03 при Физико-техническом институте им.
А.Ф. Иоффе по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба
направлять ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан “ _____ ” _____ 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



/А.Л.Орбели/

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Работы по созданию Международного термоядерного экспериментального реактора ИТЭР открывают новый этап исследований в рамках программы управляемого термоядерного синтеза. Успешная реализация этой программы в значительной степени зависит от технических возможностей диагностического комплекса.

При разработке диагностической системы токамака-реактора следует учитывать ряд факторов, действующих на внутрикамерные элементы системы, а именно интенсивный радиационный фон, осаждение распыленных материалов конструкции, а также сильное магнитное поле (~ 5 Тл) сверхпроводящих обмоток. Повышенные требования к оперативности и надежности диагностических комплексов следующего поколения продиктованы необходимостью управлять работой токамака в режиме реального времени.

Диссертация посвящена разработке диагностического комплекса томсоновского рассеяния для измерения электронной температуры и концентрации (T_e , n_e) в диверторной плазме токамака ИТЭР. Электронная температура и концентрация, как наиболее существенные характеристики плазмы, нуждаются в измерениях с высоким пространственным и временным разрешением. Одним из главных предназначений диагностики томсоновского рассеяния является предоставление данных о пространственном распределении электронной температуры и концентрации для управления режимами разряда. Другое функциональное назначение диагностики состоит в сборе информации для анализа физических процессов, и, в конечном итоге, для разработки надежных моделей и кодов управления режимами.

В диагностике томсоновского рассеяния локальность измерений достигается двумя различными способами. В классическом исполнении

рассеянное излучение наблюдается в наборе пространственных точек на пересечении лазерного пучка и набора хорд наблюдения. В другом варианте, известном как диагностика ЛИДАР, используется единственная ось наблюдения, совпадающая с осью зондирования. При этом пространственное разрешение основано на времяпролетном принципе регистрации в соответствии с временной задержкой сигналов рассеяния относительно короткого лазерного импульса. Набор диагностических систем томсоновского рассеяния, предлагаемых для дивертора токамака ИТЭР, представлен обеими схемами.

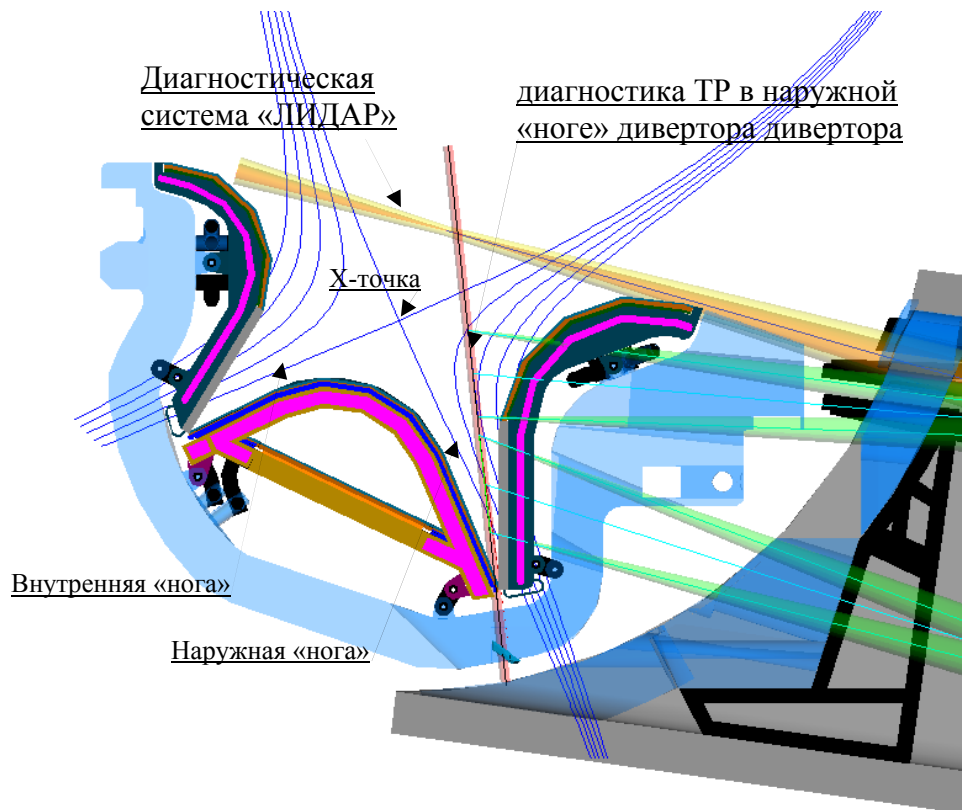


Рис.1 Схема диагностических систем ТР в диверторе токамака ИТЭР.

Целью диссертационной работы является разработка диагностического комплекса для исследования режимов работы дивертора в токамаке–реакторе ИТЭР методом томсоновского рассеяния.

В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие задачи:

1) Анализ различных источников фонового излучения и других факторов

ограничения чувствительности диагностики.

- 2) Выбор параметров диагностической системы и обоснование принципиальной оптической схемы диагностики томсоновского рассеяния диверторной плазмы токамака ИТЭР.
- 3) Обеспечение нейтронной защиты в условиях, когда основной поток нейтронов обусловлен каналами доступа к плазме.
- 4) Разработка принципов построения и создание опытных образцов диагностической аппаратуры для исследования низкотемпературной плазмы дивертора с подавлением мощного монохроматического паразитно-рассеянного излучения на 6 порядков и более.
- 5) Апробация опытных образцов аппаратуры на диагностических стендах.
- 6) Исследование эффективности методов защиты оптических поверхностей от плазменного воздействия, в том числе удаления пылевых частиц и летучих углеводородных молекул направленным потоком газа в вакууме, а также плазменной чистки пленок углеводородных соединений конденсируемых на поверхности из плазмы токамака.

Научная новизна работы:

Исходя из приоритетных задач, стоящих перед диагностикой томсоновского рассеяния в диверторе токамака ИТЭР, выбрана структура диагностического комплекса, представленного классической схемой, а также системой ЛИДАР высокого разрешения с возможностью доступа к различным участкам диверторной плазмы. Выполненные эксперименты по чистке оптических поверхностей в низкотемпературной плазме ЭЦР и ВЧ разрядов, а также опыты на стендах по удалению пыли из диагностического канала потоком газа в вакууме предоставляют важную информацию для разработки методов защиты диагностических зеркал от плазменного напыления в токамаке. Разработанная серия оригинальных дифракционных полихроматоров по принципу вычитания равных и неравных дисперсий для регистрации узких

спектральных контуров, позволяет расширить измеряемый методом томсоновского рассеяния диапазон электронных температур в ранее недоступную область низких значений ~ 1 эВ. Для регистрации спектров рассеяния в диагностике ЛИДАР предложена оригинальная компоновка фильтровых полихроматоров и быстродействующих хронографических камер.

Практическая значимость результатов работы:

- Выполненные проектные разработки, включенные в рабочие документы ИТЭР (N 55 DDD 3 00-10-27 W 0.1), позволяют перейти к очередной стадии конструирования диагностики томсоновского рассеяния.
- В рамках программы исследования плазмы в диверторе ИТЭР разработаны и испытаны опытные образцы оригинальной спектральной аппаратуры.
- Применение хронографической камеры с матричным детектором для лазерной диагностики плазмы методом ЛИДАР, позволяет реализовать высокое пространственное разрешение, а также, при использовании режима счета фотонов, повысить чувствительность диагностики.
- Разработаны эффективные методы защиты оптических поверхностей от осаждения углеводородов из плазмы токамака путем удаления пылевых частиц и летучих углеводородных молекул из диагностического канала направленным потоком газа в вакууме.
- Проведенные исследования взаимодействия низкотемпературной плазмы ЭЦР и ВЧ разрядов с поверхностью дают возможность выработать рекомендации для плазменной чистки оптических поверхностей, напыленных из плазмы токамака.

Личное участие автора:

Все представленные в диссертации результаты получены непосредственно автором или при его активном участии. Лично автором выполнены оценки пределов применимости диагностики томсоновского рассеяния в диверторной области токамака ИТЭР; сформулированы основные требования к лазерной и

детекторной аппаратуре; разработана серия оригинальных дифракционных полихроматоров с вычитанием равных и неравных дисперсий для измерения низких значений электронной температуры ~ 1 эВ; создан экспериментальный стенд по исследованию пространственно-временных характеристик и предельной чувствительности диагностики ЛИДАР с хронографической камерой в экспериментах по релеевскому рассеянию на газе; выполнены разработки эффективных методов защиты оптических поверхностей от плазменного напыления при воздействии защитного газового потока на пылевые частицы и углеводородные молекулы.

Автор принимал непосредственное участие: в нейтронно-физическом анализе диагностического порта дивертора токамака ИТЭР; расчете абберрационных свойств оптических систем и спектральных приборов; экспериментальных исследованиях плазменной очистки образцов, напыленных на стендах и в плазме токамаков Т-10 и Глобус-М.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Обоснование структуры диагностического комплекса для исследования диверторной плазмы токамака ИТЭР методом томсоновского рассеяния по результатам нейтронно-физического анализа, а также габаритных и абберрационных расчетов проекционной оптической системы.
2. Физическое обоснование и выбор рабочих вариантов лазерной и детекторной аппаратуры.
3. Оптические схемы полихроматоров, способных работать с тонкой отстройкой спектральных каналов от фона мощной помехи на лазерной длине волны и рассчитанных на разные диапазоны электронных температур с нижним пределом около 1 эВ.
4. Результаты макетирования и экспериментального исследования опытного образца дифракционного полихроматора на диагностических стендах и в экспериментах на токамаке Глобус-М.
5. Результаты исследований пространственно-временных характеристик и

предельной чувствительности диагностики томсоновского рассеяния методом ЛИДАР в демонстрационных экспериментах по релеевскому рассеянию на газе.

6. Расчетное и экспериментальное обоснование методов защиты оптических поверхностей от плазменного напыления в присутствии направленного потока стороннего газа в вакууме.
7. Результаты выполненных экспериментов по плазменной чистке пленок, напыленных на поверхности зеркал на стендах с низкотемпературной плазмой и в разрядах токамаков Т-10 и Глобус-М.

Апробация работы.

Результаты работы представлялись на международных совещаниях и конференциях:

1. ITER Progress Meeting Feb.27. 1996, Moscow.
2. ITER Progress Meeting, Jan. 1997, Garching.
3. ITER Progress Meeting, 9 Feb., 1998, San Diego.
4. ITER Progress Meeting, Sep. 1998, St. Petersburg.
5. Тезисы докладов седьмой международной конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов, С.-Петербург, 28–31 октября, 2002;
6. 30th EPS Conference, ESA vol.27A, O-1.5A July 2003.
7. ITPA Topical Group Meeting on Diagnostics Sixth Meeting – Part 1, Naka, Japan February 18–21, 2004.
8. Международный Оптический Конгресс “Оптика XXI век” Шестая Международная конференция “Прикладная оптика 2004”, октябрь 2004.
9. ITPA Topical Group Meeting on Diagnostics Seventh Meeting, Hefei, China October 11 – 15, 2004.
10. ITPA Topical Group Meeting on Diagnostics Eight Meeting, Culham, United Kingdom March 14–18, 2005.
11. ITPA Topical Group Meeting on Diagnostics Ninth Meeting, Daejeon, Korea October 10–14, 2005
12. ITPA Topical Group Meeting on Diagnostics Tenth Meeting, Moscow, Russian Federation April 10–14, 2006
13. Meeting on ИТЭР Relevant Diagnostic Developments in Russia Moscow, 10 April 2006
14. ITPA Topical Group Meeting on Diagnostics Eleventh Meeting, Sendai, Japan September 4–8, 2006
15. 21th IAEA Fusion Energy Conference, Chengdu, China, 2006

Публикации. Результаты диссертации представлены в 12 публикациях в реферируемых научных журналах и на 15 международных конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения, содержит 137 страниц, 9 таблиц и 60 рисунков. Список литературы включает 67 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Сложная радиационная обстановка и чрезвычайно ограниченный доступ к плазме в диверторной камере ИТЭР создает немало проблем при реализации диагностики в условиях, не имеющих аналогов на действующих установках токамак. Практическая реализация диагностического комплекса, а также сопутствующие проблемы и пути их преодоления подробно рассмотрены в диссертации. Приведены разработки оригинальной диагностической аппаратуры, обсуждаются результаты макетирования и экспериментальных исследований основных подсистем диагностического комплекса. Диссертация состоит из введения пяти глав и заключения.

Во введении обосновывается актуальность исследования и приводится краткое содержание работы.

В главе 1 дан краткий обзор основных режимов работы дивертора, исходя из главного предназначения диверторной конфигурации уменьшить эффекты и последствия взаимодействия плазмы со стенкой. Основное внимание уделяется специфике диверторной конфигурации в условиях токамака-реактора ИТЭР. Обсуждаются физические основы диагностики томсоновского рассеяния и потребность в ней для сбора данных о пространственном распределении электронной температуры и концентрации для анализа физических процессов, и, в конечном итоге, для разработки надежных моделей и кодов управления режимами.

В главе 2 выбрана структура диагностического комплекса, представленного классической системой томсоновского рассеяния для

наружной «ноги» дивертора, а также системой ЛИДАР высокого разрешения с зондированием плазмы из диверторного порта по большому радиусу на периферии шнура в районе X-точки. Обсуждаются также перспективы применения диагностики Томсоновского рассеяния по схеме ЛИДАР в качестве возможного претендента для измерений во внутренней «ноге» дивертора.

Выполнен нейтронно-физический анализ нижнего порта с диагностическими системами томсоновского рассеяния для дивертора токамака ИТЭР. Показана необходимость установки дополнительной защиты в диверторном порту, в условиях, когда основной поток нейтронов обусловлен диагностическими каналами доступа к плазме.

Разработан вариант дополнительной защиты, обеспечивающий среднее значение плотности полного потока нейтронов $\sim 4 \cdot 10^7 \frac{\text{н}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$ на внутренней поверхности криостата, что приемлемо для доступа персонала в зону криостата спустя 10 дней после остановки реактора. В диверторном порту плотность полного потока нейтронов не превышает $10^{11} \frac{\text{н}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$, что гарантирует безаварийную работу всех без исключения металлических зеркал при полном ресурсе установки с тритиевым циклом $5 \cdot 10^3$ часов.

В **главе 3** представлены результаты разработок аппаратуры диагностического комплекса. Рассмотрены варианты размещения зеркальных систем в диверторном порту для оснащения диагностики томсоновского рассеяния в наружной «ноге» дивертора и диагностики ЛИДАР в районе X-точки, приведены результаты расчета абберрационных искажений изображения лазерного луча в плоскость детектора для каждой из систем.

Доступ лазерного пучка к плазме наружной диверторной «ноги» осуществляется через щелевой зазор между двумя смежными кассетами в основании дивертора. Выбор типа рефлектора в основании дивертора весьма ограничен и определяется лучевой прочностью материала при энергии пучка

1,5 Дж с частотой ~ 20 Гц, а также допустимыми термическими нагрузками и теплопроводностью. В качестве претендентов рассматриваются уголкового отражатель на медных зеркалах либо призма полного внутреннего отражения, изготовленная из стекла КУ-1 или сапфира. Для защиты рефлектора от плазменного напыления предусмотрена возможность напуска газа с целью создания локальной области избыточного давления. Методика защиты противодавлением была проверена в ходе стендовых испытаний. Наблюдение рассеянного в плазме излучения со стороны диверторного порта осуществляется в линейном угле $1/15$ через щелевой зазор между кассетами увеличенный до 20 мм. Изображение лазерного луча шириной 3–5 мм передается в свете рассеянного в плазме излучения на входные торцы волоконных жгутов с числовой апертурой $NA \sim 0,12$.

При этом абберационные искажения в краевых точках, наиболее удаленных от оптической оси, уширяют изображение щели 1 мм не более чем на 20%. Простейший способ передачи изображения волоконного торца через границу вакуума основан на использовании согласующей линзовой оптики.

Доступ к плазме диагностики ЛИДАР предусмотрен через сквозное отверстие 20 x 20 см в верхней части кассеты. Для удобства юстировки в диагностике ЛИДАР обычно используют вариант зеркальной системы предполагающий совместную транспортировку зондирующего пучка и сбор рассеянного излучения. Такая система имеет существенные ограничения, связанные с лазерной прочностью зеркал, главным образом, первого зеркала, подверженного плазменному воздействию. В реализованном варианте схемы первое зеркало имеет сквозное отверстие диаметром ~ 6 см для ввода лазерного пучка. Это означает, что остальные зеркальные поверхности, предназначенные для сбора рассеянного излучения не участвуют в формировании зондирующего пучка.

Собираемое из района X-точки в линейном угле $1/15$ рассеянное излучение передается системой из четырех зеркал в плоскость, совмещенную с вакуумной перегородкой, при масштабном уменьшении в 1,25 раза.

В диагностике ЛИДАР предельная длина хорды зондирования обычно ограничена размером изображения детектора в плазме. При расчете предполагалось, что светочувствительная площадка детектора проецируется в плазму в пятно диаметром около 60мм. В этом случае предельная длина хорды зондирования, ограниченная концевыми потерями света не более 50%, составляет ~ 180 см, что согласуется с поперечными размерами плазмы на входе в дивертор.

Выполнен анализ требований к лазеру для диагностики плазмы в наружной «ноге» дивертора и субнаносекундному лазеру системы ЛИДАР, а также обсуждаются пути их реализации. Требования к лазеру для диагностики плазмы в наружной ноге дивертора в значительной мере определены. Высокий уровень фона собственного излучения диверторной плазмы в видимой области спектра, представленного мультиплетами низко ионизованных примесей и молекулярными полосами, налагает ограничение на выбор длины волны зондирующего излучения. Из возможных вариантов лазера с генерацией в далекой красной и ближней ИК областях спектра предпочтение отдается лазеру на иттрий-алюминиевом гранате (Nd:YAG, $\lambda=1064$ нм), исходя из того, что для этой области спектра характерна высокая квантовая эффективность детекторов (ЛФД), а пропускание прозрачных оптических элементов слабо чувствительно к воздействию радиации. С технологической точки зрения целесообразно применять набор коммерчески доступных лазеров с энергией импульса несколько джоулей, длительностью ~ 10 нс и частотой следования ~ 10 Гц по схеме совмещения пучков. Такая архитектура, традиционная для действующих токамаков, предоставляет максимальные возможности для маневра при выборе режима и сопряжена с наименьшим риском отказа одного из действующих лазеров.

Для диагностики ЛИДАР выбор вариантов лазерной системы, совмещающих требования высокой энергии (несколько джоулей) в частотно-периодическом режиме (не менее 10 Гц), короткой длительности (не более 0,3 нс) и узкой линии генерации (не более 1–2 нм) весьма ограничен. В настоящее время не существует коммерчески доступных лазеров, удовлетворяющих сформулированным требованиям. Лазерный раздел завершает краткий обзор трех альтернативных лазерных систем (Nd:YAG, TiSa и рубиновой), предлагаемых фирмами–изготовителями. Из них по совокупности параметров выделяется лазер Nd:YAG с генерацией на второй гармонике 532 нм, хорошо совместимой с существующими быстродействующими детекторами с микроканальным усилением.

Из лазеров Nd:YAG, работающих с длительностью 0,1–0,2 нс, на сегодняшний день коммерчески доступен лазер серии SL300 с ВРМБ компрессией, энергией в импульсе до 0,5 Дж и частотой 5–10 Гц. В предложенной схеме удалось достичь высокого контраста подавления предимпульса (до пяти порядков на первой гармонике). Для реализации диагностики на токамаке ИТЭР необходим лазер с энергией в несколько раз больше. Принципиальных препятствий для создания такого лазера нет. Сложность его технической реализации несомненно повысит стоимость диагностического проекта. Выбор лазерной длины волны и типа лазера неотделимы от детекторов рассеянного излучения. В детекторном разделе представлен обзор перспективных приемников рассеянного излучения: фотоэлектронных умножителей на микроканальной пластине (МКП ФЭУ) и лавинных фотодиодов (ЛФД). Выполнен сравнительный анализ альтернативных детекторов на основе хронографической камеры, которые, в отличие от МКП ФЭУ, обладают практически неограниченным быстродействием и позволяют простыми средствами реализовать высокое пространственное разрешение диагностики ЛИДАР. Проведены стендовые испытания шумовых характеристик усилителя света с многощелочным

фотокатодом и усилителем на микроканальной пластине. По данным испытаний, обработка матричного изображения в режиме счета фотонов позволяет повысить эффективный квантовый выход фото катода примерно вдвое.

Выбор параметров лазерной и детекторной аппаратуры продиктован требованиями к предельной чувствительности диагностики. Требования, предъявляемые к диагностике в наружной диверторной «ноге» в варианте первая гармоника Nd:YAG лазера, детектор на основе лавинного фотодиода, выполнимы для умеренной энергии зондирования $E=1,5$ Дж позволяющей измерять сигналы рассеяния с относительной ошибкой не более 10% при предельно низкой концентрации электронов 10^{19} м^{-3} . При этом пиковая мощность полезного сигнала рассеяния превышает вклад тормозного излучения на два порядка.

Наибольшую опасность может представлять излучение сильно нагретых диверторных пластин, отраженное от противоположной стенки лайнера. Это излучение может стать приемлемым и сопоставимым с пиковой мощностью сигнала рассеяния при размещении на лайнере ловушки света

Требования, предъявляемые к диагностической системе ЛИДАР в варианте вторая гармоника Nd:YAG лазера, МКП ФЭУ/хронографическая камера, реализуемы при энергии зондирования $E=1,5$ Дж, позволяющей измерять сигналы рассеяния с относительной ошибкой около 10% при низкой концентрации электронов $n_e=10^{19} \text{ м}^{-3}$.

В разделе спектральная аппаратура сформулированы и обоснованы требования к спектральной многоканальности и подавлению паразитно-рассеянного монохроматического излучения в спектральных приборах, предназначенных для регистрации низкотемпературных контуров томсоновского рассеяния вблизи 1 эВ. Физически обоснованы и разработаны принципы построения дифракционных полихроматоров, по схеме вычитания равных или неравных дисперсий. Такие полихроматоры способны работать с

тонкой отстройкой спектральных каналов от фона мощной монохроматической помехи на длине волны лазера. Выполнена разработка опытных образцов полихроматоров, рассчитанных на разные диапазоны электронных температур с нижним пределом около 1 эВ.

В **главе 4** рассмотрены различные методы защиты оптических поверхностей от плазменного напыления и проведен сравнительный анализ их эффективности, в том числе электростатического экранирования пылевых частиц, а также удаления пылевых частиц и углеводородных молекул из диагностического канала направленным потоком газа в вакууме.

Защита оптики от гравитационного осаждения пылевых частиц в форме гранулированной либо хлопьевидной графитовой пыли размером до ~ 1 мм исследовалась на специально изготовленном стенде, моделирующем диагностический канал для ввода лазерного излучения в дивертор. Поток газа $0,3-0,4 \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3}{\text{с}}$, используемый в демонстрационных экспериментах для полного удаления пыли, находится в пределах допустимых значений, предусмотренных проектным заданием для диагностической системы томсоновского рассеяния.

Описаны эксперименты по использованию плазменной чистки для удаления углеводородных пленок с поверхности зеркал, напыленных на стендах с низкотемпературной плазмой и в разрядах токамаков Т-10 и Глобус-М. Различные сценарии плазменной чистки, как следствие различных процессов взаимодействия плазмы с поверхностью, исследовались на стендах с низкотемпературной плазмой ЭЦР и ВЧ разрядов. Экспериментально установлено, что нагрев поверхности в процессе химической эрозии углеводородных покрытий неодинаково эффективен для пленок, полученных осаждением на стендах с низкотемпературной плазмой и в разрядах токамаков Т-10 и Глобус-М.

Обращенная к плазме поверхность зеркала вблизи первой стенки токамака способна накапливать загрязнения сложного химического состава, в которых,

наряду с углеродом, могут присутствовать и другие продукты эрозии первой стенки.

Химическая эрозия таких образцов, при помещении их внутри индуктора и нагреве индукционным током до температуры $\sim 250^\circ\text{C}$, малоэффективна. Существенный эффект чистки (скорость $10\text{--}20 \frac{\text{нм}}{\text{мин}}$) отмечен только при физическом распылении (ионами, ускоренными до энергии $\sim 200 \text{ эВ}$), возникающем при подключении образцов к цепи индуктора.

В **главе 5** приведены результаты макетирования основных подсистем диагностического комплекса. Выполнены эксперименты с опытным образцом спектрометра по наблюдению спектров свечения газоразрядной плазмы и сигналов томсоновского рассеяния на токамаке Глобус-М в присутствии мощной паразитной засветки на длине волны лазера;

В результате макетирования диагностики ЛИДАР высокого разрешения в демонстрационных экспериментах по релеевскому рассеянию на газе нашли решение многие принципиальные вопросы. При соблюдении определенного комплекса требований к диагностической аппаратуре, а именно при использовании субнаносекундного лазера с подавлением предимпульса с помощью дефлектора совместно с быстродействующей хронографической камерой в режиме счета фотонов удалось реализовать высокую чувствительность, высокое пространственное разрешение (несколько см) и эффективную отстройку от близкорасположенного источника паразитного излучения.

Заключение

В представленной к защите работе изложены материалы по разработке диагностического комплекса томсоновского рассеяния для дивертора токамака ИТЭР, в том числе:

- В соответствии с приоритетными направлениями исследования диверторной плазмы выполнен структурный анализ диагностического

комплекса для измерений пространственных распределений электронной температуры и концентрации в наружной ноге дивертора классическим методом Томсоновского рассеяния, а также по большому радиусу на периферии шнура в районе X-точки методом ЛИДАР высокого разрешения.

- В результате нейтронно-физических расчетов сформулированы требования к нейтронной защите в диверторном порту, в условиях, когда основной поток нейтронов обусловлен каналами доступа к плазме.
- Выполнены расчетно-аналитические работы, в том числе габаритный и абберрационный расчеты предлагаемой проекционно-оптической системы, а также расчеты пределов применимости диагностики, исходя из ограничений на светосилу диагностической аппаратуры, с учетом помех от собственного излучения плазмы и теплового излучения, собираемого приемной оптикой.
- Разработана серия оригинальных дифракционных полихроматоров по принципу вычитания равных и неравных дисперсий для регистрации низкотемпературных спектральных контуров, что позволяет расширить диапазон измеряемых электронных температур в ранее недоступную область низких значений ~ 1 эВ в присутствии сильной паразитной монохроматической засветки на длине волны лазера. Опытный образец полихроматора, рассчитанный на измерение электронной температуры 10-500эВ, прошел испытание на диагностических стендах.
- Рассмотрены варианты лазерной системы для диагностики ЛИДАР, совмещающей требование высокой энергии (несколько Дж) в частотно периодическом режиме (не менее 10 Гц), с короткой длительностью (не более 0.3 нс) и узкой линией генерации (не более 1нм). Из рассмотренных вариантов предложено использовать Nd:YAG лазер с генерацией на второй гармонике.
- Для регистрации спектров рассеяния в диагностике ЛИДАР предложена компоновка фильтрового полихроматора и быстродействующей хронографической камеры.

- Предложены эффективные методы защиты оптических поверхностей от осаждения материалов эрозии из плазмы токамака путем удаления пылевых частиц и летучих углеводородных молекул из диагностического канала направленным потоком газа в вакууме. Изготовлен стенд и проведены стендовые испытания предлагаемого метода.
- Для изучения особенностей плазменной чистки образцов, напыленных в плазме токамаков, выбраны две разновидности низкотемпературных разрядов с существенно разными характеристиками – ЭЦР при частоте 2,45 ГГц и ВЧ при частоте 13,6 МГц. Более эффективные процессы взаимодействия плазмы с поверхностью, достигнутые в определенных режимах ВЧ разряда, показали возможность получения высокой скорости удаления пленки до 50 нм в минуту при нагреве зеркала до $\sim 250^{\circ}\text{C}$, и до 20 нм в минуту при физическом распылении.
- Экспериментально установлено, что нагрев зеркала неодинаково эффективен для пленок, полученных в условиях осаждения на стендах с низкотемпературной плазмой и в разрядах токамаков Т-10 и Глобус-М. Для эффективной чистки многокомпонентного конденсата, напыленного в разрядах токамаков, потребовалось участие процессов физического распыления.
- В проведенных испытаниях опытного образца дифракционного спектрометра на токамаке Глобус-М показано, что спектральные каналы дифракционного полихроматора с отстройкой от лазерной длины волны на $\sim 1,7$ нм обеспечивают, по крайней мере, на порядок более высокий уровень режекции паразитного излучения по сравнению с существующими фильтровыми приборами.
- В результате макетирования диагностики ЛИДАР высокого разрешения в демонстрационных экспериментах по релеевскому рассеянию экспериментально доказано, что использование время-анализирующей камеры и лазера с высоким контрастом подавления предымпульса дает

возможность достичь высокого пространственного разрешения (несколько сантиметров) и регистрировать слабый сигнал в непосредственной близости от источника мощной паразитной засветки.

В конце диссертации помещен список литературы и приложение, содержащее обоснование метода защиты оптики от осаждения углеводородных пленок в присутствии направленного потока стороннего газа.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих статьях:

1. Dech A.V., Feldman G.G., Mukhin E.E., et al., Research and design study of a streak-camera for LIDAR Thomson scattering diagnostics. // *Plasma Devices and Operations*, -1994 -V.2 -P.301-310.
2. Razdoharin G.T., Daavittila A., Mukhin E.E., et al. The concept of ИТЭР divertor plasma diagnostics by means of LIDAR technique. // *Diagnostics for Experimental Thermonuclear Fusion Reactors*, Eds. P. E. Stott, G. Gorini, and E. Sindoni, Plenum, New York. -1996. –P.259-261.
3. Гусев В.К., Мухин Е.Е., Раздобарин Г.Т., Толстяков С.Ю. и др., Малогабаритный светосильный спектрометр высокого разрешения с перестраиваемой дисперсией.// *Оптический Журнал* -1997. -Т.64. -№8. - С.49-51 или Gusev V.K., Mukhin E.E., Razdoharin G.T. Tolstyakov, S.Yu., et al., Small fast high-resolution spectrometer with tunable dispersion, *Journal of Optical Technology*. -1997 –V.64 –P.739-741.
4. Razdoharin G.T., Mukhin E.E., *Status of Thomson Scattering Diagnostic Design for ИТЭР-X-Point and Divertor Plasmas.*// *Diagnostics for Experimental Thermonuclear Fusion Reactors 2*. Plenum Press. New York London. -1998 -P.237-246.
5. Razdoharin G.T., Mukhin E.E., Semenov V.V., Objectives and prospects of using Thomson scattering technique to diagnose the divertor of fusion reactor ИТЭР.// *Fusion Technology*. - 1999 - V. 35 – P. 389-92.
6. Koshkin Yu.S., Mukhin E.E., Razdoharin G.T., et al. Low Order Blaze Grating Spectrometer of Large Diffraction Angle. // *Rev.Sci.Instrum*. -1999. -V.70 - P.3844-3846.
7. Kochergin M.M., Mukhin E.E., Razdoharin G.T., et al., Interface for Thomson Scattering Diagnostics in the Divertor and SOL Near the X-Point Plasma of ИТЭР-FEAT.// *Plasma Devices and Operations*. -2003 –V.11 -Issue 1 –P.1-6.
8. Забродский В.В., Мухин Е.Е., Раздобарин Г.Т. и др. Результаты испытаний кремниевых фотодиодов в диагностических экспериментах по томсоновскому рассеянию на токамаке Туман-3М и в стендовых экспериментах. // *ЖТФ*. - 2003. - Т.73. - Вып.8. - С.118-122. или Zabrodsky

- V.V., Mukhin E.E., Razdobarin G.T., et al. Silicon Photodiodes as Thomson Scattering Detectors in Experiments on the Tuman-3M Tokamak and in Bench Experiments. // *Technical Physics*. -2003. -V.48. -Issue 8. -P.1053-1057.
9. Мухин Е.Е., Раздобарин Г.Т., Семенов В.В. и др. Многоканальный дифракционный спектрометр с малым уровнем рассеянного света. // *Оптический журнал*. -2003. -Т.70. -№ 1. -С.54-56 или Mukhin E.E., Razdobarin G.T., Semenov V.V., et al., Multichannel diffraction spectrometer with a low scattered-light level. // *Journal of Optical Technology*. -2003 –V.70 -№1 –P.45-47.
 10. Mukhin E.E., Razdobarin G.T., Semenov V.V., et al. Double-grating polychromator for laser-aided plasma diagnostics. // *Rev.Sci.Instrum*. -2004. - V.75. - Issue 5. - P. 1261-1263.
 11. Мухин Е.Е., Кутеев Б.В., Раздобарин Г.Т. и др. Разработка лазерных методов диагностики плазменного напыления стенок разрядной камеры установок токамак. // *Приборы и техника эксперимента*. -2006. -№2. - С.144-149.
 12. Kochergin M.M., Mukhin E.E., K.A.Podushnikova, et al., Research on mirror cleaning in inductively and capacitively driven radio-frequency discharges. // *Plasma Devices and Operations*. -2006 -V.14 -№2 -P.171-176.