

Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт»
Институт физики токамаков

На правах рукописи

УДК 539.1.08 и 533.9

Вуколов Константин Юрьевич

**РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ОПТИЧЕСКИХ ДИАГНОСТИК В
УСЛОВИЯХ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ИТЭР**

Специальность: 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Москва - 2012

Работа выполнена в Институте физики токамаков Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Москва

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор,
Гурович Борис Аронович

доктор физико-математических наук,
профессор,
Петров Михаил Петрович

доктор физико-математических наук,
профессор,
Савелов Александр Сергеевич

Ведущая организация: ФГУП «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Москва

Защита диссертации состоится “_____” _____ 2013 г. в _____ часов на заседании Диссертационного совета Д 520.009.06 при Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» по адресу: 123182 Москва, площадь Академика Курчатова, д. 1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт»

Автореферат разослан “_____” _____ 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор техн. наук

Мадеев Виктор Георгиевич

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Прогресс в исследованиях плазмы в установках типа токамак позволил приступить к созданию термоядерного реактора на основе токамака. В настоящее время при широком международном сотрудничестве завершается проектирование и начато строительство термоядерного экспериментального реактора ИТЭР. Главная задача проекта ИТЭР – это демонстрация работы энергетического реактора на основе дейтериево-тритиевой (Д-Т) реакции синтеза, а именно, возможности поддержания длительного горения плазмы с десятикратным превышением термоядерной мощности над вкладываемой мощностью нагрева плазмы. Проектная термоядерная мощность ИТЭР составляет 500 МВт, при этом средняя мощность нейтронной нагрузки на первую стенку оказывается на уровне $0,5 \text{ МВт/м}^2$. Для управления работой ИТЭР и проведения физических исследований необходим эффективный диагностический комплекс, обеспечивающий проведение измерений параметров плазмы при воздействии нейтронных и гамма потоков высокого уровня, тепловых нагрузок и бомбардировки входных элементов диагностики частицами из плазмы. В этих условиях надежность диагностических элементов во многом определяется их радиационной стойкостью.

Диссертация посвящена разработке оптических диагностик плазмы ИТЭР и экспериментальному исследованию радиационной стойкости оптических компонент диагностик в условиях характерных для ИТЭР. Сложность проблемы обусловлена тем, что в настоящее время нет стационарных источников термоядерных нейтронов для адекватного моделирования радиационной обстановки в ИТЭР. Поэтому экспериментальные исследования свойств и выбор материалов для термоядерного реактора вынужденно решаются с использованием различных источников радиационных излучений (плазменные установки, ядерные реакторы, гамма и нейтронные источники), параметры которых отличаются как по мощности, так и по энергетическому спектру от радиационных характеристик ИТЭР. В работе предложены научно-технические решения по обеспечению радиационной стойкости элементов и разработке оптических диагностик плазмы ИТЭР. В рамках работы был внесен существенный вклад в радиационное материаловедение и развитие элементной базы радиационно-стойкой аппаратуры для термоядерной энергетики.

Актуальность работы

Специфика построения диагностического комплекса ИТЭР обусловлена тем, что условия в экспериментальном термоядерном реакторе будут в значительной степени отличаться от условий эксплуатации диагностик в действующих плазменных установках. Используемые в настоящее время физические основы диагностики, как правило, могут быть применены и для ИТЭР, но для работы в радиационных условиях ИТЭР аппаратура должна отвечать значительно более жестким требованиям, что вызывает необходимость применения новых принципов и методов физических измерений при создании диагностик плазмы в ИТЭР. Эта ситуация связана с ростом мощности радиационных нагрузок и большой длительностью плазменного разряда, который может составлять около 1000 секунд. Защиту элементов конструкций ИТЭР от нейтронного излучения и нагрева будет обеспечивать бланкет. Кроме того, внутри диагностических патрубков предусматривается размещение защитных пробок (порт-плаггов), представляющих собой стальные блоки с водяным охлаждением, в которых будут сделаны каналы для доступа диагностик к плазме. В частности, оптические элементы, передающие излучение из плазмы к детекторам, будут расположены в вакуумном объеме внутри лабиринта в порт-плагах, что обуславливает потребность в большом количестве размещенных внутри вакуумного объема (внутрикамерных) элементов диагностики.

Внутрикамерные элементы диагностики должны выдерживать долговременное воздействие потоков частиц и излучения из термоядерной плазмы, а также факторов, сопровождающих эксплуатацию установки, таких как высокое, до 5 Тл, магнитное поле, периодический прогрев камеры до $240 \text{ }^\circ\text{C}$, наличие взрывоопасной пыли и других. При номинальной термоядерной мощности 500 МВт плотность потока нейтронов на первую

стенку ИТЭР будет составлять около 10^{14} н/см²с. При этом интегральная нейтронная нагрузка даже на первую стенку за 10 лет эксплуатации установки ИТЭР в Д-Т режиме будет относительно невелика, примерно 10^{21} н/см². Однако для детекторов и элементов, расположенных вблизи первой стенки, радиационные нагрузки могут оказаться на критическом уровне для их функционального назначения. В частности, при таких нагрузках будет происходить накопление радиационных дефектов в оптических элементах (вакуумные окна и линзы, оптоволокно), приводящее к деградации пропускания.

Взаимодействие нейтронов с веществом приводит к возникновению ядерных реакций и ионизации вещества, что вызывает вторичное гамма излучение и нагрев вещества. Основные потери энергии нейтронов (замедление) обусловлены процессами упругого и неупругого рассеяния на ядрах атомов, что также дает вклад в нагрев. Для охлаждения конструкций будет применяться водяное охлаждение с температурой воды на входе в систему 70 °С, а на выходе из системы охлаждения в Д-Т режиме до 150 °С.

Другой опасный фактор для элементов диагностик – это возможность трансмутации в материалах, то есть изменения их изотопного состава в результате ядерных реакций. Следствием этого может стать изменение электрических свойств проводников и диэлектриков. В результате таких превращений могут деградировать характеристики детекторов и возникать объемные изменения в структуре вещества, например, в результате гелиевого блистеринга. Еще одним следствием трансмутации в материалах является активация вещества из-за накопления радиоактивных изотопов. Активация материалов может внести значительные трудности в эксплуатацию установки, в частности, усложнить доступ персонала к элементам диагностики. Следует упомянуть и о радиационно-стимулированной диффузии, которая может изменять состав вещества в тонком поверхностном слое, привести к диффузионной сварке контактирующих элементов и вызвать выход из строя коммутационных элементов. Из сказанного выше следует, что обеспечение радиационной стойкости внутрикамерных элементов является одной из наиболее актуальных задач при создании диагностического комплекса ИТЭР, так как ее решение непосредственно связано с надежностью диагностик и безопасностью эксплуатации установки.

По проекту ИТЭР Российская Федерация разрабатывает 9 диагностических систем для исследования термоядерной плазмы. Четыре из них относятся к оптическим и спектроскопическим диагностикам – это спектроскопия водородных линий, активная спектроскопия, томсоновское рассеяние и лазерная флуоресценция в диверторе. Для этих диагностик проблемы обеспечения долговременной работоспособности внутрикамерных элементов оказываются наиболее сложными. Именно для оптических диагностик наряду с нейтронным облучением и сопутствующим нагревом существенна еще и так называемая проблема «первого зеркала», обусловленная большой вероятностью деградации обращенных к плазме оптических элементов под действием физического распыления и (или) переосаждения материалов конструкционных элементов, осаждения пыли, воздействия химически активных радикалов и ряда других факторов.

Для разработки и создания на ИТЭР надежных и эффективных диагностик требуется выполнить широкую программу научных исследований. Исследования радиационной стойкости элементов оптических и спектральных диагностик плазмы ИТЭР являются важной составляющей частью этих работ. Радиационная стойкость оптических элементов, в ее широком понимании как устойчивость к воздействию различных видов излучения плазмы и корпускулярных потоков, имеет первостепенную значимость для обеспечения безопасной и долговременной работы диагностического комплекса ИТЭР, что и обуславливает актуальность данной работы.

Давая общую характеристику работы, следует подчеркнуть актуальность применения развитого направления исследований для обеспечения надежной, долговременной работы оптических диагностик в ИТЭР. Предлагаемые методы и решения опробованы на прототипах в процессе испытаний как на установках токамак, так и в специальных

лабораторных условиях на стендах. Отраженная в диссертации деятельность находится в полном соответствии с планами работ в обеспечение материального вклада Российской Федерации в международный проект ИТЭР.

Цели диссертационной работы

Основным направлением диссертационной работы является разработка оптических диагностик плазмы, которые долговременно сохраняют работоспособность в радиационных условиях ИТЭР. Для выполнения работы были определены следующие цели:

1. Получение предварительной информации о радиационной стойкости оптических материалов из литературы, анализ факторов риска при воздействии термоядерной плазмы на оптические материалы и выявление критических элементов оптических диагностик плазмы. Разработка требований к расчетам для определения радиационной обстановки при проектировании оптических диагностик в ИТЭР на основе численного моделирования Д-Т плазмы как источника нейтронов.
2. Исследования радиационной стойкости оптического стекла в ядерных установках в условиях, моделирующих радиационные нагрузки от Д-Т плазмы в ИТЭР.
3. Выбор радиационно-стойких материалов для оптических элементов диагностических систем (вакуумные окна, линзы, зеркала) на основе результатов радиационных испытаний и анализа условий воздействия плазмы в ИТЭР.
4. Исследования взаимодействия плазма-стенка с целью предотвращения деградации поверхности диагностических зеркал. Экспериментальное моделирование условий работы «первого зеркала» в токамаке, а также с помощью плазмы магнетронного разряда.
5. Разработка способов и методов защиты оптических элементов от воздействия радиационных излучений и потоков частиц из плазмы, включая методы восстановления характеристик оптических элементов диагностик плазмы в процессе их эксплуатации в ИТЭР.
6. Разработка и создание прототипов элементов для оптических диагностик плазмы в ИТЭР на основе радиационно-стойких материалов с требуемыми свойствами.

Научная новизна

1. Впервые выполнены сравнительные радиационные испытания различных марок оптического стекла в условиях, моделирующих обстановку в ИТЭР, которые показали, что кварцевое стекло КУ-1 является лучшим материалом для вакуумных оптических окон в видимой области.
2. На импульсном ядерном реакторе впервые в мире непосредственно в процессе нейтронного облучения измерены интенсивности радиолюминесценции кварцевого стекла КУ-1 и КС-4В. Показано, что в ИТЭР радиолюминесценция в вакуумных окнах из этого стекла будет значительно ниже интенсивности тормозного излучения – одного из основных каналов фонового излучения из плазмы ИТЭР.
3. В экспериментах на токамаке Т-10 впервые исследована деградация металлических зеркал в результате длительного воздействия плазмы и факторов, сопровождающих эксплуатацию установки токамак. Показано, что основной проблемой является осаждение углеводородных пленок, искажающее спектры отражения зеркал.
4. Разработан и успешно испытан в лабораторных условиях оригинальный метод дистанционной очистки зеркал импульсным излучением эксимерного лазера.
5. Впервые в плазменной магнетронной установке выполнены исследования скорости роста углеводородных пленок на поверхности металлических зеркал в зависимости от их температуры. Показана возможность предотвращения осаждения углеводородных пленок за счет нагрева зеркал.
6. Разработан новый способ стабилизации характеристик металлических зеркал в процессе физического распыления под действием атомов перезарядки из плазмы. Эффект достигается за счет применения зеркал, изготовленных из однородного наноструктурного материала. Впервые созданы полноразмерные прототипы зеркал из монокристаллов молибдена и зеркала на основе магнетронного напыления наноструктурных родиевых и

молибденовых покрытий. Для этих зеркал экспериментально продемонстрированы высокое оптическое качество и устойчивость к распылению потоками частиц из плазмы.

7. Обнаружен новый эффект, заключающийся в явлении низкоэнергичного блистеринга под бомбардировкой молибденовых зеркалах ионами дейтерия с энергией до 300 эВ. Необходимым условием формирования этого типа блистеров является наличие пленки на поверхности зеркала. Явление обусловлено радиационно-стимулированной диффузией атомарного водорода.

Практическое значение работы

1. На основе результатов радиационных испытаний выбраны радиационно-стойкие материалы для вакуумных окон и пропускающей оптики диагностик плазмы в ИТЭР.
2. Получены и систематизированы экспериментальные данные об изменении оптических свойств кварцевых стекол КУ-1, КС-4В и фторалюминатных стекол под действием радиационных излучений.
3. Разработан метод восстановления пропускания облученного кварцевого стекла КУ-1 на основе термического отжига радиационных дефектов в вакууме при температурах 400 – 800 °С в зависимости от степени радиационных повреждений.
4. Созданы зеркала из монокристаллов молибдена, устойчивые к распылению, и диэлектрические зеркала с коэффициентами отражения близкими к 100% во всей видимой области спектра. Эти зеркала успешно прошли испытания в условиях, моделирующих радиационную обстановку под действием термоядерной плазмы, что позволяет рекомендовать их для использования в системах сбора излучения для оптических диагностик в ИТЭР.
5. Для оптических диагностик плазмы предложен комплекс мер по обеспечению их работоспособности в условиях ИТЭР, основанный на совместном применении пассивных и активных способов защиты оптических элементов таких как: малый входной зрачок; сменные модули зеркальной оптики; нагрев зеркал; лазерные и плазменные методы очистки зеркал.
6. Разработан, создан и используется на токамаке Т-10 прототип оптической системы сбора излучения для спектроскопии водородных линий в ИТЭР – эндоскоп с внутрикамерным металлическим зеркалом. Диагностика на основе эндоскопа эффективно применяется для исследования плазмы в Т-10 и выполнения работ по государственным контрактам.
7. В экспериментах на установках с магнетронным плазменным осаждением и на Т-10 накоплена обширная информация о процессах роста углеводородных пленок, их структуре и свойствах в зависимости от параметров плазмы.
8. Полученные в диссертации данные используются в качестве исходной информации в ходе разработки оптических диагностик плазмы в ИТЭР.
9. В процессе выполнения диссертационной работы накоплена обширная база данных о радиационно-стимулированных процессах в оптических материалах, которая может быть использована при разработке аппаратуры и оборудования как для будущих термоядерных, так и для традиционных ядерных реакторов и плазменных установок.

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие во всех экспериментальных работах, результаты которых лежат в основе диссертации. Он работал в качестве ведущего экспериментатора на токамаке Т-10, руководил экспериментами на ядерных установках ИР-8 и БАРС. Автор лично участвовал в создании оптических диагностик плазмы на токамаках Т-10 и Т-15, впервые разработал и применил на практике методику исследований воздействия плазмы на диагностические зеркала, провел первые измерения деградации оптических характеристик зеркал в результате их длительного экспонирования внутри вакуумной камеры Т-10. Автор принимал активное участие в международном сотрудничестве по разработке оптических диагностик плазмы для ИТЭР, организации проведения совместных экспериментов и теоретической интерпретации их результатов.

Достоверность результатов исследований базируется на их повторяемости в серии экспериментов, а также на подтверждении впервые полученных автором результатов данными последующих исследований в странах-участницах проекта ИТЭР. Методы и решения, предлагаемые для обеспечения радиационной стойкости элементов оптических и спектральных диагностик плазмы ИТЭР, апробированы на прототипах при испытаниях как на установках токамак, так и в лабораторных условиях. Результаты работ опубликованы в ведущих научных журналах, они докладывались и прошли апробацию на всероссийских и международных семинарах, совещаниях и конференциях по физике и диагностике высокотемпературной плазмы.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Определены требования к расчетам радиационной обстановки в ИТЭР на основе численного моделирования термоядерной плазмы как нейтронного источника. Для концептуального варианта размещения в ИТЭР оптических диагностик плазмы рассчитаны радиационные потоки и тепловыделение в оптических элементах. На основе расчетов выявлены критические элементы.
2. На ядерных установках исследованы и определены факторы, влияющие на радиационную стойкость оптического стекла в условиях, моделирующих радиационные нагрузки от Д-Т плазмы. На основе анализа воздействия радиации из плазмы ИТЭР на пропускающие оптические элементы и результатов радиационных тестов кварцевое стекло КУ-1 признано лучшим материалом в мире для этих элементов.
3. Показано, что воздействие плазмы на диагностические зеркала в токамаке приводит к деградации их оптических характеристик в результате эрозии поверхности или осаждения пленок в зависимости от режимов плазмы и расположения зеркал. Выявлена связь свойств осажденных из плазмы пленок, скорости их роста с параметрами пристеночной плазмы.
4. Предложена и реализована методика испытаний металлических зеркал в плазменной магнетронной установке, которая позволяет эффективно исследовать процессы взаимодействия плазма-стенка в условиях подобных ИТЭР.
5. Впервые созданы и испытаны методы защиты оптических элементов диагностик от воздействия радиационных излучений и потоков частиц из плазмы, включая методы восстановления характеристик оптических элементов в процессе их эксплуатации в ИТЭР.
6. Выявлены причины эрозии металлических зеркал под действием термоядерной плазмы, что позволило сформулировать требования к материалам зеркал для увеличения времени их жизни в условиях ИТЭР. В результате проделанной работы предложено использовать материалы с однородной на нанометровом уровне структурой, что приведет к стабилизации оптических характеристик зеркал в процессе распыления атомами перезарядки из пристеночной плазмы.
7. Разработаны и созданы прототипы радиационно-стойких элементов оптических диагностик плазмы в ИТЭР на основе материалов с требуемыми свойствами.

Связь с государственными планами НИОКР

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом научно-технических работ, проводимых в Институте физики токамаков НИЦ “Курчатовский институт”, в соответствии с Федеральным законом «О ратификации Соглашения о создании Международной организации ИТЭР по термоядерной энергии для совместной реализации проекта ИТЭР и Соглашения о привилегиях и иммунитетах Международной организации ИТЭР по термоядерной энергии для совместной реализации проекта ИТЭР» от 19 июля 2007 года № 143-ФЗ. Первоначально работы выполнялись в соответствии с Федеральной целевой программой “Международный термоядерный реактор ИТЭР” на 2002-2005 гг. (Постановление Правительства РФ № 604 от 21.08.2001) и Федеральной целевой программой “Международный термоядерный реактор ИТЭР и НИОКР в его поддержку” на 1996-1998 гг. (Постановление Правительства РФ № 1119 от 19.09.1996).

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинарах ИЯС и ИФТ НИЦ "Курчатовский институт", Всероссийских совещаниях по диагностике высокотемпературной плазмы (Санкт-Петербург в 1993, 1997 гг., Троицк в 2003, 2006 гг., Звенигород в 2007, 2010, 2011, 2012 гг.); Звенигородских конференциях по физике плазмы и УТС (2009, 2010, 2011 гг.), а также на Международных ИГРА Совещаниях по диагностике ИТЭР (2000-2012 гг.); Европейских конференциях по физике плазмы (Россия, Санкт-Петербург, 2003 г., Великобритания, Лондон 2004 г., Испания, Тарагонна 2005 г., Италия, Рим 2006 г.); Международных симпозиумах по термоядерным технологиям – SOFT) (Финляндия, Хельсинки 2002 г., Италия, Венеция 2004 г., Германия, Росток 2008 г., Португалия, Порто 2010 г., Бельгия, Льеж 2012); Международных конференциях по «Диагностике термоядерной плазмы» в Италии, Варенна в 2001 и 2007 г.г. За комплекс работ по разработке диагностического оборудования для спектроскопии водородных линий ИТЭР и исследования прототипа оптической системы на токамаке Т-10 коллективу исследователей, включая автора диссертации, присуждена премия им. И.В. Курчатова в области инженерных и технологических разработок в 2006 г.

Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 35 печатных работах, из которых 32 работы представлены в ведущих зарубежных и отечественных журналах из списка ВАК, а остальные опубликованы в трудах международных конференций.

Объём и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем работы составляет 213 страниц, включая 73 рисунка, 11 таблиц и список литературы из 76 наименований.

II. СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во Введении обосновывается актуальность диссертации, формулируются цели исследований, даётся аннотация диссертационной работы по главам. Приводится общая характеристика результатов работы. Подчеркивается эффективность развитого направления работ как для обеспечения радиационной стойкости оптических элементов диагностик ИТЭР, так и для накопления фундаментальных знаний о радиационно-стимулированных процессах в оптических материалах в зависимости от параметров термоядерной плазмы.

Раскрываются практическая ценность работы и научная новизна, указываются положения, выносимые на защиту. Отмечаются специфические проблемы радиационной стойкости применительно к оптическим диагностикам плазмы ИТЭР. Первая из них – это выбор материала (стекла) для вакуумных окон, линз и оптоволокон, сохраняющего пропускание под действием радиационных нагрузок от Д-Т плазмы и обладающего малой радиолуминесценцией. Эта проблема может быть решена на основе результатов радиационных испытаний существующих стекол и развития технологий производства стекла с улучшенной радиационной стойкостью. Вторая – это проблема «первого зеркала», наиболее актуальная проблема для всех оптических диагностик плазмы ИТЭР.

Кроме того, во введении дан литературный обзор проблематики. Проведен анализ состояния работ по радиационной стойкости оптических материалов. Целенаправленные эксперименты по выбору материалов для оптических вакуумных окон термоядерного реактора и по изучению влияния гамма и нейтронного облучения на свойства стекла были начаты еще в 80-х годах прошлого столетия. Эти исследования основывались на опыте, полученном ранее в ядерных реакторах и в других источниках радиационных излучений. Рассмотрены работы, постановка задачи в которых опиралась на первый вариант проекта ИТЭР 1998 года. В этих работах, в частности, представлены экспериментальные данные для большинства существующих типов стекол и прозрачных минералов по приведенному оптическому поглощению и люминесценции под действием радиационных излучений.

Сделан вывод, что эти данные носят разрозненный характер и получены в условиях слабо соотносящихся с радиационной обстановкой в современном проекте ИТЭР.

Кратко описана проблема «первого зеркала», суть которой заключается в том, что в результате воздействия плазмы и ряда факторов, сопровождающих эксплуатацию установки токамак (прогрев камеры, очистка стенки плазменными разрядами и др.) в зависимости от места размещения зеркал происходит или эрозия поверхности или осаждение загрязнений. При расположении зеркала в области первой стенки может происходить эрозия поверхности за счет ее распыления ионами и атомами перезарядки. Так как большинство зеркал будут заглублены относительно первой стенки в диагностических каналах, то осаждение загрязнений (для ИТЭР – углеродные пленки с содержанием бериллия и водорода) является наиболее вероятной причиной выхода диагностики из строя. Рост пленок на поверхности приведет к снижению коэффициентов отражения зеркал или интерференционному искажению спектра отраженного излучения в результате формирования полупрозрачных пленок. Реальная ситуация будет определяться такими параметрами плазмы как температура, плотность и ширина пристеночного слоя плазмы (SOL). Исследования влияния параметров плазмы на время жизни зеркал в условиях ИТЭР, а также способов защиты диагностических зеркал и методов восстановления их характеристик потребовались в связи с постановкой задач по разработке и созданию оптических диагностик ИТЭР.

В Главе 1 рассматриваются состав и принципы построения оптических диагностик в ИТЭР. Обсуждаются проблемы, возникающие при разработке надежных и безопасных в эксплуатации оптических диагностик плазмы. На основе результатов моделирования плазмы с помощью 5-ти зонного нейтронного источника с использованием MCNP кода и модели ИТЭР определяется радиационная обстановка в местах расположения оптических элементов и проводится анализ критических элементов диагностик плазмы ИТЭР с точки зрения их радиационной стойкости. Сформулированы основные направления программы работ по разработке радиационно-стойких элементов оптических диагностик ИТЭР и возможные пути реализации этой программы.

В разделе 1.1 представлено введение в проблематику, а в разделе 1.2 рассмотрены состав и принципы реализации оптических диагностик ИТЭР на примере двух систем, разрабатываемых в Российской Федерации: спектроскопии водородных линий (СВЛ), которую еще называют Н-альфа диагностика, и активной спектроскопии (или CXRS диагностика – Charge Exchange Recombination Spectroscopy). Н-альфа диагностика плазмы основана на регистрации линий бальмеровской серии водорода в видимой области спектра. В ИТЭР с ее помощью решается ряд важных задач, а именно: мониторинг временного хода интенсивности линий плазмы (это необходимо для определения момента L-N перехода и дифференциации типов ELMов), измерение потоков водорода со стенки по яркости линий (получение информации о рециклинге водорода), а также изотопного состава на границе плазмы (соотношение содержания трития, дейтерия и водорода). Кроме того, на эту диагностику возлагаются задачи по мониторингу линий примесей в плазме (например, бериллия). В условиях ИТЭР для организации этих измерений, большая часть которых является рутинными на действующих токамаках, приходится решать серьезные проблемы, часть из которых связана с высоким уровнем излучений и потоков из плазмы. В ИТЭР имеется целый ряд факторов, затрудняющих применение Н-альфа диагностики: очень высокая яркость излучения водорода в диверторной плазме, которое переотражается от стенок камеры и приходит на детекторы основной плазмы; наличие высокого магнитного поля, вызывающее зеэмановское расщепление линий; доплеровское уширение линий водорода, превышающее изотопное смещение. Для целей СВЛ предлагается использовать несколько оптических каналов для доступа к плазме. Для всех каналов используются лабиринт в нейтронной защите и оптическая схема на базе зеркального эндоскопа.

Активная спектроскопия основана на регистрации излучения возбужденных атомов (ионов), возникших за счет перезарядки ионов плазмы на диагностическом пучке атомов водорода с энергией 100 кэВ. Эта диагностика предназначена для измерения профиля ионной

температуры по малому радиусу, скорости вращения плазмы и концентрации ионов легких примесей (He, Be, C). Локальные значения плотности примесей можно вычислить по известным сечениям перезарядки в возбужденное состояние ионов (ядер) примесей на атомах пучка, зная плотность атомов пучка и измеряя потоки излучения возбужденных атомов. Плотность атомов пучка определяется этой же диагностической системой по свечению атомов пучка за счет возбуждения при столкновениях с заряженными частицами плазмы. Температура может быть определена по доплеровскому уширению линий излучения примесей. Оптическая схема активной спектроскопии разработана с учетом необходимости собирать излучение из нескольких пространственных точек вдоль диагностического пучка, поэтому первое зеркало собирающего свет объектива имеет большую угловую апертуру.

С точки зрения нейтронного анализа обе диагностики (СВЛ и CXRS) похожи. Они включают в себя протяженные полости, образованные перископическими каналами в нейтронной защите. Такая компоновка является типичной для большинства оптических диагностик ИТЭР. Состав используемых внутри вакуумной камеры оптических элементов для этих диагностик также практически одинаков: зеркальные объективы, плоские зеркала для передачи излучения по лабиринту в нейтронной защите, а также промежуточные линзы и оптические окна на выходе из вакуумной камеры. За первым вакуумным окном на выходе из порт-плаги для передачи излучения к детекторам может быть использован оптоволоконный коллектор (предлагается для CXRS). В тоже время оптические системы диагностик различаются: для СВЛ выбран эндоскоп с малым входным зрачком, а для активной спектроскопии используется зеркальный объектив с протяженным полем зрения и большой угловой апертурой. Первое зеркало СВЛ может быть заглублено внутри патрубка и за счет этого защищено от потоков атомов из плазмы. В CXRS диагностике первое зеркало открыто потокам нейтральных частиц из плазмы. Сравнение результатов нейтронных расчетов для этих систем дает возможность определить характерную радиационную обстановку в местах расположения оптических элементов диагностик ИТЭР.

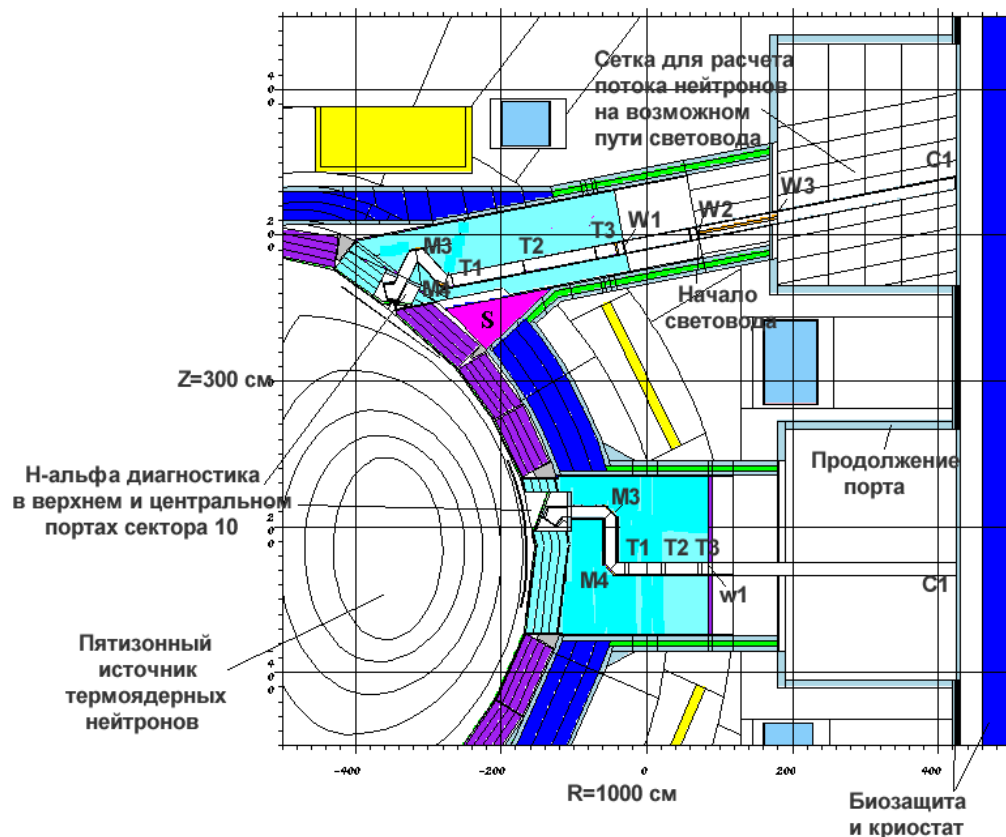


Рисунок 1. Общий вид модели Н-альфа диагностики в ИТЭР

Раздел 1.3 посвящен определению радиационной обстановки в местах расположения оптических элементов СВЛ и CXRS диагностик, а также тепловыделения в диагностических элементах. Вкладом автора была постановка задач нейтронных расчетов для оптических диагностик в ИТЭР и формулировка начальных условий для расчетов. Полученные данные нужны для обоснованного выбора материалов диагностических элементов (зеркала, окна, линзы) и уточнения условий радиационных испытаний (поток частиц и спектральный состав излучений). Анализ результатов расчетов позволил сделать предварительные выводы о возможности соблюдения требований по безопасной эксплуатации установки ИТЭР, выявить места, где необходимо усилить нейтронную защиту или изменить конструкцию диагностик. Расчеты транспорта нейтронов проводились методом Монте-Карло с помощью программы MCNP-4A с поточечной библиотекой FENDL-1 и сделаны для типового Д-Т режима ИТЭР (500 МВт термоядерной мощности). Для моделирования нейтронных потоков из плазмы применялся метод поверхностных источников, представленных пятью концентрическими зонами. При этом 50% мощности сконцентрировано в центральной зоне, а в периферийной зоне - 5%. Для решения задачи переноса ядерных излучений в среде с большим ослаблением потоков использовался метод создания промежуточных источников нейтронного излучения по мере ослабления потока. Для задания конструкции диагностик применялась 3-D модель реактора ИТЭР с сектором в 20° в тороидальном направлении с плоскостью симметрии, проходящей по центру патрубков. На рисунке 1 показана модель диагностики, использованная для первых нейтронных расчетов. Позиции, для которых сделаны расчеты, обозначены так: M3 и M4 – диэлектрические зеркала; W1 – базовая позиция вакуумного окна; W2, W3 – альтернативные позиции окна; T1, T2, T3 – промежуточные точки вдоль канала; C1 – точка на стенке криостата. Два зеркала (M1 и M2) объектива, размещенного на входе в оптический канал здесь не показаны.

В концептуальной конструкции ИТЭР, для которой проведено математическое моделирование, еще не был проработан ряд деталей конструкции порт-плагов и бланкетного защитного модуля (BSM), включая материальный состав защиты. Для преодоления этих проблем был сделан ряд предположений. Положено, что BSM имеет по массе состав: 80% нержавеющая сталь и 20% вода, диаметр оптических каналов в нейтронной защите равен 160 мм, M1 и M2 молибденовые зеркала, M3 и M4 диэлектрические зеркала на кварцевой подложке, W1 и W2 – окна из кварцевого стекла.

В результате моделирования радиационной обстановки были получены плотности потоков и спектры для нейтронов и гамма частиц в указанных на рисунке 1 позициях. Анализ результатов показал, что уровень радиационных нагрузок не противоречит требованиям общей безопасности. Другой важный вывод – серьезные радиационные нагрузки будут испытывать только элементы, расположенные внутри вакуумной камеры и, особенно, вблизи первой стенки. По мере удаления от плазмы поток нейтронов эффективно ослабляется защитой, и уже после первого поворота перископического канала можно рассматривать возможность использования пропускающей оптики. На конце порт-плага в месте размещения оптических окон флюенс нейтронов с энергией больше 0,1 МэВ спадает до $\sim 10^{15} \text{ см}^{-2}$ за 10 лет эксплуатации установки ИТЭР в Д-Т режиме при работе на 500 МВт термоядерной мощности. При уменьшении мощности пропорционально уменьшаются и потоки радиации. Энерговыведение в элементах диагностики также быстро уменьшается по мере удаления от плазмы. Например, энерговыведение в первом зеркале будет составлять 2–3 Вт/см³, а в зеркалах после поворота перископического канала – 10–30 мВт/см³.

В разделе 1.4 проанализированы проблемы, возникающие при разработке оптических диагностик ИТЭР с точки зрения радиационной стойкости. Сформулированы основные направления программы работ по созданию радиационно-стойких элементов оптических диагностик ИТЭР и возможные пути их реализации. Первым направлением работ является проведение радиационных испытаний для выбора материалов и типов элементов оптических диагностик в условиях максимально приближенных к обстановке в ИТЭР. Второе направление программы – это разработка методов повышения радиационной стойкости,

включая создание новых материалов с улучшенными характеристиками, а также мер и способов защиты оптических элементов от радиационного воздействия. Третье направление – это исследование возможностей и разработка методов восстановления характеристик элементов диагностик непосредственно в процессе их эксплуатации в ИТЭР.

По первому направлению работ обсуждаются возможности для воспроизведения в радиационных тестах основных характеристик радиационной обстановки ИТЭР, а именно: 1) поглощенной дозы и флюенса излучения, 2) плотности потока излучения, 3) соотношение типов воздействующего излучения (в ИТЭР – потоков нейтронов и гамма частиц), 4) энергетических спектров излучения, 5) температуры элементов в процессе облучения. Кратко рассматриваются аспекты взаимодействия нейтронов и гамма излучения с оптическими материалами, и обсуждается описание результатов взаимодействия. Так ионизация вещества в процессе гамма облучения приводит к образованию электронно-дырочных пар в оптическом стекле. В результате последующего захвата электронов или дырок в потенциальных энергетических «ямах», образованных структурными или примесными дефектами материала, появляются радиационные центры окраски (РЦО), что приводит к постепенной потере пропускания стекла с ростом поглощенной дозы. Число образующихся электронно-дырочных пар не всегда пропорционально поглощенной энергии (дозе), их количество зависит от энергии и типа облучения. При облучении постоянно происходит не только образование, но и рекомбинация электронно-дырочных пар (отжиг дефектов), причем интенсивность процесса отжига зависит от мощности дозы и температуры вещества. Подчеркивается важный для радиационных тестов факт, что потери энергии нейтронов на ионизацию вещества (их вклад в поглощенную дозу) значительно меньше, чем у гамма частиц.

Радиационные эффекты при облучении нейтронами удобнее описывать с помощью флюенса - числа частиц, прошедших через единицу площади за время облучения (например, нейтрон/см²). Флюенс определяет вклад нейтронов в радиационные повреждения за счет взаимодействия с ядрами вещества (упругое потенциальное рассеяние и ядерные реакции различных типов, включая неупругое рассеяние). В результате этих процессов, в частности, возникает вторичное гамма излучение, а также происходят атомные смещения, то есть образуются точечные дефекты структуры (вакансии и междоузельные атомы), которые служат ловушками для свободных носителей заряда в диэлектриках. В оптическом стекле этот процесс является одним из каналов образования РЦО. Численной характеристикой воздействия нейтронов на вещество служит среднее число смещений из своего положения, приходящееся на атом вещества при набранном флюенсе нейтронов. В результате облучения термоядерными (14 МэВ) нейтронами одно смещение происходит при достижении флюенса примерно 10^{21} нейтронов через см² (другими словами, это флюенс, соответствующий одному смещению на атом).

Из данных расчетов (раздел 1.3) найдены характерные значения радиационной обстановки в местах размещения элементов оптических диагностик, а именно:

- 1) на первом зеркале плотность потока нейтронов с энергией больше 0,1 МэВ $\Phi_{>0,1}$ не превышает $6 \cdot 10^{13}$ н/(см²с);
- 2) на вторичных зеркалах характерные значения $\Phi_{>0,1}$ составляют от $2 \cdot 10^{11}$ до $1 \cdot 10^{12}$ н/(см²с),
- 3) для вакуумного окна значения $\Phi_{>0,1}$ варьируются от $2 \cdot 10^7$ до $4 \cdot 10^8$ н/(см²с).

Сделана оценка флюенсов нейтронов с энергией больше 0,1 МэВ ($\Phi_{>0,1}$) за 10 лет эксплуатации установки ИТЭР в Д-Т режиме, считая, что длительность каждого импульса ИТЭР составляет 1000 с при 1000 импульсов установки в год:

- 1) для первого зеркала $\Phi_{>0,1} = 6 \cdot 10^{20}$ н/см²; 2) для вторичных зеркал - 10^{19} н/см²; 3) для оптических окон - $4 \cdot 10^{15}$ н/см². Отмечено, что в ИТЭР флюенс будет набираться постепенно от импульса к импульсу. В перерывах между ними может происходить частичная релаксация материала (отжиг радиационных повреждений).

Обсуждаются возможности для воспроизведения радиационной обстановки ИТЭР на существующих радиационных источниках. Сделан вывод, что на практике приходится использовать все возможные варианты:

- Co^{60} гамма источники для первичного выбора материалов, определения общей ситуации и исследования физических эффектов непосредственно в процессе облучения;
- ядерные реакторы для углубленных тестов и окончательного выбора материалов;
- ускорители электронов для измерения в процессе облучения зависимости наведенного оптического поглощения от дозы облучения;
- Д-Т источники нейтронов при проведении *in situ* измерений для критичных прототипов.

Анализ полученных результатов сделан в выводах к Главе 1. Важным итогом является то, что серьезные радиационные нагрузки будут испытывать только диагностические элементы, расположенные внутри вакуумной камеры и, особенно, вблизи первой стенки. По мере удаления от плазмы поток нейтронов в порт-плаге эффективно ослабляется защитой. Практически важно, что уже после первого поворота перископического канала можно рассматривать возможность использования пропускающей оптики. На конце порт-плаги в месте размещения оптических окон флюенс нейтронов с энергией больше 0,1 МэВ спадает до $\sim 10^{15} \text{ см}^{-2}$ за 10 лет эксплуатации установки ИТЭР в Д-Т режиме. Выбор материалов и типов оптических элементов и меры по их защите предлагается делать на основе разработанной программы по обеспечению радиационной стойкости.

Глава 2 посвящена циклу экспериментов на ядерных установках по изучению радиационной стойкости стекол с целью выбора материала для элементов оптических диагностик. Приводятся результаты исследования физических явлений, происходящих в стекле под действием различного типа излучений: наведенное оптическое поглощение, радио- и фотолюминесценция. Предлагаются и обосновываются способы устранения радиационных дефектов для восстановления первоначальных свойств кварцевого стекла с помощью термического отжига.

В разделе 2.1 изложена история исследований по радиационной стойкости стекла. Подчеркивается роль проекта ИТЭР, который дал мощный импульс изучению радиационной стойкости оптических материалов.

Раздел 2.2 посвящен свойствам основных типов оптических стекол и методике радиационных испытаний стекла в условиях, моделирующих обстановку в ИТЭР. Даются определения и вводятся основные формулы для описания эффекта потерь света в стекле в результате радиационного облучения, который принято называть наведенным оптическим поглощением (НОП). Мерой эффекта НОП на длине волны λ является изменение показателя поглощения δA стекла в результате радиационного облучения. Расчеты показателя поглощения ведутся по формуле: $A_\lambda = (D_\lambda - D_p) / H$, где D_λ - оптическая плотность, H - толщина образца, в см, D_p - поправка на отражение, которая определялась по таблицам из ГОСТ 15130-86, приложение 3. Оптическая плотность рассчитывается на основании измерений пропускания τ_λ образцов стекла по формуле: $D_\lambda = -\lg(I / I_0) = -\lg \tau_\lambda$, где I - интенсивность прошедшего света, I_0 - интенсивность падающего света.

Причиной поглощения света являются центры окраски, которые имеются в стекле. Их образуют дефекты структуры материала и примеси. В процессе радиационного облучения на этих центрах возникают дополнительные ловушки света. Для радиационной стойкости стекла большое значение имеет исходные химическая чистота и минимальное количество дефектов структуры. В качестве стекла для вакуумных окон в плазменных установках используется, как правило, наиболее распространенный его тип - кварцевое стекло. Результаты литературного анализа показали, что для выбора материала вакуумных окон и других внутрикамерных оптических элементов ИТЭР можно использовать синтетический и плавленый кварц. К последнему типу относятся такие марки стекла как КУ-1, корнинг 7940, КСГ, супразил I. Эти стекла отличаются низкой концентрацией металлических примесей, но значительное содержание гидроксильных групп (до 1000 ppm) и примесей хлора (до 100

ppm), что обусловлено технологией производства из SiCl_4 в водородно-кислородном пламени. Наиболее химически чистым является синтетический кварц (корнинг 7943, супразил IR, КС-4В), который получают электроплавлением синтетического кремнезема высокой чистоты. Например, особо чистое кварцевое стекло КС-4В содержит примесей хлора около 20 ppm и групп ОН менее 0,1 ppm. Изучались образцы кварца обоих типов, а именно: плавленный кварц КУ-1 производства Завода кварцевого стекла в г. Гусь-Хрустальный и синтетическое кварцевое стекло КС-4В, изготовленное фирмой «ИРУВИСИЛ» по технологии, Института химии силикатов, г. С.-Петербург.

Во второй части раздела 2.2 описана методика радиационных испытаний стекла в условиях, моделирующих обстановку в ИТЭР. В экспериментах изучались образцы плавного кварца КУ-1 из стекла высшей категории 01 по показателю поглощения, более чем двадцати различных плавок, а также образцы синтетического кварцевого стекла КС-4В. Образцы стекла для испытаний изготавливались в виде цилиндров с полированными торцами диаметром около 16 мм и толщиной от 10 мм до 0,6 мм. Полировка торцов осуществлялась не хуже чем по 14 классу. Пропускание образцов измерялось при комнатной температуре на спектрофотометрах СФ-46 в диапазоне длин волн от 190 до 800 нм или «Hitachi» в диапазоне от 190 до 2500 нм. После облучения в ядерном реакторе измерения пропускания проводились только спустя 3-12 дней из-за активации контейнера с образцами. После гамма облучения спектры измерялись через минимально возможный промежуток времени от 10 минут до 1 часа, а спустя сутки измерения повторялись.

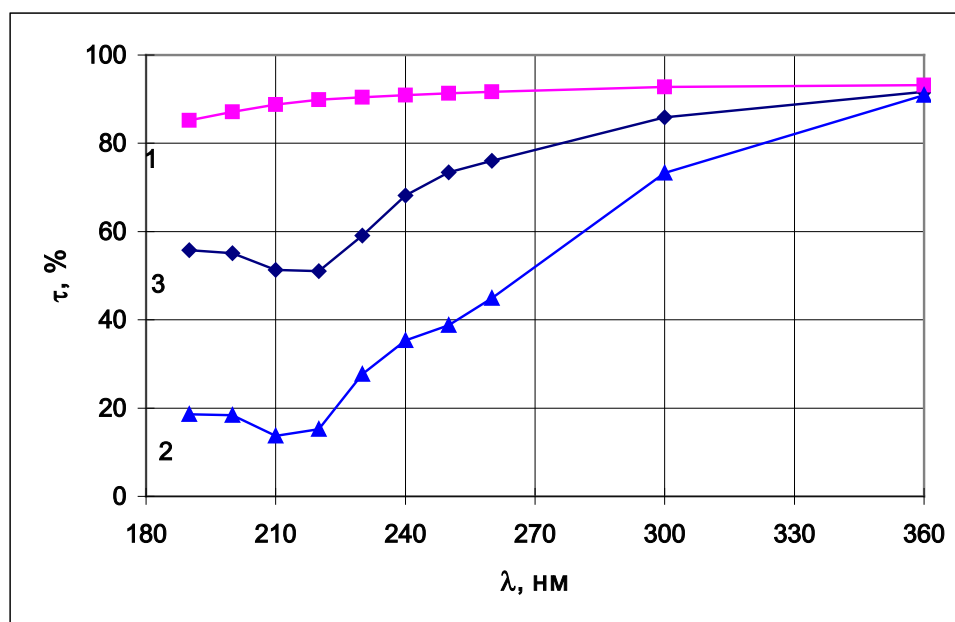
Для облучения стекол в НИЦ «Курчатовский Институт» использовались гамма-источник Co^{60} и водо-водяной ядерный реактор ИР-8. Радиолюминесценция в стеклах изучалась на импульсном ядерном реакторе «БАРС». Исследования НОП проводились в нескольких циклах экспериментов, начиная с больших уровней радиационных нагрузок с переходом к более низким уровням облучения для приближения к условиям для оптических окон в ИТЭР. Облучение на ИР-8 выполнялось в заполненном водой вертикальном канале на уровне центра активной зоны. Температура воды в канале в процессе облучения находилась в диапазоне от 20 °С до 55 °С в зависимости от мощности реактора. В герметичном алюминиевом контейнере одновременно облучалось до 10 образцов стекла. Гамма облучение выполнялось на установке ГУТ-200М внутри кольцевого цилиндрического кобальтового источника при мощности дозы около 4 Гр/с (все дозовые значения для кварцевых стекол здесь, и далее приводятся в пересчете на кремний). Температура образцов во время облучения составляла около 40 °С, кроме эксперимента, когда образцы облучались в термостате при 200 °С. Дозиметрические измерения в ГУТ-200М проводились с помощью стеклянных дозиметров СГД-8. Для определения флюенса быстрых нейтронов при облучении в ядерном реакторе ИР-8 в контейнеры с образцами устанавливались детекторы сопровождения – нейтронно-активационные фольги из железа, обогащенного по изотопу Fe^{54} до 99,6%. Доза гамма-излучения D_γ рассчитывалась на основе предварительно измеренного на малой мощности реактора (110 кВт) отношения D_γ к флюенсу нейтронов $\Phi_{>3}$, считая, что это отношение сохраняется с ростом мощности реактора. Экспериментальные ошибки определения радиационных параметров не превышали 20%.

В разделе 2.3 представлены результаты радиационных испытаний кварцевых стекол в ядерном реакторе и на Co^{60} гамма источнике. Эксперименты были начаты на максимальной мощности 4,5 МВт реактора ИР-8, где первый контейнер с образцами облучался до флюенса $\Phi_{>0,1} = 6 \cdot 10^{19}$ н/см² (поглощенная доза 3 ГГр с учетом 10% вклада от нейтронов). Затем на той же мощности был облучен второй контейнер с образцами до $\Phi_{>0,1} = 6 \cdot 10^{18}$ н/см² (поглощенная доза примерно 300 МГр). В обоих случаях в результате облучения в видимой и ИК области спектра пропускание у образцов стекла практически не изменилось, появилась только слабая полоса поглощения с максимумом на длине волны $\lambda = 620$ нм. Таким образом, уже в первом цикле экспериментов было показано, что кварцевое стекло КУ-1 является радиационно-стойким в видимой и ИК областях спектра и может быть использовано как

материал диагностических окон. Отсутствие в ИК и видимой области разницы спектров у образцов, облученных до флюенсов $6 \cdot 10^{19}$ и $6 \cdot 10^{18}$ н/см² объясняется тем, что уже при облучении до $\Phi_{>0,1} \sim 10^{18}$ н/см² наступает «насыщение» кинетики РЦО. При дальнейшем увеличении флюенса изменения количества ловушек света не происходит. С практической точки зрения этот факт позволяет рассчитывать на успешное применение линз из КУ-1 в диагностических каналах ИТЭР после первого колена перископа. Другой важный результат – это катастрофическое падение пропускания при $\lambda < 350$ нм. Например, на $\lambda = 300$ нм изменение показателя поглощения δA в результате облучения до $\Phi_{>0,1} = 6 \cdot 10^{18}$ н/см² превысило 3 см^{-1} , а для излучения с длиной волны меньше 260 нм образцы толщиной 10 мм стали полностью непрозрачными для измерений.

На следующем этапе работ выполнено изучение зависимостей НОП от мощности дозы, плотности потока нейтронов и температуры. Образцы КУ-1 были облучены при трех разных мощностях реактора ИР-8. В процессе непрерывного облучения на каждой мощности реактора был набран флюенс нейтронов $\Phi_{>0,1} \sim 10^{17}$ н/см². По-прежнему, позитивным результатом оказывается то, что в видимой области изменений пропускания не происходит, кроме появления слабой полосы поглощения на $\lambda = 620$ нм. В ней коэффициент пропускания образцов толщиной 8 мм из разных плавок уменьшился на (3–8)% после облучения на мощности 45 кВт, где эффект проявился в наибольшей степени. В УФ области, прозрачность стекла КУ-1 резко упала. Обнаружена зависимость НОП от индивидуальных характеристик образцов из разных плавок стекла (наличия примесей и степени дефектности). Для стекла КУ-1 показано, что уровень потока нейтронов и мощности дозы гаммы излучения влияют на НОП. Эффект проявляется в УФ области спектра. Например, на $\lambda = 215$ нм величины δA отличаются на 3 см^{-1} при стократном различии в интенсивности (n- γ)-облучения. Деградация пропускания ниже при более высоком уровне потока нейтронов и мощности дозы гаммы излучения. По-видимому, этот результат обусловлен более интенсивным отжигом РЦО в процессе облучения на высокой мощности.

Несколько важных результатов было получено в гамма источнике. Вывод о преобладающем влиянии облучения нейтронами на деградацию пропускания стекла сделан из результатов облучения образца КУ-1 (рисунок 2) до поглощенной дозы $D_\gamma \sim 3$ МГр в ядерном реакторе ИР-8 и в гамма установке ГУТ-200М.



1 – исходный спектр стекла КУ-1 и спектр восстановленный после термического отжига; 2 – спектр после облучения в активной зоне реактора до $\Phi_{>0,1} \sim 10^{17}$ н/см² и $D_\gamma \sim 3$ МГр; 3 – спектр после γ -облучения до 3 МГр на установке Co^{60}

Рисунок 2. Спектры пропускания $\tau(\lambda)$ образца КУ-1 толщиной 0,85 мм в УФ области

Экспериментально показано, что увеличение температуры стекла КУ-1 в процессе облучения приводит к снижению эффекта НОП. После облучения в гамма источнике образца КУ-1 при температуре 200 °С его пропускание оказалось в несколько раз выше чем после облучения при 40°С. На рисунке 3 показаны спектры пропускания образца КУ-1 толщиной 3,65 мм после гамма облучения до дозы $D_\gamma = 2$ МГр при 200 °С и при 40 °С.

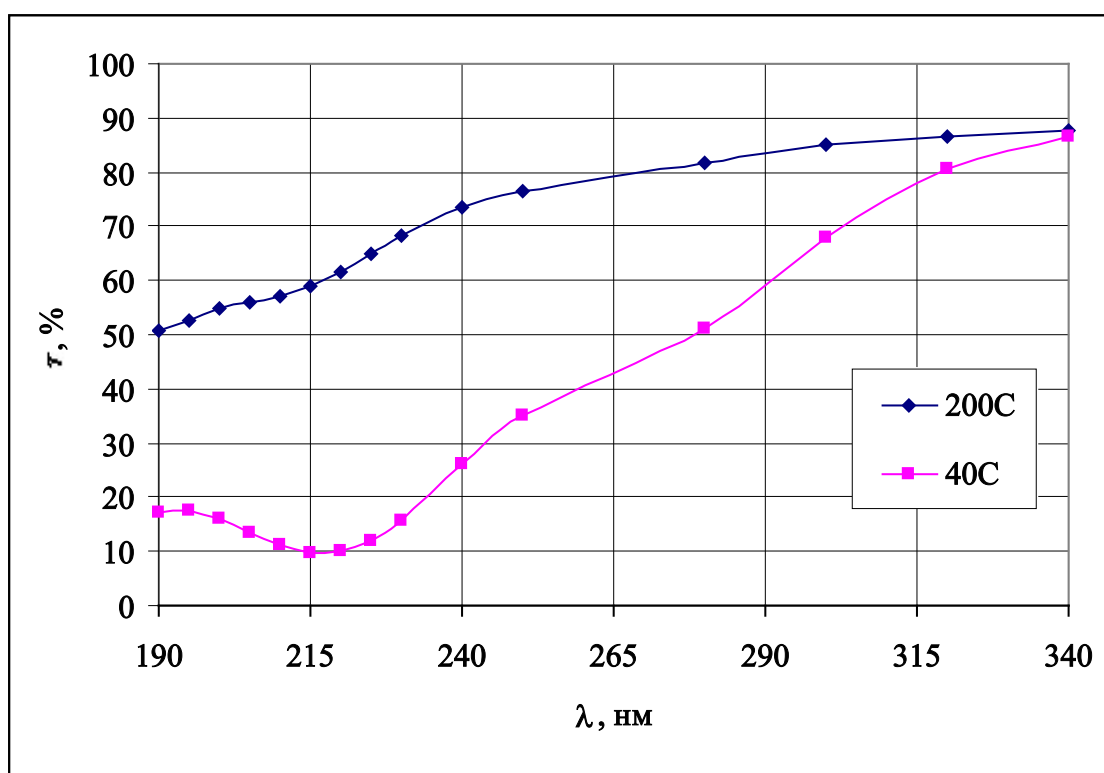


Рисунок 3. Спектры пропускания $\tau(\lambda)$ образца КУ-1 толщиной 3,65 мм после гамма облучения до дозы $D_\gamma = 2$ МГр при 200 °С и при 40 °С

Испытания в гамма источнике образцов КС-4В, взятых из блоков стекла разных плавок, показали, что после облучения от 1 до 3000 кГр радиационная стойкость этого стекла в УФ области лучше, чем у стекла КУ-1. Отмечено, что спектры облученных стекол КС-4В сильно различаются для образцов из разных плавок. Для лучшего стекла КС-4В разница показателей поглощения со стеклом КУ-1 достигает 10 и более раз на $\lambda=215$ нм. С другой стороны при малых дозах облучения (~1 кГр) выявлено наличие для большинства плавок стекла КС-4В короткоживущей составляющей НОП в УФ и видимой области спектра. Только у одного образца компонента НОП через 10-15 минут после облучения не зарегистрирована. Обнаружена аномальная зависимость эффекта НОП от температуры. У стекла одной из плавок КС-4В показатель поглощения при повышении температуры не падает, как у КУ-1, а увеличивается. В стекле КС-4В из другой плавки уменьшение НОП при нагреве происходит не во всей области спектра. Таким образом, если для стекла КУ-1 в условиях эксплуатации ИТЭР при температуре 100-150 °С следует ожидать снижения НОП по сравнению с облучением в ядерном реакторе, то для стекла КС-4В этого не будет. Сделан вывод, что для использования в ИТЭР стекло КС-4В требует технологической доработки.

Следующий эксперимент посвящен реакторному облучению стекла КУ-1 и КС-4В в условиях, сопоставимых с условиями для вакуумных окон в ИТЭР. Спектры пропускания образцов стекол КС-4В и КУ-1 толщиной 1 см до и после облучения в ядерном реакторе до флюенса $\Phi_{>0,1}=3 \cdot 10^{16}$ н/см² и $D_\gamma \approx 1$ МГр представлены на рисунке 4.

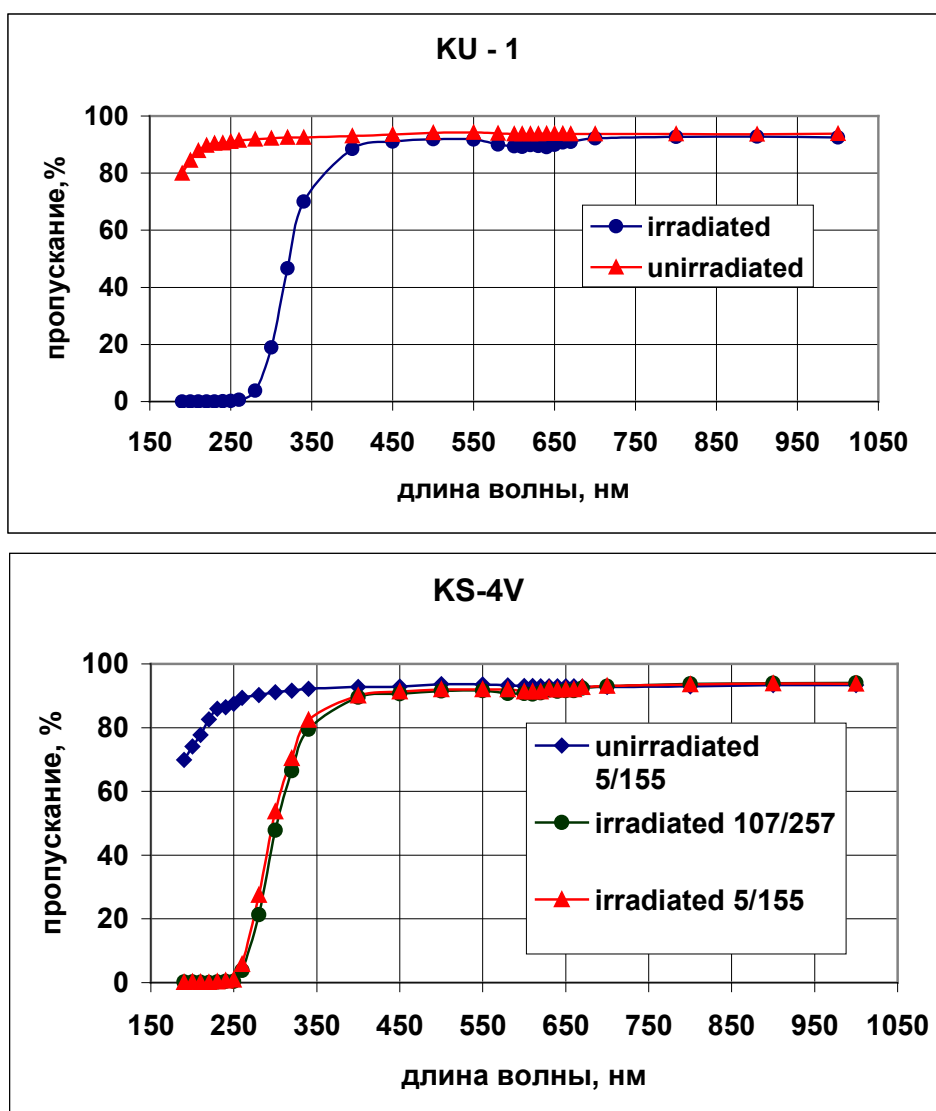


Рисунок 4. Пропускание стекол КУ-1 (вверху) и КС-4В (внизу) толщиной 1 см до и после облучения в ядерном реакторе флюенсом $\Phi_{>0,1}=3 \cdot 10^{16}$ н/см² и $D_\gamma \approx 1$ МГр

Две группы образцов кварцевого стекла были облучены при плотности потока нейтронов примерно $2 \cdot 10^{12}$ н/(см²с) – одна до флюенса $\Phi_{>0,1}=3 \cdot 10^{16}$ н/см², а вторая до $\Phi_{>0,1}=3 \cdot 10^{17}$ н/см². Обнаружено, что спектры пропускания стекла КС-4В и КУ-1 после облучения в ядерном реакторе мало различаются. В видимой области пропускание стекла практически не меняется. Полоса поглощения в интервале 550-680 нм присутствует, но проявляется очень слабо. Пропускание в ее максимуме на $\lambda=620$ нм падает не более чем на 4% у стекла КУ-1, у КС-4В еще меньше. В ИК области спектра пропускание стекол КС-4В и КУ-1 после облучения не меняется. Приемлемое пропускание стекла наблюдается при $\lambda > 350$ нм, в УФ области прозрачность резко падает. Отмечен тот важный факт, что у стекла КУ-1 после облучения в ядерном реакторе до флюенса 10^{17} н/см² и $D_\gamma \approx 3$ МГр эффект НОП оказался близким к результатам, полученным ранее после облучения до того же флюенса и описанным выше. Такая повторяемость результатов подтверждает их достоверность.

В разделе 2.4 рассмотрен эффект радиолуминесценции в кварцевых стеклах, так как для материала окон оптических диагностик ИТЭР кроме приемлемого уровня НОП критическим фактором является свечение, возникающее в стекле под действием радиационных излучений. Описаны выполненные на импульсном ядерном реакторе оригинальные исследования радиолуминесценции, возбужденной гамма-нейтронным излучением в образцах стекла, в зависимости от мощности дозы радиационного облучения.

К достоинствам этого эксперимента относится экономичность и достоверность получения информации, что достигается за счет выполнения измерений непосредственно в процессе импульса нейтронов длительностью 150 мкс при плотности потока нейтронов до 10^{17} н/(см²с). Флюенс нейтронов за импульс реактора в месте размещения образца составлял $\Phi_{>0,1}=6,5 \cdot 10^{12}$ н/см², флюенс гамма частиц $5,3 \cdot 10^{12}$ см⁻², средняя за импульс мощность поглощенной дозы 155 кГр/с. Интенсивность радиолюминесценции в видимом диапазоне в образцах стекла КС-4В и КУ-1 измерена в течение импульса ядерного реактора. Показано, что радиолюминесценция линейно зависит от мощности поглощенной дозы. Это позволило сделать на основе измерений оценку спектральной интенсивности радиолюминесценции в вакуумных окнах из КУ-1 на ИТЭР. Например, на $\lambda = 656$ нм она составляет примерно $5 \cdot 10^{-15}$ Вт/(см³Å·ср). Проведено сравнение радиолюминесценции с уровнем основного фонового излучения плазмы – тормозным излучением. Для оценки тормозного излучения плазмы ИТЭР принято, что температура плазмы $T_e \sim 10$ кэВ, плотность электронов $n_e \sim 10^{20}$ м⁻³, эффективный заряд плазмы $Z_{\text{eff}} \sim 1,69$, гаунт-фактор $g_{\text{ff}} \approx 3$. В этих предположениях получено, что на $\lambda = 656$ нм плотность мощности тормозного излучения в единицу телесного угла имеет значение $2 \cdot 10^{-10}$ Вт/(см³Å·ср). А это почти на 5 порядков величины выше по сравнению с оценкой радиолюминесценции в окнах из КУ-1 на ИТЭР. Сделано заключение, что радиолюминесценция не может быть помехой при диагностике плазмы в ИТЭР.

В разделе 2.5 рассматривается способ устранения радиационных дефектов с помощью термического отжига. Использование этого эффекта может обеспечить работу оптических диагностик на ИТЭР в УФ области спектра. Обнаружен эффект полного восстановления пропускания кварцевого стекла КУ-1 в результате термического отжига. Показано, что после облучения в ядерном реакторе до 10^{17} н/см² пропускание стекла КУ-1 может быть полностью восстановлено за 3 часа путем прогрева при 600 °С. Предложено использовать нагреватель для отжига радиационных центров окраски в оптических элементах после снижения их пропускания до критического уровня или непрерывный нагрев стекла в процессе эксплуатации. Отмечено, что в стекле КС-4В восстановить полностью пропускание за счет нагрева после облучения нейтронами не удастся.

В выводах к Главе 2 подчеркнуто, что основным результатом исследований является экспериментальное доказательство высокой радиационной стойкости стекол КУ-1 и КС-4В в видимой и ИК областях спектра в условиях облучения, моделирующего радиационные нагрузки в ИТЭР. В УФ области спектра пропускание КУ-1 может быть восстановлено с помощью термического отжига. Измерен уровень радиолюминесценции кварцевого стекла в процессе нейтронного облучения и показано, что радиолюминесценция в окнах из кварцевого стекла КУ-1 не является помехой для диагностики плазмы в ИТЭР.

Глава 3 посвящена проблеме «первого зеркала» в ИТЭР. В ней приводятся результаты экспериментов в Токамаке-10 и в магнетронных плазменных установках, а также описывается процесс выбора и разработки зеркал, которые были бы применимы в ИТЭР. В Токамаке-10 исследована деградация металлических зеркал в результате длительного воздействия излучения плазмы и других факторов, сопровождающих эксплуатацию установки токамак. Приведены результаты работ по созданию новых типов зеркал, устойчивых к распылению потоками атомов перезарядки из термоядерной плазмы. В качестве прототипов зеркал ИТЭР испытаны зеркала из монокристаллов молибдена, а также зеркала с нано-кристаллическими покрытиями из родия и молибдена. Приводятся результаты исследования процессов роста углеводородных пленок на поверхности металлических зеркал и модификации поверхности зеркал под действием плазменного разряда в вакуумной установке с планарным магнетроном. Предлагается метод лазерной очистки зеркал от углеводородных пленок, и приводятся результаты экспериментов по очистке зеркал импульсным излучением эксимерного лазера от пленок, осажденных в Т-10.

Раздел 3.1 представляет краткий обзор проблемы «первого зеркала», которая возникла в связи с началом разработки оптических диагностик плазмы ИТЭР. Первым зеркалом

принято называть зеркало, которое собирает излучение и находится в прямой видимости плазмы. Суть проблемы первого зеркала состоит в том, что в результате длительного воздействия термоядерной плазмы и ряда эксплуатационных операций в установках токамак (прогрев камеры, очистка стенки плазменными разрядами и др.) происходит деградация оптических характеристик размещенных внутри камеры зеркал. В ИТЭР наиболее энергонапряженная часть конструкции диверторных пластин будет изготовлена из графитовых композитных материалов. При взаимодействии с плазмой они подвержены химической эрозии, распылению и испарению. При этом образуются углеводородные молекулы и радикалы, а также атомарный углерод. Попадая в плазму, эти частицы ионизируются и переносятся по всему объему вакуумной камеры. В результате переосаждения углеводородных соединений на ее стенках, даже в удаленных от плазмы местах, образуются углеводородные пленки. В ИТЭР эта ситуация будет усугубляться большой длительностью импульса, а также участием в процессах осаждения бериллия, который является материалом первой стенки. Это делает проблему первого зеркала для ИТЭР особо острой, так как в результате осаждения спектр отражения от зеркала может значительно измениться даже в течение одного импульса плазмы. Основная практическая задача при разработке оптических диагностик для ИТЭР – это обеспечение максимального времени жизни зеркала, в течение которого сохраняются его приемлемые характеристики.

Традиционно используемые в оптике зеркала – это зеркала с напылением на полированную подложку из стекла тонкого слоя металлов с высокими коэффициентами отражения (алюминий, серебро, золото). В условиях ИТЭР использование их в качестве первого зеркала для диагностики основной плазмы представляется неприемлемым. Основные причины этого – нейтронное излучение, ELMы и срывы плазмы, быстрое распыление покрытия, технологические проблемы (например, сложности с равномерным охлаждением, слабая адгезия слоев) и др. В связи с этим принято считать, что первое зеркало в диагностиках ИТЭР должно быть целиком металлическим. Решающую роль для пригодности зеркал в ИТЭР имеет правильный выбор материала и технологии изготовления.

В разделе 3.2 представлены эксперименты в Токамаке-10, заложившие понимание проблемы первого зеркала для ИТЭР и положившие начало работам по этой тематике в нашей стране. Исследования, выполненные в Т-10 в течение нескольких экспериментальных кампаний в 2000–2003 годах, позволили изучить физические процессы и понять закономерности, приводящие к постепенной деградации зеркал под действием плазмы. Типичные параметры режимов плазмы в Т-10: рабочий газ – дейтерий, ток разряда – 200–400 кА в течение 1 с; тороидальное магнитное поле – 2,8 Тл; электронная температура на оси ~1 кэВ в омическом режиме и до 2,5 кэВ при ЭЦР нагреве плазмы; средняя концентрация электронов $(1-6) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$; температура ионов на оси плазмы 450–700 эВ. Плотность потока атомов перезарядки на стенку в лимитерном сечении $\sim 1 \cdot 10^{23} \text{ атомов м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, средняя энергия атомов перезарядки около 70 эВ в омическом режиме и 180–200 эВ при ЭЦР нагреве плазмы. В 2001 и 2002 годах использовались кольцевая диафрагма и подвижный лимитер, сделанные из графита МПГ-8. Существенное отличие кампании 2003 года заключалось в том, что в ней использовался только один подвижный лимитер из графита РГТ-91. Перед экспериментальными кампаниями вакуумная камера очищалась прогревом до 200 °С и разрядами – индукционными в водороде или дейтерии и тлеющими в гелии и аргоне. В процессе экспериментов такая процедура очистки повторялась каждую ночь. Перед вскрытием установки на атмосферу проводилась обработка камеры индукционным разрядом в водороде. Общая длительность рабочих разрядов в 2002 году составила – 1620 с, в 2003 году – 212 с. Длительность индукционных разрядов превышала 300 часов в 2002 году и 100 часов в 2003 году. Образцы зеркал экспонировались внутри верхнего патрубка токамака Т-10 в лимитерном сечении «А» на разных расстояниях от плазмы. Наличие в прямом поле зрения кольцевой диафрагмы из графита МПГ-8 создавало оптимальные условия для исследования процессов переосаждения углерода.

В экспериментах использовались образцы зеркал из нержавеющей стали, часть поверхности которых прикрывалась фольгой (экранированная часть образца), а оставшаяся была открыта для потоков частиц из плазмы. Температура зеркал в процессе экспонирования не контролировалась, но в рабочем режиме была не выше, чем 70 °С в режимах с ЭЦР нагревом, а во время кондиционирования камеры могла подниматься до 200 °С. После длительной экспозиции в токамаке образцы вынимались из патрубка, экраны с зеркал снимались, и проводилось исследование характеристик зеркал и пленок. Коэффициенты зеркального отражения измерялись спектрофотометром Lambda 35, Perkin Elmer. Диффузное рассеяние определялось с помощью стенда на основе He-Ne лазера. Измерения толщины плёнок делались на профилемере фирмы TENCOR Instruments на границе между открытой и экранированной поверхностью образца, где в результате осаждения возникала ступенька. Морфология поверхности исследовалась на электронном микроскопе JSM-35CF, JEOLS. Компонентный состав осадений определялся методом обратного резерфордовского рассеяния (RBS) на ускорителе Ван-де-Графа в НИИЯФ МГУ. Для определения накопления изотопов водорода в зеркалах и измерений их распределения по глубине применялся метод регистрации атомов отдачи – ERDA (elastic recoil detection analysis). По данным ERDA была определена толщина пленок, что увеличило достоверность измерений на профилемере.

В первом эксперименте, в 2000 году три зеркала экспонировались в течение 6 месяцев в T-10 (примерно 2000 импульсов плазмы продолжительностью 1 с) на расстоянии 5 см, 30 см и 55 см от плазмы. Уменьшение отражения от зеркала, располагавшегося на расстоянии 5 см от плазмы, оказалось небольшим ($\Delta k_{\text{ref}} = 4\%$ на $\lambda = 632,8$ нм) и было вызвано эрозией поверхности зеркала. Такой вывод был сделан, поскольку пленка на нем визуально не обнаружена, а диффузное рассеяние значительно возросло по сравнению с исходным. Отражение от двух других зеркал значительно уменьшилось. Они были покрыты углеводородными пленками с гладкой поверхностью: коричневой (3 мкм толщиной – $\Delta k_{\text{ref}} = 54\%$ на $\lambda = 632,8$ нм) и желтой (0,9 мкм – $\Delta k_{\text{ref}} = 9\%$ на $\lambda = 632,8$ нм). Результаты эксперимента объясняются тем, что процессы эрозии и осаждения в основном были обусловлены воздействием индукционных и тлеющих разрядов в процессе кондиционирования камеры токамака. Деграция зеркала, стоявшего наиболее близко к плазме, вызвана распылением его поверхности в процессе чистки камеры. Образование пленок на зеркалах значительно удаленных от плазмы происходило за счет переосаждения материалов со стенок патрубка, прилегающих участков камеры и графитового лимитера. Получены предварительные данные: 1) степень загрязнения зеркал зависит от их положения (расстояния от плазмы), 2) деграция зеркал, не защищенных шторками, в основном определяется не воздействием плазмы токамака, а чисткой камеры, 3) в процессе кондиционирования можно очистить зеркала, размещенные близко к плазме.

В 2002 году был подготовлен и выполнен второй эксперимент в T-10. Три зеркала (1, 2 и 3) были установлены внутри тубуса диаметром 50 мм на глубине 5 мм от его входного торца. Этот тубус закрывался крышкой в процессе кондиционирования камеры. Расстояние от поверхности этих зеркал до плазмы составляло 22 см. На том же расстоянии от плазмы, но снаружи на тубусе был закреплен контрольный образец зеркала 4. Образцы 5, 6 были установлены вне тубуса на расстоянии от плазмы 45 см и 66 см соответственно. Все образцы находились в прямой видимости подвижного лимитера и стационарной кольцевой диафрагмы. После экспозиции в течение года (1620 с в рабочем режиме) все открытые части зеркал оказались покрытыми плёнками, включая образцы 1, 2 и 3 внутри тубуса, из чего сделано заключение, что в условиях этого эксперимента в T-10 осаждение преобладало над распылением. Пленки не только уменьшили их отражательную способность, но и исказили спектр отражённого от зеркал излучения в результате интерференции (рисунок 5).

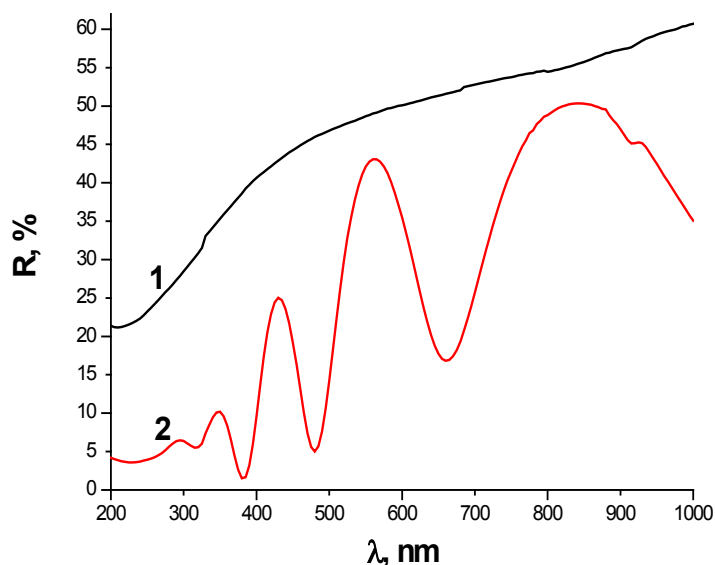


Рисунок 5. Спектры зеркального отражения от образца 2: 1 – исходный спектр и 2 – спектр после экспозиции в Т-10 от участка поверхности с осажденной пленкой

Поверхность образцов выглядела гладкой и блестящей, окрашенной в оранжево-золотые и зелёно-фиолетовые тона. Внешний вид экранированной части зеркал не изменился. Было обнаружено, что толщина пленки на контрольном образце 4 значительно больше, чем на образцах 1, 2, 3. Все эти зеркала находились на одинаковом расстоянии от плазмы (22 см), но образец 4 был закреплен снаружи тубуса. На зеркалах внутри тубуса толщина пленки не превышает 0,4 мкм, а на образце 4 образовалась плёнка 12,3 мкм. Это доказывает предположение о том, что рост пленок на образцах зеркал в Т-10 происходит в основном в процессе кондиционирования камеры токамака. Оценка скорости роста пленки на зеркалах 1, 2, 3, осажденных из плазмы токамака, дало величину около 0,2 нм/с.

Подчеркивается, что если скорость осаждения в ИТЭР по порядку величины будет сравнима с наблюдаемой в Т-10, то за 500 с разряда в ИТЭР на зеркале осядет пленка толщиной 100 нм. Это сильно исказит интенсивность и спектральные характеристики собираемого из плазмы излучения, что неприемлемо для работы диагностик. Делается вывод, что для поддержания зеркал в рабочем состоянии при высокой скорости осаждения необходима их эффективная защита и (или) чистка. В Т-10 за счет осаждения из плазмы скорость роста пленок оказалась примерно в 30 раз выше по сравнению с их ростом в процессе кондиционирования камеры. А большой вклад процесса кондиционирования в рост пленки связан с его большой длительностью. В ИТЭР соотношение длительностей процесса кондиционирования и рабочего режима будет меньше, чем в Т-10, поэтому влияние осаждения пленок в режимах кондиционирования камеры в ИТЭР будет меньшим.

Сравнение коэффициентов отражения от экранированной во время экспозиции в Т-10 поверхности образцов с исходными показало, что на всех зеркалах существует небольшая разница в 3-5% между отражением до и после экспонирования. Этот результат можно объяснить тем, что в образование пленок небольшой вклад вносит и осаждение углеводородов из газовой фазы. Показано, что в вакуумной камере Т-10 содержание СН компонент нарастает в течение 5-10 с после импульса тока и затем уменьшается в течение приблизительно 10 минут. Сразу после развала плазменного шнура количество углеводородов метановой группы возрастает от 4 (CD_3^+) до 20 раз (CD_4) по сравнению с их уровнем перед импульсом. В ИТЭР вклад осаждения из газовой фазы в образование пленок будет зависеть от парциального давления углеводородов в процессе импульса плазмы. Можно предположить, что при определенных условиях он будет выше, чем в Т-10. Для диагностик в диверторе ИТЭР этот тип осаждения будет преобладающим.

Выполнены исследования микроструктуры пленок и морфологии их поверхности. Частиц пыли на поверхности немного, поэтому их присутствие практически не отражается

на оптических характеристиках. На срезе пленки, сделанном лучом лазера, видно, что её структура однородная, но слоистая. На рисунке 6 слева показан срез пленки на образце 4 с вкраплением металлической частицы, справа - слоистая частичка пыли на поверхности зеркала, покрытого пленкой. На левом фото видно, что плёнка состоит из отдельных слоёв разделенных тонкими светлыми прослойками.

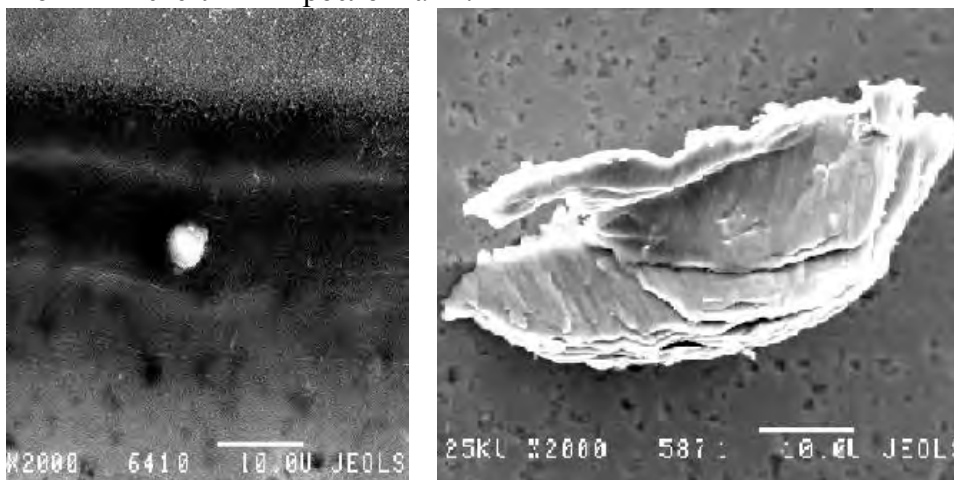


Рисунок 6. Слева показан срез пленки на образце 4, сделанный лучом лазера, справа - частичка пыли на поверхности

Исследования состава показали, что соотношение дейтерия и углерода $D/C = 0,2$ в пленках на образцах 1, 2, и 3, выросших только под воздействием плазмы в рабочих импульсах. Такие пленки классифицируются как твердые. Отношение $D/C = 0,35$ для пленки на образце 6, которая выросла в основном в процессе кондиционирования камеры. Такой результат хорошо соотносится с теорией и экспериментами по осаждению углеводородных пленок. Пленки получаются более твердыми, если энергия падающих частиц более высокая.

Эксперименты по экспонированию зеркал в Т-10 были продолжены в 2003 году. Зеркала были размещены так же, как в 2002 году, и еще три зеркала были дополнительно помещены на большом расстоянии от плазмы. Режим работы установки отличался от стандартного режима - была вынута кольцевая диафрагма. Интенсивность взаимодействия плазмы со стенкой заметно возросла, следствием этого стало охлаждение периферии плазмы и рост ее загрязнения, вырос уровень рециклинга. Это отразилось на свойствах пленок, отношение D/C в осадках на открытых частях зеркал возросло примерно на порядок. Пленки стали не просто мягкими, а перенасыщенными дейтерием. Как и в 2002 году, спектры зеркал значительно изменились в результате поглощения и интерференции света в пленках. Скорость роста пленок на образцах, экспонировавшихся только в рабочих разрядах, возросла более чем в 10 раз до 4 нм/с. Приведены результаты исследования химического состава пленок на открытых участках зеркал. В пленке 2002 года углерода было до 80%, кислорода - до 8% и остальное - дейтерий и водород. В 2003 году углерода в составе осадений - 30%, кислорода - до 7%, а остальное - дейтерий и водород, по сравнению с 2002 годом повышено содержание железа. Делается вывод, что в 2003 году пленки отличаются от пленок, полученных в 2002 году, потому что их свойства определяются плазменным режимом и, в частности, чистотой плазмы и уровнем рециклинга.

В конце раздела 3.2 кратко формулируются итоги тестов металлических зеркал в условиях токамака. Показано, что в зависимости от места размещения зеркал наблюдается эрозия поверхности в результате распыления потоками атомов перезарядки либо осаждение загрязнений. Сделан вывод о том, что осаждение пленок на зеркалах в процессе эксплуатации токамака является наиболее серьезной проблемой, которую будет необходимо решить для обеспечения работы оптических диагностик в ИТЭР. В результате осаждения отражение падает, а спектры искажаются уже при наличии тонкой пленки. Установлено, что: 1) процесс осаждения обусловлен потоками частиц из плазмы и значительно ускоряется с

ростом потоков примесей и водорода на стенку, 2) скорость осаждения падает с увеличением расстояния зеркал от плазмы или при затенении зеркал, 3) в образование углеводородных пленок вносит вклад и осаждение углеводородов из газовой фазы, 4) деградация отражательной способности зеркал, не защищенных шторками, в основном определяется не воздействием плазмы токамака, а длительными процессами кондиционирования камеры.

В разделе 3.3 проанализированы возможные причины эрозии поверхности зеркал: физическое распыление, плавление и испарение, блистеринг, химическая эрозия и воздействие нейтронов. Обоснован выбор металлических зеркал для использования в ИТЭР как наиболее стойких к указанным факторам. Рассмотрено воздействие на зеркало нейтронов с точки зрения возможности трансмутации. На основе результатов нейтронных расчетов сделан вывод, что ни для одного из возможных материалов трансмутация в условиях ИТЭР не должна повлиять на оптические свойства диагностических зеркал. На основе анализа этих факторов предложено молибден и нержавеющую сталь рассматривать как основные материалы для первого зеркала, а родий – как дополнительный вариант.

Рассмотрены возможности предотвращения влияния физического распыления металлических зеркал в ИТЭР под действием атомов перезарядки. Следствием физического распыления поликристаллических зеркал является увеличение шероховатости поверхности из-за различия коэффициентов распыления кристаллитов с разной ориентацией кристаллических осей. Предлагается использовать материал, эрозия которого будет проходить равномерно. Существует два варианта - изготовление зеркал из монокристаллов или нанесение мелкодисперсного покрытия на полированную подложку. Описаны результаты развития при участии автора технологий изготовления зеркал, устойчивых к физическому распылению, из монокристаллов молибдена на НПО «ЛУЧ» и опытной технологии для магнетронного напыления родиевых и молибденовых покрытий с наноструктурой в «Курчатовском Институте».

Образцы зеркал из монокристаллов молибдена испытывались под действием распыления ионами дейтериевой плазмы. Вытягивающее напряжение ионного источника модулировалось с частотой 100 Гц при изменении от 0,1 до 1,5 кэВ. Через определенные промежутки времени измерялся коэффициент отражения зеркал, что давало зависимость отражения от толщины распыленного слоя. Для тестов использовались образцы зеркал диаметром 20 мм с различной ориентацией ((110) и (111)) кристаллографических осей относительно поверхности зеркала. Показано, что зеркала хорошо выдерживают нагрузку в условиях эксперимента. После удаления в процессе распыления слоя толщиной около 5 мкм они теряют только 2-5% отражательной способности в области 300-600 нм. Распыление происходит быстрее для зеркал с ориентацией (111), чем для зеркал с ориентацией (110).

Для подтверждения достоверности результата, зеркала из монокристалла (110) молибдена $\varnothing 25$ мм были успешно испытаны в токамаке TEXTOR (Юлих, Германия). Монокристалл был выращен методом бестигельной электронно-лучевой зонной плавки. Отклонение ориентации кристаллографических направлений не превышало 4° . Полировка проводилась в несколько стадий алмазными пастами с добавлением поверхностно-активных веществ. Результирующая шероховатость менее 10 нм. Для сравнения были использованы образцы зеркал из поликристаллического молибдена, изготовленные в Германии. Экспозиция зеркал проводилась в эрозионной зоне (SOL) плазмы TEXTOR. Сделано 36 идентичных разрядов дейтериевой плазмы, длительность экспозиции зеркал в плазме составила 210 секунд. Энергия ионов, бомбардирующих поверхность зеркал 200–250 эВ, плотность потока $2,4 \cdot 10^{18}$ ионов/(см²с), флюенс ионов на поверхность зеркала $1,7 \cdot 10^{20}$ ионов/см². После теста на всех зеркалах в центре появилась зона эрозии, в которой были измерены коэффициенты полного, зеркального и диффузно рассеянного отражения. У всех образцов полное отражение практически не изменилось, а вот диффузное рассеяние для поликристаллического зеркала значительно возросло. Естественно, что при этом зеркально отраженное излучение от поликристаллического зеркала снизилось примерно на 5% в

видимой области. Этот результат подтвердил высокую устойчивость зеркал из монокристаллов к распылению в реальных условиях токамака.

Далее в разделе 3.3 описана разработка технологии вакуумного напыления отражающих покрытий с наноструктурой на полированные подложки. Создано уникальное оборудование для магнетронного напыления родиевых и молибденовых покрытий, изготовлены образцы этих зеркал и проведено исследование их стойкости к физическому распылению. Технология напыления основана на том, что при определенных режимах осаждения формируется столбчатая структура покрытия, состоящая из плотно упакованных кристаллитов с наноразмерами. Напыление проводилось на подложки $\varnothing 22$ мм из монокристаллов молибдена, с поверхности которых ионным травлением удалялся слой 0,2 мкм вместе с внедренными частицами абразива. Перед напылением подложки тщательно очищались, в том числе в магнетронной установке газовым разрядом. Нанесение покрытий из молибдена толщиной 1,5 мкм проводилось при температуре подложки примерно 500 °С в аргоне при давлении $3 \cdot 10^{-3}$ Торр, напряжении разряда 320 В и токе 1 А. Получены зеркала с отражающим покрытием, состоящим из нанокристаллитов размером примерно 100 нм. Экспериментально доказана высокая адгезия покрытия к подложке. Показано, что коэффициент отражения слабо меняется после распыления более 1 мкм покрытия.

Разработана методика экспресс-тестов зеркал в магнетронной установке и применена для испытаний зеркал с молибденовыми покрытиями в условиях, подобных ИТЭР. Образец зеркала устанавливается в качестве катода, а его распыление проводится в газовой смеси с контролируемым составом, основным компонентом которой является дейтерий. Методика позволяет моделировать с помощью магнетронного плазменного разряда процессы на поверхности металлических зеркал, с её помощью выполнены исследования физического распыления образцов зеркал различного типа и обнаружен эффект ионно-стимулированной диффузии дейтерия в материал зеркала с образованием блистеров на его поверхности.

В разделе 3.4 описана методика моделирования осаждения углеводородных пленок в установке с планарным магнетроном. Методика основана на распылении графитового катода ионами аргона для формирования потока атомов углерода на зеркало со средней энергией около 8 эВ. Интенсивность потока может регулироваться за счет содержания аргона в газовой смеси и расстояния до зеркала, так чтобы смоделировать ситуацию на первом зеркале в ИТЭР. Полученная зависимость скорости роста пленок из плазменного разряда магнетрона от температуры зеркал для трех составов газовой смеси показана на рисунке 7.

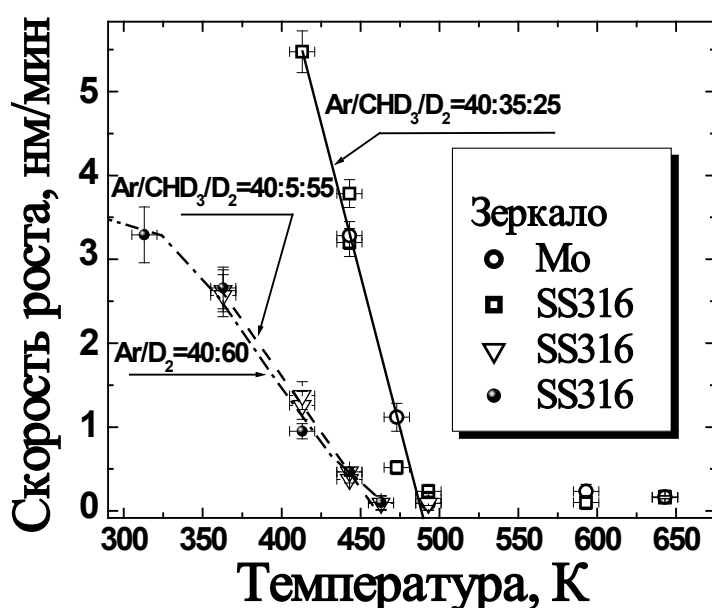


Рисунок 7. Зависимость скорости роста пленок от температуры зеркал из нержавеющей стали (SS316) и молибдена (Mo) при трех различных составах газовой смеси

В эксперименте плотность потока атомов углерода на зеркало равнялась $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Использование дейтерированного метана в смесях для магнетронного разряда, а также химическая эрозия графитового катода атомарным дейтерием обеспечивали наличие в объеме вакуумной камеры метильных (CD_3 , CHD_2) радикалов. Эксперименты показали, что чем выше температура, тем меньше скорость роста пленки, а значит, и ее воздействие на отражательную способность зеркала. Нагрев до температуры «нулевой скорости роста» пленки можно рекомендовать для защиты от осаждения углерода зеркал в системах сбора излучения оптических диагностик ИТЭР. При этом следует учитывать, что нагретая до 450-650 К поверхность зеркала, не покрытая углеводородной пленкой, химически активна и легко модифицируется под действием потока частиц из плазмы. Отмечено также, что в качестве материала зеркала металлы оказались предпочтительнее, чем, например, кремний, так как скорость роста пленок на металле меньше, чем на кремнии.

В разделе 3.5 предлагается методика для очистки диагностических зеркал от пленок с помощью сканирования лучом лазера загрязненной поверхности. Для исследований процесса удаления пленок был создан стенд на основе эксимерного лазера: длина волны 308 нм, частота повторения импульсов 10 Гц, длительность импульса 20 нс, энергия в импульсе до 50 мДж, плотность энергии 0,03-0,25 Дж/см². Процесс разрушения пленки контролировался по изменению зеркального отражения и диффузного рассеяния луча диодного лазера от очищаемого участка на зеркале. Показано, что очистка зеркала достигается только при плотности энергии в импульсе выше некоторого порогового значения. Процесс очистки пленки происходит за счет взрывного испарения слоёв пленки от импульса к импульсу. Углеводородные плёнки разного типа, включая пленки из Т-10, разрушалась при плотности энергии в импульсе лазера более 0,12-0,15 Дж/см². Скорость очистки росла с увеличением плотности энергии лазера. Удаление углеводородных пленок с полным восстановлением оптических характеристик зеркала происходило после воздействия примерно 30-ти лазерных импульсов. Проведены измерения и показано, что порог разрушения стальных зеркал излучением эксимерного лазера на порядок выше пороговых значений плотности энергии лазера для удаления пленок. На основе результатов цикла экспериментов сделан вывод, что предложенный оригинальный метод дистанционной очистки зеркал излучением эксимерного лазера и разработанная аппаратура применимы для удаления углеводородных загрязнений.

Наиболее значимые выводы по результатам Главы 3 основаны на экспериментах в Токамаке-10, где было показано, что осаждение пленок на зеркалах в процессе эксплуатации токамака является наиболее серьезной проблемой, которую необходимо решить для обеспечения работы оптических диагностик ИТЭР. В результате осаждения отражение падает, спектры искажаются уже при наличии тонкой пленки на зеркале. В образование пленок на зеркалах основной вклад вносят атомы перезарядки, осаждение углеводородов из газовой фазы даёт вклад в несколько процентов. Степень загрязнения зеркал зависит от их положения в камере и расстояния от плазмы. Деградация отражательной способности зеркал, не защищенных шторкой, в основном определяется не воздействием плазмы токамака, а процессом кондиционирования вакуумной камеры.

В Главе 4 описаны результаты разработки прототипов оптических элементов для диагностик ИТЭР. Краткое введение и обзор содержания главы представлены в разделе 4.1. Подчеркивается, что разработка прототипов диагностической аппаратуры с высокой радиационной стойкостью и их испытания на действующих установках являются ключевыми условиями для обеспечения надежности работы диагностики на ИТЭР. В материалах Главы 4 представлены результаты испытаний на Токамаке-10 системы сбора излучения из плазмы с помощью эндоскопа с внутрикамерным зеркалом для спектроскопии водородных линий. Рассматривается критическая для оптических диагностик ИТЭР проблема обеспечения минимальных потерь в тракте сбора излучения и предлагается её решение с использованием зеркал с многослойными диэлектрическими покрытиями. Для обоснования применимости кварцевого стекла КУ-1 в качестве материала для вакуумных окон выполнены расчеты

изменения в процессе эксплуатации на ИТЭР пропускания прототипа оптического окна из этого стекла.

В разделе 4.2 описаны работы по подготовке для спектроскопии водородных линий оптической системы сбора излучения из плазмы на основе эндоскопа. Прототип узла для сбора излучения из плазмы ИТЭР – эндоскоп с внутрикамерным зеркалом - был разработан, изготовлен и испытывается в экспериментах на Токамаке-10. Показана эффективность использования системы для исследования плазмы и стабильность работы эндоскопа в условиях эксплуатации на установке токамак. Указано на важность результатов реального экспонирования зеркала эндоскопа в Т-10. Отмечено два факта. Во-первых, защищенное входным зрачком малого диаметра зеркало эндоскопа за год эксплуатации в Т-10 практически не изменило характеристик, что на практике подтвердило эффективность такой защиты зеркала. Во-вторых, при более длительной эксплуатации зеркала в течение двух лет коэффициент отражения упал примерно на 20% за счет эрозии поверхности в виде локальных дефектов. Предложено объяснение этого факта блистерингом, вызванным ионно-стимулированной диффузией атомарного водорода из газовой среды. Другим возможным объяснением является химическое взаимодействие с поверхностью соединений лития, присутствовавших в камере, поскольку при эксплуатации этого зеркала на Т-10 проводился «литиевый» эксперимент. Из результатов испытания молибденовых зеркал в составе эндоскопа сделан вывод, что такое зеркало может быть использовано на ИТЭР.

Раздел 4.3 посвящен исследованиям свойств диэлектрических зеркал для применения в качестве вторичных зеркал в системах сбора излучения в условиях ИТЭР. Важно, что в результате целенаправленных разработок на НПО «Луч» удалось создать прототипы радиационноустойчивых диэлектрических зеркал просветленных ($\geq 95\%$) в видимой области. Для многослойных полупрозрачных покрытий используется чередование слоев окислов металла (таких как TiO_2 , ZrO_2 , Nb_2O_5) и слоев окиси кремния. Образцы зеркал успешно прошли испытания в ядерном реакторе в условиях, моделирующих обстановку в ИТЭР. После облучения до флюенса около 10^{19} нейтронов/см² спектральные характеристики большинства образцов остались без изменений. Только у некоторых зеркал с покрытием $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ рабочий диапазон сместился в сторону коротких длин волн (рисунок 8), что возможно объясняется нагревом в процессе облучения.

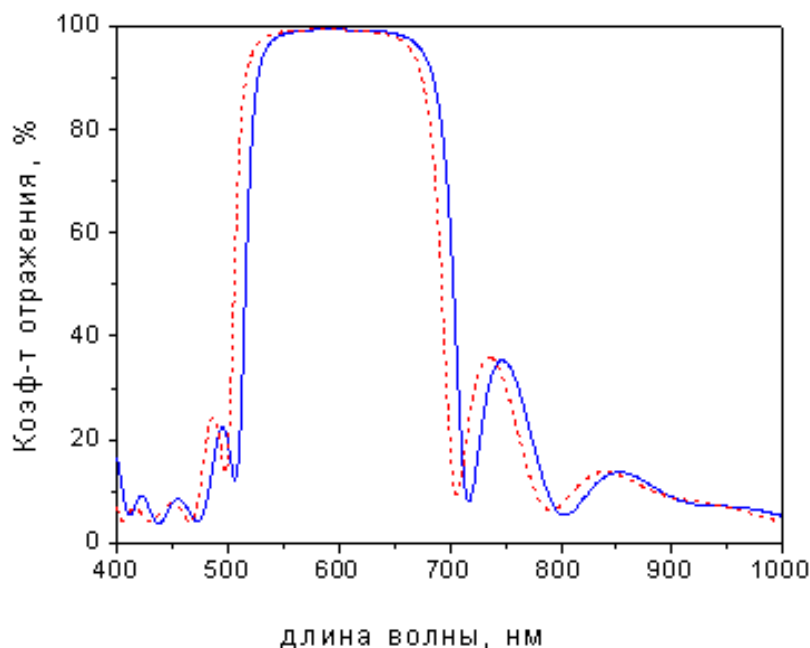


Рисунок 8. Спектр отражения диэлектрического зеркала: сплошная линия - до облучения, пунктирная линия - после облучения до флюенса около 10^{19} нейтронов/см²

В серии экспериментов по нагреву до 150 °С в течение 50 часов прототипов диэлектрических зеркал Nb₂O₅/SiO₂ и TiO₂/SiO₂ показано, что их параметры удовлетворяют требованиям, предъявляемым в диагностиках СВЛ и активной спектроскопии. Спектры отражения образцов до и после нагрева практически не отличаются. Во время нагрева для обоих типов зеркал в диапазоне 450-500 нм происходит изменение коэффициента отражения не более чем на 3%. Обратимые изменения коэффициента отражения в пределах 2-3% во время непрерывного нагрева могут быть объяснены тепловым расширением покрытия и зависимостью коэффициентов преломления и поглощения в диэлектрических слоях от температуры. Такие изменения приемлемы для работы диагностики. Основные задачи по разработке прототипов диэлектрических зеркал для ИТЭР можно считать выполненными.

В разделе 4.4 выполнено расчетное обоснование применимости кварцевого стекла КУ-1 для вакуумных окон оптических диагностик. Для расчета деградации пропускания за прототип вакуумного окна принималось окно, состоящее из двух стекол КУ-1 толщиной 2 см. С использованием результатов, изложенных в главах 1 и 2 диссертации, получена расчетная зависимость изменения пропускания в процессе эксплуатации для прототипа вакуумного окна ИТЭР под действием радиационного излучения. Показано, что в окнах из кварцевого стекла КУ-1 поглощение света в видимой области спектра практически отсутствует. Пропускание окна в области длин волн 400 – 700 нм составит 86%, потери связаны с отражением от четырех поверхностей стекол, через которые проходит свет. Пропускание окна в ультрафиолетовой области уменьшается за счет радиации. После 10 лет эксплуатации окна в Д-Т режиме пропускание на длине волны 350 нм составит 77%, а на длине волны 250 нм - 17%.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты исследований можно кратко сформулировать следующим образом:

1. Выполнен анализ воздействия плазмы как источника 14 МэВ нейтронов на элементы диагностик плазмы, размещенные в перископических каналах внутри железобетонной защиты патрубков ИТЭР. Определены радиационные нагрузки на оптические элементы, включая спектры нейтронов. На первом зеркале плотность потока нейтронов составляет $6 \cdot 10^{13}$ н/(см²с), на вторичном зеркале – $1 \cdot 10^{12}$ н/(см²с), на вакуумном окне – $4 \cdot 10^8$ н/(см²с), что говорит об эффективности защиты.

2. В ядерных установках испытаны кварцевые стекла КУ-1 и КС-4В. Показано, что пропускание стекла КУ-1 в видимой и ИК областях спектра не будет изменяться под действием излучения термоядерной плазмы. В типовом Д-Т режиме ИТЭР при термоядерной мощности 500 МВт радиолюминесценция в стекле КУ-1 оказывается незначительной, ее спектральная плотность мощности будет более чем на четыре порядка ниже спектральной плотности мощности тормозного излучения из плазмы при $T_e = 10$ кэВ и $n_e = 10^{20}$ м⁻³. По итогам испытаний кварцевое стекло КУ-1 признано лучшим материалом для оптических окон в ИТЭР.

3. Экспериментально обнаружено значительное уменьшение пропускания стекла КУ-1 в УФ области под действием облучения гамма частицами и нейтронами. Разработан и успешно испытан метод восстановления пропускания в УФ области стекла КУ-1 на основе отжига при температуре до 800 °С. Этот метод позволит значительно расширить область применения стекла КУ-1 для оптических элементов в диагностиках плазмы ИТЭР.

4. В токамаке Т-10 показано, что осаждение углеводородных пленок, искажающее спектры отражения зеркал, может составить проблему для диагностики плазмы в ИТЭР. В типовом режиме Т-10 скорость осаждения пленок на зеркалах, размещенных в сечении кольцевой диафрагмы на расстоянии 22 см от плазмы, составляет 0,2 нм/с. В режиме с увеличенным рециклингом и повышенным содержанием примесей в плазме скорость осаждения возрастает в 20 раз.

5. Создан стенд на основе эксимерного лазера с энергией до 50 мДж в импульсе длительностью 20 нс. С его помощью в вакууме при плотности энергии выше $0,12 \text{ Дж/см}^2$ проведена очистка стальных зеркал от твердых СН пленок, осажденных из плазмы в токамаке Т-10, без изменения характеристик зеркал. Методика лазерной очистки может быть использована в ИТЭР.

6. В процессе распыления графитового катода ионами из плазмы магнетронного разряда изучена зависимость скорости роста СН пленок от температуры зеркал. Показано, что при температуре выше $200 \text{ }^\circ\text{C}$ рост пленок прекращается. Такой нагрев зеркал может быть использован в ИТЭР для защиты зеркал от осаждения пленок.

7. Оработана технология изготовления зеркал из монокристаллов молибдена и созданы прототипы зеркал для ИТЭР, которые сохраняют оптические характеристики в процессе длительного распыления, что продемонстрировано в процессе их испытания в пристеночной плазме токамака TEXTOR. Анализ результатов исследований позволяет сделать вывод, что монокристалл молибдена является одним из лучших материалов для первого зеркала диагностик плазмы в ИТЭР.

8. Разработан, изготовлен и испытан на Т-10 прототип оптической системы сбора излучения из плазмы для спектроскопии водородных линий в ИТЭР – эндоскоп с внутрикамерным молибденовым зеркалом. Показана высокая надежность этой оптической системы и ее эффективность для диагностики плазмы в токамаке.

9. Показано, что многослойные диэлектрические зеркала $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ с отражением не менее 95% в видимой области спектра обладают достаточной радиационной стойкостью в условиях, моделирующих обстановку в ИТЭР. Высокая отражательная способность таких зеркал позволит передавать с их помощью излучение из плазмы к детекторам с малыми потерями. Разработаны и созданы прототипы этих зеркал для спектроскопии водородных линий и активной спектроскопии плазмы в ИТЭР.

10. Разработан комплекс мер для увеличения надежности оптических компонент диагностик плазмы в ИТЭР. Для их защиты предложены: малый входной зрачок; перископ в нейтронной защите установки; сменные модули зеркальной оптики; нагрев зеркал и методы очистки зеркал. Вместе с технологиями по изготовлению прототипов оптических элементов это позволяет приступить к разработке конструкторской документации для создания оптических диагностик плазмы в ИТЭР.

В заключение автор выражает благодарность сотрудникам, при участии которых проводились эксперименты: Б.А. Левину, С.Н. Звонкову, А.В. Горшкову, А.А. Медведеву, А.В. Рогову, В.М. Гурееву, И.И. Орловскому, Т.Р. Мухамедзянову. Особо признателен А.Н. Чудновскому за полезные обсуждения результатов и постоянный интерес к работе. Благодарю научный и технический коллектив ИФТ за помощь в работе.

Основные положения диссертации содержатся в следующих опубликованных работах:

1. С.В. Шелудяков, К.Ю. Вуколов, Г.Е. Шаталов. Нейтронно-физический анализ Н-альфа и CXRS диагностических систем в реакторе ИТЭР. – ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2004, вып.1, с. 26-40
2. K.Yu. Vukolov. Radiation effects in window materials for ITER diagnostics // Fusion Engineering and Design. 84 (2009) 1961-1963
3. A.J.H. Donn'e, A.E. Costley, R. Barnsley, H. Bindslev, R. Boivin, G. Conway, R. Fisher, R. Giannella, H. Hartfuss, M.G. von Hellermann, E. Hodgson, L.C. Ingesson, K. Itami, D. Johnson, Y. Kawano, T. Kondoh, A. Krasilnikov, Y. Kusama, A. Litnovsky, P. Lotte, P. Nielsen, T. Nishitani, F. Orsitto, B.J. Peterson, G. Razdobarin, J. Sanchez, M. Sasao, T. Sugie, G. Vayakis, V. Voitsenya, K. Vukolov, C. Walker, K. Young. *The Progress in ITER Physics Basis, Chapter 7: Diagnostics*. Nucl. Fusion **47** (2007) S337–S384

4. K.Yu. Vukolov, M.I. Guseva, S.A. Evstigneev, A.A. Medvedev, S.N. Zvonkov. Exposure of stainless steel mirrors in T-10 tokamak. *Plasma Devices and Operations*. V. 12, Number 3. September 2004, p.p. 193–202
5. Д.В. Орлинский, В.С. Войцены, К.Ю. Вуколов. Имитационные исследования поведения зеркал диагностических систем экспериментального термоядерного реактора. *ВАНТ, сер. Термоядерный синтез*, 2005, вып.3. стр.3-50
6. K. Vukolov, A. Medvedev, I. Orlovskiy. Issues and options for mirrors of CXRS and H-alpha ITER diagnostics. CP 988, *Burning Plasma Diagnostics. An International Conference*, Varenna, Italy. 24 – 28 September, 2007. Edited by F.P. Orsitto et. al. Melville, New York, 2008. AIP Conference Proceedings, Volume 968, p.370–374
7. Д.В. Орлинский, К.Ю.Вуколов, Б.А. Левин, В.Т. Грицина. Радиационная стойкость кварцевых стекол// *ВАНТ, Серия термоядерный синтез*, 2002, выпуск 3-4, стр. 82-91.
8. K.Yu. Vukolov, B.A. Levin. Results of irradiation tests of KU-1 and KS-4V silica glasses as ITER candidate window materials // *Fusion Engineering and Design*. 66-68 (2003) 861-864.
9. К.Ю. Вуколов, Б.А. Левин, В.С. Скобкин, И.И. Черемисин, С.А. Попов, Т.А. Ермоленко, И.К. Евлампиев, П.К. Туроверов. Наведенное оптическое поглощение у кварцевых стекол КС-4В и КУ-1 в результате γ -облучения// *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2001, вып.1, с.66-72
10. П.Б. Басков, В.В. Сахаров, К.Ю. Вуколов, О.В. Акимова, В.Ш. Берикашвили. Получение фторалюминатных стекол и исследование их радиационно-оптического поведения при гамма-облучении. // *Сб. XI Международной научно-технической конференции "Высокие технологии в промышленности России. Материалы и устройства функциональной электроники и нанофотоники"*. М.: 2005, С.305-311
11. D.V. Orlinski and K.Yu. Vukolov. Quartz KU-1 optical density measurements after irradiation in the nuclear reactor IR-8 // *J. Plasma Devices and Operations* v.7, 1999, p. 195-204
12. К.Ю. Вуколов, Б.А. Левин, Н.Ю. Вуколов. Влияние облучения и термического отжига на оптическое пропускание кварцевого стекла// *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2000, выпуск 1, стр.72-80
13. К.Ю.Вуколов, Н.Ю. Вуколов, Е.В. Егоров, Б.А. Левин, А.Ф. Яшин. Наведенное оптическое поглощение в кварцевых стеклах КУ-1 и КС-4В в результате после реакторного облучения// *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2002, выпуск 1-2, стр. 86-92
14. A. Gorshkov, D. Orlinski, V. Sannikov, K. Vukolov, S. Goncharov, Yu. Sadovnikov, A. Kirillov. // Measurement of the radiation resistant fused quartz radioluminescence spectral intensity under irradiation in the pulse nuclear reactor. - *J. of Nucl. Mater.*, 273, 1999, p. 271 – 276
15. V. Voitsenya, A. Costley, V. Bandourko, A. Bardamid, V. Bondarenko, Y. Hirooka, S. Kasai, V. Konovalov, M. Nagatsu, K. Nakamura, D. Orlinskij, F. Orsitto, L. Poperenko, S. Solodovchenko, A. Stan', T. Sugie, M. Taniguchi, M. Vinnichenko, K. Vukolov, S. Zvonkov. "Diagnostic first mirrors for burning plasma experiments". – *Review of Scientific Instruments*, Vol. 72, No.1, January 2001, p. 475 –482
16. Д.В. Орлинский, К.Ю. Вуколов, В.С. Войцены. Имитационные исследования поведения зеркал диагностических систем экспериментального термоядерного реактора. *ВАНТ, сер. Термоядерный синтез*, 2005, вып.3. стр.3-50
17. A. Litnovsky, P. Wienhold, V. Philipps, G. Sergienko, O. Schmitz, A. Kirschner, A. Kreter, S. Droste, U. Samm, Ph. Mertens, A.H. Donne, D. Rudakov, S. Allen, R. Boivin, A. McLean, P.Stangeby, W. West, C. Wong, M. Lipa, B. Schunke, G. De Temmerman, R. Pitts, A. Costley, V. Voitsenya, K. Vukolov, P. Oelhafen, M. Rubel, A. Romanyuk. Diagnostic mirrors for ITER: a material choice and an impact of erosion and deposition on their performance. *Journal of Nuclear Materials* 363–365 (2007) 1395–1402

18. A. Litnovsky, V. Voitsenya, T. Sugie, G. De Temmerman, A.E. Costley, A.J.H. Donn'e, K.Yu. Vukolov, I. Orlovskiy, J.N. Brooks, J.P. Allain, V. Kotov, A. Semerok, P.-Y. Thro, T. Akiyama, N. Yoshida, T. Tokunaga and K. Kawahata // Progress in research and development of mirrors for ITER diagnostics. Nucl. Fusion 49 (2009) 075014 (8pp)
19. M. Lipa, B. Schunke, Ch. Gil, J. Bucalossi, V. S. Voitsenya, V. Konovalov, K. Vukolov, M. Balden, G. de Temmerman, P. Oelhafen, A. Litnovsky, P. Wienhold. Analyses of metallic first mirror samples after long term plasma exposure in TORE SUPRA. Fus. Eng. and Design 81 (2006) 221
20. K.Vukolov, A.Bardamid, A.Gorshkov, V.Konovalov, A.Rogov, V.Sannikov, S.Solodovchenko, V.Voitsenya, S.Zvonkov. Experimental study of first mirror degradation under influence of ITER relevant conditions. Advanced Diagnostics for Magnetic and Inertial Fusion. Edited by Stott et al. Kluwer Academic/Plenum Publisher, New York, 2002. p. 299–302
21. К.Ю. Вуколов, В.М. Гуреев, М.И. Гусева, Л.С. Данелян, С.Н.Звонков, С.А.Евстигнеев, В.В. Затекин, В.С. Кулукаускас. Исследование углеводородных пленок на внутрикамерных зеркалах в токамаке Т-10. В тезисах докладов XXXV международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, 31 мая – 2 июня 2005 г.
22. К.Ю.Вуколов, Д.В.Марковский, И.И.Орловский, Р.А. Форрест. Анализ трансмутации материалов диагностических зеркал в ИТЭР// ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2011, вып.1, с.25-28
23. A. Litnovsky, G. De Temmerman, K. Vukolov, P. Wienhold, V. Philipps, O. Schmitz, U. Samm, G. Sergienko, P. Oelhafen, M. Büttner, I. Orlovskiy, A. Yastrebkov, U. Breuer, A. Scholl. Investigations of single crystal and polycrystalline metal mirrors under erosion conditions in TEXTOR. Fusion Engineering and Design 82 (2007) 123-132
24. А.В. Рогов, К.Ю. Вуколов. Магнетронное напыление молибденовых зеркал и зеркальной микронной фольги со столбчатой упорядоченной нанокристаллитной структурой. Журнал технической физики, 2006, том 76, вып.4, 109 – 113
25. A.F. Bardamid, K.Yu. Vukolov, V.G. Konovalov, D.I.Naidenkova, A.V. Rogov, I.V. Ryzhkov, A.N. Shapoval, A.F. Shtan', S.I. Solodovchenko, V.S. Voitsenya, K.I. Yakimov. Testing of Molybdenum film mirrors under bombardment by deuterium plasma ions. Plasma Devices and Operations. Vol. 14, No. 2 (June 2006), p.p. 159 – 171
26. А.В. Рогов, К.Ю. Вуколов, А.В. Горшков, В.М. Гуреев. Исследования методом магнетронного распыления деградации монокристаллических и напыленных молибденовых зеркал в условиях, подобных ИТЭР. ВАНТ, вып. 2, 2005, стр. 39–54.
27. А.В. Рогов, К.Ю. Вуколов. Моделирование условий распыления в ИТЭР с использованием магнетронной установки. Методика и режимы распыления. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, вып. 1, 2005, стр. 9-25
28. К.Ю. Вуколов, Л.С. Данелян, С.Н. Звонков, А.А. Медведев, Т.Р. Мухаммедзянов, В.В. Пиксайкин, В.В. Затекин, В.С. Кулукаускас. Влияние нагрева на скорость роста а-С:Н пленок и характеристики металлических зеркал в условиях подобных ИТЭР. ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез, 2006, вып. 4, с. 21-34
29. К.Ю. Вуколов, В.М. Гуреев, М.И. Гусева, Л.С. Данелян, С.Н. Звонков, С.А. Евстигнеев, В.В. Затекин, В.С. Кулукаускас. Изучение пленок, осажденных на зеркалах в токамаке Т-10. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2006, №4, с. 5-8
30. E. Mukhin, K. Vukolov, V. Semenov, S. Tolstyakov, M. Kochergin, G. Kurskiev, K. Podushnikova, A. Razdobarin, A. Gorodetsky, R. Zalavutdinov, V. Bukhovets, A. Zakharov, S. Bulovich. Progress in the development of deposition prevention and cleaning techniques of in-vessel optics in ITER. Nucl. Fusion. 49 (2009) 085032 (9pp)

31. К.Ю. Вуколов, А.В. Горшков, С.Н. Звонков. Очистка металлических зеркал от загрязнений излучением эксимерного лазера – ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2001, вып.1, с.61 - 66
32. А.А. Медведев, Е.В. Александров, Д.К. Вуколов, К.Ю. Вуколов, А.В. Горшков. Эндоскоп для измерений в видимой области спектра на токамаке Т-10. Конструкция и результаты первых экспериментов. ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез, том.4, 2007, стр. 50-56
33. А.В. Горшков, Д.К. Вуколов, К.Ю. Вуколов, А.А. Медведев, С.Н. Звонков. Влияние воздействия плазмы на молибденовое зеркало эндоскопа в токамаке Т-10. В тезисах докладов XXVI Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС. 9 – 13 февраля 2009 г., г. Звенигород, Московской области. М-73, http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXXVI/Zven_XXXVI.html
34. I.I. Orlovskiy, K.Yu. Vukolov. Thermal and neutron tests of multilayered dielectric mirrors. Fusion Engineering and Design 74 (2005) 865– 869
35. I. Orlovskiy, K. Vukolov, E. Andreenko, T. Mukhammedzyanov, A. Taranchenko. Thermal tests of broadband dielectric mirrors. Fusion Engineering and Design, Volume 86, Issues 6-8, October 2011, 1290-1293