

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Зарубина Елена Юрьевна

**Диагностика параметров криогенной мишени для
лазерного термоядерного синтеза**

Специальность 1.3.2. Приборы и методы
экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2026

Диссертация подготовлена в Российском федеральном ядерном центре – Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики, в Институте лазерно-физических исследований и в Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова, на физическом факультете, на кафедре общей физики и волновых процессов.

Научные руководители – *Савельев-Трофимов Андрей Борисович, доктор физико-математических наук, профессор*
Чугров Иван Александрович, кандидат физико-математических наук

Официальные оппоненты – *Кузнецов Андрей Петрович, доктор физико-математических наук, доцент, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», проректор, институт лазерных и плазменных технологий, кафедра физики лазерного термоядерного синтеза, главный научный сотрудник*
Бузмаков Алексей Владимирович, доктор физико-математических наук, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Курчатовский комплекс кристаллографии и фотоники, Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова, ведущий научный сотрудник отделения
Запонов Арсений Эдуардович, кандидат технических наук, доцент, «Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого» Министерства обороны Российской Федерации, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра

Защита диссертации состоится «17» сентября 2026 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ 013.7 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр.2, Физический факультет МГУ, ауд. Н-16.

Е-mail (диссертационного совета): diss.sov.013.7@org.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/4000>.

Автореферат разослан «__» августа 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

Карташов И.Н.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Целью работ в области лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) являются фундаментальные и прикладные исследования физики высоких плотностей энергии и экстремального состояния вещества. Термоядерный синтез является источником энергии, в качестве которого может выступать реакция синтеза двух изотопов водорода (дейтерия и трития) с образованием гелия и нейтрона с общей энергией 17,6 МэВ. Для зажигания термоядерного дейтерий-тритиевого (DT) топлива может быть использована криогенная мишень (КМ), представляющая собой полую сферическую капсулу (оболочка-аблятор) диаметром около 2 мм, на внутренней поверхности которой равномерно распределен слой DT льда. Зажигание может быть реализовано при воздействии на капсулу профилированного импульса высокоинтенсивного лазерного излучения (ЛИ) (КМ прямого сжатия) или квазиравновесного рентгеновского излучения (РИ), которое генерируется в результате конверсии ЛИ на внутренней поверхности бокса-конвертера (КМ непрямого сжатия). При этом нагретая капсула начинает «испаряться», и под действием импульса отдачи неиспаренная часть мишени сжимается с образованием в центре термоядерной плазмы при сверхвысоких температурах (100 млн градусов). Это обеспечивает условия для преодоления ядрами дейтерия и трития кулоновского потенциального барьера и инициации термоядерных реакций синтеза [1]. Если энергия реакций синтеза как минимум равна энергии лазерного импульса, затраченной на создание и удержание плазмы, зажигание термоядерной криогенной мишени считается достигнутым.

В 1997 г. в США началось строительство лазерной установки NIF, а 2009 г. выполнен запуск установки со 192 каналами с общей энергией лазерного излучения на мишени 1,8 МДж (в настоящее время после модернизации достигнуто 2,2 МДж) при длине волны ЛИ $\lambda_{3\omega}=0,351$ мкм (третья гармоника Nd-лазера) [2]. К 2023 г. проект объединил усилия 38 научных организаций («The Indirect Drive ICF Collaboration») [3]. В 2014 г. во Франции запущена установка LMJ (готова половина из 176 каналов, проектная энергетика 1,6 МДж, третья гармоника Nd-лазера) [4]. В 2022 г. в России завершён первый этап создания лазерной установки с проектной энергетикой на мишени 2,8 МДж и длиной волны ЛИ $\lambda_{2\omega}=0,5265$ мкм (вторая гармоника Nd-лазера). Введены в эксплуатацию 32 канала, пиковая мощность лазерного импульса до 500 ТВт при длительности импульса от 5 до 20 нс [5].

Всего до настоящего времени на установке NIF было проведено 11 успешных экспериментов (в период с 2021 г. по август 2026 г.) по зажиганию КМ непрямого сжатия, рекордный энергетический выход составил 8,6 МДж при вложенной энергии ЛИ 2,2 МДж [6]. При этом рост энергетического выхода до 60-80 МДж остается главной задачей для расширения области исследования различных вопросов физики высоких плотностей энергии и других практических применений.

Для достижения зажигания КМ ее поверхности (капсулы и твердого слоя топлива) должны удовлетворять очень высоким требованиям, которые сформулированы в виде одномерного спектра пространственных мод (СПМ) возмущений поверхности, горизонтальная ось которого представляет собой номера мод (гармонических компонент) возмущений поверхности, вертикальная координата - квадрат амплитуды для каждой моды [7]. Характеристики поверхностей КМ (одномерные СПМ $P_{1D}(n)$ экваториальных профилей, двумерные СПМ $P_{2D}(l)$ полных поверхностей, шероховатости и параметры локальных неоднородностей) необходимы для моделирования процесса сжатия (имплозии) КМ и предсказания нейтронного выхода.

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ проводится работа по получению КМ непрямого сжатия с требуемыми характеристиками (требования к поверхностям капсулы и твердого слоя топлива приведены в табл. 1). Отрабатываются технологии изготовления капсул из различных материалов (ПАМС (поли-альфа-метил-стирол), СН, Ве и др.) разных диаметров и толщиной стенки, капилляров, боксов-конвертеров и других составляющих криогенный мишеный узел (сокращенно – КМУ) элементов; отрабатываются технологии сборки элементов КМУ и технология получения твердого слоя топлива в КМ.

Табл. 1 – Требования к поверхностям капсулы и твердого слоя топлива КМ непрямого сжатия РФЯЦ-ВНИИЭФ

Параметр	СН-капсула	Ве-капсула
Шероховатость внешней поверхности капсулы	10 нм	30 нм
Шероховатость внутренней поверхности твердого DT слоя топлива	< 1 мкм	2 мкм
Несферичность и неконцентричность поверхностей капсулы и твердого слоя топлива	<1%	

Неотъемлемой частью этих технологий является измерение параметров всех элементов и их сборок, самыми сложными из которых с точки зрения диагностики являются капсула и твердый слой топлива

(ТСТ), поскольку диагностические методы должны быть неразрушающими и обеспечивающими достаточный уровень точности. Кроме того, конструкция КМ для ЛТС может варьироваться в зависимости от исследовательской задачи, и при этом постоянно совершенствуется, что влечет за собой непрерывное освоение новых технологий изготовления элементов КМУ и непрерывное совершенствование диагностических методов для выявления соответствия КМ и составляющих ее элементов всем предъявляемым требованиям.

Таким образом, *актуальность* темы исследования заключается в необходимости проведения комплексной диагностики параметров криогенной мишени и составных частей мишенного узла как в процессе отработки технологии получения мишени, так и перед постановкой мишени в эксперимент по зажиганию на лазерной установке мегаджоульного уровня энергии.

Степень разработанности темы. Существуют известные методы диагностики параметров капсулы и твердого слоя топлива, но информация, предоставляемая в публикациях, недостаточна для воспроизведения методов. В каждой научной организации, которая занимается данной проблемой, разрабатываются и постоянно совершенствуются свои программные пакеты для конкретного экспериментального оборудования и используемого метода. При этом программные пакеты обработки экспериментальных данных являются уникальными, не раскрываются и не распространяются. Это обуславливает необходимость создания собственной экспериментальной базы в РФЯЦ-ВНИИЭФ, разработки для конкретного оборудования диагностических методов и программ обработки экспериментальных данных, что до начала работы по теме диссертационного исследования в РФЯЦ-ВНИИЭФ не проводилось.

Цель диссертационного исследования. Целью исследования является создание экспериментальной базы и разработка методов диагностики параметров криогенной мишени и составляющих мишенный узел элементов. Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка конструкции и создание стенда для измерений параметров капсул методом конфокальной микроскопии (одномерные СПМ и двумерный СПМ возмущений внешней поверхности, а для оптически прозрачных капсул – также СПМ возмущений внутренней поверхности, толщина и разнотолщинность стенки). Разработка метода измерений характеристик полной поверхности капсул. Разработка

программы сшивки и анализа экваториальных поверхностей капсул. Получение трехмерной карты дефектов поверхностей капсул.

2. Разработка методов измерений параметров составных частей мишенного узла и узла в целом.

3. Создание систем оптической теневой диагностики параметров топлива в оптически прозрачной капсуле. Разработка и создание рентгеновской фазоконтрастной системы для диагностики параметров топлива (одномерные и двумерный СПМ внутренней поверхности, толщина и разнотолщинность слоя) в оптически прозрачной/непрозрачной капсуле, а также для измерений толщины и разнотолщинности стенки оптически непрозрачных полых капсул.

4. Двумерное численное моделирование прохождения видимого и рентгеновского излучения через криогенную мишень для нахождения взаимосвязей положений поверхностей с характерными особенностями на оптическом теневом и рентгеновском фазоконтрастном изображениях криомишени. Трехмерное численное моделирование для исследования влияния ряда факторов на формирование оптического теневого и рентгеновского фазоконтрастного изображений криомишени и, соответственно, на корректность вычисления параметров жидкого (форма поверхности, объем топлива) и твердого топлива. Оценка точности вычисления двумерного СПМ внутренней поверхности топлива с использованием трехмерной модели поверхности с гармоническими возмущениями поверхностей.

5. Разработка метода дозирования жидкого топлива по оптическому теневому и рентгеновскому фазоконтрастному изображению для получения твердого слоя топлива требуемой толщины. Разработка программ для автоматического анализа оптических теневых и рентгеновских фазоконтрастных изображений криогенной мишени с вычислением параметров твердого слоя топлива и трехмерным восстановлением внутренней поверхности твердого слоя топлива для анализа результатов эксперимента по формированию твердого слоя топлива.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является криогенная мишень. Предметом исследования является реализация экспериментальных методов, обеспечивающих диагностику параметров капсулы и твердого слоя топлива криогенной мишени (одномерные и двумерные спектры пространственных мод возмущений поверхностей, дефекты поверхностей, толщины и разнотолщинности слоев).

Научная новизна работы.

1. Показано, что метод конфокальной микроскопии можно применять не только для анализа параметров внешней поверхности капсулы и получения трехмерной карты дефектов поверхности, но и для неразрушающего контроля оптически прозрачных капсул: определения толщины стенки и анализа внутренней поверхности капсул при отсутствии дефектов в объеме и на внешней поверхности.

2. Показано, что по характеристическим яркому и бледному кольцам на оптических теневых изображениях криогенной мишени можно определять параметры твердого слоя топлива в плоскости экватора капсулы.

3. Предложен метод дозирования жидкого топлива для получения твердого слоя топлива требуемой толщины по характеристическому бледному кольцу на оптическом теневом изображении капсулы.

4. Показано, что по характеристическим темным кольцам на рентгеновском фазоконтрастном изображении полой капсулы, а также криогенной мишени можно определять параметры внутренних поверхностей однородных и неоднородных по толщине слоев в плоскости экватора.

5. Показано, что точность вычисления спектров пространственных мод возмущений внутренней поверхности твердого слоя топлива зависит от числа плоскостей наблюдения и ориентации двумерных мод возмущений относительно плоскостей наблюдения.

6. Показано, что диагностика параметров неоднородного по толщине твердого слоя топлива по двум осям наблюдения с трехмерным восстановлением внутренней поверхности твердого слоя топлива относительно мишенного узла с применением температурных расчетов позволяет выявлять недостатки конструкции мишенного узла.

Практическая значимость. Созданная в процессе работы по теме диссертационного исследования экспериментальная база и разработанный комплекс диагностических методов используются не только для измерения элементов криогенной мишени для ЛТС, но и для измерения параметров широкой номенклатуры лазерных мишеней: простых и сложносоставных, однослойных и многослойных, оптически прозрачных и непрозрачных мишеней сферической и цилиндрической формы в экспериментах по лазерному нагружению материалов и обработке диагностических методик на моделирующих лазерных установках ИЛФИ ФГУП «РФАЦ-ВНИИЭФ».

Методология диссертационного исследования. В рамках диссертационной работы были использованы современные методы:

- экспериментальные методы: метод конфокальной микроскопии для сканирования поверхностей капсул, метод оптической профилометрии «focus variation» для сканирования полусфер бокса-конвертера и мишенного узла, оптический теневой (ОТ) и рентгеновский фазоконтрастный (РФК) методы для получения изображений капсул и капсул с топливом;

- методы численного моделирования: моделирование распространения видимого и рентгеновского излучения через полые капсулы и капсулы с топливом с формированием изображений для определения механизма формирования изображений и оценки корректности ОТ и РФК методов;

- методы анализа: обработка экспериментальных данных с помощью разработанных программ анализа ОТ и РФК изображений, разработанной программы автоматической сшивки и анализа экваториальных поверхностей капсул, промышленного ПО для сшивки и анализа трехмерных моделей полусфер бокса-конвертера и мишенного узла.

Положения, выносимые на защиту.

1. Стенд измерений параметров капсул методом конфокальной микроскопии с автоматизированным сбором и обработкой данных позволяет выполнять анализ спектров пространственных мод (гармонических компонент) возмущений поверхностей капсул с разрешением до 3 нм, получать трехмерную карту дефектов поверхности, а для оптически прозрачных капсул - также выполнять анализ толщины стенки капсул с точностью 0,5%.

2. Рентгеновская фазоконтрастная система диагностики параметров полых капсул, а также криогенной мишени с автоматизированным анализом изображений позволяет определять спектры пространственных мод возмущений поверхностей и толщины слоев с разрешением до 2,5 мкм.

3. Оптическая теневая система диагностики параметров твердого слоя топлива с автоматизированным анализом изображений позволяет определять спектры пространственных мод возмущений внутренней поверхности твердого слоя топлива и толщину слоя с разрешением до 0,6 мкм при нулевой разнотолщинности слоя топлива.

Степень достоверности полученных результатов. Достоверность результатов, представленных в диссертации, обеспечивается использованием комплекса современных методов исследования: оптической конфокальной микроскопии, оптической профилометрии «focus variation», оптического теневого метода, рентгеновского фазоконтрастного метода, использованием современного ПО для численного моделирования и обработки экспериментальных данных, хорошей воспроизводимостью результатов, полученных на современном оборудовании ИЛФИ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», а также подтверждается публикациями результатов исследования в рецензируемых научных изданиях.

Публикации. Результаты работы отражены в 6 статьях в научных журналах [A1]-[A6], 5 из них ([A1]-[A5]) - в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук.

Апробация результатов. Материалы докладывались и обсуждались на 17 международных и всероссийских конференциях:

1. XX, XXV Харитоновские тематические научные чтения. Применение лазерных технологий для решения задач по физике высоких плотностей энергии, г. Саров, 2018, 2024.

2. XII, XIII, XIV Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям Национального центра физики и математики (НЦФМ) и Института лазерно-физических исследований (ИЛФИ) ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, 2019, 2022, 2023.

3. 17-я, 19-я, 20-я, 21-я научно-техническая конференция «Молодежь в науке», г. Саров, октябрь 2018, 2021, 2022, 2023.

4. XVI Международная конференция «Забабахинские научные чтения – 2023», г. Снежинск, 2023.

5. 15-я, 16-я, 17-я Международная школа молодых ученых и специалистов им. А. А. Курдюмова «IHISM», г. Саров, 2022, 2023, 2024.

6. 21-я Международная конференция «Оптика лазеров» (ICLO 2024), г. Санкт-Петербург, 2024.

7. 40-я Фортонская международная конференция «Взаимодействие интенсивных потоков энергии с веществом», п. Терскол, Приэльбрусье, 2025.

8. 52-я, 53-я Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, г. Звенигород Московской обл., 2025, 2026.

Личный вклад автора. Личный вклад автора заключается в разработке конструкции и сборке стенда измерения параметров капсул, автоматизации работы стенда, разработке метода сбора данных с полных поверхностей капсулы, получении и обработке экспериментальных данных, получении трехмерных карт дефектов поверхности капсул; измерении параметров полусфер боксов-конвертеров и мишенного узла; разработке конструкции и сборке ОТ систем для непрерывного наблюдения за формированием твердого слоя топлива в капсуле и диагностики параметров слоя; выполнении двумерного и трехмерного численного ОТ и РФК моделирования; разработке метода для осуществления дозирования жидкого топлива по ОТ и РФК изображениям для получения твердого слоя топлива требуемой толщины в КМ; разработке программ для автоматического контроля параметров твердого слоя топлива, в том числе с возмущенной внутренней поверхностью, по ОТ и РФК изображениям с трехмерным восстановлением внутренней поверхности твердого слоя топлива; обработке результатов формирования твердого слоя топлива в капсуле; выполнении температурных расчетов мишенного узла для анализа результатов экспериментов по формированию слоя топлива.

Автор принимал участие в разработке программы автоматической сшивки экваториальных поверхностей капсулы; разработке конструкции и сборке стенда РФК диагностики параметров капсул и КМ; в проведении экспериментов по получению твердого слоя топлива в КМ.

Структура и объем и диссертации. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы, включающего в себя 109 наименований. Работа изложена на 165 страницах, содержит 6 таблиц, 110 рисунков.

Основное содержание работы

Во Введении отражена актуальность проблемы, указаны научная новизна и практическая значимость работы; приведены цель и основные задачи работы, личный вклад автора; сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе сделан литературный обзор исследований в области разработки методов диагностики параметров КМ, проводимых в научно-исследовательских центрах разных стран мира: США (установки OMEGA

и NIF, а также участвующие в данной работе научные организации США и других стран), Китай (установки серии ShenGuang), Франция (установка LMJ), Российская Федерация (ФИАН). Обоснован выбор диагностических методов.

Во второй главе [A2, A6] приведены результаты исследований по разработке методов измерений параметров КМУ. Основными элементами КМУ с критичными для зажигания параметрами являются капсула, ТСТ (диагностике которого посвящена третья глава) и бокс-конвертер. Измерения параметров капсулы подразумевают собой измерения параметров ее внешней и внутренней поверхностей. Также измерениям подлежат все остальные составляющие КМУ элементы как в отдельности, так и в сборке.

Разработана и реализована конструкция стенда измерений параметров капсул методом конфокальной микроскопии на базе оптического профилометра, обеспечивающая сканирование полной поверхности капсулы с разрешением по вертикали до 3 нм. Автоматизированы работа стенда и обработка получаемых экспериментальных данных. Набор данных с одной капсулы состоит из 1296 файлов (по 72 на экватор), каждый из которых включает в себя топографию внешней поверхности, а для оптически прозрачной капсулы – также топографию внутренней поверхности и толщину стенки. Для автоматизации сшивки топографий поверхности капсулы, полученных с одного экватора, разработана программа. По сшитым экваторам (рис. 1) вычисляются $P_{1D}(n)$, необходимые для оценки качества поверхности и выявления соответствия поверхности капсулы предъявляемым требованиям, а также $P_{2D}(l)$ полной поверхности капсулы, необходимый для численного моделирования роста неустойчивостей при сжатии КМ в эксперименте по зажиганию (рис. 2). Экваторы между собой собираются в 3D-карту дефектов поверхности капсулы, необходимую для анализа процесса и результатов формирования твердого слоя топлива в капсуле, а также для исследования влияния развития неустойчивостей на локальных дефектах капсулы в эксперименте по сжатию КМ (рис. 3).

Отсутствие дефектов в объеме и на внешней поверхности оптически прозрачной капсулы позволяет выполнить аналогичный анализ внутренней поверхности. В случае, если капсула изготавливается на сферической



Рис.1. Сшитый экватор шириной 283 мкм для внешней поверхности ПАМС капсулы

матрице-подложке (например, осаждение Ве слоя на подложку методом напыления, получение НДС слоя на подложке в виде кремниевого шарика методом плазмохимического осаждения, где подложка затем вытравливается), предварительно может быть измерена внешняя поверхность подложки, при этом внутренняя поверхность сформированной капсулы, как правило, будет повторять внешнюю поверхность подложки.

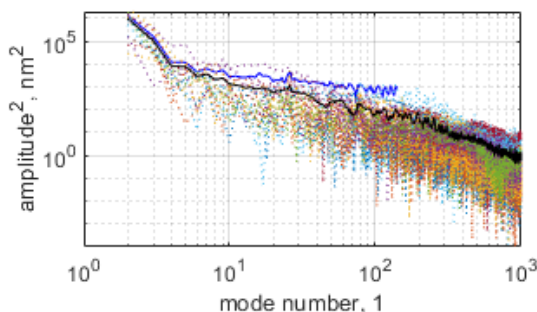


Рис. 2. СПМ внешней поверхности капсулы. Синий цвет - $P_{2D}(l)$, черный - усредненный по 18 анализируемым экваторам $\bar{P}_{1D}(n)$, точечные линии - $P_{1D}(n)$ для 18 экваториальных профилей

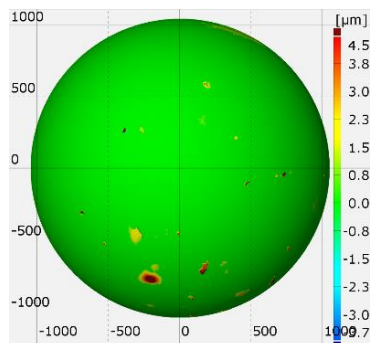


Рис. 3. 3D-карта дефектов внешней поверхности капсулы

Для оптически прозрачных капсул также определяются экваториальные толщины стенки с точностью 0,5%, что определяется характеристиками профилометра (рис. 4).

Для измерения толщины стенки оптически непрозрачных капсул применяется рентгеновский фазоконтрастный (РФК) метод. Разработана и реализована конструкция стенда рентгеновских измерений, позволяющая получать РФК изображение для оптически прозрачных и непрозрачных капсул. Стенд реализован на базе криостата, расположенного в перчаточном боксе с возможностью проведения РФК диагностики не только полых капсул, но и капсул с топливом, в том числе радиоактивным

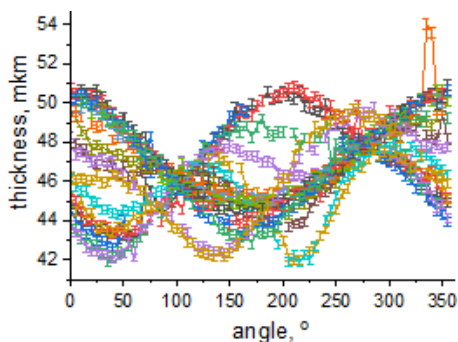


Рис. 4. Экваториальные толщины стенки капсулы

(DT). На стенд зарегистрировано ноу-хау. В качестве источника РИ используется микрофокусная рентгеновская трубка с вольфрамовым анодом, в качестве детектора РИ – камера с рентгеновской матрицей размером 1024×1024 пикселей. Расстояние от источника РИ до объекта исследования составляет 10 см, от объекта до детектора – 60 см.

На РФК изображениях полых капсул присутствуют темное кольцо (ТК) и светлые кольца (рис. 5). С целью определения механизма их образования проведено численное 2D моделирование распространения РИ через капсулу, в результате чего получено, что ТК – это зона отсутствия сигнала, образуемая вследствие отклонения за счет преломления лучей, падающих почти по касательной к сферической поверхности в области экватора капсулы, а светлые кольца образуются в результате попадания этих лучей на уже освещенную область. Получена взаимосвязь толщины стенки τ_{sh} капсулы с положением ТК:

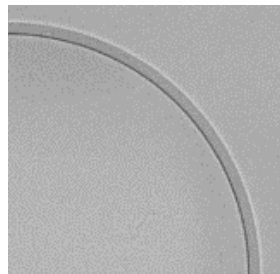


Рис. 5. Часть РФК изображения капсулы

$$R_{dr} - \left(\frac{d_{sh}}{2} - \tau_{sh}\right) \times \sqrt{1 - \left(\frac{d_{sh}}{2} - \tau_{sh}\right)^2} - 2 \times \delta_{sh} \times f \times \left(\frac{d_{sh}}{2} - \tau_{sh}\right) = 0 \quad (1)$$

где d_{sh} – внешний диаметр капсулы, R_{dr} – радиус характеристического внешнего края ТК, δ_{sh} – фазовый сдвиг в показателе преломления капсулы, f – расстояние от капсулы до детектора.

Для автоматической обработки РФК изображений разработана программа, основанная на поиске внешней границы капсулы и ТК в матрице изображения, в которой положение ТК с учетом показателя преломления материала капсулы для используемой энергии РИ пересчитывается в толщину стенки капсулы. Получено, что результаты измерений толщины стенки оптически прозрачных капсул РФК методом в пределах погрешностей согласуются с результатами, полученными методом конфокальной микроскопии. Применение РФК метода обеспечивает неразрушающий контроль экваториальных толщин стенки капсул с разрешением до 2,5 мкм, что определяется разрешением экспериментальных изображений (от 2,3 до 2,5 мкм/пиксель). Разрешение может быть повышено путем использования камеры с большим размером матрицы. РФК метод уступает в разрешении методу конфокальной микроскопии, но является единственным методом неразрушающего контроля толщины стенки оптически непрозрачных капсул. Проанализирована видимость дефектов на РФК изображениях с

использованием РФК изображений различных (ПАМС, СН и Ве) капсул путем сопоставления разных наблюдаемых дефектов с данными, полученными методом конфокальной микроскопии.

Далее измеренная капсула собирается с капилляром, предназначенным для напуска в нее топлива при проведении экспериментов по формированию твердого слоя топлива (ТСТ), устанавливается в бокс-конвертер, состоящий из двух предварительно измеренных полусфер. Полусфера сканируется на бесконтактном оптическом профилометре, работающем на принципе «focus variation», с пятнадцати разных ракурсов, в результате чего получается набор топографий, из которого собирается 3D-модель полусферы.

Собранный бокс-конвертер с капсулой внутри устанавливается на держатель бокса-конвертера, который имеет 8 отверстий, выполненных под углом к вертикальной оси держателя и предназначенных для заведения ЛИ в верхнее окно бокса-конвертера (рис. 6). В эксперименте по зажиганию КМ в шесть окон бокса-конвертера заводится ЛИ, которое проходит мимо капсулы с топливом, падает на золотую внутреннюю поверхность бокса-конвертера, на которой в свою очередь происходит конверсия ЛИ в РИ. Поэтому вся конструкция в сборе (КМУ) также сканируется с получением 3D модели и последующими измерениями. Информация о диаметрах и положениях центров всех окон бокса-конвертера и центрах отверстий на держателе бокса-конвертера позволит выполнить заведение 192 пучков ЛИ в камеру взаимодействия в шесть окон бокса-конвертера по известным координатам окон (фокус лазерных пучков находится в центрах окон). Информация о положении капсулы относительно внутренней поверхности бокса-конвертера позволит выполнять численное моделирование распространения ЛИ в боксе-конвертере и распространение РИ до поверхности капсулы. Измеренный КМУ после герметизации окон ввода ЛИ монтируется в криостат для получения твердого слоя топлива в капсуле, чему посвящена третья глава диссертации.

В третьей главе [A1-A6] приведены результаты исследований по разработке методов диагностики параметров жидкого и твердого топлива в капсуле КМ.

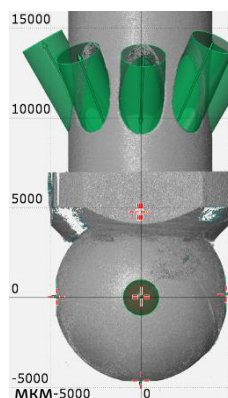


Рис. 6. 3D-модель мишенного узла

Отработка технологии получения твердого слоя топлива (ТСТ) в капсуле КМ проводится на двух стендах для исследования мишеней при низких температурах, основу которых составляют криостаты. На одном стенде возможна работа только с D_2 , что подразумевает собой формирование твердого слоя D_2 в капсуле с помощью воздействия на него ИК излучения (имитация тепловыделения при бета-распаде в ДТ топливе) [А1]. Соответственно, капсула должна быть прозрачна для длины волны применяемого ИК-излучения, чем и определяется ее материал: ПАМС или СН, поэтому реализована оптическая теньевая (ОТ) система наблюдения по двум ортогональным осям, что определяется числом пар диагностических окон бокса-конвертера. ОТ метод наблюдения за слоем топлива заключается в следующем. Параллельный пучок видимого излучения падает на капсулу, затем, преломляясь и отражаясь на границах капсулы и топлива, выходит из капсулы. Далее лучи, попадающие в апертуру наблюдения объектива, попадают на камеру, образуя ОТ изображение с характерными светлыми кольцами.

Второй стенд находится в перчаточном боксе, предназначенном для работы в том числе и с ДТ топливом, поэтому на стенде реализована РФК система получения изображений КМ. Соответственно, на данном стенде также возможна работа с оптически непрозрачными капсулами и ДТ топливом. Третий стенд с транспортным криостатом будет использоваться непосредственно для получения КМ с последующей ее доставкой без потери качества в камеру взаимодействия лазерной установки мегаджоульного уровня энергии.

С момента дозирования жидкого топлива необходимо постоянно осуществлять контроль параметров топлива (как жидкого, так и твердого). При использовании ОТ системы наблюдения контроль за параметрами топлива осуществляется по ОТ изображению в режиме реального времени (рис. 7). В качестве зондирующего излучения используются коллимированные

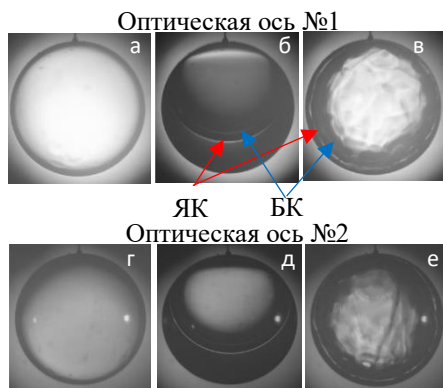


Рис. 7. ОТ изображения ПАМС капсулы Ø2 мм при наблюдении с двух осей в один момент времени:
а) и г) пустой,
б) и д) с жидким дейтерием,
в) и е) с твердым дейтерием

светодиодные источники: белого света мощностью до 4,5 Вт и источник с $\lambda=625$ нм и мощностью 700 мВт. Объективы используются с увеличением 2X ($NA=0,06$ и $WD=92$ мм), CMOS-камеры – с разрешением 4912×3684 пикселей.

Для объяснения механизма формирования ОТ изображения выполнено численное 2D моделирование прохождения видимого излучения через капсулу с топливом, по результатам которого определены основные группы лучей, образующие ОТ изображение и отличающиеся наборами преломлений и отражений на поверхностях. Получено, что две группы лучей зондируют внутреннюю поверхность ТСТ в плоскости фокусировки объектива (плоскости экватора капсулы) и образуют яркое кольцо (ЯК) и бледное кольцо (БК) на ОТ изображении, которые можно использовать в качестве характеристических, поэтому получены взаимосвязи положения колец с толщиной τ_{fuel} твердого слоя топлива, которые можно использовать при диагностике параметров топлива:

$$\frac{\tau_{fuel} = 1 - \tau_{sh} - \frac{R_{br}}{n_{cr} \times \cos(\arcsin(R_{ЯК}) - \arcsin(\frac{R_{ЯК}}{n_{sh}}) + \arcsin(\frac{R_{ЯК}}{n_{sh} \times (1 - \tau_{sh})}) - \arcsin(\frac{R_{ЯК}}{n_{cr} \times (1 - \tau_{sh})}))}}{\arcsin(R_{БК}) - \arcsin(\frac{R_{БК}}{n_{sh}}) + \arcsin(\frac{R_{БК}}{n_{sh} \times (1 - \tau_{sh})}) - \arcsin(\frac{R_{БК}}{n_{cr} \times (1 - \tau_{sh})}) + \arcsin(\frac{R_{БК}}{n_{cr} \times (1 - \tau_{sh} - \tau_{fuel})}) - 2 \times \arcsin(\frac{R_{БК}}{(1 - \tau_{sh} - \tau_{fuel})}) + \frac{\pi}{2} = 0} \quad (2)$$

где $R_{ЯК}$ - радиус ЯК, $R_{БК}$ - радиус БК, τ_{sh} – толщина стенки капсулы, n_{sh} и n_{cr} – показатели преломления капсулы и ТСТ для используемой длины волны видимого излучения соответственно. Также с помощью 2D моделирования выявлены факторы, влияющие на точность диагностики параметров ТСТ, самыми критичными из которых являются возмущения внутренней поверхности ТСТ.

Для более детального исследования построена 3D модель, в которой сферические поверхности КМ могут иметь возмущения, которые принято описывать с помощью сферических гармоник $Y_{lm}(\theta, \varphi)$:

$$Y_{lm}(\theta, \varphi) = \begin{cases} CP_l^m(\cos \theta) \cos(m(\varphi + \varphi_0)), m \geq 0 \\ CP_l^m(\cos \theta) \sin(|m|(\varphi + \varphi_0)), m < 0 \end{cases} \quad (4)$$

где $l=0, 1, 2, \dots$ – степень полиномов Лежандра $P_l(\cos \theta)$:

$$P_l(\cos \theta) = \frac{1}{2^l l!} \frac{d^l}{d(\cos \theta)^l} (\cos^2 \theta - 1)^l \quad (5)$$

$m=1, 2, \dots, l$ - порядок присоединенных функций Лежандра $P_l^m(\cos \theta)$:

$$P_l^m(\cos \theta) = (-1)^m (1 - \cos^2 \theta)^{\frac{m}{2}} \frac{d^m}{d(\cos \theta)^m} P_l(\cos \theta) \quad (6)$$

θ – полярный угол в сферической системе координат (ССК), определенный на интервале $(0 \leq \theta \leq \pi)$, φ – азимутальный угол $(0 \leq \varphi \leq 2\pi)$, φ_0 – начальная фаза, C – нормирующий коэффициент. Радиус возмущенной поверхности в ССК определяется выражением (7):

$$\rho_{harm}(\theta, \varphi) = r + dr(Y_{lm}(\theta, \varphi)) \quad (7)$$

где $dr(Y_{lm}(\theta, \varphi))$ – функция сферических гармоник, несущая в себе информацию о возмущениях (модах и их амплитудах).

На основе данной модели разработана программа трассировки видимого излучения через КМ. Получено, что возмущения поверхностей капсулы и ТСТ значительно искажают ход зондирующего излучения, в том числе и характеристических групп лучей, образующих ЯК и БК, приводя к смещениям, разрывам

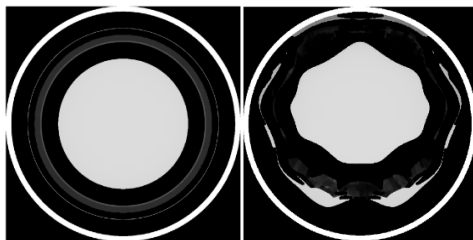


Рис. 8. Влияние возмущений поверхностей капсулы и ТСТ на формирование ОТ изображения

и размытию колец (пример приведен на рис. 8). При этом определяющее влияние на смещение положения колец оказывают две первые моды возмущений внутренней поверхности ТСТ ($l=1$ – неконцентричность, $l=2$ – несферичность), в результате чего вычисленное положение поверхности может отличаться от реального (при сильных возмущениях с разнотолщинностью Δt слоя топлива до 100% – более чем на 50 мкм при внешнем радиусе R капсулы 1000 мкм). Поскольку положения данных колец являются единственным средством оценки положения внутренней поверхности ТСТ в плоскости экватора капсулы, было исследовано влияние данных возмущений на формирование ЯК и БК и, соответственно, на корректность результатов диагностики.

По результатам ряда моделирований и анализа их результатов предложен метод введения поправок при диагностике параметров ТСТ оптическим теневым методом, основанный на том, что с помощью 3D моделирования оценивается влияние возмущений на формирование характеристических колец и это учитывается при вычислении параметров внутренней поверхности ТСТ. Пример проверки метода приведен на рис. 9. Данный метод оценки параметров сферически несимметричного ТСТ имеет важную экспериментальную значимость, т.к. в процессе

отработки технологии получения КМ для выявления проблем в текущих экспериментах и постановки задач на следующие эксперименты требуется выполнять диагностику параметров ТСТ с сильно возмущенной внутренней поверхностью.

Для ТСТ хорошего качества со сферической симметрией, вычисленное по ЯК и БК положение поверхности в плоскостях фокусировки объективов не будет содержать в себе ошибок вследствие искажения хода

характеристических групп лучей. Поэтому параметры ТСТ (толщина, $P_{1D}(n)$ и $P_{2D}(l)$) в случае однородной по толщине стенки оптически прозрачной капсулы и однородного по толщине ТСТ по ОТ изображению вычисляется с разрешением до 0,6 мкм для капсулы Ø2 мм, что определяется разрешением ОТ изображения.

Дозирование жидкого топлива в объем капсулы осуществляется по видимой высоте мениска жидкого топлива на ОТ изображении. С целью исследования влияния асимметрии поверхностей на связь реальной высоты мениска жидкого топлива в плоскости экватора капсулы и положений ЯК и БК на ОТ изображении проведено 2D и 3D моделирование распространения видимого излучения через капсулу с жидким топливом. Получено, что вычисляемая по ЯК и БК высота мениска отличается от реальной, при этом ошибка вычисления по БК меньше и положение БК находится ближе к поверхности жидкого топлива в плоскости фокусировки объектива (рис. 10). Поскольку видимая по БК высота мениска жидкости зависит не только от требуемой толщины ТСТ,

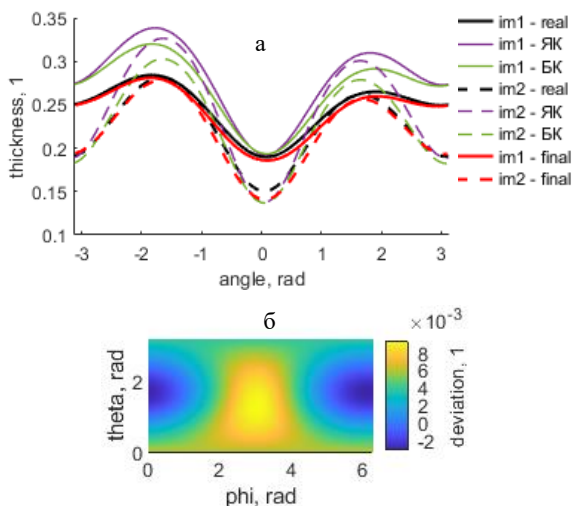


Рис. 9. Применение метода введения поправок для сильно возмущенной внутренней поверхности ТСТ: а) сравнение заданной толщины, вычисленной по ЯК и БК и скорректированной с учетом влияния возмущений (по изображениям im1 и im2 в 2 плоскостях), б) отклонение восстановленной поверхности от заданной. Величины нормированы на внешний радиус капсулы

но и от толщины стенки капсулы и показателей преломления капсулы и топлива, предложен способ определения видимой высоты мениска жидкого топлива для получения требуемой толщины $\tau_{fuel req}$ ТСТ – с помощью прямого 2D моделирования вычислять видимую по БК высоту мениска для параметров используемой капсулы с учетом формы свободной поверхности жидкости, которая описывается уравнением эллипсоида вращения вокруг вертикальной оси:

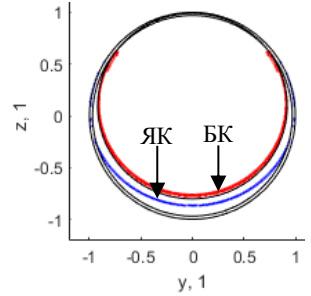


Рис. 10.
3D-моделирование формирования ЯК и БК на ОТ изображении капсулы с жидким топливом

$$\frac{2x^2}{\left(-1,15\tau_{fuel req}+1,01\left(\frac{d_{sh}}{2}-\tau_{sh}\right)\right)^2} + \frac{\left(z-1,49\tau_{fuel req}-0,03\left(\frac{d_{sh}}{2}-\tau_{sh}\right)\right)^2}{\left(-1,19\tau_{fuel req}+0,97\left(\frac{d_{sh}}{2}-\tau_{sh}\right)\right)^2} = 1 \quad (8)$$

При формировании ТСТ в оптически непрозрачной капсуле используется РФК метод диагностики. С помощью численного 2D моделирования получено, что на РФК изображении капсулы с топливом образуются 2 темных кольца (ТК), при этом внешнее ТК характеризует толщину стенки капсулы, а внутреннее ТК – толщину ТСТ (рис. 11). Получена связь толщины ТСТ с положением характеристического внешнего края внутреннего ТК:



Рис. 11. Часть смоделированного РФК изображения капсулы с ТСТ

$$\tau_{cr} = \frac{d_{sh}}{2} - \tau_{sh} - f \tan(2\alpha_1 - \alpha_0 - 2(\alpha_2 - \alpha_3) - \alpha_4) - R_{in dr} \quad (9)$$

$$\text{где } \alpha_0 = \arctan \frac{\left(\frac{d_{sh}}{2} - \tau_{sh} - \tau_{fuel}\right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{d_{sh}}{2} - \tau_{sh} - \tau_{fuel}\right)^2}}, \alpha_1 = \alpha_0 + \delta_{sh} \frac{\left(\frac{d_{sh}}{2} - \tau_{sh} - \tau_{fuel}\right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{d_{sh}}{2} - \tau_{sh} - \tau_{fuel}\right)^2}},$$

$$\alpha_2 = \arcsin\left(\frac{\sin(\alpha_1)}{1 - \tau_{sh}}\right), \alpha_3 = \arcsin\left(\frac{n_{sh}\sin(\alpha_1)}{n_{fuel}(1 - \tau_{sh})}\right), \alpha_4 = \arcsin\left(\frac{n_{sh}\sin(\alpha_1)}{n_0}\right),$$

n_{sh} , n_{fuel} , n_0 – показатели преломления капсулы, топлива и окружающей среды для используемой энергии РИ. Для вычисления толщины стенки капсулы по РФК изображению капсулы и топливом используется зависимость (1).

С помощью численного 3D моделирования распространения РИ через капсулу с топливом с возмущениями поверхностей получено, что для РФК метода возмущения поверхностей не вносят ошибки при диагностике параметров поверхностей, и метод можно применять для неразрушающего контроля экваториальных толщин стенки капсулы и толщины ТСТ с разрешением до 2,5 мкм для капсулы Ø2 мм.

С использованием 3D модели КМ с гармоническими возмущениями поверхностей показано, что точность вычисления $P_{2D}(l)$ внутренней поверхности ТСТ зависит от ограниченного конструкцией бокс-конвертера числа плоскостей наблюдения (две плоскости) и ориентации возмущений относительно плоскостей наблюдения. Увеличение числа плоскостей наблюдения приводит к повышению точности вычисления амплитуд мод. Амплитуда моды определяется точно, если максимум возмущения попал в обе плоскости наблюдения, в противном случае может быть занижена вследствие вычисления $P_{2D}(l)$ по усредненному по двум плоскостям $\overline{P_{1D}(n)}$.

После того, как для ОТ и РФК методов определены механизмы формирования изображений КМ, выявлены характеристические группы лучей, получены взаимосвязи положений характеристических особенностей на изображениях с положениями поверхностей КМ и исследовано влияние возмущений поверхностей на формирование изображений, данные методы могут применяться для обработки результатов экспериментов.

Для анализа результатов эксперимента по формированию ТСТ в капсуле разработана программа автоматической обработки ОТ и РФК изображений, полученных в один момент времени в двух плоскостях наблюдения. Принцип анализа изображений основан на поиске положений ЯК и БК (для ОТ изображения) или ТК (для РФК изображения) относительно внешней границы капсулы в матрицах изображений, развернутых через центр внешней границы капсулы. Положения колец с использованием полученных взаимосвязей характеристических колец с положениями поверхностей пересчитываются в толщину ТСТ с учетом показателей преломления капсулы и ТСТ для используемого зондирующего излучения. При наличии возмущений внутренней поверхности ТСТ для ОТ изображения применяется метод введения

поправок для учета влияния асимметрии поверхностей на формирование ЯК и БК, после чего выполняется восстановление поверхности относительно составляющих мишенного узла и с применением температурных расчетов КМУ анализируются результаты эксперимента по формированию ТСТ в капсуле, а также выявляются недостатки мишенного узла (рис. 12).

Оптический теневой метод, безусловно, обладает рядом преимуществ над РФК методом (имеет более высокое разрешение; позволяет выполнять непрерывное наблюдение и контроль за наполнением капсулы жидким топливом, начало и весь процесс кристаллизации топлива, формирование ТСТ; позволяет наблюдать гораздо большее количество различных дефектов капсулы и ТСТ), но применим только для оптически прозрачных капсул. При этом отработка технологии формирования монокристаллического ТСТ без дефектов может производиться только при непрерывном наблюдении за процессом формирования ТСТ, поскольку для обеспечения медленного роста монокристалла топлива требуется поддержание температуры возле тройной точки топлива, которая изменяется со временем и не является повторяемой величиной даже в пределах одного эксперимента. Оптическая теневая система наблюдения, благодаря возможности смещения плоскостей фокусировки объективов с экваторов мишени на ее поверхности, позволяет следить за ростом кристалла и видеть дефекты на всей внутренней поверхности топлива.

Поликристаллический слой топлива, не требующий столь тонкого баланса температуры, имеет много дефектов: трещины и бороздки на внутренней поверхности, канавки на стыке границ кристаллов, которые не сглаживаются в процессе выравнивания топлива и такой слой не может удовлетворять предъявляемым требованиям.

Для непрозрачных капсул РФК метод контроля остается единственно возможным, даже несмотря на то, что позволяет осуществлять контроль за процессом формирования ТСТ только раз в несколько минут при выключенном компрессоре криостата. Тем не менее, РФК метод обладает важным преимуществом над оптическим теневым: возмущения поверхностей мишени не вносят ошибок при диагностике вследствие искажения хода характеристических групп лучей.

В Заключение кратко сформулированы основные результаты диссертационной работы.

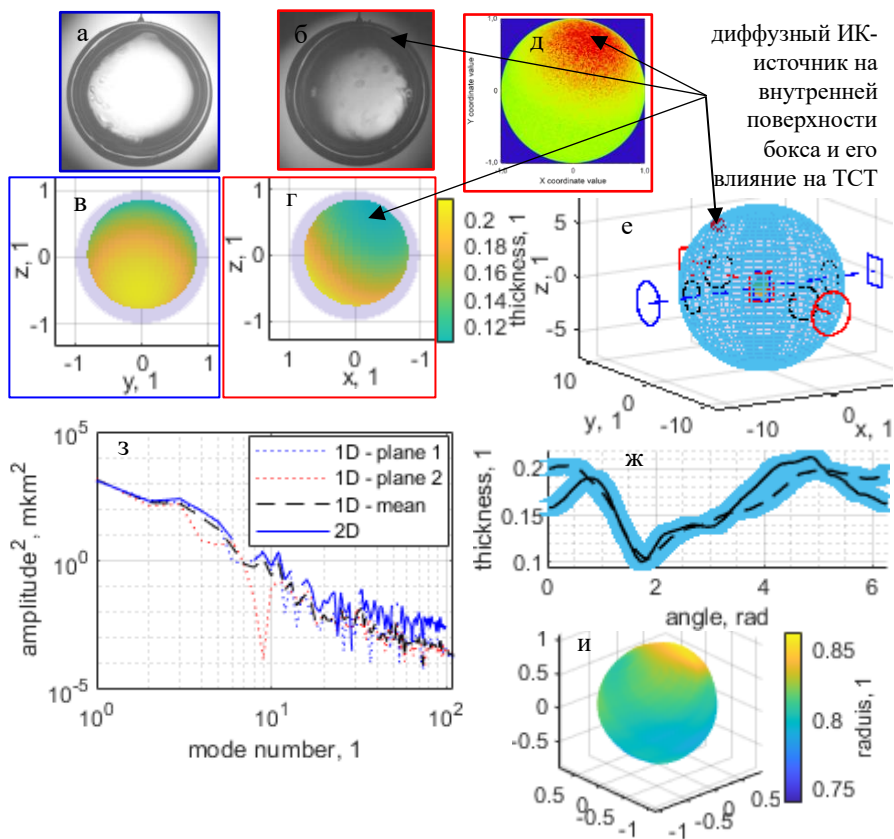


Рис. 12. Наблюдение КМ с двух ортогональных осей. (а), (б) - ОТ изображения. (в), (г) – вид восстановленной внутренней поверхности ТСТ, соответствующий изображениям (а) и (б), цвет – толщина ТСТ. д) интенсивность падающего на капсулу ИК-излучения. е) взаимное расположение капсулы с ТСТ, внутренней поверхности бокса, ОТ системы и ИК-источника. ж) толщина ТСТ в плоскостях (а) и (б). з) анализ внутренней поверхности ТСТ: синий - $P_{2D}(l)$, черный - $P_{1D}(n)$.

и) поверхность, построенная по $P_{2D}(l)$, возмущения распределены со случайной фазой. Величины (кроме (з)) нормированы на внешний радиус капсулы 1000 мкм

Основные результаты

1. Разработан и реализован стенд измерений параметров капсул методом конфокальной микроскопии, оптическая теневая (ОТ) система наблюдения капсулы с жидким и твердым топливом, система получения

рентгеновских фазоконтрастных (РФК) изображений полых капсул и капсул с топливом.

2. Показано, что метод конфокальной микроскопии можно применять для анализа внешней поверхности капсул (ПАМС, СН, Ве и др.), включая:

- вычисление одномерного СПМ $P_{1D}(n)$ экваториальных профилей поверхностей капсул с разрешением до 3 нм для выявления соответствия капсулы требованиям,

- вычисление двумерного СПМ $P_{2D}(l)$ полной поверхности для моделирования роста неустойчивостей при имплозии мишени,

- получение трехмерной карты дефектов поверхности для анализа результатов эксперимента по формированию твердого слоя топлива в капсуле и для исследования влияния развития неустойчивостей на локальных дефектах капсулы при имплозии мишени, а также может быть использован для неразрушающего контроля оптически прозрачных капсул (ПАМС, ПС, СН и др.): определения экваториальных толщин стенки капсулы с точностью 0,5%, средней толщины стенки $\bar{\tau}$, разнотолщинности $\Delta\tau$ и для анализа внутренней поверхности капсулы.

3. С помощью прямого 2D моделирования распространения видимого и рентгеновского излучения через полую капсулу и капсулу с топливом определены механизмы формирования ОТ и РФК изображений, выявлены характеристические группы лучей, для которых решены обратные задачи и получены зависимости, используемые для вычисления толщин стенки капсулы и слоя топлива по ОТ и РФК изображениям.

4. Получено, что параметры твердого слоя топлива ($\bar{\tau}$, $\Delta\tau$, $P_{1D}(n)$ и $P_{2D}(l)$) в оптически прозрачной капсуле определяются по характеристическим кольцам (ЯК и БК) на ОТ изображении с разрешением до 0,6 мкм для капсулы Ø2 мм при нулевой разнотолщинности слоя топлива.

5. С помощью численного 3D моделирования показано, что для ОТ метода возмущения внутренней поверхности ТСТ искажают ход характеристических групп лучей, при этом определяющее влияние оказывают возмущения в модах $l=1$ и $l=2$. Предложен метод учета влияния возмущений на формирование характеристических колец.

6. С помощью двумерного и трехмерного численного моделирования показано, что для получения требуемой толщины ТСТ оптимальный способ определения количества напускаемого в капсулу жидкого топлива по ОТ изображении заключается в контроле высоты

мениска жидкого топлива по характеристическому бледному кольцу с учетом параметров капсулы и формы поверхности жидкости.

7. Получено, что параметры как полой оптически прозрачной/непрозрачной капсулы, так и капсулы с топливом, в том числе с возмущениями поверхностей, по характеристическим темным кольцам на РФК изображении определяются с разрешением до 2,5 мкм для капсулы Ø2 мм. При этом разрешение может быть повышено использованием камеры с большим размером матрицы.

8. С использованием 3D модели капсулы с твердым топливом, внутренняя поверхность которого имеет гармонические возмущения, показано, что точность вычисления $P_{2D}(l)$ внутренней поверхности ТСТ зависит от ограниченного конструкцией бокса-конвертера числа плоскостей наблюдения и ориентации двумерных мод возмущений относительно плоскостей наблюдения.

9. Показано, что диагностика параметров неоднородного по толщине ТСТ по двум осям наблюдения с трехмерным восстановлением внутренней поверхности ТСТ относительно мишенного узла с применением температурных расчетов позволяет в процессе отработки технологии получения ТСТ с требуемыми характеристиками анализировать результаты эксперимента и выявлять недостатки мишенного узла.

Основные публикации по теме диссертации

Результаты диссертации отражены в следующих публикациях в научных журналах, рекомендованных для защиты в диссертационных советах МГУ по специальности и отрасли наук:

А1. Зарубина Е.Ю., Рогожина М.А., Чугров И.А. Получение криогенной мишени непрямого облучения с твердым слоем дейтерия // Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2024. - № 79. - С. 2410401. EDN: DMVBPI. Импакт-фактор 0.651 (РИНЦ).

Авт. вклад 1.2 из 1.7 п.л.

Zarubina E.Yu. , Rogozhina M.A., Chugrov I.A. Creation of the Indirect-Drive Cryogenic Target with the Solid Deuterium Layer // Moscow University Physics Bulletin. – 2024. – Vol.79, № 1. – pp. 25–38. EDN: HZULKT. Импакт-фактор 0.4 (JIF). **Авт. вклад 1.2 из 1.7 п.л.**

А2. Зарубина Е.Ю., Рогожина М.А., Соломатина Е.Ю., Чугров И.А. Разработка методов аттестации оболочки и слоя топлива криогенной мишени непрямого облучения для лазерного термоядерного синтеза //

Дефектоскопия. - 2025. - № 3. - С. 47-58. EDN: QIONPY. Импакт-фактор 1.21 (РИНЦ). **Авт. вклад 1.2 из 1.4 п.л.**

Zarubina E.Yu., Rogozhina M.A., Solomatina E.Yu., Chugrov I.A. Development of Methods for Shell and Fuel Layer Characterization of Indirect-Drive Cryogenic Target for Laser Thermonuclear Fusion // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2025. - Vol.61, № 3. - pp. 343–352. EDN: SBYPMV. Импакт-фактор 0.9 (JIF). **Авт. вклад 1.0 из 1.2 п.л.**

А3. Зарубина Е.Ю., Рогожина М.А., Чугров И.А. Трехмерное моделирование распространения видимого излучения через криогенную мишень с гармоническими возмущениями поверхностей оболочки и твердого слоя топлива // Дефектоскопия. - 2025. - № 11. - С. 44-53. EDN: RSFXHX. Импакт-фактор 1.21 (РИНЦ). **Авт. вклад 1.1 из 1.2 п.л.**

Zarubina E.Yu., Rogozhina M.A., Chugrov I.A. Three-Dimensional Modelling of Visible Radiation Propagation Through Cryogenic Target with Harmonic Perturbations of Shell and Solid Fuel Layer // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2025. - Vol. 61, № 11. - pp. 1341–1348. EDN: BSVDUU. Импакт-фактор 0.9 (JIF). **Авт. вклад 0.9 из 1.0 п.л.**

А4. Зарубина Е.Ю., Рогожина М.А. Теневой метод диагностики криогенного слоя изотопов водорода в мишени непрямого облучения для лазерного термоядерного синтеза // Ядерная физика и инжиниринг. – 2023. – Т. 14, № 4. - С. 335–338. EDN: XFRWET. Импакт-фактор 0.124 (РИНЦ). **Авт. вклад 0.4 из 0.5 п.л.**

Zarubina E.Yu., Rogozhina M.A. Shadowgraphic Characterization Method of a Cryogenic Hydrogen Isotope Layer in an Indirect-Drive Target for Inertial Confinement Fusion // Physics of Atomic Nuclei. – 2022. - Vol. 85, № 10. - pp. 1638–1641. EDN: SKIGZF. Импакт-фактор 0.4 (JIF). **Авт. вклад 0.4 из 0.5 п.л.**

А5. Рогожина М.А., Зарубина Е.Ю. Формирование однородного по толщине криогенного слоя дейтерия в сферической оболочке как этап создания криогенной мишени для лазерного термоядерного синтеза // Ядерная физика и инжиниринг. – 2023. – Т. 14, № 5. - С. 441–445. EDN: JXYMPN. Импакт-фактор 0.124 (РИНЦ). **Авт. вклад 0.3 из 0.5 п.л.**

Rogozhina M.A., Zarubina E.Yu. Formation of a Cryogenic Deuterium Uniform-Thickness Layer in a Spherical Shell as a Step in Making a Cryogenic Target for Laser Fusion // Physics of Atomic Nuclei. – 2022. -Vol. 85, № 10. - pp. 1642–1645. EDN: HHQNNE. Импакт-фактор 0.4 (JIF). **Авт. вклад 0.3 из 0.5 п.л.**

А также в других научных журналах:

Аб. Зарубина Е.Ю., Рогожина М.А., Чугров И.А. Диагностика параметров слоя изотопов водорода в криогенной мишени непрямого облучения для лазерного термоядерного синтеза // Физмат. – 2024. – Т.2, № 2. - С.134-154. EDN: KZEFJA. Импакт-фактор 0.462 (РИНЦ). **Авт. вклад 2.2 из 2.3 п.л.**

Список цитируемой литературы

1. Басов Н.Г., Крохин О.Н. Условия разогрева плазмы излучением оптического генератора // ЖЭТФ, 1964, Т.46. С.171-175.
2. Mary L. Spaeth, Kenneth R. Manes, M. Bowers, et al. National Ignition Facility Laser System Performance // Fusion Science and Technology, 2016, V. 69, No. 1, P. 366-394. <http://dx.doi.org/10.13182/FST15-136>.
3. Abu-Shawareb H. et al. (The Indirect Drive ICF Collaboration). Achievement of Target Gain Larger than Unity in an Inertial Fusion Experiment // PHYSICAL REVIEW LETTERS, 2024, No. 132, P. 065102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.065102>.
4. Miquel J-L, Lion C, Vivini P. The Laser Mega-Joule: LMJ & PETAL status and Program Overview // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. - №688. - pp. 012067. DOI:10.1088/1742-6596/688/1/012067.
5. Гаранин С.Г., Гарнов С.В., Сергеев А.М., Хазанов Е.А. Мощные лазеры для физики высоких плотностей энергии // Вестник Российской академии наук, 2021, Т. 91, №. 5. С. 435-445. DOI: 10.31857/S0869587321050108.
6. <https://lasers.llnl.gov/science/achieving-fusion-ignition>.
7. S. W. Haan, J. D. Lindl, D. A. Callahan, D. S. Clark. Point design targets, specifications, and requirements for the 2010 ignition campaign on the National Ignition Facility // Physics of Plasmas, 2011, V. 18, P. 051001. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3592169>.