

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ АТТЕСТАЦИИ ОБОЛОЧКИ И СЛОЯ ТОПЛИВА КРИОГЕННОЙ МИШЕНИ НЕПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

© 2025 г. Е.Ю. Зарубина^{1,2,*}, М.А. Рогожина^{1,**}, Е.Ю. Соломатина^{1,***}, И.А. Чугров^{1,****}

¹ Российский Федеральный Ядерный Центр — Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Экспериментальной Физики (РФЯЦ—ВНИИЭФ),

Россия 607188 Саров, пр-т Мира, 37

² МГУ им. М.В. Ломоносова, филиал МГУ в г. Сарове,

Россия 607328 Саров, ул. Парковая, 8

E-mail: *zarubinaelena2@yandex.ru; **rogozhina.marina.a@gmail.com;

eyusolom@gmail.com; *cahbi4var@mail.ru

Поступила в редакцию 10.02.2025; после доработки 22.02.2025

Принята к публикации 28.02.2025

Криогенная мишень непрямого облучения представляет собой расположенную в боксе-конверторе полую сферическую оболочку-капсулу со сферически симметричным твердым слоем дейтерий-тритиевого топлива на ее внутренней поверхности. Постановке криогенной мишени в эксперимент по зажиганию на установке мегаджоульного уровня энергии предшествует всесторонняя аттестация всех составляющих мишень элементов и аттестация готовой мишени. В данной работе описан метод аттестации полной внешней поверхности оболочки криогенной мишени с помощью конфокальной микроскопии, приведены результаты развития оптического теневого метода и рентгеновского метода с фазовым контрастом для диагностики слоя топлива в криомишени. Результаты шивки полной внешней поверхности оболочки используются для интерпретации результатов экспериментов по формированию твердого слоя топлива в криомишени. Разработанный комплекс программ для аттестации слоя топлива применяется для дозирования жидкого топлива, диагностики параметров твердого слоя топлива и оценки корректности результатов диагностики.

Ключевые слова: оболочка, капсула, криогенный слой, конфокальная микроскопия, оптическая теневая диагностика, рентгеновская диагностика с фазовым контрастом.

DEVELOPMENT OF METHODS FOR SHELL AND FUEL LAYER CHARACTERIZATION OF INDIRECT-DRIVE CRYOGENIC TARGET FOR LASER THERMONUCLEAR FUSION

© 2025 E.Yu. Zarubina^{1,2,*}, M.A. Rogozhina^{1,**}, E.Yu. Solomatina^{1,***}, I.A. Chugrov^{1,****}

¹The Russian Federal Nuclear Center—All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics (RFNC—VNIIEF), Russia 607188 Sarov, Mira Street, 37

²MSU named after M.V. Lomonosov, MSU Branch in Sarov, Russia 607328 Sarov, Parkovaya str., 8

E-mail: *zarubinaelena2@yandex.ru; **rogozhina.marina.a@gmail.com;

eyusolom@gmail.com; *cahbi4var@mail.ru

Indirect-drive cryogenic target is a located in box-converter hollow spherical shell-capsule with spherically symmetric solid layer of deuterium-tritium fuel on its inner surface. Placing a cryogenic target in an experiment on ignition at a megajoule energy level facility is preceded by thorough characterization of all component elements of the target and characterization of finished target. This paper describes the characterization method of the entire external surface of the cryogenic target using a confocal scanning, and presents the results of developing an optical shadow method and an X-ray phase-contrast method for characterization the cryogenic fuel layer in the target. The results of stitching the entire external surface are used for interpretation of the results of experiments on the solid fuel layer formation in a cryogenic target. The developed program system for characterization of fuel layers is used for measuring the liquid fuel, for characterization of the solid fuel layer parameters and for evaluation the robustness of the characterization results.

Key words: capsule, cryogenic layer, confocal microscope, optic shadowgraphic characterization, x-ray phase-contrast imaging.

DOI: 10.31857/S0130308225030042

ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений исследований, предусмотренных в рамках федерального проекта (ФП-3) «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий» комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до

2024 года” (продлена до 2030 года Указом Президента Российской Федерации от 14.04.2022 г. № 202), является направление «Лазерный термоядерный синтез и технологии» [1, 2]. Глобальной целью данных работ является обеспечение экономической и энергетической безопасности страны. Цель работ в области инерционного, а именно лазерного термоядерного синтеза (ЛТС), являющегося альтернативой магнитному управляемому термоядерному синтезу (УТС), состоит в проведении фундаментальных исследований физики высоких энергий и сверхсильных полей, а также в заделе работ по элементам установки ЛТС.

Термоядерный синтез потенциально является экологически чистым (без углеродосодержащих выбросов в окружающую среду), безопасным (термоядерные реакции не цепные), неограниченным в ресурсах источником энергии. В качестве такого источника может быть использована реакция синтеза двух легких атомных ядер дейтерия и трития с образованием гелия и нейтрона с энергией 17,6 МэВ. Для осуществления такой реакции может использоваться криогенная мишень, в общем виде представляющая собой полую сферическую оболочку (капсулу, аблятор) диаметром около 2 мм с равномерно распределенным по ее внутренней поверхности твердым слоем дейтерий-тритиевого (DT) топлива. Оболочка с DT-топливом располагается в боксе-конверторе диаметром около 10 мм, обеспечивающем преобразование интенсивного лазерного излучения (ЛИ) в квазиравновесное рентгеновское, а также высокую симметрию облучения оболочки.

Эксперименты по сжатию криогенной мишени проводятся на установках мегаджоульного уровня энергии: NIF в США, LMJ во Франции, на установках серии Shenguang в Китае. Зажигание считается достигнутым, если энергия выхода термоядерной реакции синтеза превышает энергию, вложенную в лазерный импульс (КПД > 100 %). В 2021—2022 гг. на установке NIF было реализовано термоядерное зажигание на криогенной мишени непрямого облучения и получен рекордный нейтронный выход, равный $1,38 \cdot 10^{18}$ нейтронов (3,88 МДж) [3].

Основные этапы получения криомишени следующие (с акцентом на аттестацию криомишени): аттестация оболочки, капилляра для наполнения оболочки изотопами водорода, бокса-конвертора, сборка данных элементов в мишенный узел с последующей аттестацией положения оболочки внутри бокса-конвертора; установка мишенного узла в криостат, откачка систем до высокого вакуума, наполнение оболочки изотопами водорода (дозирование), замораживание топлива и выравнивание внутренней поверхности топлива, которая выстраивается по изотермической поверхности (или медленное выращивание монокристаллического слоя топлива, что потенциально исключает границы и канавки между кристаллами в поликристаллическом слое) с оценкой параметров слоя топлива в процессе его формирования, аттестация конечного твердого слоя топлива; при соответствии криомишени предъявляемым ей требованиям (которые будут описаны ниже) выполняется перемещение мишени в транспортном криостате в камеру взаимодействия для осуществления зажигания.

Материал оболочки со временем менялся от полимерной (СН), бериллиевой (Ве), многослойной конструкции с разными слоями и разными уровнями допирующих элементов (например, СН(Ge), Ве(Cu)) [4] до высокоплотного углерода (HDC) [5]. Углерод превосходит другие материалы в плане энергетического выхода и стабильности имплозии мишени, именно на криогенной мишени с HDC-оболочкой и было получено зажигание на NIF [3].

В зарубежной литературе приводятся следующие требования к характеристикам криогенной мишени. Сферичность внешней и внутренней поверхностей оболочки должна быть выше 99,9 %, однородность (толщины) — выше 99 % [6]. Отклонения от однородности, сферичности, концентричности всех слоев криомишени должны быть менее 1—2 % [7, 8]. В работе [9] предъявляются требования к среднеквадратичной (rms) шероховатости поверхностей оболочки и топлива: ~10—1000 нм. Характеристики поверхностей могут быть представлены в виде спектра плотности мощности (рис. 1) [10]. Разные моды возмущения поверхностей по-разному влияют на имплозию (сжатие) криомишени: неоднородности поверхностей в низких модах приводят к неоднородному сжатию мишени, а в высоких модах — вызывают перемешивание на границах областей при имплозии. Кроме того, характеристики поверхностей криомишени (спектры плотности мощности и rms-шероховатости поверхностей, параметры локальных неоднородностей поверхностей, положение первоначального зерна кристалла твердого топлива (льда) при формировании монокристаллического слоя топлива и др.) необходимы для моделирования процесса имплозии и предсказания нейтронного выхода [11].

В эксперименте по зажиганию на NIF выполняется диагностика параметров топлива только по трем взаимно ортогональным осям рентгеновским методом с фазовым контрастом [12]. Даже с тремя осями наблюдения может быть пропущено много неоднородностей поверхностей криогенного слоя, но количество осей наблюдения не может быть увеличено ввиду того, что отношение площади окон для ввода лазерного излучения к площади внутренней поверхности бокса-конвертора не должно превышать определенного значения для эффективного преобразования ЛИ в

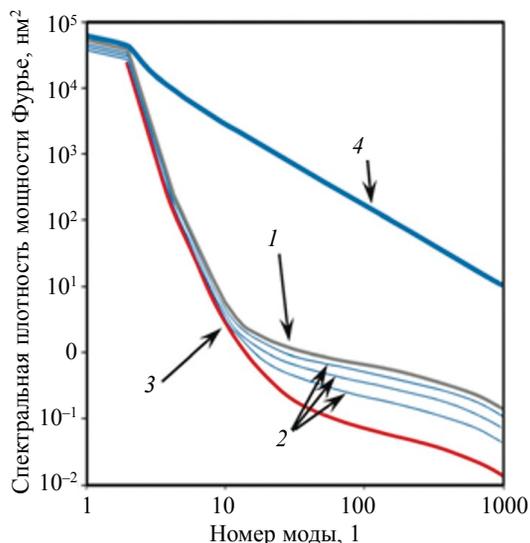


Рис. 1. Требования NIF к поверхностям криомишени [10]. Максимально допустимый одномерный спектр мощности шероховатости поверхностей криомишени (для экваториальных прописей поверхностей): 1 — внешняя поверхность оболочки; 2 — первая-третья средние поверхности оболочки; 3 — внутренняя поверхность оболочки; 4 — внутренняя поверхность льда. Поверхности определяются относительно центра внутренней поверхности оболочки, поэтому мода 1 (неконцентричность) не определяется для этой поверхности.

рентгеновское излучение (РИ). Поэтому огромное количество исследований касательно формирования и аттестации криогенного слоя проводится на множестве дополнительных исследовательских экспериментальных стендов NIF и OMEGA: эксперименты по формированию слоя в боксах различных конструкций (цилиндрические хольраумы различных размеров с разными конструктивными элементами [12], массивные сферы выравнивания с диаметром от 15 до 25 мм [13]), эксперименты по формированию DT-слоя с помощью бета-выравнивания [14] и по формированию D_2 -слоя с использованием инфракрасного (ИК) излучения [15], эксперименты на оптически прозрачных оболочках только с оптической теневой диагностикой параметров криогенного слоя [16], только с оптической интерферометрической диагностикой [17], со взаимодополняющими оптической теневой и оптической интерферометрической диагностикой [15], с оптической теневой и рентгеновской с фазовым контрастом диагностикой [18], эксперименты на оптически непрозрачных оболочках только с рентгеновской диагностикой с фазовым контрастом [11]. В большинстве из упомянутых экспериментальных стендов оболочка с топливом может вращаться относительно диагностических осей с целью изучения возможностей полного трехмерного восстановления внутренней поверхности криослоя (при этом в эксперименте по зажиганию мишень не вращается), а также с целью валидации применяемых диагностических методов.

В настоящее время и в РФЯЦ—ВНИИЭФ создается мощная лазерная установка мегаджоульного уровня энергии для проведения экспериментов по лазерному термоядерному синтезу (ЛТС) [19]. На данной установке планируется проведение экспериментов по сжатию криогенной мишени. Максимальная энергия лазерного излучения будет достигать значения 2,8 МДж. Принципиальным отличием от конструкции мишени NIF является сферическая форма бокса-конвертора (на NIF — цилиндрический хольраум), а также другая длина волны ЛИ (на NIF 0,351 мкм — третья гармоника неодимового лазера) (общую схему см. на рис. 2а) [20]. В боксе-конверторе предусмотрено шесть отверстий для ввода ЛИ диаметром 2 мм, четыре из которых (распологающихся в горизонтальной экваториальной плоскости бокса-конвертора) могут использоваться для диагностики качества внутренней поверхности криогенного слоя.

Первоначально проведение экспериментов по сжатию планировалось на криогенной мишени (криомишени) диаметром около 2 мм, с оболочкой из CH или $Be(Cu)$, твердым слоем DT-топлива, с внутренним диаметром бокса-конвертора 10 мм, аналогичной криомишени NIF за исключением бокса-конвертора [21]. В связи с осуществлением зажигания на мишени с оболочкой из HDC на NIF, в РФЯЦ—ВНИИЭФ проведены теоретические расчеты по зажиганию мишени с оболочкой из HDC [20]. Выявлена проблема с доставкой лазерного излучения на оболочку из-за сферической геометрии бокса-конвертора и отличающейся длины волны ЛИ, в связи с чем необходимо увеличение размеров бокса-конвертора до диаметра 1,4 см с размерами окон для ввода ЛИ 2 мм, при этом диаметр и толщина HDC-оболочки составят 3,35 мм и 75 мкм соответственно, толщина DT-льда — 100 мкм (модель увеличенной криомишени) (см. рис. 2).

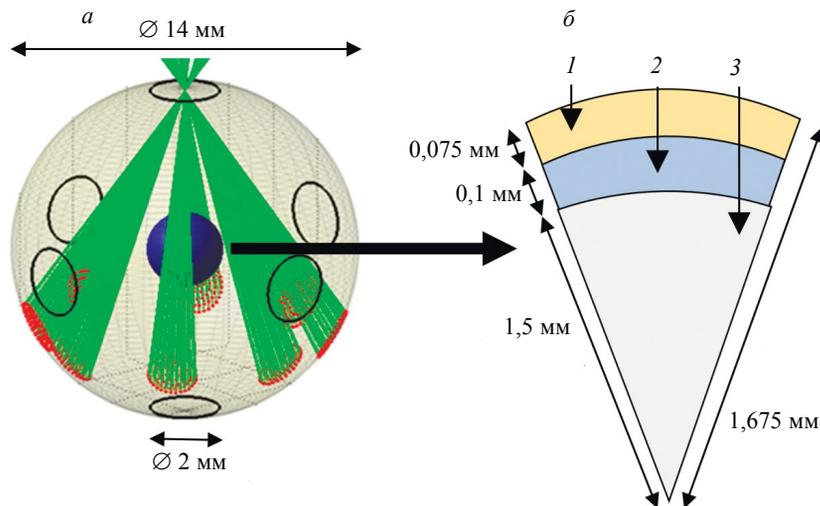


Рис. 2. Конструкция мишени увеличенного размера РФЯЦ—ВНИИЭФ: *a* — бокс-конвертор диаметром 1,4 см с шестью окнами диаметром 2 мм для ввода ЛИ (ввод ЛИ показан для одного окна); *б* — часть оболочки с топливом: 1 — оболочка из HDC (плотность 3,51 г/см³); 2 — твердый слой DT-топлива (плотность 0,25 г/см³); 3 — насыщенный DT-газ (плотность 0,3 мг/см³).

Также в случае неполного введения лазерных модулей в эксплуатацию на установке мегаджоульного уровня энергии могут проводиться эксперименты по изучению влияния асимметрии облучения криомишени, асимметрий различных элементов криомишени (например, несферичность и неконцентричность поверхностей оболочки с топливом, асимметрия бокса-конвертора, наличие капилляра для напуска топлива в оболочку и поддерживающих оболочку тентов и т.д.) на генерацию нейтронов в камере взаимодействия, эксперименты по асимметричной имплозии с целью проверки диагностических систем в камере взаимодействия лазерной установки, аналогично экспериментам на установке LMJ [22].

Криомишени, поставляемые в лазерный эксперимент по зажиганию на установке мегаджоульного уровня энергии в РФЯЦ—ВНИИЭФ, должны соответствовать высоким требованиям. Отклонение от сферичности оболочки должно быть менее 1 %, неконцентричность поверхностей — менее 1 %, шероховатость поверхностей оболочки — 70 нм. Отклонения от сферичности и концентричности внутренней поверхности криогенного слоя должны быть менее 1 %, шероховатость менее 1 мкм. Точность расположения центра оболочки относительно центра бокса-конвертора: ± 30 мкм. Эти требования обусловлены тем, что на неоднородностях поверхностей криомишени развиваются гидродинамические неустойчивости, которые вызывают перемешивание горячих и холодных областей топлива и, как следствие, уменьшают выход термоядерной реакции [9].

Выравнивание DT-слоя происходит за счет бета-распада трития без внешних воздействий, поэтому DT-слой, соответствующий требованиям, можно получать как в оптически прозрачных оболочках (например, полистирол, поли-альфа-метилстирол (ПАМС)), так и в оптически непрозрачных (например, Be, Be(Cu), HDC). Выравнивание D₂-слоя возможно при внешнем воздействии на слой с помощью ИК-излучения с длиной волны, близкой к максимуму поглощения дейтерия (3,16 мкм), поэтому получение слоя D₂ возможно только в оптически прозрачных оболочках, прозрачных в том числе для длины волны ИК-излучения.

В РФЯЦ—ВНИИЭФ в настоящее время отработка технологии получения криомишени проводится на двух стендах для исследования мишеней при низких температурах [23]. Один стенд предназначен для работы с нерадиоактивными изотопами водорода (D₂) с оптической теневой диагностикой по двум взаимно ортогональным осям. Поэтому на данном стенде возможно получение криомишени только с оптически прозрачной оболочкой. Второй стенд находится в перчаточном боксе, предназначенном для работы с радиоактивным изотопом водорода, на стенде возможна рентгеновская с фазовым контрастом диагностика по одной оси и оптическая теневая диагностика по другой оси. Соответственно, на данном стенде возможна работа с криомишнями с оптически прозрачными оболочками с криогенным слоем D₂ или DT, а также работа на непрозрачных оболочках с криогенным слоем DT. Еще один, третий, стенд планируется непосредственно для получения криомишени с последующей ее доставкой без потери качества (криостат является транспортным) в камеру взаимодействия лазерной установки

мегаджоульного уровня энергии. Конструкция криогенной мишени предусматривает диагностику только по двум взаимно ортогональным осям и исключает ее вращение в боксе-конверторе относительно диагностических окон бокса.

Неотъемлемой частью получения криомишени является аттестация всех ее элементов, основными из которых являются оболочка, капилляр для наполнения оболочки изотопами водорода, бокс-конвертор, криогенный слой топлива. Несмотря на то, что в мире уже проведена большая работа по разработке методов аттестации элементов криомишени разных конструкций, разработка и развитие методов аттестации в РФЯЦ—ВНИИЭФ не теряет своей актуальности, поскольку из-за отличающейся длины волны ЛИ установки мегаджоульного уровня энергии и принципиального отличия бокса-конвертора конструкция криомишени постоянно изменяется, что потенциально влечет за собой изменение стендов сборки, модернизацию стендов и методов аттестации элементов криомишени.

Для разработки программ аттестации криогенного слоя оптическим теневым и рентгеновским с фазовым контрастом методами необходимо построить теоретические модели прохождения видимого и рентгеновского излучений через криомишень; разработать программы трассировки излучения с образованием изображения; решить обратные задачи для нахождения связей характеристических особенностей на изображениях с параметрами реальных поверхностей криомишени; исследовать влияние различных факторов (таких как отклонение поверхностей криомишени от идеальных, несовершенство постановки эксперимента и т.д.) на образование изображений и, соответственно, на корректность определения параметров криослоя; исследовать границы применимости методов аттестации в рабочих диапазонах. При изменении конструкции (даже просто размеров) криомишени, изменении формы диагностических окон (с круглых на щелевые) необходимо заново определять границы применимости методов аттестации в новых условиях, корректировать программы автоматической диагностики параметров криослоя. Аттестация полных поверхностей оболочек (внешней и внутренней) для криомишени является отдельной научно-исследовательской задачей, требующей решения, поскольку подразумевает сбор огромного количества данных, которые требуют автоматизации их обработки.

Таким образом, актуальность темы исследования заключается в необходимости проведения диагностики параметров (аттестации) элементов криогенной мишени в экспериментах по обработке технологии получения мишени и проведения диагностики (аттестации) перед постановкой мишени в лазерный эксперимент по зажиганию на установке мегаджоульного уровня энергии. Целью исследования является разработка методов и создание средств аттестации всех элементов криогенной мишени.

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ АТТЕСТАЦИИ ОБОЛОЧКИ КРИОГЕННОЙ МИШЕНИ

Основными элементами криомишени с критичными для зажигания параметрами поверхностей являются: оболочка, капилляр для напуска топлива, твердый слой изотопов водорода, бокс-конвертор. Аттестация оболочки подразумевает собой диагностику параметров ее внешней и внутренней поверхностей (получение трехмерной карты дефектов, их геометрических параметров и статистических данных, сферический гармонический спектр полных поверхностей). В случае, если оболочка изготавливается на сферической матрице-подложке (например, получение бериллиевых оболочек методом вакуумного осаждения слоя бериллия на оболочках-подложках из ПАМС или получение НДС-оболочек методом плазмохимического осаждения углерода на оболочках-подложках в виде шариков из кремния), предварительно должна быть аттестована внешняя поверхность матрицы-подложки, при этом внутренняя поверхность полученной оболочки будет повторять внешнюю поверхность матрицы-подложки [5].

Существующие методы для диагностики качества внешней и внутренней поверхностей оболочек могут быть разделены на методы контурных линий и широкопольные. Методы контурных линий включают в себя: метод сканирования щупом, бесконтактное лазерное дифференциальное конфокальное сканирование [6], контактное и полуконтактное сканирование с помощью атомно-силового микроскопа, бесконтактную оптическую теневую диагностику [8], бесконтактную рентгеновскую диагностику [24].

С помощью методов контурных линий можно эффективно измерять профиль внутренней поверхности (кроме атомно-силового микроскопа (АСМ)), но на одно измерение может быть получена только одна контурная линия, при этом отдельные дефекты могут быть упущены между двумя соседними контурными линиями. Поэтому методы контурных линий не позволяют эффективно определять дефекты поверхностей оболочки. Контурный метод атомно-силовой микроскопии удовлетворяет требованиям к точности измерений, но время сканирования долгое, и для измерения полной поверхности оболочки этот метод не подходит [25].

С помощью широкопольных методов, включающих в себя микроскопию и интерферометрию, получают топографию поверхности с определенной шириной поля зрения, поэтому дефекты в поле зрения могут быть определены без упущений. Методы микроскопии, включающие в себя цифровую сканирующую электронную микроскопию и конфокальную микроскопию [26, 27], голографическую микроскопию [28], дают хорошие результаты для определения дефектов внешней поверхности, но с помощью этих методов сложно точно определить дефекты внутренней поверхности через сферическую внешнюю.

Методы дифракционной интерферометрии фазового сдвига [29] и вертикальной сканирующей интерферометрии белого света не подходят для измерений шероховатых сферических поверхностей, что подтверждается измерениями на сканирующем электронном микроскопе.

Наиболее оптимальным методом аттестации поверхностей оболочек представляется широкопольный метод конфокальной микроскопии, показывающий хороший результат как для гладких, так и для шероховатых поверхностей оболочек, что подтверждается измерениями маленьких дефектов поверхности на сканирующем электронном микроскопе.

АТТЕСТАЦИЯ ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ОБОЛОЧКИ КРИОГЕННОЙ МИШЕНИ

Разработана конструкция экспериментального стенда для аттестации оболочек на базе оптического профилометра (рис. 3). Стенд состоит из основного трехкоординатного манипулятора 1 для снятия экваториального профиля оболочки, дополнительного шестикоординатного манипулятора 2 для переориентации оболочки 3, системы управления моторизированными позиционерами, вакуумной системы 4 и оптического профилометра с объективом 5 для конфокального сканирования поверхности оболочки.

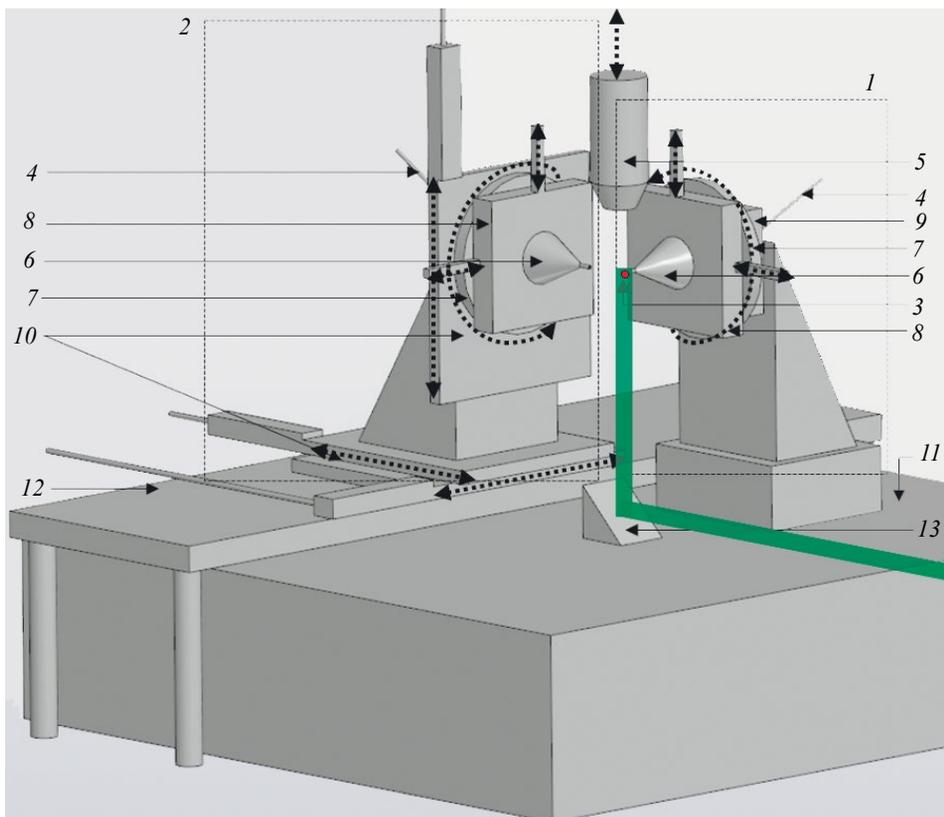


Рис. 3. Схема экспериментального стенда аттестации оболочек: 1 — основной трехкоординатный манипулятор; 2 — вспомогательный шестикоординатный манипулятор; 3 — оболочка диаметром около 2 мм; 4 — к вакуумной системе; 5 — объектив оптического профилометра; 6 — вакуумные пинцеты; 7 — моторизированные ротаторы; 8 — двухосевые ручные позиционеры; 9 — заклонный столик; 10 — трехосевая система моторизированных позиционеров; 11 — виброгасящий стол оптического профилометра; 12 — развязывающий оптический столик; 13 — поворотное зеркало. Пунктирными стрелками показаны возможные направления перемещений позиционеров и объектива.

Оба манипулятора включают в себя: вакуумные пинцеты 6 для посадки оболочки; моторизированные ротаторы 7; двухосевые ручные позиционеры 8 для юстировки соосности вакуумного пинцета и оси вращения ротатора; заклонные столики 9 для корректировки наклона оси вакуумного пинцета относительно оси вращения ротатора.

Моторизированный ротатор на основном трехкоординатном манипуляторе 1 предназначен для вращения оболочки от 0 до 360° с целью сканирования поверхности оболочки вдоль экватора. Моторизированный ротатор на дополнительном шестикоординатном манипуляторе 2 предназначен для переориентации (поворота на угол) оболочки с целью съемки топографий со следующего экватора. Манипулятор 2 снабжен также трехосевой системой моторизированных линейных позиционеров 10 для аккуратного и точного подведения манипулятора к оболочке, при этом по причине своих массогабаритных параметров он развязан от виброгасящего столика оптического профилометра 11 с помощью столика 12.

Вакуумные пинцеты манипуляторов расположены на одном уровне в горизонтальной плоскости, сканируется верхняя часть оболочки с использованием объектива 50X. На одном экваторе сканируется набор из 72 топографий размером 338×273 мкм с угловым шагом 5°. После сканирования одного экватора осуществляется переориентация оболочки при меньшем увеличении (10X) и включенной нижней подсветке, направленной от светодиодного источника через оболочку в объектив с помощью поворотного зеркала 13. Всего по поверхности сканируется 18 экваторов с угловым шагом 10°, что обеспечивает достаточное перекрытие экваторов между собой для последующей сшивки.

Разрабатывается программа автоматической сшивки топографий внутри экватора для поточковой аттестации поверхности оболочек. В каждом экваторе сшиваются 72 топографии с угловым шагом 5° (область перекрытия более 70 %). Основные этапы работы программы следующие. Координаты облаков точек каждой топографии преобразуются в общую систему координат с центром в центре сферы с радиусом, равным усредненному радиусу кривизны, полученному из всех топографий экватора, с учетом поворота оболочки на угол между двумя последовательными сканированиями. Каждая последующая топография совмещается с предыдущей, облако точек экспортируется в программу для трехмерной визуализации и полигонизируется в поверхность. Затем экваторы между собой сшиваются вручную, пример показан на рис. 4.

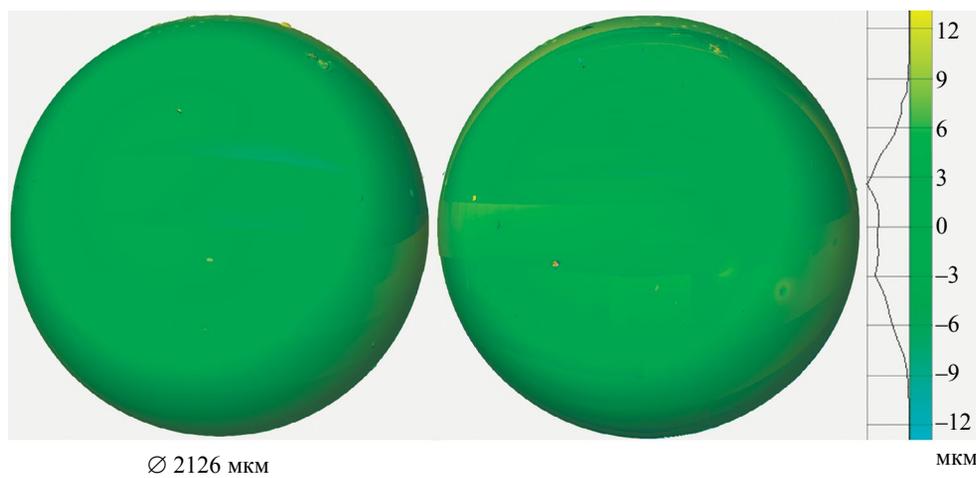


Рис. 4. Трехмерная карта дефектов внешней поверхности полый ПАМС-оболочки в виде отклонений от аппроксимирующей поверхность сферы диаметром 2126 мкм.

По трехмерной карте поверхности оболочки можно оценивать пространственное положение дефектов и их геометрические параметры (площадь, объем), как показано на рис. 5. Эта информация полезна при проведении эксперимента по формированию твердого слоя топлива в криомишени: дефекты слоя могут быть вызваны дефектами поверхности оболочки. Кроме того, дефекты оболочки в основном являются центрами кристаллизации при выращивании монокристаллического твердого слоя [30]. Также при аттестации криогенного слоя дефект характеристических особенностей на теневом изображении (яркого кольца) может напрямую коррелировать с дефектом оболочки, даже если слой при этом в данной области не имеет дефекта.

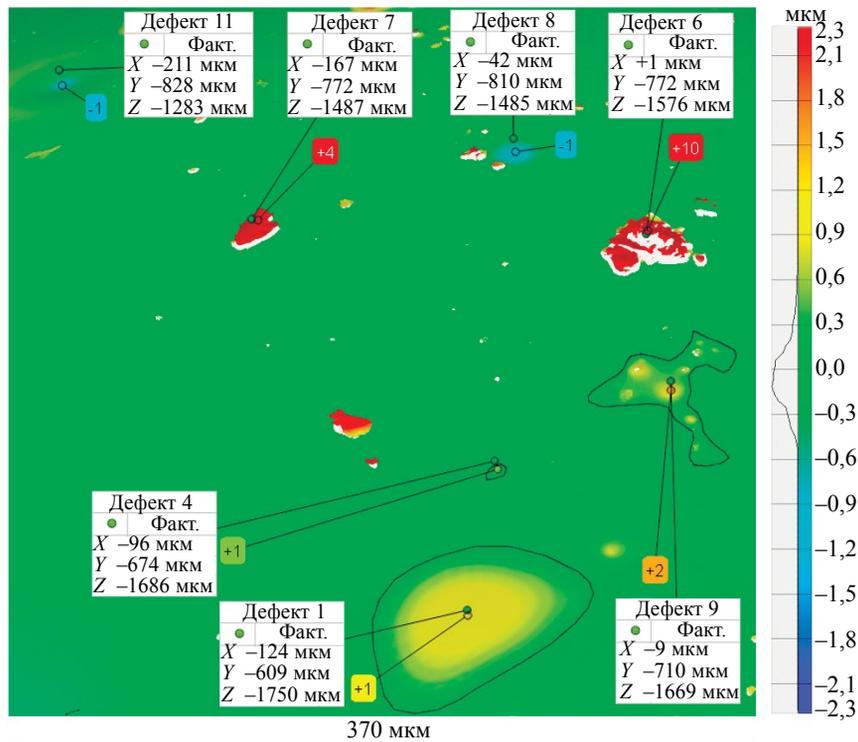


Рис. 5. Оценка пространственного положения и геометрических параметров дефектов. X , Y , Z — координаты дефектов в системе координат с центром в центре сферы, аппроксимирующей шитую внешнюю поверхность оболочки; координаты вычисляются как проекция центра дефекта на сферу диаметром 2130 мкм (измеренный диаметр оболочки). Цифрами на дефектах указано их максимальное отклонение от прилегающей поверхности в радиальном направлении (высота, глубина). Рисунок представляет собой карту высот. Параметры некоторых дефектов, не обозначенные на рисунке, следующие. Дефект № 1 (самый крупный): площадь 7230 мкм², объем 2890 мкм³. Дефект № 4 (маленький): площадь 79 мкм², объем 8 мкм³. Дефект № 6 (самый высокий): площадь 1520 мкм², объем 5930 мкм³. Область на рисунке включает в себя 4 экватора с перекрытием от 20 до 50 %, по 3 топографии в каждом.

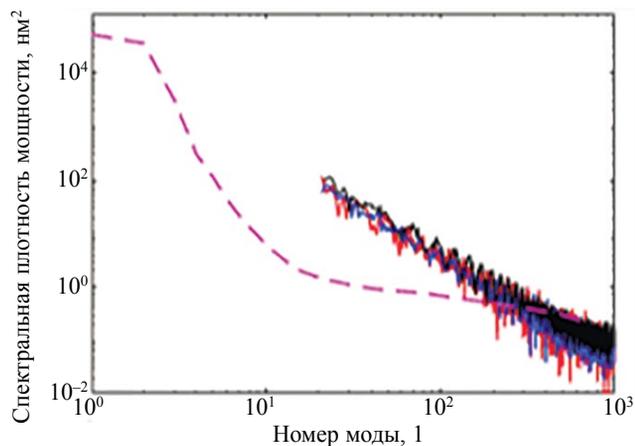


Рис. 6. Спектры мощности Фурье, вычисленные по профилям трех соседних экваторов для оболочки, и требования к внешней поверхности оболочки NIF (штриховая линия).

Для отдельных шитых экваторов вычисляются спектры плотности мощности по модам средних и высоких порядков (21—1024), пример для трех соседних экваторов представлен на рис. 6. Эти одномерные спектры плотности мощности для всех экваторов могут быть затем усреднены в двумерный по всей поверхности [25]. Двумерный сферический гармонический спектр мощности количественно отражает информацию о частотном распределении для топографии полной поверхности оболочки. Быстрый рост флуктуаций поверхности в модах низких порядков приводит к деформации при имплозии, а в модах высоких порядков будет вызывать перемешивание на поверхности из-за гидродинамических нестабильностей. Для вычисления мод низких порядков следует использовать атомно-силовой микроскоп, но оболочка должна

быть установлена на прецизионный узел вращения с аэроподшипником. Работа по развитию метода аттестации полной поверхности оболочки продолжается.

АТТЕСТАЦИЯ СЛОЯ ТОПЛИВА В КРИОГЕННОЙ МИШЕНИ

Аттестация криогенного слоя изотопов водорода в оболочке выполняется в процессе проведения эксперимента по получению криомишени и должна выполняться перед отправкой готовой, удовлетворяющей всем требованиям криомишени в камеру взаимодействия лазерной установки. При этом, если слой неудовлетворительного качества, эксперимент по формированию криослоя следует начинать сначала. Разработан комплекс программ для дозирования жидкого топлива, диагностики параметров твердого криогенного слоя и оценки корректности результатов диагностики с помощью оптического теневого метода и рентгеновского метода с фазовым контрастом. Подробно данная работа описана в [23, 31, 32], ниже кратко приведены результаты.

В части оптического теневого метода результаты следующие. Выполнено двумерное моделирование прохождения пучка видимого излучения через криогенную мишень методом трассировки лучей, где переменными параметрами являются несферичность и неконцентричность поверхностей мишени, расходимость и наклон пучка излучения относительно оптической оси, смещение плоскости фокусировки объектива относительно экватора мишени, показатели преломления слоев, апертура наблюдения и т.д. На основе данной модели разработана программа моделирования, необходимая для исследования влияния данных факторов на формирование теневого изображения криомишени и, соответственно, на вычисление параметров криогенного слоя. Получены связи между положениями характеристических особенностей на теновом изображении (яркое и бледное кольца) и параметрами внутренней поверхности слоя топлива. Исследованы границы применимости метода.

Для получения твердого криогенного слоя требуемой толщины разработана программа для дозирования жидкого топлива по оптической теневой и рентгеновской с фазовым контрастом картинам. Также разработана программа для оптического теневого контроля параметров твердого слоя топлива, в которой при известном диаметре и толщине стенки оболочки по теновому изображению автоматически вычисляются параметры криослоя в плоскости экватора мишени: профиль, шероховатость, спектр мощности Фурье, отклонения от концентричности и сферичности внутренней поверхности криослоя, средняя толщина криослоя.

В части работы по рентгеновскому методу с фазовым контрастом результаты следующие. Проведено двумерное моделирование прохождения параллельного пучка рентгеновских лучей через сферически симметричную криогенную мишень со следующими переменными параметрами: внешний диаметр мишени, толщины и материалы слоев, расстояние от криомишени до детектора. Результат работы программы — смоделированное рентгеновское изображение и нанесенные на него реальные границы криомишени в плоскости экватора. Получены зависимости положения характеристических особенностей на рентгеновском изображении (темных колец) от положения поверхностей мишени, написана альфа-версия программы обработки изображения криомишени с автоматическим вычислением параметров криослоя, работа которого проверена на обработке изображений полых оболочек. Планируется исследование границ применимости рентгеновского метода, а также исследование возможностей измерения локальных неоднородностей с помощью обоих методов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На данном этапе работ по трехмерной карте поверхности оболочки можно оценивать пространственное положение дефектов на внешней поверхности оболочки и их геометрические параметры. Эта информация полезна при проведении текущих экспериментов по формированию слоя топлива в криомишени, в частности, для понимания причин повторяющихся центров кристаллизации при выращивании монокристаллического твердого слоя, объяснения устойчивых во времени локальных неоднородностей криогенного слоя, оценки корректности результатов диагностики параметров внутренней поверхности криогенного слоя топлива. Работа над методом аттестации полной поверхности оболочки продолжается. Разработан комплекс программ для дозирования жидкого топлива, автоматической диагностики параметров твердого криогенного слоя с помощью оптического теневого метода и рентгеновского метода с фазовым контрастом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильгисонис В. Термоядерные исследования как существенная составляющая технологической платформы энергетической безопасности // Энергетическая политика. 2023. Т. 2. № 180. DOI: 10.46920/2409-5516_2023_2180_12

2. *Ильгисонис В.И., Ильин К.И., Новиков С.Г., Оленин Ю.А.* О программе российских исследований в области управляемого термоядерного синтеза и плазменных технологий // *Физика плазмы*. 2021. Т. 47. № 11. С. 963—969. DOI: 10.31857/S0367292121110172
3. *Danson C.N., Gizzi L.A.* Inertial confinement fusion ignition achieved at the National Ignition Facility — an editorial // *High Power Laser Science and Engineering*. 2023. V. 11. No. 40. DOI:10.1017/hpl.2023.38
4. *Huang H., Stephens R.B., Nikroo A., Eddinger S.A., Chen K.C., Xu H.W., Moreno K.A., Youngblood K.P., Skelton M.* Quantitative radiography: Film Model Calibration and Dopant/Impurity Measurement in ICF Ablators // *Fusion Science and Technology*. 2007. V. 51. No. 4. P. 530—538. DOI: 10.13182/FST51-530
5. *Biener J., Ho D.D., Wild C., Woerner E., Woerner E., Biener M.M., El-dasher B.S., Hicks D.G., Eggert J.H., Celliers P.M., Collins G.W., Teslich N.E., Koziowski B.J., Haan S.W., Hamza A.V.* Diamond spheres for inertial confinement fusion // *Nucl. Fusion*. 2009. V. 49. P. 112001.
6. *Xianxian Ma, He Ni, Mengshuang Lu, Zihao Liu, Jingwen Huang, Qi Wangb, Yun Wang.* A measurement method for three-dimensional inner and outer surface profiles and spatial shell uniformity of laser fusion capsule // *Optics and Laser Technology*. 2021. V. 134. P. 106601.
7. *Tianliang Yan, Kai Wang, Zhongming Zang, An Lu, Xiaobo Hu, Nan Chen, Huxiang Zhang, Chong Liu, Dong Liu.* Compact, snapshot and triple-wavelength system for ICF target ice-layer refractive index and thickness measurement // *Optics and Laser Technology*. 2021. V. 134. P. 106595.
8. *Nikitenko A.I., Tolokonnikov S.M.* Optimal “Tomography” of 2-Layered Targets: 3D Parameters Reconstruction from Shadow Images // *Fusion Science and Technology*. 2007. V. 51. No. 4. P. 705—716. DOI: 10.13182/FST07-A1468
9. *Kucheev S.O., Hamza A.V.* Condensed hydrogen for thermonuclear fusion // *J. Appl. Phys.* 2010. V. 108. P. 091101.
10. *Haan S.W., Lindl J.D., Callahan D.A., Clark D.S., Salmonson J.D., Hammel B.A., Atherton L.J., Cook R.C., Edwards M.J., Glenzer S., Hamza A.V., Hatchett S.P., Herrmann M.C., Hinkel D.E., Ho D.D., Huang H., Jones O.S., Kline J., Kyrala G., Landen O.L., MacGowan B.J., Marinak M.M., Meyerhofer D.D., Milovich J.L., Moreno K.A., Moses E.I., Munro D.H., Nikroo A., Olson R.E., Peterson K., Pollaine S.M., Ralph J.E., Robey H.F., Spears B.K., Springer P.T., Suter L.J., Thomas C.A., Town R.P., Vesey R., Weber S.V., Wilkens H.L., Wilson D.C.* Point design targets, specifications, and requirements for the 2010 ignition campaign on the National Ignition Facility // *Physics of Plasmas*. 2011. V. 18. P. 051001. DOI: 10.1063/1.3592169
11. *Narang Simon.* Modeling for Direct Drive Fusion Implosions: Cryogenic Target Filling at Arbitrary Viewing Angles and Yield Prediction. Pittsford, New York: Sutherland High School, 2019.
12. *Parham T., Koziowski B., Atkinson D., Baisden P., Bertolini L., Boehm K., Chernov A., Coffee K., Coffield F., Dylla-Spears R., Edwards O., Fair J., Fedorov M., Fry J., Gibson C., Haid B., Holunga D., Kohut T., Lewis T., Malsbury T., Mapoles E., Sater J., Skulina K., Trummer D., Walters C.* Cryogenic Target System for Hydrogen Layering / American Nuclear Society Scientific Publication. 2016. LLNL-JRNL-696377.
13. *Harding D.R., Wittman M.D., Edgell D.H.* Considerations and Requirements for Providing Cryogenic Targets for Direct-Drive Inertial Fusion Implosions at the National Ignition Facility, *Fusion Science and Technology* // *Fusion Science and Technology*. 2013. V. 63. No. 2. P. 95—105.
14. *Koziowski B.J., Mapoles E.R., Sater J.D., Chernov A.A., Moody J.D., Lugten J.B., Johnson M.A.* Deuterium-Tritium Fuel Layer Formation for the National Ignition Facility // *Fusion Science and Technology*. 2011. V. 59. No. 1. P. 14—25.
15. *Koziowski B.J., London R.A., McEachern R.L., and Bittner D.N.* Demonstration of symmetry control of infrared heated deuterium layers in holraums. 2003. UCRL-JC-154640.
16. *Cryogenic Target Handling System Operation Manual / Volume IV—CTHS Description, Chapter 8: Characterization Station (CS) — Revision A.* 2004.
17. *Numerical Investigation of Characterization of Thick Cryogenic-Fuel Layers Using Convergent Beam Interferometry / LLE Review.* V. 79. P. 131—138.
18. *Harding D.R., Wittman M.D., Redden N.P., Edgell D.H., Ulreich J.* Comparison of Shadowgraphy and X-Ray Phase Contrast Methods for Characterizing a DT Ice Layer in an Inertial Confinement Fusion Target // *Fusion Science and Technology*. 2020. DOI: 10.1080/15361055.2020.1812990
19. *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. 9. № 5. С. 435—445.
20. *Аверин М.С., Баранова А.С., Бусалов А.А., Гнутов А.С., Ермакова И.Ю., Ляпин В.В.* Алгоритм переноса поверхностной сетки при подготовке расчетных сеток для тонкостенных конструкций / *Молодежь в науке: сборник докладов XXI научно-технической конференции*. 2024.
21. *Clark D.S., Haan S.W., Hammel B.A., Salmonson J.D., Callahan D.A., Town R.P.* *Phys. Plasmas* / 2010. 17 (052703).
22. *L MJ & PETAL Status and first experiments* // *IOP Publishing. Journal of Physics: Conference Series*. 2016. V. 717. P. 012084. DOI:10.1088/1742-6596/717/1/012084
23. *Зарубина Е.Ю., Рогожина М.А., Чугров И.А.* Получение криогенной мишени непрямого облучения с твердым слоем дейтерия // *ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия*. 2024. V. 79. No. 1. P. 2410401. [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. V. 79. No. 1. P. 25—38.]

24. Eddinger S.A., Huang H., Schoff M.E. Three-Dimensional Wallmapping Using Xradia with Distortion Correction // *Fusion Sci. Technol.* 2009. V. 55. No. 4. P. 411—416.
25. Stephens R. B., Olson D., Huang H., Gibson J. B. Complete Surface Mapping of ICF Shells // *Fusion Science and Technology.* 2004. V. 45. No. 2. P. 210—213. DOI: 10.13182/FST45-210
26. Antipa N.A., Baxamusa S.H., Buice E.S., Conder A.D., Emerich M.N., Flegel M.S., Heinbockel C.L., Horner J.B., Fair J.E., Kegelmeyer L.M., Koh E.S., Johnson M.A., Maranvill W.L., Meyer J.S., Montesanti R., Nguyen J., Ralph J.E., Reynolds J.L. & Senecal J.G. Automated ICF Capsule Characterization Using Confocal Surface Profilometry // *Fusion Sci. Technol.* 2013. V. 63. No. 2. P. 151—159.
27. Huang H., Carlson L. C., Requieron W., Rice N., Hoover D., Farrell M., Goodin D., Nikroo A., Biener J., Stadernann M., Haan S.W., Ho D., Wild C. Quantitative Defect Analysis of Ablator Capsule Surfaces Using a Leica Confocal Microscope and a High-Density Atomic Force Microscope // *Fusion Sci. Technol.* 2016. V. 70. No. 2. P. 377—38.
28. Chobriat A., Raphaël O., Hermerel C., Busvelle E., Choux A., Merillot P., Reverdy L., Theobald M. Developments in Shell Surface Characterizations Using Holography // *Fusion Sci. Technol.* 2018. V. 73. No. 2. P. 132—138.
29. Nguyen Q.L., Eddinger S.A., Huang H., Johnson M.A., Lee Y.T., Montesanti R.C., Moreno K.A., Schoff M.E. Increasing the Throughput of Phase-Shifting Diffraction Interferometer for Quantitative Characterization of ICF Ablator Capsule Surfaces // *Fusion Science and Technology.* 2009. V. 55. No. 4. P. 399—404. DOI: 10.13182/FST09-18
30. Рогожина М.А., Зарубина Е.Ю., Чугров И.А. Диагностика параметров криогенного слоя изотопов водорода в мишени непрямого облучения / Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'23 Junior: сб. докладов 16-й Международной школы молодых ученых и специалистов им. А. А. Курдюмова. 2023. P. 369—378.
31. 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. V. 2. No. 2. P. 134—154.
32. 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. V. 5. No. 10. P. 1638—1641. DOI: 10.1134/S1063778822100659

REFERENCES

1. Ilgisonis V. Fusion research as an essential component of the technological platform of energy security // *Energy Policy.* 2023. V. 2. No. 180. DOI: 10.46920/2409-5516_2023_2180_12
2. Ilgisonis V.I., Ilyin K.I., Novikov S.G., Olenin Yu.A. On the Program of Russian Research in the Field of Controlled Thermonuclear Fusion and Plasma Technologies // *Plasma Physics.* 2021. V. 47. No. 11. P. 963—969. DOI: 10.31857/S0367292121110172
3. Danson C.N., Gizzi L.A. Inertial confinement fusion ignition achieved at the National Ignition Facility — an editorial // *High Power Laser Science and Engineering.* 2023. V. 11. No. 40. DOI:10.1017/hpl.2023.38
4. Huang H., Stephens R.B., Nikroo A., Eddinger S.A., Chen K.C., Xu H.W., Moreno K.A., Youngblood K.P., Skelton M. Quantitative radiography: Film Model Calibration and Dopant/Impurity Measurement in ICF Ablators // *Fusion Science and Technology.* 2007. V. 51. No. 4. P. 530—538. DOI: 10.13182/FST51-530
5. Biener J., Ho D.D., Wild C., Woerner E., Woerner E., Biener M.M., El-dasher B.S., Hicks D.G., Eggert J.H., Celliers P.M., Collins G.W., Teslich N.E., Koziowski B.J., Haan S.W., Hamza A.V. Diamond spheres for inertial confinement fusion // *Nucl. Fusion.* 2009. V. 49. P. 112001.
6. Xianxian Ma, He Ni, Mengshuang Lu, Zihao Liu, Jingwen Huang, Qi Wangb, Yun Wang. A measurement method for three-dimensional inner and outer surface profiles and spatial shell uniformity of laser fusion capsule // *Optics and Laser Technology.* 2021. V. 134. P. 106601.
7. Tianliang Yan, Kai Wang, Zhongming Zang, An Lu, Xiaobo Hu, Nan Chen, Huxiang Zhang, Chong Liu, Dong Liu. Compact, snapshot and triple-wavelength system for ICF target ice-layer refractive index and thickness measurement // *Optics and Laser Technology.* 2021. V. 134. P. 106595.
8. Nikitenko A.I., Tolokonnikov S.M. Optimal “Tomography” of 2-Layered Targets: 3D Parameters Reconstruction from Shadow Images // *Fusion Science and Technology.* 2007. V. 51. No. 4. P. 705—716. DOI: 10.13182/FST07-A1468
9. Kucehev S.O., Hamza A.V. Condensed hydrogen for thermonuclear fusion // *J. Appl. Phys.* 2010. V. 108. P. 091101.
10. Haan S.W., Lindl J.D., Callahan D.A., Clark D.S., Salmonson J.D., Hammel B.A., Atherton L.J., Cook R.C., Edwards M.J., Glenzer S., Hamza A.V., Hatchett S.P., Herrmann M.C., Hinkel D.E., Ho D.D., Huang H., Jones O.S., Kline J., Kyrala G., Landen O.L., MacGowan B.J., Marinak M.M., Meyerhofer D.D., Milovich J.L., Moreno K.A., Moses E.I., Munro D.H., Nikroo A., Olson R.E., Peterson K., Pollaine S.M., Ralph J.E., Robey H.F., Spears B.K., Springer P.T., Suter L.J., Thomas C.A., Town R.P., Vesey R., Weber S.V., Wilkens H.L., Wilson D.C. Point design targets, specifications, and requirements for the 2010 ignition campaign on the National Ignition Facility // *Physics of Plasmas.* 2011. V. 18. P. 051001. DOI: 10.1063/1.3592169

11. *Narang Simon*. Modeling for Direct Drive Fusion Implosions: Cryogenic Target Filling at Arbitrary Viewing Angles and Yield Prediction. Pittsford, New York: Sutherland High School, 2019.
12. *Parham T., Kozioziemski B., Atkinson D., Baisden P., Bertolini L., Boehm K., Chernov A., Coffee K., Coffield F., Dylla-Spears R., Edwards O., Fair J., Fedorov M., Fry J., Gibson C., Haid B., Holunga D., Kohut T., Lewis T., Malsbury T., Mapoles E., Sater J., Skulina K., Trummer D., Walters C.* Cryogenic Target System for Hydrogen Layering / American Nuclear Society Scientific Publication. 2016. LLNL-JRNL-696377.
13. *Harding D.R., Wittman M.D., Edgell D.H.* Considerations and Requirements for Providing Cryogenic Targets for Direct-Drive Inertial Fusion Implosions at the National Ignition Facility, Fusion Science and Technology // Fusion Science and Technology. 2013. V. 63. No. 2. P. 95—105.
14. *Kozioziemski B.J., Mapoles E.R., Sater J.D., Chernov A.A., Moody J.D., Lugten J.B., Johnson M.A.* Deuterium-Tritium Fuel Layer Formation for the National Ignition Facility // Fusion Science and Technology. 2011. V. 59. No. 1. P. 14—25.
15. *Kozioziemski B.J., London R.A., McEachern R.L., and Bittner D.N.* Demonstration of symmetry control of infrared heated deuterium layers in holraums. 2003. UCRL-JC-154640.
16. Cryogenic Target Handling System Operation Manual / Volume IV—CTHS Description, Chapter 8: Characterization Station (CS) — Revision A. 2004.
17. Numerical Investigation of Characterization of Thick Cryogenic-Fuel Layers Using Convergent Beam Interferometry / LLE Review. V. 79. P. 131—138.
18. *Harding D.R., Wittman M.D., Redden N.P., Edgell D.H., Ulreich J.* Comparison of Shadowgraphy and X-Ray Phase Contrast Methods for Characterizing a DT Ice Layer in an Inertial Confinement Fusion Target // Fusion Science and Technology. 2020. DOI: 10.1080/15361055.2020.1812990
19. *Garanin S.G., Garnov S.V., Sergeev A.M., Khazanov E.A.* Powerful lasers for high energy density physics // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2021. V. 9. No. 5. P. 435—445.
20. *Averin M.S., Baranova A.S., Busalov A.A., Gnutow A.S., Ermakova I.Yu., Lyapin V.V.* Algorithm for transferring a surface mesh in preparing computational meshes for thin-walled structures / Youth in Science: collection of reports from the XXI scientific and technical conference. 2024.
21. *Clark D.S., Haan S.W., Hammel B.A., Salmonson J.D., Callahan D.A., Town R.P.* Phys. Plasmas / 2010. 17 (052703).
22. LMJ & PETAL Status and first experiments // IOP Publishing. Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 717. P. 012084. DOI:10.1088/1742-6596/717/1/012084
23. *Zarubina E.Yu., Rogozhina M.A., and Chugrov I.A.* Creation of the Indirect-Drive Cryogenic Target with the Solid Deuterium Layer // Moscow University Physics Bulletin. 2024. V. 79. No. 1. P. 25—38.
24. *Eddinger S.A., Huang H., Schoff M.E.* Three-Dimensional Wallmapping Using Xradia with Distortion Correction // Fusion Sci. Technol. 2009. V. 55. No. 4. P. 411—416.
25. *Stephens R. B., Olson D., Huang H., Gibson J. B.* Complete Surface Mapping of ICF Shells // Fusion Science and Technology. 2004. V. 45. No. 2. P. 210—213. DOI: 10.13182/FST45-210
26. *Antipa N.A., Baxamusa S.H., Buice E.S., Conder A.D., Emerich M.N., Flegel M.S., Heinbockel C.L., Horner J.B., Fair J.E., Kegelmeyer L.M., Koh E.S., Johnson M.A., Maranville W.L., Meyer J.S., Montesanti R., Nguyen J., Ralph J.E., Reynolds J.L. & Senecal J.G.* Automated ICF Capsule Characterization Using Confocal Surface Profilometry // Fusion Sci. Technol. 2013. V. 63. No. 2. P. 151—159.
27. *Huang H., Carlson L. C., Requieron W., Rice N., Hoover D., Farrell M., Goodin D., Nikroo A., Biener J., Stadernann M., Haan S.W., Ho D., Wild C.* Quantitative Defect Analysis of Ablator Capsule Surfaces Using a Leica Confocal Microscope and a High-Density Atomic Force Microscope // Fusion Sci. Technol. 2016. V. 70. No. 2. P. 377—38.
28. *Chobriat A., Raphaël O., Hermerel C., Busvelle E., Choux A., Merillot P., Reverdy L., Theobald M.* Developments in Shell Surface Characterizations Using Holography // Fusion Sci. Technol. 2018. V. 73. No. 2. P. 132—138.
29. *Nguyen Q.L., Eddinger S.A., Huang H., Johnson M.A., Lee Y.T., Montesanti R.C., Moreno K.A., Schoff M.E.* Increasing the Throughput of Phase-Shifting Diffraction Interferometer for Quantitative Characterization of ICF Ablator Capsule Surfaces // Fusion Science and Technology. 2009. V. 55. No. 4. P. 399—404. DOI: 10.13182/FST09-18
30. *Zarubina E.Yu., Rogozhina M.A., Chugrov I.A.* Characterization of hydrogen isotopes cryogenic layer parameters in indirect-drive target / Interaction of hydrogen isotopes with structural materials. IHISM'23 Junior: collection of reports of the 16th International School of Young Scientists and Specialists named after A.A. Kurdyumov. 2023. P. 369—378.
31. *Zarubina E.Yu., Rogozhina M.A., Chugrov I.A.* Characterization of Hydrogen Isotopes Layer Parameters in Indirect-Drive Cryogenic Target for Laser Thermonuclear Fusion // FIZMAT. 2024. V. 2. No. 2. P. 134—154.
32. *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. V. 5. No. 10. P. 1638—1641. DOI: 10.1134/S1063778822100659