
МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИЯ
ДЛЯ НОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

УДК 621.039.63

ТЕНЕВОЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ КРИОГЕННОГО СЛОЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В МИШЕНИ НЕПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

© 2023 г. Е. Ю. Зарубина^а, *, М. А. Рогожина^а

^аФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров, Нижегородская обл., 607188 Россия

*E-mail: EYuZarubina@vniief.ru

Поступила в редакцию 13.07.2022 г.

После доработки 01.08.2022 г.

Принята к публикации 02.08.2022 г.

Приведены промежуточные результаты работы над программой теневой диагностики слоя изотопов водорода в криогенной мишени непрямого облучения. Мишень представляет собой сферическую оболочку с замороженным на ее внутренней поверхности криогенным слоем изотопов водорода и необходима для исследований ЛТС на установке мегаджоульного уровня энергии. Перед лазерным выстрелом по мишени необходимо провести ее диагностику на соответствие требуемым параметрам.

Ключевые слова: криогенная мишень, изотопы водорода, оптический теневой метод

DOI: 10.56304/S2079562922050542

ВВЕДЕНИЕ

Криогенная мишень непрямого облучения — это сферическая оболочка с однородным по толщине твердым слоем водородного топлива на ее внутренней поверхности, размещенная в сферическом боксе-конверторе. Создание такой мишени, ее аттестация и постановка в лазерный эксперимент по зажиганию является достаточно сложной задачей. К криомишени предъявляются следующие требования: однородность, сферичность, концентричность поверхностей должна быть менее 1%, среднеквадратичная шероховатость 0.1–1 мкм [1]. Неотъемлемой частью создания криогенной мишени является разработка методов контроля параметров слоя изотопов водорода, поскольку топливо в оболочке перераспределяется до тех пор, пока внутренняя поверхность криослоя не выстроится по изотермической поверхности, которая подвержена влиянию множества факторов и является неустойчивой во времени.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

В настоящее время для отработки технологии создания криомишени используются только оптически прозрачные оболочки, поэтому в основном развивается направление оптической теневой диагностики криослоя. Измерение параметров (например, толщины) криослоя основано на определении положения характеристического яркого кольца относительно края оболочки на тене-

вом изображении [2]. Построена теоретическая модель прохождения света через оптически прозрачную оболочку с топливом. Параметры оболочки с твердым криослоем, полученной в эксперименте по выравниванию криослоя на установке OMEGA [3], использовались для сравнения расчетов с экспериментальными данными: радиус 438 мкм, толщина полистирольного слоя 4.2 мкм, толщина криогенного слоя DT примерно 79 мкм. Расчетный нормированный радиус яркого кольца равен 0.905, экспериментальный нормированный (измеренный по изображению) — (0.91 ± 0.05) . Выполнена экспериментальная проверка теоретической модели. Получена зависимость толщины криослоя от параметров оболочки, которая согласуется с графиками, полученными в работе [1].

В настоящее время проводится работа над программой автоматической диагностики криослоя. Далее описаны основные этапы программы на примере теневого изображения криомишени, представленного на рис. 1. В программе необходимо задать диаметр и толщину стенки оболочки в мкм, необходимый угловой шаг в градусах, название изображения для обработки и название pdf-файла для записи результата. Входные данные для изображения на рис. 1: диаметр оболочки 1215 мкм, толщина стенки оболочки 17 мкм, угловой шаг 0.2°. Далее все описанные ниже этапы выполняются автоматически. Основные этапы программы: выделение границ на изображении; итеративный поиск внешней границы и центра оболочки; развертка изображения в полярных ко-

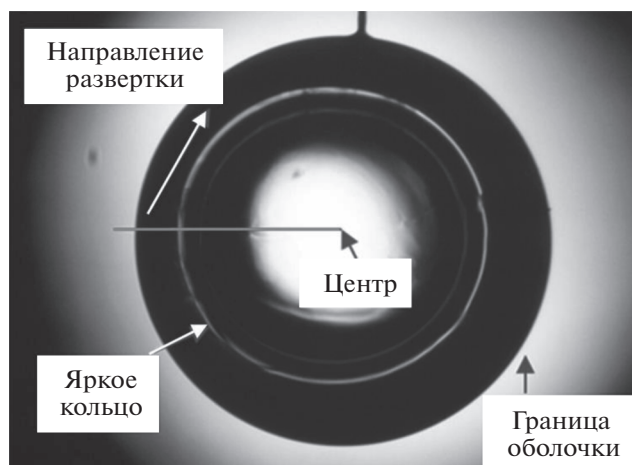


Рис. 1. Теневое изображение криогенной мишени (диаметр оболочки 1215 мкм, толщина стенки оболочки 17 мкм).

ординатах из центра оболочки; идентификация внешней границы оболочки и “яркого кольца” из развернутого изображения; вычисление соответствующей толщины криослоя.

Сначала цветное изображение преобразуется в полутоновое, применяется метод Канни обнаружения границ на изображении, производится морфологическое смыкание близко расположен-

ных пикселей и удаляются объекты, содержащие количество пикселей менее установленной величины. Результат обработки представлен на рис. 2. Выполняются несколько итераций поиска внешней границы и центра оболочки. По найденным точкам, принадлежащим границе оболочки, проводится аппроксимация границы эллипсом (общий случай, если оболочка не является идеально сферической). Решается система уравнений с четырьмя неизвестными (полуоси и две координаты центра эллипса) — эта последняя итерация поиска центра. Бинарное изображение разворачивается в полярные координаты через последний центр [4]. Размер полярного изображения по горизонтали определяется заданным шагом по углу, начало координат — в левом верхнем углу изображения. Далее выполняется поиск внешней границы оболочки на развернутом изображении: найденные пиксели обозначены на рис. 2. Затем фильтруются выпадающие точки, которые возникают из-за дефектов изображения, пылинок на оболочке, выделенных границ капилляра и т.д. Интерполяционная функция и будет считаться внешней границей оболочки на развернутом изображении, а среднее значение составляющих ее координат будет полярным радиусом оболочки на развернутом изображении.

На следующем этапе проводится идентификация яркого кольца, как показано на рис. 3. В цик-

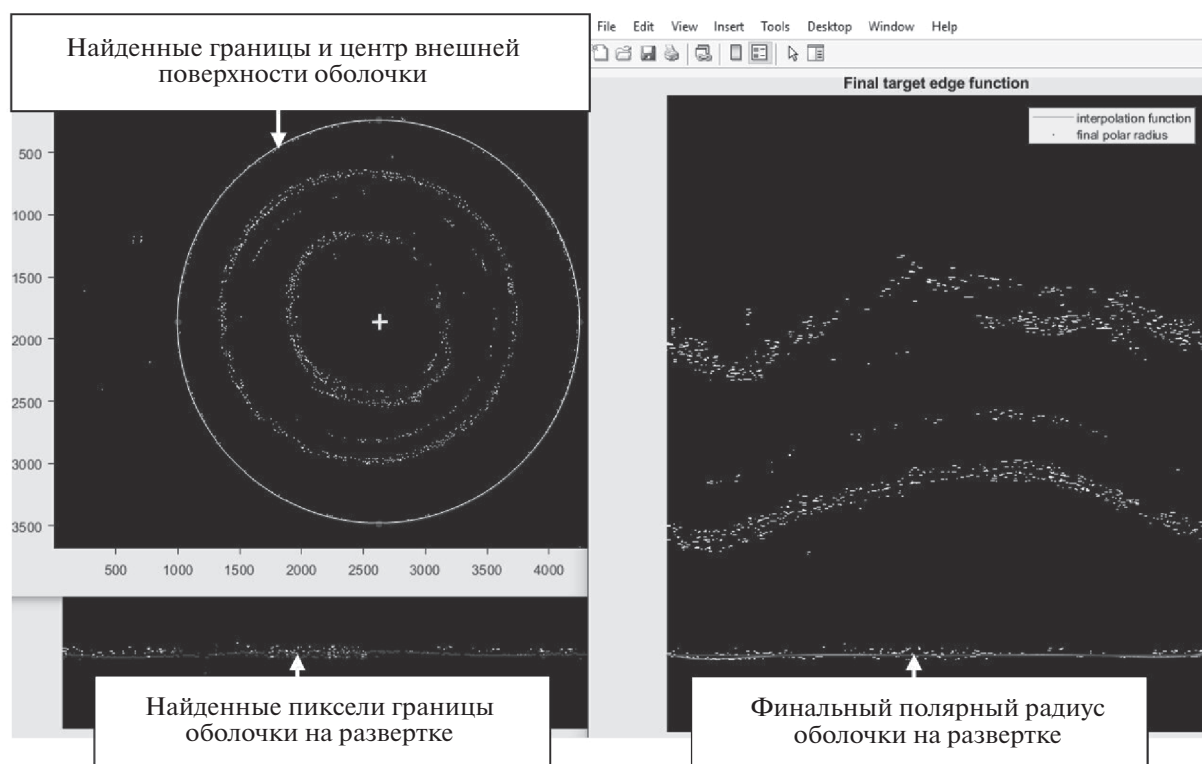


Рис. 2. Идентификация внешнего края оболочки.

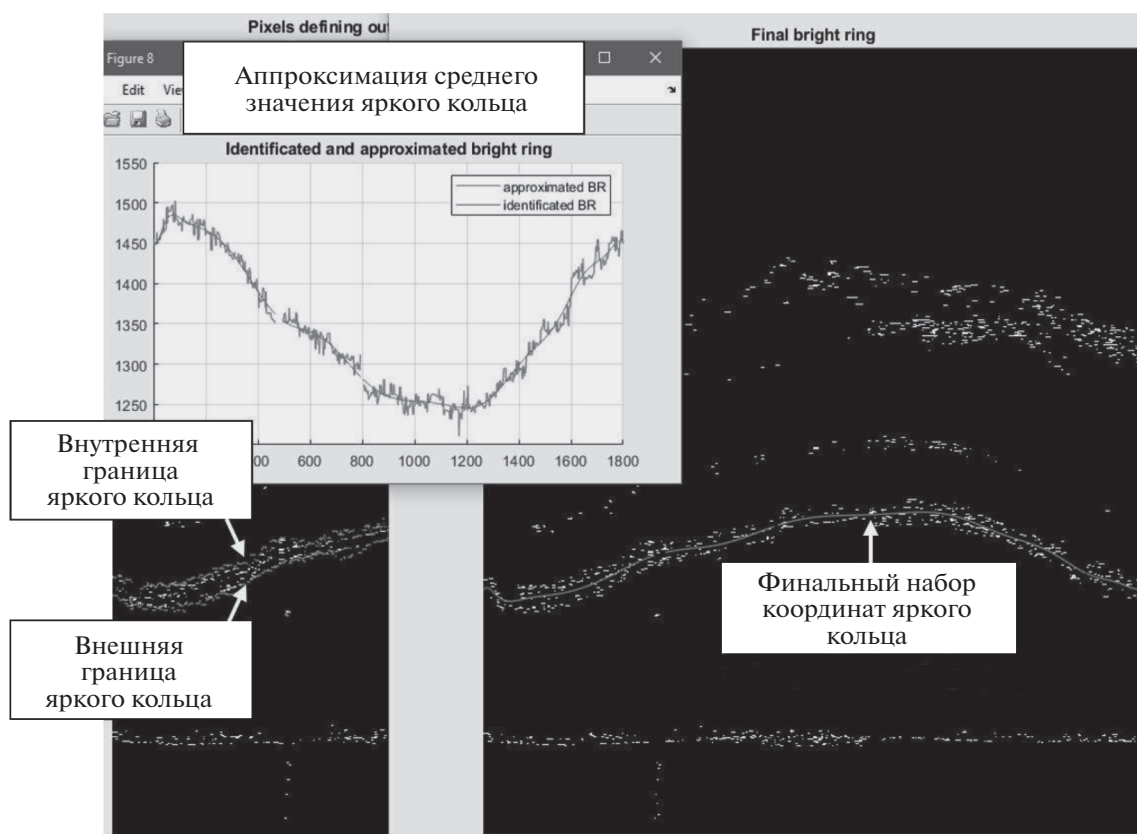


Рис. 3. Идентификация яркого кольца на развернутом изображении.

ле для каждого столбца изображения на установленном вертикальном интервале с отрицательным шагом по вертикали находятся первые пиксели со значением “1” и их вертикальные координаты записываются в матрицу, эти пиксели принадлежат внешнему краю яркого кольца. Затем записанные координаты нормируются на полярный радиус оболочки. Выполняется фильтрация выпадающих точек, полученных из-за дефектов изображения, разрывов в ярком кольце и т.д. Далее проводится идентификация внутреннего края яркого кольца, координаты внутреннего края нормируются на радиус оболочки. После этого находится среднее значение координаты яркого кольца для каждого столбца развернутого изображения отдельно. Идентифицированный набор координат, описывающий яркое кольцо, показан на рис. 3. Видно, что присутствуют осцилляции, связанные с разрывами в границах яркого кольца: при развертке бинарного изображения проводится ступенчатая интерполяция по соседним точкам для присвоения величины “0” или “1” пикселю на развернутом изображении. Для устранения данных осцилляций далее проводится аппроксимация координат яркого кольца и финальный набор координат, нанесенный на развернутое изображение, записывается в pdf-файл с результатами диагностики.

На последнем этапе для каждого значения яркого кольца находится значение толщины криослоя из зависимости, полученной при построении теоретической модели прохождения света через оболочку с топливом. Далее вычисляется среднее значение толщины криослоя и строится профиль внутренней поверхности криослоя (отклонение локальной толщины от средней) в плоскости локализации изображения, вычисляется спектр мощности Фурье до моды 6 (мода 1 — концентричность внешней сферической поверхности оболочки и внутренней поверхности криослоя, мода 2 — эллиптичность). Результат представлен на рис. 4. Информация о профиле, спектре мощности Фурье, концентричности, сферичности и шероховатости внутренней поверхности криослоя, средней толщине криослоя, параметрах оболочки записывается в файл. Спектр мощности нужен для моделирования процесса имплозии мишени в эксперименте по зажиганию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана программа для теневого контроля параметров твердого криогенного слоя в плоскости локализации изображения (профиль, спектр мощности Фурье, концентричность, сферичность и шероховатость внутренней поверхности

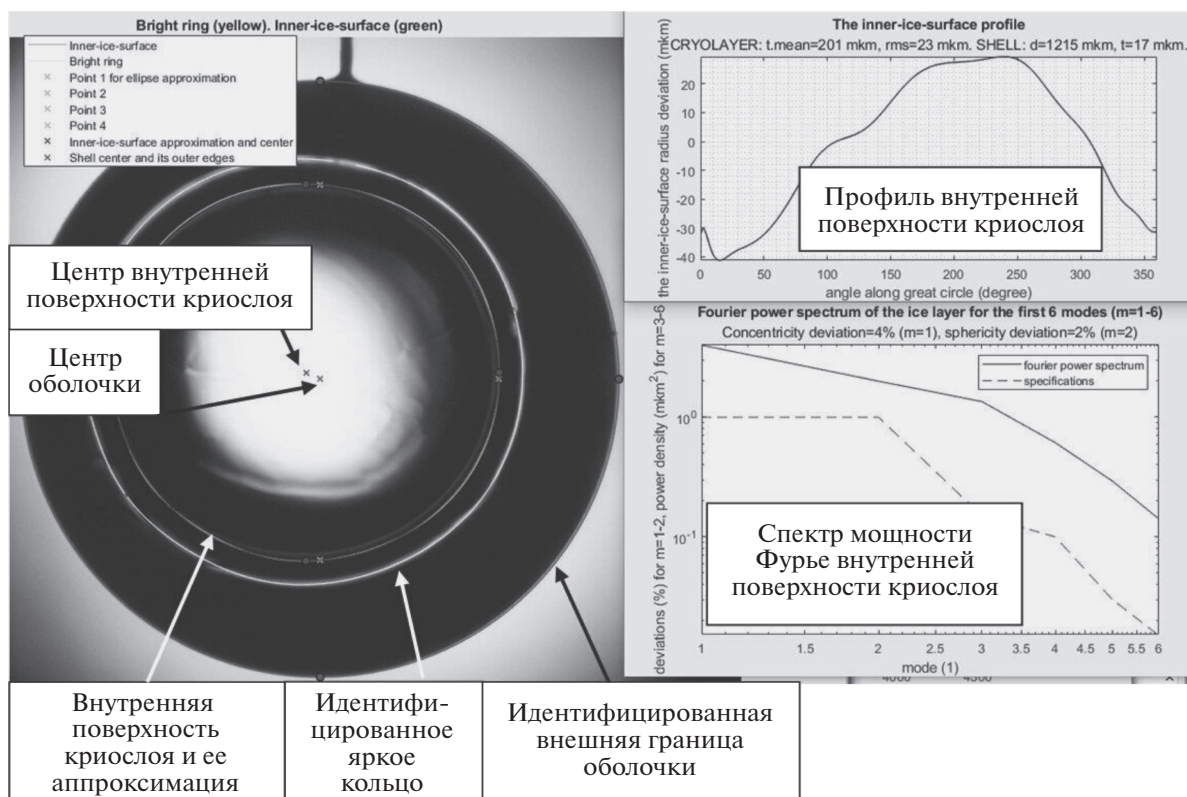


Рис. 4. Выходные данные программы.

криослоя, средняя толщина криослоя). Работа по развитию методов контроля параметров твердого криогенного слоя продолжается. Проведены патентные исследования по данной теме. Анализ информационных источников показал, что впереди предстоит большой объем работы по разработке методов диагностики слоя топлива в криомишени, поскольку в ведущих лабораториях мира до сих пор проводится активная работа по развитию методов диагностики, исследованию границ их применимости, усовершенствованию сложных алгоритмов анализа изображений и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Koresheva E.R., Nikitenko A.I., Aleksandrova I.V. // Nucl. Fusion. 2006. V. 46 (11). P. 891.
2. Cryogenic Target Handling System Operations Manual. S-AA-M-31. 2004. Rochester: Univ. Rochester. Vol. IV—CTHS Description. Ch. 8. Characterization Station (CS).
3. Edgell D.H., Craxton R.S., Elasky L.M., et al. // Fusion Sci. Tech. 2007. V. 51 (4). P. 717–726. <https://doi.org/10.13182/FST07-A1469>.
4. Edgell D.H., Craxton R.S., Elasky L.M., et al. // Fusion Sci. Tech. 2006. V. 49 (4). P. 616–625. <https://doi.org/10.13182/FST49-616>

Shadowgraphic Characterization Method of Cryogenic Hydrogen Isotopes Layer in Indirect-Drive Target for Inertial Confinement Fusion

E. Yu. Zarubina¹, * and M. A. Rogozhina¹

¹FSUE "RFNC-VNIIEF", Sarov, 607188 Russia

*e-mail: EYuZarubina@vniief.ru

Received July 13, 2022; revised August 1, 2022; accepted August 2, 2022

Abstract—The intermediate results of work in shadow characterization program of hydrogen isotopes layer in indirect-drive cryogenic target are presented. The target is a spherical shell with cryogenic hydrogen isotopes layer on its inner surface and it's necessary for laser-driven fusion researches on a megajoule energy level facility. It's necessary to perform target characterization for correspondence to requirement parameters before laser shot.

Keywords: cryogenic target, hydrogen isotopes, optic shadowgraph method