
МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИЯ
ДЛЯ НОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

УДК 621.039.633

**ФОРМИРОВАНИЕ ОДНОРОДНОГО ПО ТОЛЩИНЕ КРИОГЕННОГО
СЛОЯ ДЕЙТЕРИЯ В СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ КАК ЭТАП
СОЗДАНИЯ КРИОГЕННОЙ МИШЕНИ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО
ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА**

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

^аФГУП “РФЯЦ-ВНИИЭФ”, Саров, Нижегородская обл., 607188 Россия

*E-mail: MARogozhina@vniief.ru

Поступила в редакцию 14.07.2022 г.

После доработки 20.07.2022 г.

Принята к публикации 22.07.2022 г.

Приведено описание технологии формирования криогенного равнотолщинного слоя дейтерия в оболочке, находящейся в экспериментальном боксе. Представлены полученные криогенные слои дейтерия, которые удовлетворяют требованиям разнотолщинности слоя криогенной мишени.

Ключевые слова: криогенная мишень, выравнивание, криослой, ик-нагрев, полистирольная оболочка, изотопы водорода

DOI: 10.56304/S2079562922050384

ВВЕДЕНИЕ

Проведение экспериментов в области лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) предполагает использование криогенных мишеней. Мишень представляет собой полую сферическую оболочку с замороженным на ее внутренней поверхности гладким и однородным по толщине слоем твердого водородного топлива.

К качеству криогенного слоя предъявляются высокие требования, в частности, разнотолщинность слоя (отклонения от сферичности) не должна превышать 1% [1]. Для симметризации слоя используется метод радиальных температурных градиентов. В упрощенном случае одномерной передачи тепла в радиальном направлении можно взять сконденсированный водородный слой с объемным источником тепла и теплоотводом на стенке сферической оболочки. Объемное тепло производится при бета-распаде ядер трития в случае содержащих тритий слоев и для ИК-выравнивания – при сферически равномерной ИК-подсветке оболочки [2]. Поскольку только одна сторона слоя имеет теплоотвод, в установившемся состоянии в слое будет развиваться радиальный температурный градиент с максимальной температурой на поверхности “лед/пар” и уменьшающейся температурой по направлению к теплоотводу.

МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ КРИОСЛОЯ

На сегодняшний день наиболее эффективными и распространенными методами получения однородного криогенного слоя в мишенях непрямого облучения для экспериментов по ЛТС являются бета-выравнивание (в случае с ДТ-смесью) и ИК-выравнивание (для нерадиоактивных изотопов водорода).

В методе бета-выравнивания в качестве механизма выравнивания по толщине твердого ДТ-слоя используется тепло, выделяющееся в процессе бета-распада трития [3]. Реализация метода предполагает выдерживание оболочки с водородным топливом в изотермических условиях при температуре ниже температуры замерзания топлива. В этом случае из-за большего выделения тепла в объеме толстой области ДТ-слоя ее поверхность будет более нагрета, чем поверхность тонкой области. Вещество слоя будет испаряться с более нагретой области, и конденсироваться в менее нагретой области на поверхности слоя, как показано на рис. 1. Процесс выравнивания толщины имеет экспоненциальный характер, поскольку по мере выравнивания слоя градиент температуры на его поверхности снижается.

В методе бета-выравнивания, описанном выше, источником внутренней энергии является процесс бета-распада атомов трития. Таким образом, этот метод применим только для содержащих тритий мишеней. При работе с нерадиоактивными изотопами водорода (D₂, H₂) и их сме-

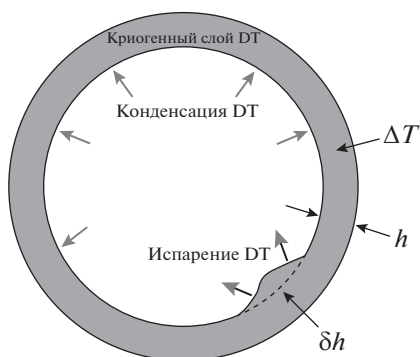


Рис. 1. Принцип работы метода радиальных температурных градиентов.

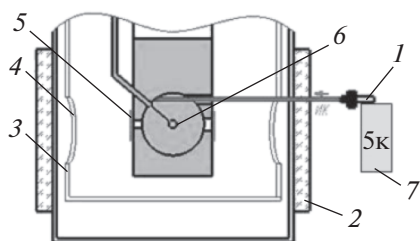


Рис. 2. Схема «внешнего» облучения: 1 — источник инфракрасного излучения; 2 — смотровые окна криостата; 3 — криогенный экран; 4 — окна криогенного экрана; 5 — окна бокса; 6 — сферическая оболочка с водородным топливом; 7 — столик пяти координатный.

сию (HD) энергия для объемного прогрева может быть подведена за счет внешнего ИК-облучения криогенного слоя [4, 5]. При пропускании инфракрасного излучения через вещество происходит возбуждение колебательных движений молекул. Однако поглощение происходит не во всем спектре падающего излучения, а лишь при тех длинах волн, энергия которых соответствует энергиям возбуждения колебаний в изучаемых молекулах.

Применение метода ИК-выравнивания выглядит следующим образом. Оболочка с криогенным слоем помещается в изотермическую камеру (в центр внутренней сферической полости бокса), ИК-излучение заводится в эту внутреннюю

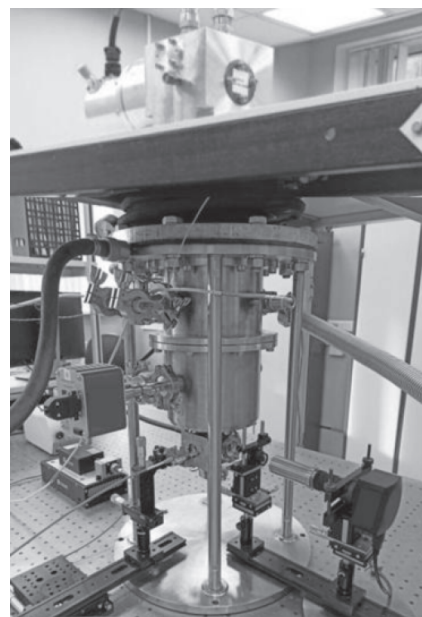


Рис. 3. Стенд для исследования мишеней при низких температурах.

сферическую полость, в результате чего криогенный слой поглощает излучение и нагревается. Чтобы выравнивать слои инфракрасным поглощением, длина волны должна быть выбрана для конкретного изотопа или смеси (2.57 мкм — пик поглощения HD-смеси, 3.16 мкм — D2). Данный метод может использоваться для получения базовых знаний о физическом механизме образования криослоя водорода, о необходимой конструкции криомишени, алгоритмах проведения экспериментов на изотопах водорода, тем самым снижая риски, возникающие при работе с радиоактивными веществами.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИК-ВЫРАВНИВАНИЮ КРИОСЛОЯ

В качестве источника ИК-излучения был выбран твердотельный лазер с диодной накачкой с центральной длиной волны 3.16 мкм и выходом под одномодовое оптоволокно. Эксперимент прово-

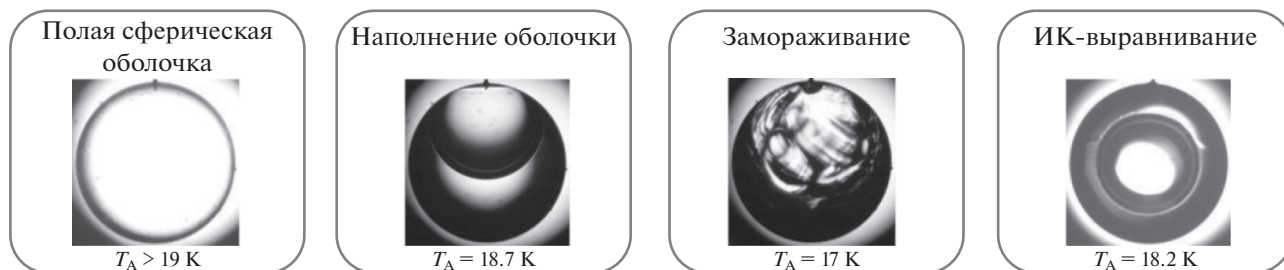


Рис. 4. Этапы формирования криогенного слоя изотопов водорода в оболочке.



Рис. 5. Влияние стеклянного капилляра на однородность слоя.

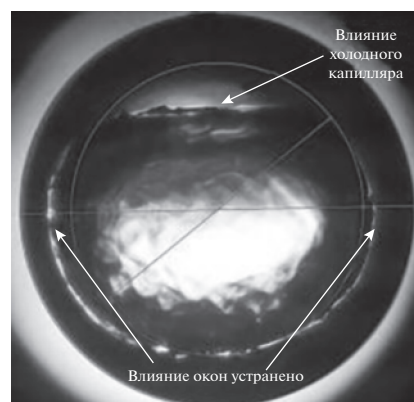


Рис. 6. Влияние холодного капилляра и теплоприток от окон бокса.

дится по схеме “внешнего” облучения, как показано на рис. 2 [6]. Оптоволоконный кабель закреплен на 5-координатном столике для ориентации пучка излучения в пространстве и заведения его в специальное отверстие бокса через окна криостата, криоэкрана и бокса. Ключевой задачей является реализация нагрева только криогенного топлива рассеянным ИК-излучением, избегая попадания излучения на экспериментальный бокс и саму оболочку. Кроме того, необходимо подобрать материалы окон так, чтобы потери ИК-излучения при прохождении через них были минимальны.

Эксперименты по формированию криогенного слоя изотопов водорода в сферической полистирольной оболочке проводились на стенде для исследования мишеней при низких температурах. Стенд состоит из исследовательского криостата со сменяемым мишенным узлом, системы одновременной откачки газовых магистралей, систем напуска гелия и изотопов водорода, оптической схе-

мы визуального контроля, системы контроля температуры, ИК-лазера. Фото стенда представлено на рис. 3.

Эксперименты по получению криогенного слоя изотопов водорода производятся в несколько этапов [7]: 1) Откачка рабочего объема криостата и систем напуска газов (гелий, изотопы водорода) до 10–4 мбар. 2) Охлаждение экспериментальной сборки до 19 К. 3) Напуск теплообменного газа гелия в полость бокса (до 10–2 мбар). 4) Напуск изотопов водорода в сферическую полистирольную оболочку, дозирование количества жидкости в оболочке до необходимого уровня. 5) Понижение температуры с заданными параметрами скорости до полного преобразования жидкой фазы в твердую. 6) Перераспределение льда в оболочке с помощью ИК-нагрева.

Этапы формирования криогенного слоя изотопов водорода в оболочке показаны на рис. 4.

Ключевым условием получения однородного по толщине криогенного слоя водородного топ-

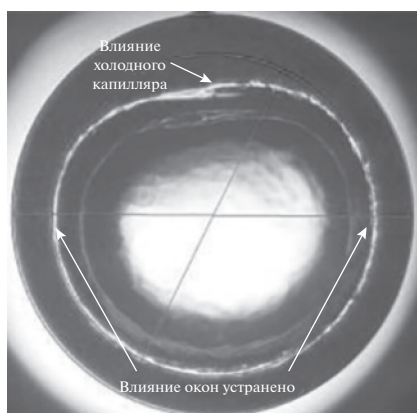


Рис. 7. Влияние холодного капилляра при устраненном влиянии окон.

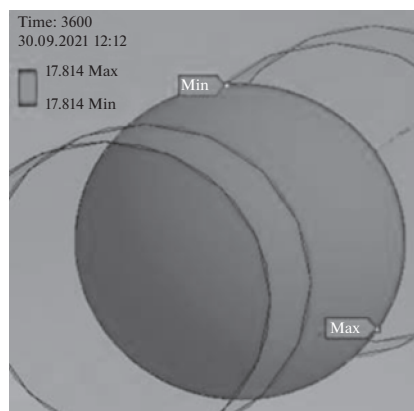


Рис. 8. Изотермическая поверхность оболочки.

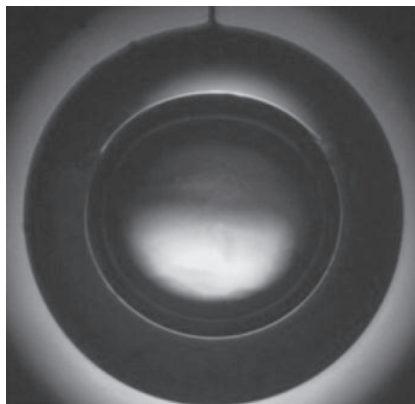


Рис. 9. Результат эксперимента по формированию криослоя дейтерия.

лива по методу радиальных температурных градиентов является выдерживание оболочки с водородным топливом в изотермических условиях, т.е. градиенты температур на поверхности сферической полости бокса, как и на поверхности оболочки должны отсутствовать. С целью проверки выполнения условия изотермичности сферической полости бокса был проведен нестационарный тепловой анализ конструкции. Особый интерес вызвали результаты теплового расчета при включении источника ИК-излучения, было выявлено влияние на однородность слоя теплопритоков от окон бокса; стеклянного капилляра, вклеенного в оболочку; контакта металлического капилляра со стенкой бокса и пр. Теоретические расчеты подтвердились экспериментальными данными. Примеры влияния разных факторов на однородность слоя приведены на рис. 5–7. Устранив в расчетной модели все выявленные факторы, получили изотермическую поверхность оболочки, как показано на рис. 8. Это означает, что при данной конфигурации экспериментальной сборки может быть выполнено условие равномерного теплового окружения оболочки для получения криогенного слоя с требуемой разнотолщинностью. Соответствующие изменения были внесены в конструкцию бокса, после чего проведена серия экспериментов по формированию однородного по толщине слоя дейтерия в оболочке. В результате были получены слои дейтерия, удовлетворяющие требованиям разнотолщинности слоя. Результат одного из экспериментов приведен на рис. 9.

Данный эксперимент по схеме “внешнего” облучения проводился на оболочке диаметром 1544 мкм, оценочная разнотолщинность криогенного слоя дейтерия составила $\approx 1\%$ при средней толщине криослоя 311 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На данном этапе создания криомишеней для ЛТС проводится отработка всех технологических процессов создания мишени: от конструктивных особенностей мишени до влияния различных аспектов на формирование однородного слоя льда. На этом этапе актуальнее работать с нерадиоактивными изотопами водорода, чтобы исключить риски, связанные с работой с радиоактивными веществами, для работников и снизить трудозатраты. Для симметризации криослоя нерадиоактивных изотопов водорода применяется метод ИК-выравнивания. Применяя данный метод для формирования криогенного слоя дейтерия, были получены криослои с параметрами разнотолщинности, близкими к требуемым, что является важным этапом на пути создания криогенной мишени для ЛТС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Kucheev S.O., Hamza A.V. // J. Appl. Phys. 2010. V. 108. P. 91–101.
2. Sangster T.C. et al. // LLE Rev. Q. Rep. 2006. Rochester: Univ. Rochester. V. 108.
3. Martin A.J., Simms R.J., Jacobs R.B. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1998. V. 6 (3). P. 1885–1888.
4. Sangster C., Betti R., Craxton R.S., et al. // Phys. Plasmas. 2007. V. 14. P. 058101.
5. London R.A., Kozioziemski B.J., Marinak M.M., Kerbel G.D., Bittner D.N. // Fusion Sci. Technol. 2006. V. 49 (4). P. 608–615.
6. Bittner D.N. et al. // Forming Uniform HD Layers in Shells Using Infrared Radiation. Preprint UCRL-JC-131371. 1998.
7. Izgorodin V.M., Solomatina E.Y., Pepelyaev A.P., Rogozhina M.A., and Osetrov E.I. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 747. P. 012008.

Formation of a Cryogenic Deuterium Layer Uniform in Thickness in a Spherical Shell as a Step in Making a Cryogenic Target for Laser Fusion

M. A. Rogozhina^{1, *} and E. Yu. Zarubina¹

¹*Russian Federal Nuclear Center—All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics (RFNC-VNIIEF), Sarov, Nizhny Novgorod oblast, 607188 Russia*

**e-mail: MARogozhina@vniief.ru*

Received July 14, 2022; revised July 20, 2022; accepted July 22, 2022

Abstract—The technology of forming a cryogenic deuterium uniform in thickness layer in a shell located in an experimental box is described. The obtained cryogenic deuterium layers are presented, which meet the requirements of the uniform in thickness of the cryogenic target layer.

Keywords: cryogenic target, equalization, cryogenic layer, infrared radiation, polystyrene shell, hydrogen isotopes