

СОЗДАНИЕ КРИОГЕННОЙ МИШЕНИ НЕПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

М. А. Рогожина, Е. Ю. Зарубина

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

Проведение экспериментов в области лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) предполагает использование криогенной мишени непрямого облучения. Такая мишень представляет собой полую сферическую оболочку с замороженным на ее внутренней поверхности гладким и однородным по толщине слоем твердого водородного топлива. Оболочка в свою очередь помещена в центр бокса-конвертора, который обеспечивает равномерное тепловое окружение оболочки на этапе формирования криослоя и конвертацию лазерного излучения в рентгеновское излучение на этапе проведения экспериментов по зажиганию. Аттестация криослоя и заведение лазерного излучения выполняется через отверстия в боксе-конверторе, которые герметично закрыты пленками. Схематичное изображение криогенной мишени непрямого облучения приведено на рис. 1 [1]. К конструкции этих мишеней предъявляются высокие требования к геометрии и размеру элементов, точности их изготовления и сборки, герметичности, качеству криогенного слоя и др. Эти требования направлены на снижение энергетических потерь для достижения максимальной температуры и плотности топлива в точке зажигания при вложенной лазерной энергии.

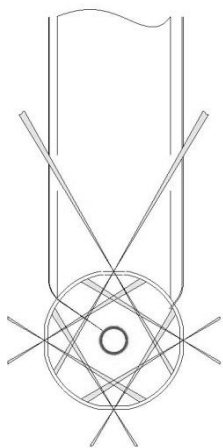


Рис. 1. Схематичное изображение криогенной мишени непрямого облучения

Создание криогенной мишени непрямого облучения – многоуровневая задача, заключающаяся несколько этапов:

- разработка концепции криомишени;
- разработка и производство составных элементов криомишени, их аттестация;
- прецизионная сборка криомишени (расположение элементов с микронной точностью относительно друг друга) и ее аттестация;
- создание криослоя требуемого качества;
- аттестация криослоя;
- постановка криомишени на эксперимент без потери качества слоя.

Данные подзадачи решаются параллельно друг другу и, по мере получения каких-либо значимых результатов в одной из них, могут оказывать влияние и вносить корректировки в методы решения и реализацию остальных. Рассмотрим подробнее этапы, на которых были сконцентрированы усилия последних лет, а именно прецизионная сборка элементов криомишени и создание криогенного слоя внутри оболочки.

Для сборки криогенных мишеней с требуемой точностью был разработан стенд сборки криогенных мишеней [2]. На данном стенде проводятся сборочные операции по герметизации окон бокса-конвертора; вклеивание микрокапилляра в отверстие сферической оболочки; сборка узла бокса-конвертора с капсулой внутри; сборка всего мишенного узла и финишная аттестация мишени на соответствие требуемой точности расположения элементов друг относительно друга. Рабочие места оборудованы системами точного позиционирования собираемых элементов; системами удержания собираемых элементов; системами видеонаблюдения высокого разрешения для регистрации процесса сборки и аттестации. Финишная аттестация проводится на видеоизмерительной системе высокого разрешения для трехмерного контроля поверхности с разрешением до 10 нм.

На рис. 2 показан один из этапов сборки мишени: процесс ввода микрокапилляра $\varnothing 20$ мкм в соответствующее отверстие оболочки $\varnothing 2$ мм [2, 3]. На воронкообразный держатель устанавливается оболочка, при помощи позиционеров положение отверстия корректируется так, чтобы оно на-

ходилось в полюсе оболочки; капилляр устанавливается в цанговый зажим манипулятора и ориентируется соосно отверстию оболочки, предварительно на поверхность микрокапилляра с отступом от торца наносится небольшое количество клея. После чего микрокапилляр опускается в отверстие оболочки до распределения клея по контуру отверстия.

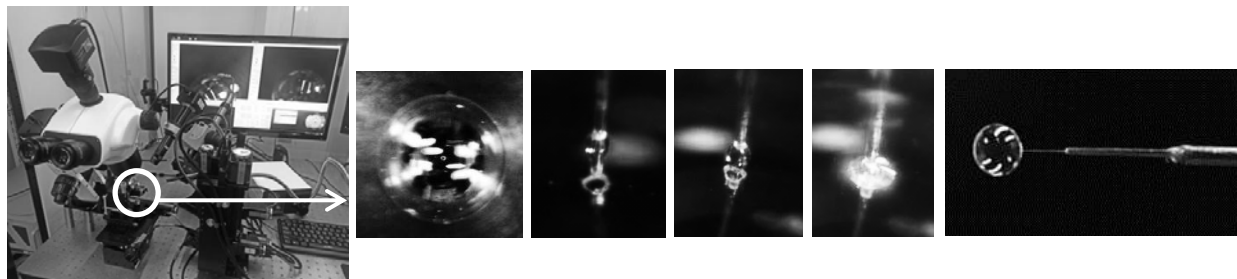
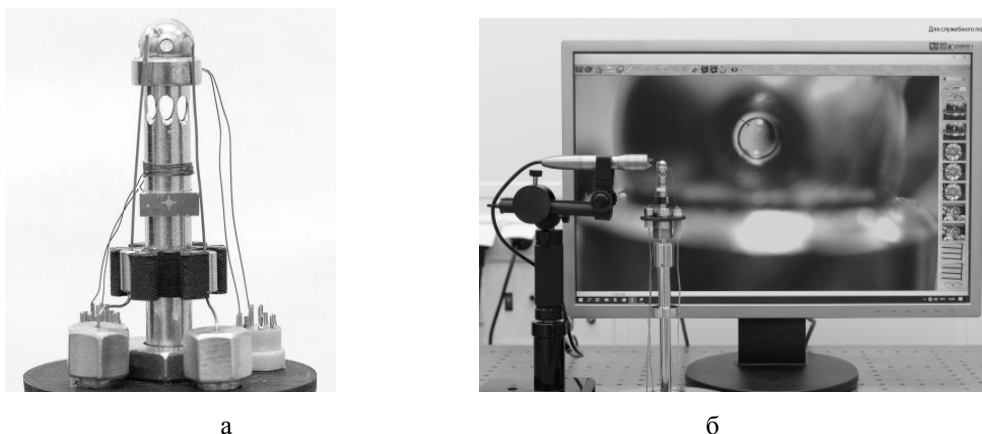


Рис. 2. Процесс сборки микрокапилляра и оболочки

Итогом последовательно выполненных всех сборочных операций на стенде является конструкция мишени, аттестованная на предмет соответствия требуемой точности расположения элементов относительно друг друга. На рис. 3 представлена собранная на стенде конструкция мишени непрямого облучения криогенного типа [4].



а

б

Рис. 3. Конструкция мишени непрямого облучения криогенного типа: а – общий вид, б – вид центральной оболочки внутри бокса-конвертора

Следующим этапом создания криогенной мишени является формирование криогенного слоя изотопов водорода внутри сферической оболочки. К качеству криогенного слоя предъявляются высокие требования, в частности, отклонение от сферичности и концентричности не должно превышать 1 % [5, 6].

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. 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 (например, стенка оболочки) [6].

В методе бета-выравнивания в качестве механизма выравнивания по толщине твёрдого DT-слоя используется тепло, выделяющееся в процессе бета-распада трития [7]. 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 объёме толстой области DT-слоя её 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. 4. Процесс выравнивания толщины имеет экспоненциальный характер, поскольку по мере выравнивания слоя градиент температуры на его поверхности снижается.

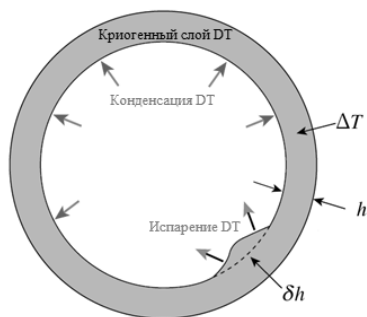


Рис. 4. Принцип работы метода радиальных температурных градиентов

ИК-излучение заводится в эту внутреннюю сферическую полость, в результате чего криогенный слой поглощает излучение и нагревается [9]. Чтобы выравнивать слой инфракрасным поглощением, длина волны должна быть выбрана для конкретного изотопа или смеси (2,57 мкм – пик поглощения HD-смеси, 3,16 мкм – D₂). При этом так же, как и в методе бета-выравнивания, толстая область становится более нагретой, а тонкая – менее нагретой, в результате чего происходит перераспределение вещества и выравнивание слоя по толщине. Аналогично бета-выравниванию, процесс ИК-выравнивания имеет экспоненциальный характер. В этом случае также предъявляются высокие требования к изотермичности экспериментального бокса, в котором располагается оболочка с топливом. Дополнительным требованием для метода ИК-выравнивания является использование оболочек, прозрачных для инфракрасного излучения. Таким образом, данный метод не может использоваться для получения криогенных мишеней непосредственно для экспериментов по ЛТС, но может быть полезен для получения базовых знаний о физическом механизме образования криослоя водорода, о необходимой конструкции криомишени, алгоритмах проведения экспериментов по формированию криослоя и пр., тем самым снижая риски, возникающие при работе с радиоактивными веществами.

В этой работе рассмотрим способ формирования однородного по толщине твердого слоя дейтерия с использованием ИК-излучения. В качестве источника ИК-излучения был выбран твердотельный лазер с диодной накачкой среднего инфракрасного диапазона с центральной длиной волны 3,16 мкм и выходом под одномодовое оптоволокно. Средняя выходная мощность излучения составляет 80 мВт. В качестве проводника излучения был выбран одномодовый оптоволоконный кабель с рабочим диапазоном в области длин волн 2,3 – 4,1 мкм.

ИК-излучение в сферическую полость бокса заводится по схеме «внешнего» облучения [9], рис. 5. 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 при этом 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.

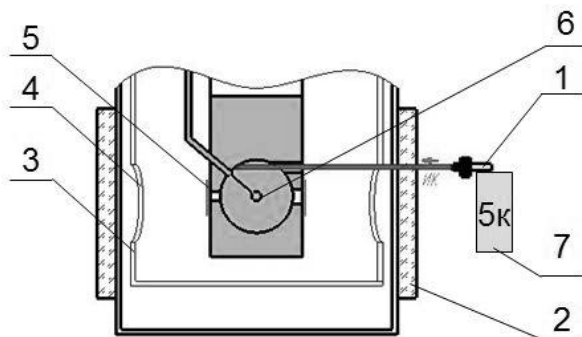


Рис. 5. Схема «внешнего» облучения: 1 – Источник инфракрасного излучения; 2 – смотровые окна криостата; 3 – криогенный экран; 4 – окна криогенного экрана; 5 – окна бокса; 6 – сферическая оболочка с водородным топливом; 7 – столик 5-координатный

Эксперименты по формированию криогенного слоя изотопов водорода в сферической полистирольной оболочке проводятся на стенде для исследования мишеней при низких температурах [10]. Стенд состоит из исследовательского криостата со сменяемым мишенным узлом, системы одновременной откачки газовых магистралей, систем напуска гелия и изотопов водорода, оптической схемы визуального контроля, системы контроля температуры, ИК-лазера. Фото стенда представлено на рис. 6.

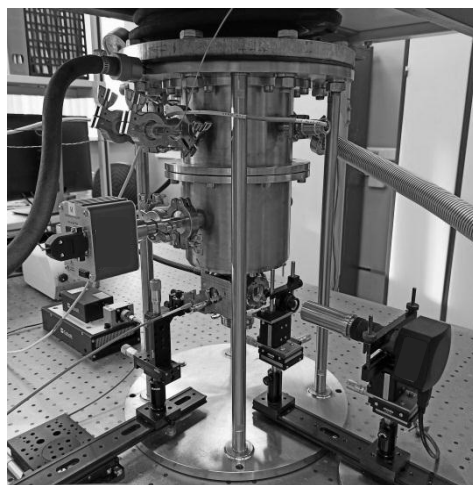


Рис. 6. Стенд для исследования мишеней при низких температурах

Эксперименты по получению криогенного слоя изотопов водорода производятся в несколько этапов [11]:

- Откачка рабочего объема криостата и систем напуска газов (гелий, изотопы водорода) до 10^{-4} мбар;
- Охлаждение экспериментальной сборки до 19 К;
- Напуск теплообменного газа гелия в полость бокса (до 10^{-2} мбар);
- Напуск изотопов водорода в сферическую полистирольную оболочку, дозирование количества жидкости в оболочке до необходимого уровня;
- Понижение температуры с заданными параметрами скорости до полного преобразования жидкой фазы в твердую.
- Перераспределение льда в оболочке с помощью ИК-нагрева.

Этапы формирования криогенного слоя изотопов водорода в оболочке показаны на рис. 7.



Рис. 7. Этапы формирования криогенного слоя изотопов водорода в оболочке

Ключевым условием получения однородного по толщине криогенного слоя водородного топлива 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. 8,а,в.

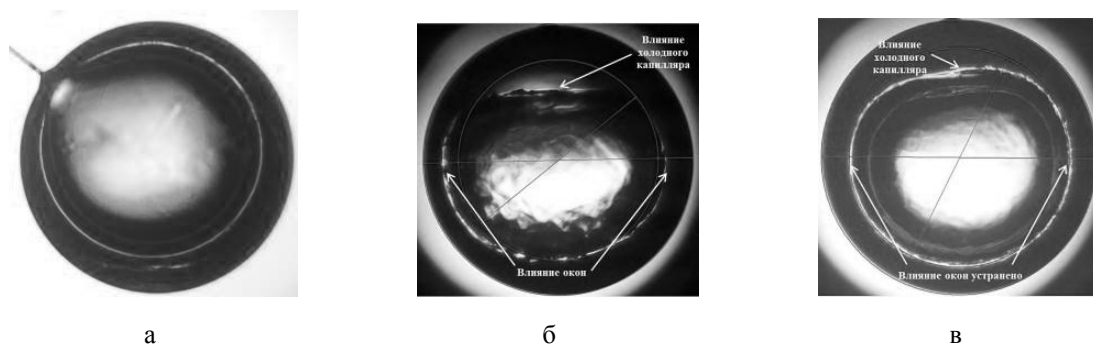


Рис. 8. Влияние температурных градиентов на криослой: а – влияние стеклянного (теплого) капилляра, б – влияние холодного капилляра и теплопритоков от окон бокса, в – влияние холодного капилляра при устраненном влиянии окон

Устранив в расчетной модели все выявленные факторы, получили изотермическую поверхность оболочки, как показано на рис. 9.

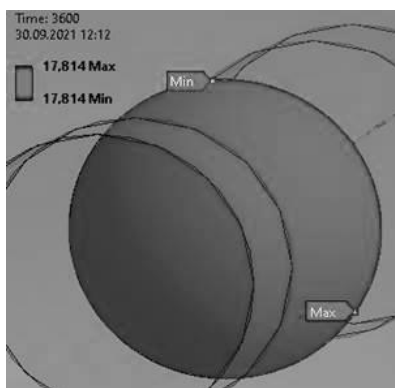


Рис. 9. Изотермическая поверхность оболочки

Это означает, что при данной конфигурации экспериментальной сборки может быть выполнено условие равномерного теплового окружения оболочки для получения криогенного слоя с требуемой разнотолщиной. 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 разнотолщины слоя. Результат одного из экспериментов приведен на рис. 10.



Рис. 10. Результат эксперимента по формированию криослоя дейтерия

Данный эксперимент по схеме «внешнего» облучения проводился на оболочке диаметром 1460 мкм, отклонение криогенного слоя дейтерия от concentричности составило 1 %, от сферичности 2 % при средней толщине криослоя 196 мкм [12].

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 проводить эксперименты с нерадиоактивными изотопами водорода, чтобы снизить трудозатраты и исключить риски, которые возникают при работе с радиоактивными веществами. В экспериментах по формированию криогенного слоя дейтерия методом ИК-выравнивания были получены криослои с параметрами разнотолщины, близкими к требуемым, что является важным этапом на пути создания криогенной мишени для ЛТС. Проведение таких экспериментов способствовало выявлению необходимых условий для получения криослоя изотопов водорода, удовлетворяющего качества:

- абсолютная герметичность сборки в условиях высокого вакуума и криогенных температур;
- точность изготовления внутренней сферической поверхности бокса и точность расположения оболочки в ее центре;
- отсутствие температурных градиентов на поверхности оболочки (теплопритоки от окон, влияние капилляра и клеевого пятна, наличие теплообменного газа и т. д.);
- возможность непрерывной работы для проведения длительных экспериментов по формированию криослоя, т. к. проведение эксперимента по ИК-формированию слоя при выполненных предыдущих условиях составит более 15 часов.

При выполнении перечисленных условий, можно рассчитывать на хорошую повторяемость результатов и возможность быстрой адаптации полученных технологий и методик проведения экспериментов к работе по получению криогенных мишеней непрямого облучения с варьируемыми параметрами по топливу, материалам и размерам элементов.

Список литературы

1. Изгородин В. М., Соломатина Е. Ю. и др. Криогенная мишень для ЛТС и проблемы её создания. Одиннадцатая Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям: Сборник докладов. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2018.

2. Жилинская Е. В., Калашников Е. В. и др. Создание комплекса оборудования сборки мишени непрямого облучения для многоканальной лазерной установки. Применение лазерных технологий для решения задач по физике высоких плотностей энергии. Труды международной конференции «XX Харитоновские тематические научные чтения: сборник докладов. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2019.

3. Harding D. R., Ulreich J., etc. Requirements and Capabilities for Fielding Cryogenic DT-Containing Fill-Tube Targets for Direct-Drive Experiments on Omega. *Fusion Science and Technology*, 2017.

4. Гаранин С. Г., Гарнов С. В., Сергеев А. М., Хазанов Е. А. Мощные лазеры для физики высоких плотностей энергии. *Вестник Российской академии наук*, 2021, том 9, № 5.

5. Tianliang Yan, Kai Wang, Zhongming Zang, et al. Compact, snapshot and triple-wavelength system for ICF target ice-layer refractive index and thickness measurement. *Optics and Laser Technology* 134 (2021) 106595.

6. Sangster T. C., Betti R., Craxton R. S., Delettrez J. A. et al., *Phys. Plasmas* 14, 058101 (2007).

7. Martin A. J., Simms R. J., and Jacobs R. B., *Vac J. Sci. Technol. A* 6, 1885 (1988).

8. London R. A., Koziolowski B. J., Marinak M. M. and Kerbel G. D., *Fusion Sci. Technol.* 49, 608 (2006).

9. Bittner D. N. et al. Forming Uniform HD Layers in Shells Using Infrared Radiation / UCRL-JC-131371, PREPRINT, Lawrence Livermore National Laboratory, 12.10.1998.

10. Осетров Е. И., Изгородин В. М., Пепеляев А. П. и др. Эксперименты по выравниванию криогенного слоя изотопов водорода инфракрасным излучением в сферической полистирольной оболочке. // Молодежь в науке: Сборник докладов 17-й научно-технической конференции – Саров: М-75 ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2019. – 546 с.

11. Izgorodin V. M., Solomatina E. Y., Pepelyaev A. P., Rogozhina M. A. and Osetrov E. I. The polystyrene microsphere filling with hydrogen isotopes through the fill tube with consequent freezing. *Journal of Physics: Conference Series* 747 (2016) / IOP Publishing.

12. Зарубина Е. Ю., Соломатина Е. Ю., Изгородин В. М. и др. Диагностика криогенного слоя изотопов водорода в сферической оболочке по теневым изображениям. // Сборник научных трудов V Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии», 2019. С. 320–321.