

ФОРМИРОВАНИЕ РАВНОТОЛЩИННОГО КРИОГЕННОГО СЛОЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ИК-НАГРЕВЕ

Рогожина Марина Анатольевна (oefimova@otd13.vniief.ru), Соломатина Елена Юрьевна, Зарубина Елена Юрьевна

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Представлены результаты экспериментов по выравниванию криогенного слоя изотопов водорода в сферической полистирольной оболочке с помощью инфракрасного излучения, проведены оценочные расчеты качества получаемого слоя.

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

FORMATION OF A UNIFORMLY THICK CRYOGENIC LAYER OF HYDROGEN ISOTOPES AT THE INNER SURFACE OF A SPHERICAL SHELL BY INFRARED RADIATION

Rogozhina Marina Anatolievna (oefimova@otd13.vniief.ru), Solomatina Elena Yurievna, Zarubina Elena Yurievna

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

The paper presents results of experiments on equalization of a cryogenic layer of hydrogen isotopes in a spherical polystyrene shell by means of infrared radiation; estimated calculations of the cryogenic layer quality are given.

Key words: cryogenic target, equalization, cryogenic layer, infrared radiation/heating, polystyrene shell, hydrogen isotopes.

Введение

Важнейшим этапом развития современных исследований в области лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) являются технологии получения криогенных мишеней. В простейшем виде такая мишень представляет собой полимерную оболочку и криогенный слой топлива, замороженный на внутренней поверхности. Требования, предъявляемые к качеству твердого водородного слоя в криомишенях, достаточно высоки: шероховатость поверхности криогенного слоя не должна превышать 1 мкм, разнотолщинность (отклонения от сферичности) – не более 1 % [1]. Одним из наиболее эффективных методов выравнивания по толщине криогенного слоя в процессе его формирования является нагрев инфракрасным излучением [2].

Метод нагрева криогенного слоя инфракрасным излучением используется при работе с нерадиоак-

тивными изотопами водорода – дейтерием, тритием и их смесями. Он основан на эффекте поглощения ИК-излучения изотопами водорода. Вещество перераспределяется с более нагретой (и более толстой) области в менее нагретую (и более тонкую) область на поверхности слоя. Процесс выравнивания толщины происходит с экспоненциальным затуханием, так как по мере выравнивания градиент температуры на поверхности слоя снижается.

Эксперименты по формированию криослоя

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 схемы визуального контроля, системы контроля температуры, ИК-лазера. Фото стенда представлено на рис. 1.



Рис. 1. Стенд для исследования мишеней при низких температурах

Эксперименты по получению криогенного слоя изотопов водорода производятся в несколько этапов [3]:

- откачка рабочего объема криостата и систем напуска рабочих газов (гелий, изотопы водорода) до 10^{-4} мбар;
- охлаждение экспериментальной сборки до 30 К;
- напуск теплообменного газа гелия в полость бокса (до 10^{-2} мбар);
- напуск изотопов водорода в сферическую полистирольную оболочку (до 1 бар);
- охлаждение оболочки до температуры тройной точки, дозирование количества жидкости в микросфере 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 льда в оболочке показаны на рис. 2.

Выравнивание криогенного слоя изотопов водорода в сферической оболочке с помощью инфра-

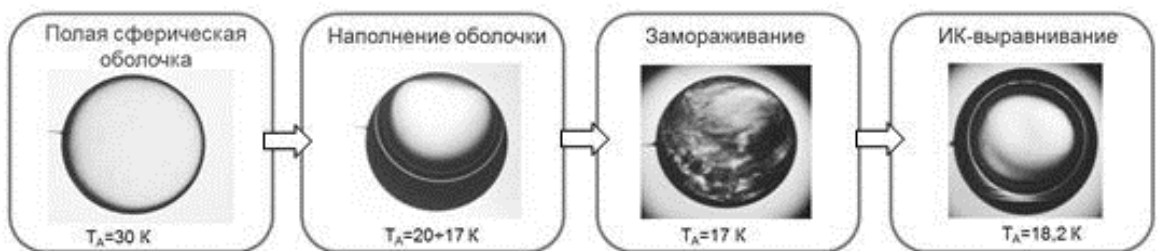


Рис. 2. Процесс наполнения сферической полистирольной оболочки изотопами водорода методом низкотемпературной перегонки через капилляр

красного излучения проводились по схеме внешнего облучения[2]. Инфракрасное излучение лазера заходило в полость экспериментального мишенного бокса через ИК-прозрачные окна криостата, криоэкрана и бокса. Схематичное изображение бокса представлено на рис. 3. При реализации схемы нагрева через смотровые окна криостата, воздействию инфракрасного излучения, помимо криогенного слоя, подвергаются также смотровые окна криостата 2, см. рис. 3, окна сферического бокса из лавсана 4, сферическая оболочка из полистирола 5 и стеклянный капилляр, через который осуществляется наполнение оболочки водородным топливом.

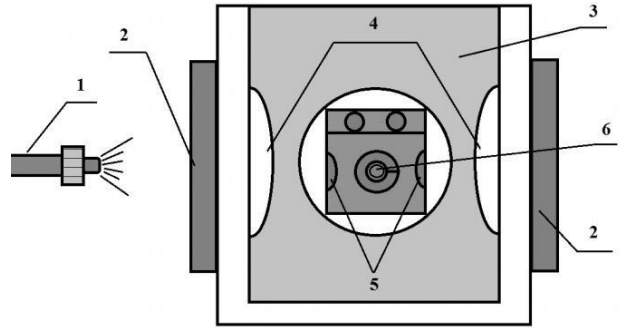


Рис. 3. Принципиальная схема внешнего ИК-облучения: 1 – источник ИК-излучения, 2 – смотровые окна криостата КУ-1, 3 – криогенный экран, 4 – окна криогенного экрана, 5 – пленки из лавсана 4 мкм на окнах бокса, 6 – сферическая оболочка с водородным топливом

Для выравнивания криогенного слоя дейтерия был выбран лазер среднего ИК-диапазона с центральной длиной волны 3,16 мкм (пик поглощения дейтерия) и выходом под оптоволоконно. Оптоволоконно закреплено на 5-координатном столике, что позволяет направлять излучение под различными углами, ограничиваясь лишь апертурой смотровых окон экспериментального бокса, криоэкрана и оптического стакана криостата.

Диагностика криослоя

Для измерения параметров (толщины, разнотолщинности и локальной толщины) криогенного слоя изотопов водорода в оптически прозрачной оболочке-капсуле проведено построение теоретиче-

ской модели прохождения света через оболочку с топливом с образованием характеристического «яркого кольца» на теновом изображении, получена хорошая корреляция с экспериментальными данными [4].

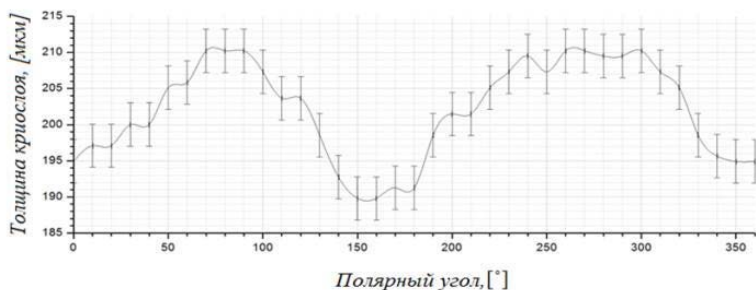
На рис. 4,а представлен результат одного из экспериментов. Диаметр оболочки 1460 мкм, толщина стенки 11 мкм. Разнотолщинность криослоя составляет $\Delta = (5 \pm 2) \%$ при средней толщине криослоя (202 ± 3) мкм. На рис. 4,б для этой оболочки с твердым криогенным слоем представлен гра-

фик локальной толщины криослоя (τ) в зависимости от полярного угла ϕ (шаг по углу 10°).

Проведены тепловые расчеты экспериментального бокса (рис. 5, б). По распределению температур видно, что возникает теплая область на поверхности в результате прямого попадания пучка ИК-излучения, часть которого доходит и до противоположной стороны, где капилляр поглощает большую часть и греет оболочку и криослой. На рис. 5,а показаны результаты эксперимента по выравниванию криос-

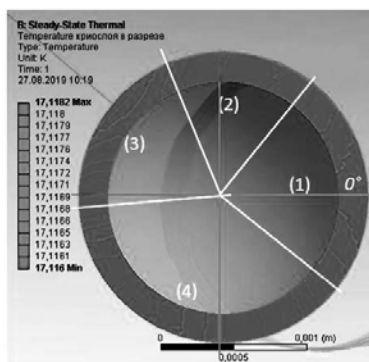


а

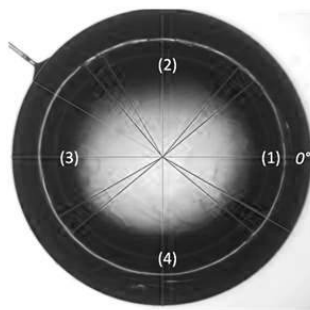


б

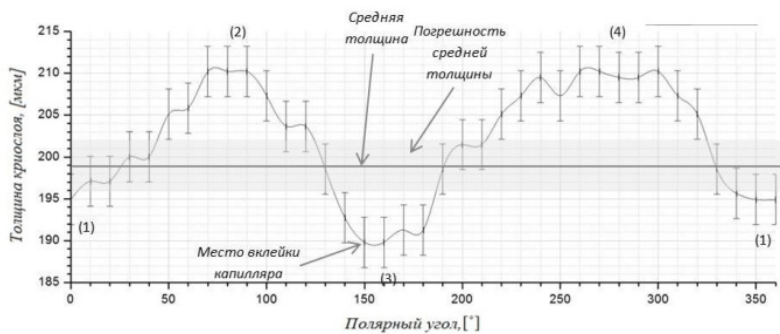
Рис. 4. Измерение толщины и разнотолщинности слоя: а – оболочка с твердым криослоем дейтерия, б – график локальной толщины криослоя в зависимости от полярного угла (шаг по углу 10°)



а



б



в

Рис.5. Анализ теоретических и экспериментальных данных: а – оболочка с криослоем (202 ± 3) мкм, б – результат теплового расчета для оболочки и криослоя, в – график разнотолщинности криослоя с указанием теплых и холодных областей

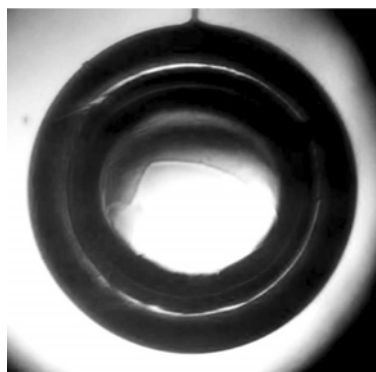


Рис. 6. Результат эксперимента по формированию криослоя D₂. Слой 208 мкм с разнотолщинностью 0,5%

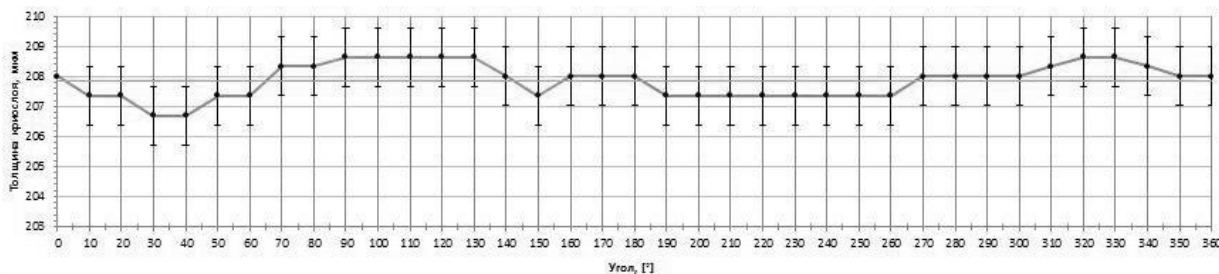


Рис. 7. Зависимость локальной толщины криослоя от полярного угла

ля с помощью коллимированного пучка ИК-излучения диаметром 8 мм. Получен криогенный слой разнотолщинностью $(5 \pm 2)\%$ при средней толщине криослоя (202 ± 3) мкм. Обработка результатов эксперимента представлена на рис. 5, в (зависимость толщины криослоя от полярного угла, шаг измерений по углу 10°). На рис. 5, а и на графике рис. 5, в обозначены цифрами области, где слой тоньше среднего (области (1), (3)), и где слой толще среднего (области (2), (4)). Расположение более тонких и более толстых областей криослоя в плоскости локализации изображения на рис. 5, а и 5, б, совпадает.

Таким образом, результат теоретических тепловых расчетов хорошо согласуется с экспериментальными результатами в плане положения изотермической внутренней поверхности криослоя: криогенный слой тоньше в более теплых областях (области прямого попадания ИК-излучения на оболочку и место соединения стеклянного капилляра и оболочки). Анализ расчетов показал, что в данном боксе можно добиться однородного теплового окружения оболочки, для этого необходимо бороться с температурными градиентами на поверхности оболочки. Стеклянный капилляр был покрыт золотом для отражения ИК-излучения, а пучок ИК-излучения был направлен под углом, чтобы он попадал на внутреннюю поверхность сферы выравнивания, а не на оболочку, для получения равномерно рассеянного диффузного излучения.

В результате проведенных расчетно-теоретических и экспериментальных исследований были получены криогенные слои дейтерия с разнотолщинностью менее 1 % при средней толщине кри-

ослоя (208 ± 1) мкм по схеме внешнего облучения. Результат одного из экспериментов приведен на рис. 6. На рис. 7 показана зависимость локальной толщины полученного криослоя от полярного угла.

Заключение

Применение инфракрасного излучения для формирования криогенного слоя изотопов водорода на внутренней поверхности сферической оболочки позволяет получать слои требуемых параметров разнотолщинности в пределах погрешности измерения.

Список литературы

1. Kucheev S. O., Hamza A. V. Condensed hydrogen for thermonuclear fusion // J. Appl. Phys. 2010. Vol. 108. P. 91–101.
2. Bittner D. N., Collins G. W., Monsler E., Letts S. Forming uniform HD layers in shells using infrared radiation. // Fusion Technology. 1999. Vol. 35. P. 244.
3. Izgorodin V. M., Solomatina E. Y., Pepelyaev A. P., Rogozhina M. A., 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.
4. Зарубина Е. Ю., Соломатина Е. Ю., Изгорodin 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.