

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ВЫРАВНИВАНИЮ КРИОГЕННОГО СЛОЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В СФЕРИЧЕСКОЙ ПОЛИСТИРОЛЬНОЙ ОБОЛОЧКЕ

*Е. И. Осетров, В. М. Изгородин, Е. Ю. Соломатина, А. П. Пепеляев, А. А. Кострикина,
С. П. Баринов, Е. Ю. Зарубина, С. Ю. Батуков, Н. Н. Мариничева*

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

Важнейшим этапом развития современных исследований в области лазерного термоядерного синтеза являются технологии получения криогенных мишеней. В простейшем виде такая мишень представляет собой полимерную оболочку и криогенный слой топлива, намороженный 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 нерадиоактивными изотопами водорода – дейтерием, тритием и их смесями. Он базируется на эффекте поглощения ИК-излучения изотопами водорода. Вещество перераспределяется с более нагретой (и более толстой) в менее нагретую (более тонкую) область на поверхности слоя. Процесс выравнивания толщины происходит с экспоненциальным затуханием, так как по мере выравнивания градиент температуры на поверхности слоя снижается.

Проведены расчетно-теоретические исследования возможностей выравнивания по толщине криогенного твердого слоя дейтерия на внутренней поверхности сферической оболочки. На основе их результатов был выбран источник ИК-излучения и подобраны соответствующие конструкционные материалы. Наиболее предпочтительным вариантом, на наш взгляд, является использование лазера среднего ИК-диапазона с центральной длиной волны 3,16 мкм (пик поглощения дейтерия) или 2,57 мкм (пик поглощения трития) и выходом под оптоволокно. Использование оптоволокна позволит исключить нагрев конструкционных материалов, доставить излучение с минимумом потерь, а главное – обеспечить возможность однородного нагрева криогенного слоя рассеянным в полости бокса инфракрасным излучением. Это требует использования специального одномодового оптоволокна, эффективно проводящего ИК-излучение заданной длины волны. Для таких целей используются флюоридные оптоволокна.

Экспериментальная часть

Эксперименты по намораживанию изотопов водорода в сферической полистирольной оболочке с последующим ИК-нагревом проводились на стенде для исследования мишеней при низких температурах. Стенд состоит из исследовательского криостата, системы одновременной откачки газовых магистралей, систем напуска гелия и изотопов водорода, оптической схемы визуального контроля и системы контроля температуры. Фото стенда представлено на рис. 1.

В общем случае существует две основных схемы проведения эксперимента по выравниванию криогенного слоя изотопов водорода в сферической оболочке с помощью инфракрасного излучения.

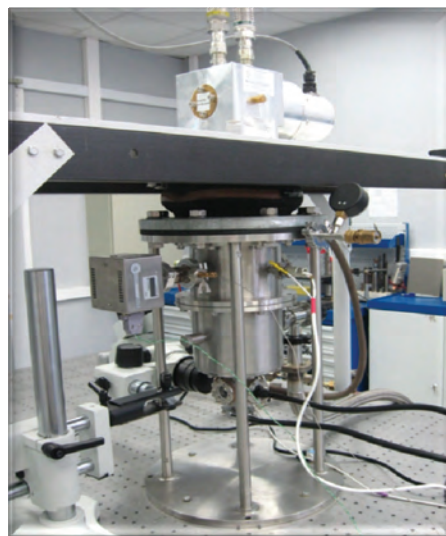


Рис. 1. Стенд для исследования мишеней при низких температурах

Первая схема – внешнее облучение [2]. Инфракрасное излучение лазера заводится в полость экспериментального мишенного бокса через ИК-прозрачные окна криостата, криозкрана и бокса. При разработке схемы эксперимента важно реализовать нагрев только водородного топлива, что, при наличии множества конструкционных материалов, окружающих экспериментальную сборку, становится очень нетривиальной задачей. Данная схема предполагает

использование различных оптических схем, позволяющих заводить инфракрасное излучение внутрь экспериментального бокса. На сегодняшний момент реализован вариант нагрева через оптоволокно, которое закреплено на 5-координатном столике. Это позволяет направлять излучение под различными углами, ограничиваясь лишь апертурой смотровых окон экспериментального бокса, криоэкрана и оптического стакана криостата. И позволяет уйти от применения сложных оптических схем.

Вторая схема представляет собой нагрев криогенного слоя изотопов водорода инфракрасным излучением через оптоволокно, которое заводится непосредственно в корпус экспериментального бокса («сферы выравнивания») [3]. На сегодняшний день этот вариант является наиболее перспективным, поскольку здесь снимается проблема нагрева конструкционных материалов, окружающих оболочку и пропадает потребность в использовании дополнительных фильтров и сложных оптических схем. Однако, данную схему гораздо сложнее реализовать технически, поскольку заведение хрупкого оптоволокна без риска разрушения и потери герметичности в экспериментальный бокс – очень непростая задача.

На рис. 2 показан оптический стакан криостата, в котором располагается экспериментальный бокс. При реализации схемы нагрева через смотровые окна криостата, воздействию инфракрасного излучения, помимо криогенного слоя, подвергаются также смотровые окна криостата (2), окна сферического бокса из лавсана (4), сферическая оболочка из полистирола (5) и стеклянный капилляр, через который осуществляется наполнение оболочки водородным топливом.

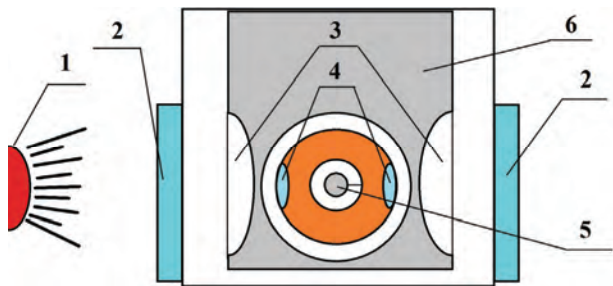
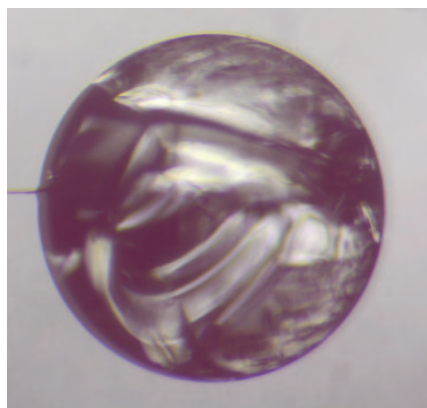


Рис. 2. Принципиальная схема ИК-нагрева через смотровые окна криостата (схема внешнего облучения): 1 – источник инфракрасного излучения; 2 – смотровые окна криостата из кварца марки «КУ-1»; 3 – окна криогенного экрана; 4 – окна сферического бокса из лавсана; 5 – сферическая полистирольная оболочка с криогенным слоем дейтерия; 6 – криогенный экран

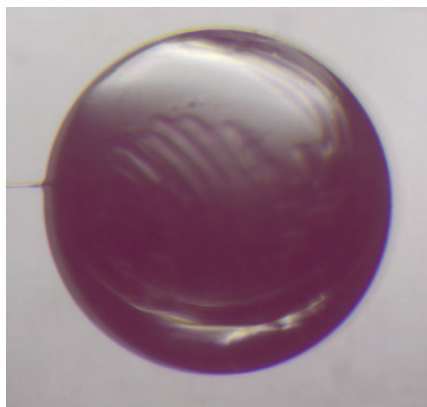
Результаты экспериментов по выравниванию криослоя

На рис. 3 показаны результаты эксперимента по ИК-нагреву керамическим излучателем ИКН-102-0,125/230-1 мощностью 125 Вт замороженного дейтерия на внутренней поверхности сферической поли-

стирольной оболочки диаметром 1,5 мм. Видно, что слой после нагрева через смотровые окна криостата и повторной кристаллизации заметно выровнялся, исчезли крупные неоднородности поверхности. При работе с этим источником избежать общего нагрева экспериментальной сборки не удалось, поскольку он имеет широкий спектр теплового излучения (от 2,5 до 9 мкм). Так же очевидно, что внутренняя полость бокса-кюветы не позволяет реализовать равномерное рассеяние инфракрасного излучения, ее геометрия далека от сферической, что препятствует равномерному распределению криогенного слоя внутри полистирольной оболочки при нагреве. Тем не менее, распределение льда наблюдается, и кратковременное воздействие даже неоднородным инфракрасным излучением положительно влияет на качество получаемого криогенного слоя.



а



б

Рис. 3. Сферическая полистирольная оболочка Ø1,5 мм с замороженным слоем D_2 : а – до нагрева ИК-излучением; б – после нагрева ИК-излучением в течение 7 минут и проведения повторной процедуры кристаллизации слоя

На рис. 4 показаны результаты эксперимента по нагреву криогенного слоя дейтерия с помощью инфракрасного лазера. Основным его преимуществом является возможность эффективного нагрева только криослоя дейтерия, общая температура экспериментальной сборки и окружающих ее конструкционных материалов при этом возрастает незначительно.

С помощью ИК-лазера в специальном экспериментальном боксе можно получить слои с разнотолщиной не более 40 % (рис. 5).

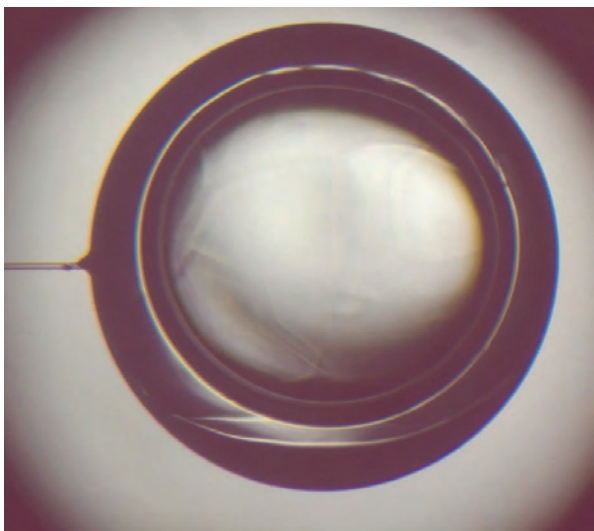


Рис. 4. Криогенный слой дейтерия после процедуры ИК-нагрева (схема внешнего облучения)

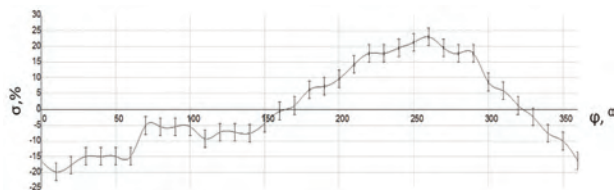


Рис. 5. График отклонения (σ) локальной толщины криослоя от средней в зависимости от полярного угла ϕ (шаг по углу 10°)

Литература

1. Kucheev S. O., Hamza A. V. Condensed hydrogen for thermonuclear fusion // J. Appl. Phys. 2010. Vol. 108. P. 091101.
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. Bittner D. N., Collins G. W., and Sater J. D. Generating Low Temperature Layers with IR Heating // Preprint UCRL-JC-143446, Lawrence Livermore National Laboratory, 31.03.2003.