

# КРИОГЕННАЯ МИШЕНЬ ДЛЯ ЛТС И ПРОБЛЕМЫ ЕЁ СОЗДАНИЯ

*В. М. Изгородин, Е. Ю. Соломатина, Е. И. Осетров, М. А. Рогожина, А. П. Пепеляев*

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

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ проводится работа по созданию новой лазерной установки мегаджоульного уровня энергии. Главная задача экспериментов по лазерному термоядерному синтезу, которую необходимо решить с помощью этой установки – провести эксперименты по сжатию термоядерной мишени вблизи порога ее зажигания, т. е. достичь энергии выхода термоядерной реакции синтеза, превышающей энергию, вложенную в лазерный импульс. Основной мишенью для демонстрации зажигания является криогенная мишень. В связи с этим поставлена задача разработать технологию изготовления таких мишеней, позволяющих осуществить демонстрацию зажигания. Конструкция этих мишеней и требования к ним направлены на снижение всех энергетических потерь для достижения максимальной температуры и плотности топлива в точке зажигания при вложенной лазерной энергии.

Наиболее перспективным для новой лазерной установки предполагается использовать режим непрямого облучения мишени со сферическим боксом-конвертором, имеющим 6 отверстий. Ниже приводятся характеристики таких мишеней, исходя из общепринятых [1] требований.

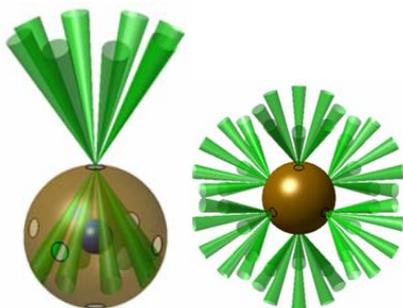


Рис. 1. Схема ввода лучей в бокс-конвертор

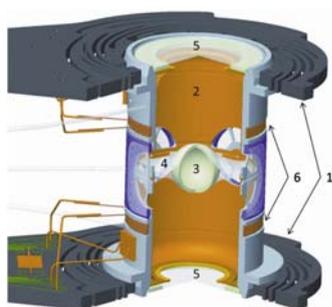
Центральная сферическая криогенной капсула состоит из оболочки из СНх полимера, легированного Ge или Be легированного Cu, DT льда, DT газа.

## Требования к параметрам криогенных мишеней непрямого облучения [1]

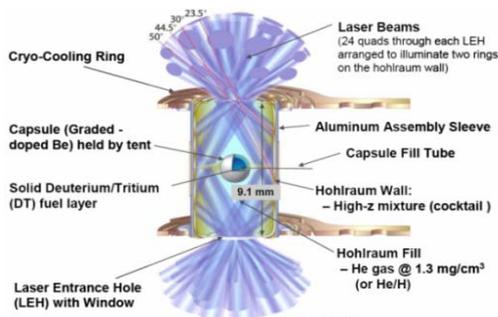
Диаметр бокса	От 6 до 10 мм
Диаметр отверстий в боксе	От 1 до 1,5 мм
Центральная капсула из полимера легированного Ge или Be легированного Cu	
Допустимая шероховатость внешней поверхности капсулы:	
– пластиковая капсула	10 нм
– капсула из Be	30 нм
Толщина слоя DT льда	От 65 до 100 мкм
Допустимая разнотолщинность	<1 %
Масса DT в мишени	От 0,2 до 0,3 мг
Допустимая шероховатость внутренней поверхности DT-льда:	
– полимерная капсула	<1 мкм
– капсула из Be	2 мкм

За рубежом имеются несколько аналогичных лазерных установок. Наибольших успехов достигли американские ученые на действующей установке NIF. Используемые криогенные мишени есть продукт коллаборации нескольких лабораторий и научных объединений. На указанной установке удалось продемонстрировать «физическое зажигание», когда выход выделившейся термоядерной энергии стал больше поглощенной топливом энергии излучения [2, 3].

Конструкция мишени непрямого облучения hot-spot ignition для экспериментов по зажиганию на NIF (рис. 2), к которой пришли исследователи в результате многолетних усилий, представляет собой сложную сборку из центральной капсулы, помещенной внутрь золотого цилиндрического конвертора, в свою очередь размещенного внутри цилиндрического кожуха. Кожух состоит из двух алюминиевых частей, изготовленных с помощью прецизионной машинной обработки, соединяемых между собой кольцом с диагностическими прорезями, также изготовленным механической обработкой с высокой точностью.



а



б

Рис. 2. Схема мишени непрямого облучения «hot-spot ignition» для установки NIF: (а) – 1 – хладопроводы из монокристаллического кремния; 2 – золотой конвертор; 3 – Be+Cu или CH<sub>x</sub>+Ge оболочка с внешним диаметром около 2 мм и толщиной стенки до 200 мкм; 4 – тонкие (<100 нм) полимерные пленки; 5 – окна для ввода лазерного излучения, закрытые полимерными пленками (0,5 мкм); 6 – нагреватели для терморегулировки; (б) – ввод лучей в мишень непрямого облучения на NIF [4]

Температура кожуха контролируется и поддерживается стабильной с точностью 0,001 К в районе «тройной точки» смеси изотопов водорода (температуры, при которой все три фазы существуют в равновесии) во время процедуры выравнивания криослоя.

Разработан метод получения криослоя с низкой шероховатостью и с однородностью по толщине от 0,1 до 1 % [5]. Этапы приготовления криослоя проиллюстрированы на рис. 3 и 4.

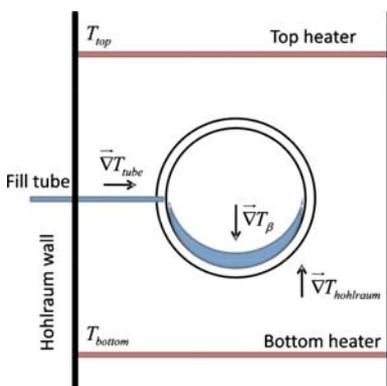


Рис. 3. Наполнение через капилляр [5]

Наполнение оболочки смесью изотопов водорода через капилляр происходит при температуре от 21 до 23 К.

После наполнения оболочки заданным количеством DT смеси в жидком виде температура снижается до температуры затвердевания смеси. В жидком DT начинают расти кристаллы DT льда гексагональной плотно упакованной структуры. По сути это процесс кристаллизации из расплава в сферическом тигле.

Если держать оболочку в однородном температурном окружении при температуре около тройной точки продолжительное время, происходит самовыравнивание по толщине слоя за счет тепловыделения из-за распада трития. Этот процесс называют Beta-layering (рис. 4).

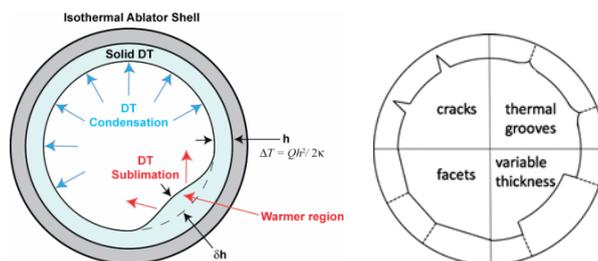


Рис. 4. Beta-layering [6] и возможные дефекты поверхности твердого криослоя

Для DT удельное тепловыделение 0,964 Вт/моль, в тройной точке для твердого DT тепловыделение составит 0,051 Вт/см<sup>3</sup>. Одномерные оценки скорости выравнивания слоя дают уменьшение неоднородности по толщине при однородном температурном окружении

$$\delta(t) = \delta_0 e^{-At} \quad (1)$$

где  $\delta_0$  – начальная неравномерность толщины,

$$A = q / (\rho L) \quad (2)$$

где  $q$  – тепловыделение,  $L$  – теплота сублимации. Характерное время выравнивания  $1/A$  для DT будет порядка 25 мин.

Основой успешности процесса выравнивания с помощью Beta-layering является выращивание в начале монокристалла DT. Поликристалличность начального твердого слоя, полученного при охлаждении DT жидкости, препятствует достижению низкой шероховатости выровненного слоя из-за наличия межкристаллических границ [5].

Для того, чтобы плотность газа DT внутри оболочки во время лазерного эксперимента была на уровне 0,3 мг/см<sup>3</sup>, температура мишени должна быть снижена примерно на 1,5 К. Исследования показывают, что даже если до снижения температуры слой был идеально ровным, то после снижения он покрывается сеткой дефектов [7]. Причем шероховатость охлажденного слоя нарастает со временем. Существует промежуток времени около 30 сек [8] от начала снижения температуры, когда шероховатость еще остается на приемлемо низком уровне.

Необходимо контролировать процесс выравнивания слоя. Это осуществляется оптическими и рентгеновскими методами. Для оптически непрозрачных бериллиевых оболочек возможен только рентгеновский метод контроля.



Рис. 5. Слой топлива во время процесса выравнивания. Рентгеновские изображения оболочки и топливного слоя, полученные с двух перпендикулярных направлений – через диагностическое отверстие с прорезями и через отверстие для ввода излучения [9]

Существуют альтернативные методы выравнивания криослоя внутри сферических оболочек: ИК нагрев, быстрая заморозка, плазменное выравнивание, метод «переменного точечного контакта», выравнивание жидкого слоя методом вертикальных тепловых градиентов, в слое микропористой пены и др. Однако, для применения в мишенях непрямого облучения для демонстрации зажигания по различным причинам ни один из них не может составить хорошую альтернативу представленному методу. Например, метод ИК нагрева возможен для пластиковых капсул, но не пригоден для бериллиевых, быстрая заморозка, как и метод «переменного точечного контакта», дает выравнивание по толщине только для тонких слоев топлива, причем, последний метод пригоден только для незакрепленных «свободных» оболочек.

Кратко опишем выбранный подход к созданию криогенной мишени для демонстрации зажигания на новой лазерной установке мегаджоульного уровня энергии и приведем обзор основных технологий, которые требуются для изготовления мишени.



Рис. 6. Схематическое изображение криогенной мишени непрямого облучения для новой лазерной установки мегаджоульного уровня энергии

Основные этапы создания криомишени:

- 1) изготовление центральной капсулы требуемого качества;
- 2) изготовление комплектующих элементов бокса и держателя требуемого качества;
- 3) изготовление герметичной мишени сборки и ее аттестация;
- 4) наполнение центральной капсулы смесью изотопов водорода в необходимом количестве;
- 5) проведение процедуры выравнивания криослоя;
- 6) доставка криомишени в центр мишени камеры.

Существуют несколько методов изготовления полых микросфер, используемых в качестве центральной капсулы для криогенной мишени. В вертикальной печи падения (рис. 7) можно изготавливать как стеклянные, так и полимерные оболочки. Частицы фритты при прохождении горячей зоны увеличиваются в размере за счет содержащихся в них газообразующих компонентов. Увеличение длины горячей зоны до 4 метров позволяет получить микросферы требуемого размера. Диаметр стеклянных – до значения от 1,1 до 1,3 мм, из полистирола от 1,6 до 1,8 мм. Толщина стенки – от 2 до 5 мкм. Температура горячей зоны для изготовления полимерных оболочек от 700 до 800 °С, стеклянных от 1300 до 1500 °С.

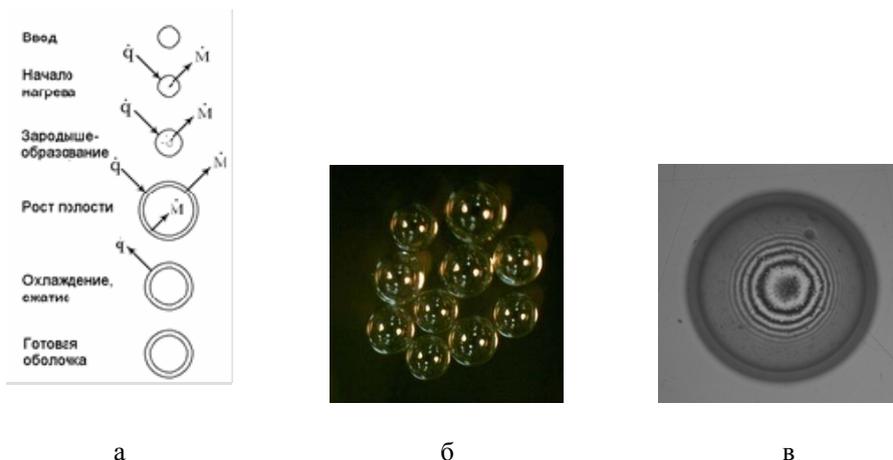


Рис. 7. Изготовление полых сферических тонкостенных оболочек из стекла или полистирола в вертикальной печи: а – схема процесса, б – фото, в – интерферограмма полистирольных оболочек

Методом микрокапсулирования изготавливаются тонкостенные (~5 мкм) большого диаметра (~2–3 мм) оболочки из полистирола, поли-альфа-метилстирола и др., обладающие хорошими параметрами по сферичности и шероховатости внешней поверхности. Этот метод общепринят для изготовления оболочек-подложек, удаляемых после наращивания рабочей стенки осаждением из газовой фазы или напылением.

Наращивание толщины стенки полимерных оболочек необходимо для получения толщины слоя полимерного аблятора до 200 мкм (рис. 8).



Рис. 8. Наращивание толщины стенки оболочек плазмохимическим методом

Оболочки из бериллия изготавливаются путем напыления бериллия на пластиковые оболочки на установке магнетронного напыления (рис. 9). Три магнетрона работают независимо друг от друга. Напыляемые сферы находятся в непрерывно вибрирующей чашке. Скорость напыления при работе 3-х магнетронов составляет ~1 мкм/час.

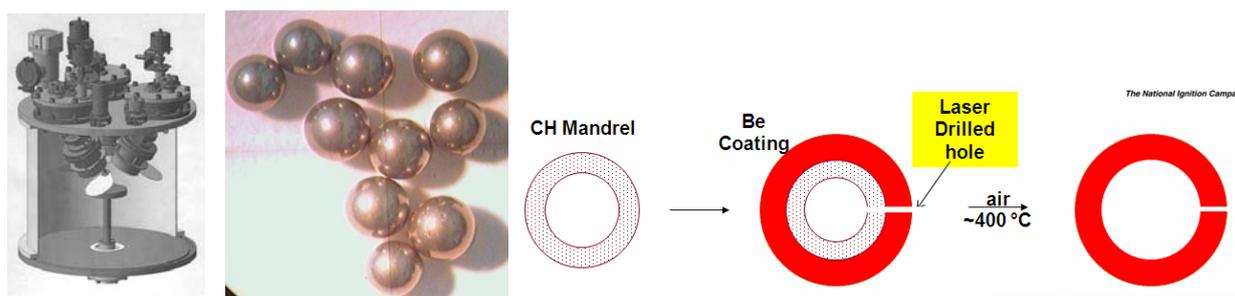


Рис. 9. Процесс изготовления полых сферических оболочек из бериллия. Диаметр бериллиевых оболочек от 1,4 до 1,7 мм; толщина стенки от 10 до 30 мкм

После напыления бериллия, получившиеся оболочки необходимо полировать, удалять подложку через микроотверстие. Кроме того, необходимо с нанометровой точностью измерять параметры внешней и внутренней поверхностей оболочек.

Основными инструментами при аттестации криомишеней на данный момент считаются [10]: конфокальная микроскопия, атомно-силовая микроскопия, применение рентгеновская техники, голографическая микроскопия, растровая электронная микроскопия, высокоточное взвешивание и др.

Устройства для оценки качества всей стенки полученной микросферы – это wallmapper или spheremapper, работающие на основе атомно-силовой микроскопии и спектроинтерферометра [10]. Оптическая когерентная томография используется для повышения качества измерений оболочек по сравнению с интерферометрией белого света. Толщина стенки в этом случае может быть измерена с обоих полюсов. Цифровая голографическая микроскопия используется, если на поверхности есть большие объекты (пыль), пустоты или локальные дефекты.

Изготовление корпусов и держателей мишени (рис. 10) должно проводиться с очень высокой точностью с помощью прецизионной механической обработки на специальном ультрапрецизионном станке алмазного точения.

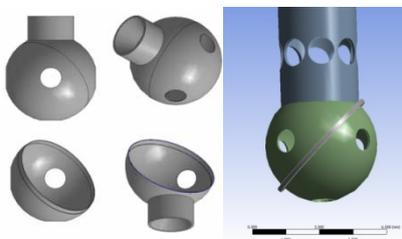


Рис. 10. Элементы мишенной сборки

Точность изготовления элементов мишени может контролироваться, например, с помощью профилометров, интерференционного микроскопа, лазерных микрометров и т. п.

Мишенная сборка представляет собой сложную конструкцию, соединенную из элементов, специально разработанных и изготовленных для создания криогенной мишени. Полусферы медного бокса-конвертора обладают сложной геометрией для изготовления: помимо сферической формы конструкции малого диаметра с высокими требованиями по отклонению от сферичности не более 1 мкм, необходимо обеспечить соединение полусфер по внутреннему «замку». Также на каждой полусфере необходимо выполнить отверстия, которые образуют при соединении полусфер три взаимно перпендикулярных окна для ввода лазерного излучения, а также для наблюдения за поведением криослоя в мишени.

Кроме того, к сферическому боксу предъявляются высокие требования по шероховатости (не более 10 нм) и точности формы (не более 1 мкм). Полусферы бокса-конвертора изготавливаются на отдельном стенде ультрапрецизионной финишной обработки элементов мишеней.

Отверстия микронных размеров в полистирольных оболочках мишеней выполняются на стенде прецизионной лазерной обработки, путем испарения материала с поверхности объекта. Диаметр получаемых отверстий составляет приблизительно 25 мкм.

Для подачи изотопов водорода в полистирольную микросферу во время экспериментов по получению криослоя, необходимо изготовить стеклянный микрокапилляр определенной геометрии и завести его в отверстие оболочки. Микрокапилляр изготавливается из легкоплавкого стекла путем растяжения при нагреве спирали. Торец капилляра обрезается по размеру, максимально соответствующему диаметру отверстия в микросфере, чтобы исключить большой зазор между стенками капилляра и стенками микросферы.

Заведение капилляра в оболочку и их склеивание производится в специальной камере, оборудованной системой присоса для удерживания оболочки, системами микронных линейных перемещений (для ориентации положения оболочки и микрокапилляра), а также системой наблюдения в двух проекциях с помощью микроскопа и зеркал.

Изготовление отверстия в сферическом медном боксе происходит на стенде электроэрозионного сверления.

Сборка мишени должна проводиться в чистых условиях. Особые требования к чистоте предъявляются, чтобы снизить количество возможных частиц пыли на поверхности микросферы [11].

Необходима система обеспечения топливной смесью, осуществляющая функции подготовки смеси изотопов водорода требуемого состава, на основе гидридов металлов, и др. Содержание трития в системе предполагается до 1000 Ки. Система для безопасной работы с тритием и перчаточные боксы являются необходимым условием работы с тритием, как с открытым источником излучения.

Наполнение газом происходит в уже установленную в криостат полистирольную оболочку, закрепленную в медном сферическом боксе. Перед напуском рабочих газов осуществляется выход на заданную температуру и ее поддержание с помощью контроллера. Затем происходит подача теплообменного газа в бокс-конвертор и изотопов водорода в оболочку. Далее следует постепенное понижение температуры с заданной скоростью (на 1 К за 3–4 минуты), задаваемое через программу контроллера, до начала процесса ожидения в оболочке. Процесс увеличения жидкой фазы в полистирольной оболочке в результате наполнения методом перегонки представлен на рис. 11.

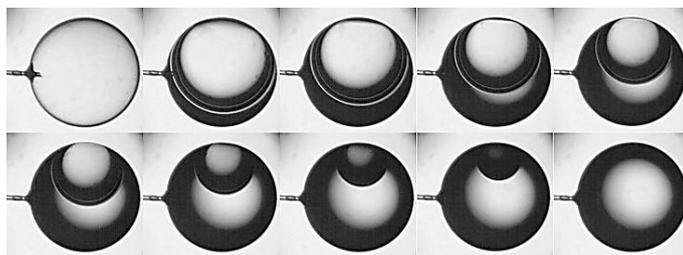


Рис. 11. Процесс наполнения сферической полистирольной оболочки жидкой фазой

Для получения криослоя используются следующие этапы [13]: формирование слоя льда (2 часа), таяние слоя льда до одного «зерна» (2 часа), формирование монокристаллического слоя льда (от 6 до 13 часов), выравнивание слоя льда (от 1 до 4 часов) (возвращение к первому этапу в случае неудовлетворительного результата), ввод мишени в камеру взаимодействия. Общее время попыток на приготовление гладкого монокристаллического слоя льда составляет от 100 до 120 часов из-за накопления гелия в результате распада трития.

Ключевым этапом в приведенном цикле является поиск одиночного «зерна» монокристалла [12, 13]. Для получения единственного «зерна» используется медленное охлаждение на заключительной стадии оттаивания и своевременная остановка при состоянии 0,999 от полного таяния.

Готовую криомишень с подготовленным криослоем, удовлетворяющим всем требованиям, перемещают в центр камеры взаимодействия, совершают процедуру настройки лазерных лучей и производят выстрел. Для новой лазерной установки принято вертикальное расположение узла ввода криомишени. Узел ввода должен обеспечить перемещение мишени от места загрузки к посту приготовления и аттестации, а после окончательной аттестации к центру мишениной камеры, обеспечить точное позиционирование криомишени.

### Список литературы

1. Point design targets, specifications, and requirements for the 2010 ignition campaign on the National Ignition Facility, S. W. Haan, J. D. Lindl, D. A. Callahan, D. S. Clark, J. D. Salmonson et al., Phys. Plasmas 18, 051001 (2011).

2. John Lindl, Otto Landen, John Edwards, Ed Moses, and NIC Team, Review of the National Ignition Campaign 2009-2012, Physics of Plasmas (1994-present) 21, 020501 (2014).

3. Hurricane O. A. et al. [Fuel gain exceeding unity in an inertially confined fusion implosion](https://doi.org/10.1038/nature13008), Nature (2014); предварительная онлайн-публикация doi:10.1038/nature13008.

4. Malsbury T., Haid B., Gibson C., Atkinson D. et al. Fielding the NIF Cryogenic Ignition Target February 28, European Society for Precision Engineering and Nanotechnology 10th Anniversary International Conference 2008.
5. Kucheyev S. O. and Hamza A. V. Condensed hydrogen for thermonuclear fusion *J. Appl. Phys.* 108, 091101, 2010.
6. Cryogenic DT and D2 Targets for Inertial Confinement Fusion, *LLE Review*, Volume 108, p.167-178, 2007.
7. Koziowski B. J., Kucheyev S. O. et al. *J. Appl. Phys.* 2009. 105, 093512.
8. Cook R. C., Koziowski B. J., Nikroo A. et al. National Ignition Facility Target Design and Fabrication, 3rd Moscow Workshop TARGETS & APPLICATIONS, Moscow, Russia, October 11, 2007.
9. Glenzer S. H., Callahan D. A., MacKinnon A. J., Kline J. L., Grim G. et al. Cryogenic thermonuclear fuel implosions on the National Ignition Facility, *Phys. Plasmas* 19, 056318 (2012); doi: 10.1063/1.4719686.
10. Laurent Jeannot, Cyril Hermerel, Alexandre Choux, Olivier Raphael, Ludovic Reverdy, Marc Theobald, LAST IMPROVEMENTS ON CHARACTERIZATION FOR THE LMJ TARGETS FABRICATION, CEA, TARGET FABRICATION MEETING (LAS VEGAS, 21-26TH JUNE 2015).
11. Salmaan Baxamusa, Bill Maranville, Aaron Peer, Rob McDonald, Ben Mason, Jack Nguyen, Joshua Senecal, Lawrence Livermore National Laboratory, Full-surface confocal microscopy and cleaning of capsule fill-tube assemblies at the National Ignition Facility, TARGET FABRICATION MEETING (LAS VEGAS, 21-26TH JUNE 2015).
12. Bittner D. N., Koziowski B., Pipes J. Forming uniform deuterium hydride and deuterium-tritium layers in shells. *ICF Quarterly Report 4*, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA UCRL-LR-105821-98-4 (1998)., p.131-139.
13. Koziowski B. J., Baxamusa S. H., Dylla-Spears R., Field J. E., Parham T. G., Sater J. D., Walters C., Lawrence F. Livermore National Laboratory, Producing deuterium-tritium fuel layers for the National Ignition Facility, TARGET FABRICATION MEETING (LAS VEGAS, 21-26TH JUNE 2015).