



РФЯЦ
ВНИИЭФ
РОСАТОМ

Технология создания криогенной мишени непрямого облучения для лазерного термоядерного синтеза.

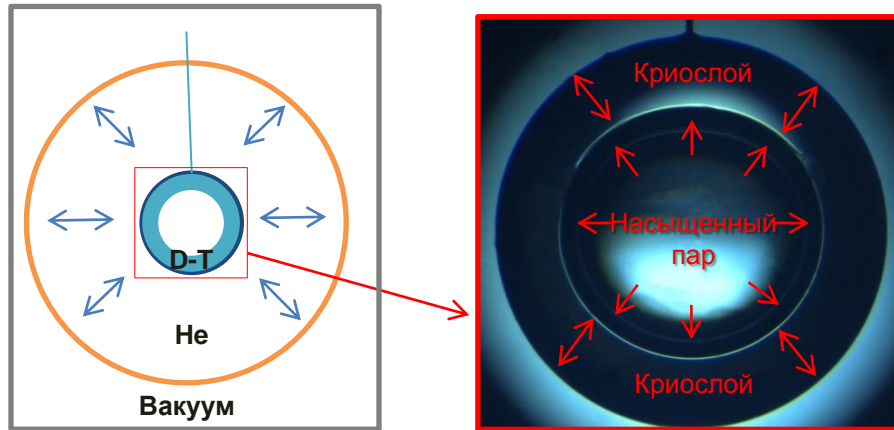
XVI Международная конференция «Забабахинские научные чтения-2023»

Авторы:

М.А. Рогожина
Е.Ю. Зарубина

Криогенная мишень непрямого облучения

Криогенная мишень - полая сферическая оболочка с замороженным на ее внутренней поверхности гладким и однородным по толщине слоем твердого водородного топлива, помещенная в центр бокса, который обеспечивает равномерное тепловое окружение оболочки на этапе формирования криослоя и конвертацию лазерного излучения в рентгеновское излучение на этапе проведения экспериментов по зажиганию.



Требуемые параметры криослоя:

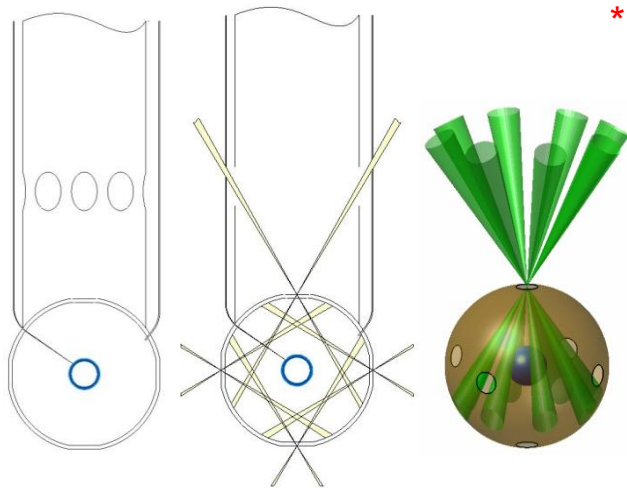
- Толщина слоя D-T льда: $65 \div 100 \mu\text{м}$ *
- Масса D-T в мишени: $0,2 \div 0,3 \text{ мг}$
- Отклонение от сферичности, концентричности: $< 1\%$ **
- Допустимая шероховатость внутренней поверхности D-T льда: $< 1\%$ ***

* D.N. Bittner, B.Kozioziemski, J.Pipes. 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.;

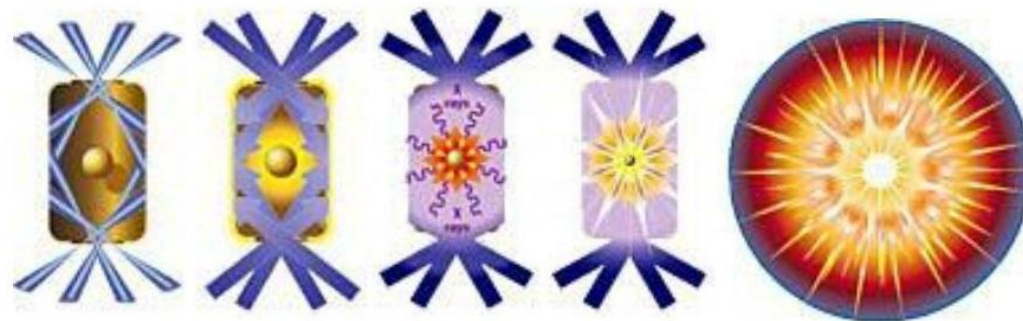
** Tianliang Yan, Kai Wang, Zhongming Zang, et al. Compact, snapshot and triple-wavelength system for ICF target ice-layer refractive index and thickness measurement. Optics and Laser Technology 134 (2021) 106595.

*** T. C. Sangster, R. Betti, R. S. Craxton, et.al. Cryogenic DT and D2 targets for inertial confinement fusion. PHYSICS OF PLASMAS 14, 058101, 2007.

Криогенная мишень непрямого облучения



Ввод лазерного излучения в сферический бокс-конвертор



Этапы зажигания термоядерной реакции в цилиндрическом боксе-конверторе «хольрауме»

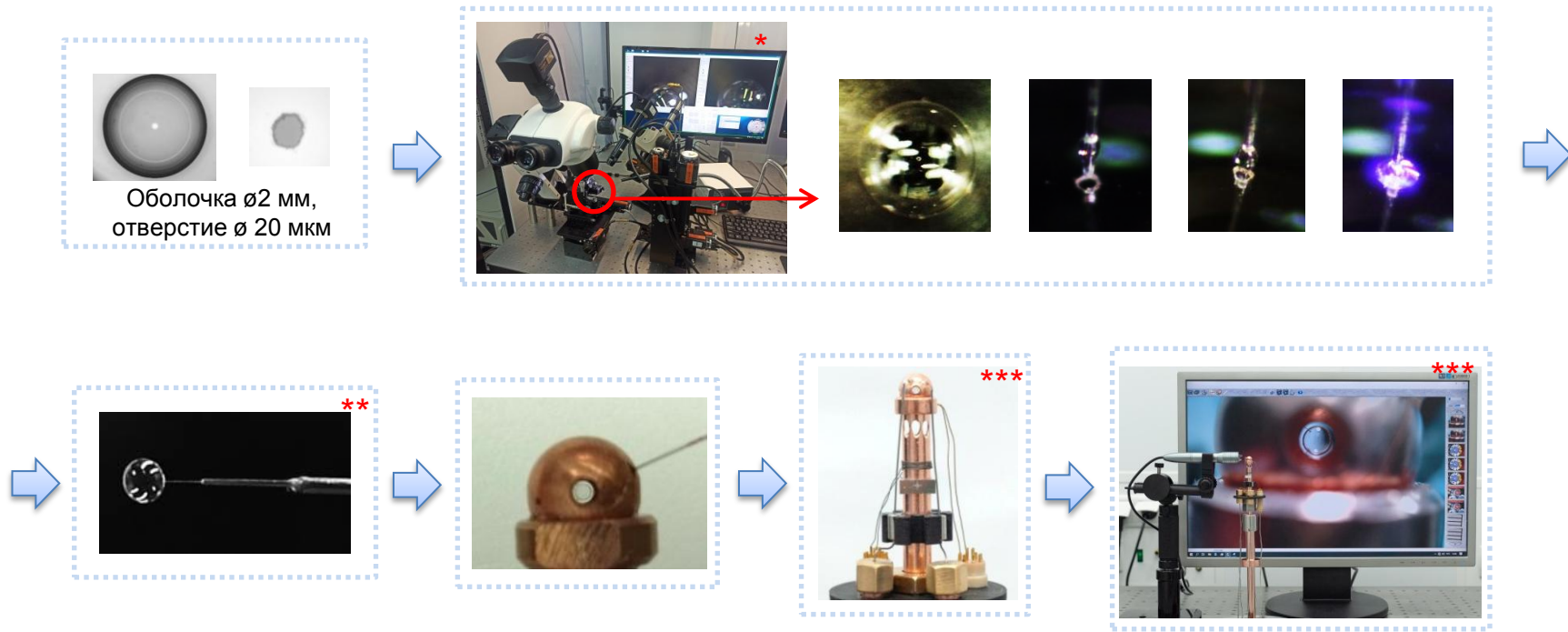
* В.М. Изгородин, Е.Ю. Соломатина и др. Криогенная мишень для ЛТС и проблемы её создания. Одиннадцатая Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям: Сборник докладов. -Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2018.

** M. Ragheb. Inertial confinement fusion. 2015

Этапы создания криогенной мишени

- *Разработка концепции криомишени.*
- *Разработка и производство составных элементов криомишени, их аттестация.*
- *Прецизионная сборка криомишени (расположение элементов относительно друг друга с микронной точностью), аттестация.*
- *Создание криослоя требуемого качества.*
- *Аттестация криослоя.*
- *Доставка криомишени на эксперимент без потери качества слоя.*

Прецизионная сборка элементов криогенной мишени

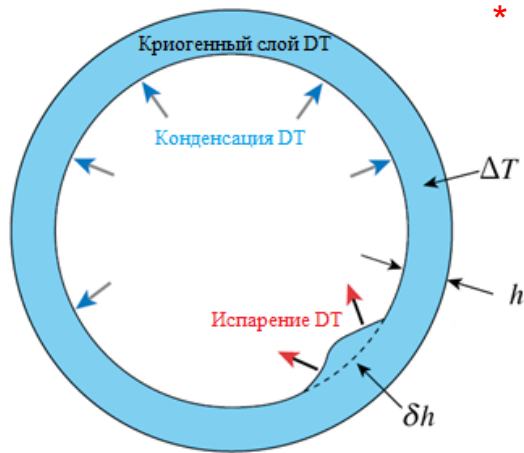


* Е.В.Жилинская, Е.В. Калашников, В.С. и др. Создание комплекса оборудования сборки мишени непрямого облучения для многоканальной лазерной установки. Применение лазерных технологий для решения задач по физике высоких плотностей энергии. Труды международной конференции «XX Харитоновские тематические научные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

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

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

Метод радиальных температурных градиентов для симметризации криослоя



Требования:

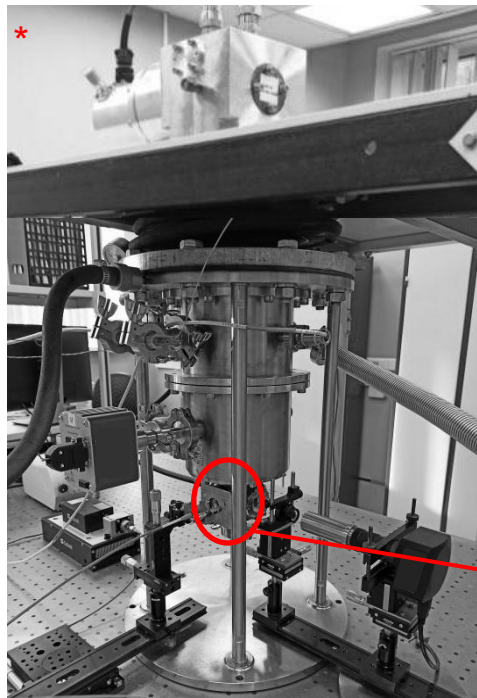
- Сферическая симметрия температурного окружения оболочки с водородным топливом;
- $T_{\text{форм}} < T_{\text{кр}}$;
- Объемный источник тепла в криослое^{**} (β -распад для DT-слоев или ИК-излучение);
- Теплоотвод на стенке оболочки.

- Из-за бóльшего выделения тепла в объеме толстой области 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.
- Процесс выравнивания толщины имеет экспоненциальный характер, поскольку по мере выравнивания слоя градиент температуры на его поверхности снижается.

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

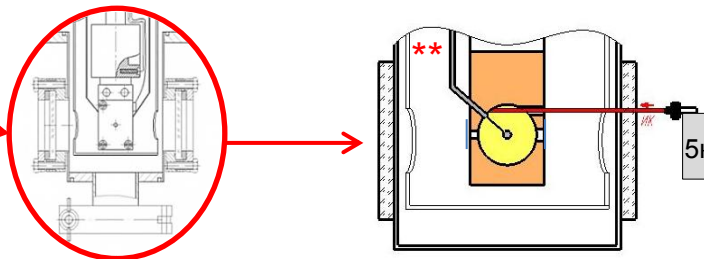
** A. J. Martin, R. J. Simms, and R. B. Jacobs, J. Vac. Sci. Technol. A 6, 1885 (1988).

Стенд для исследования мишеней при низких температурах



Состав станда:

- исследовательский криостат;
- мишенный узел
- система одновременной откачки газовых магистралей;
- система напуска гелия;
- система напуска изотопов водорода;
- оптическая система;
- система контроля температуры;
- ИК-лазер.



Необходимая температура для проведения эксперимента **10К ÷ 20К**

* 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.

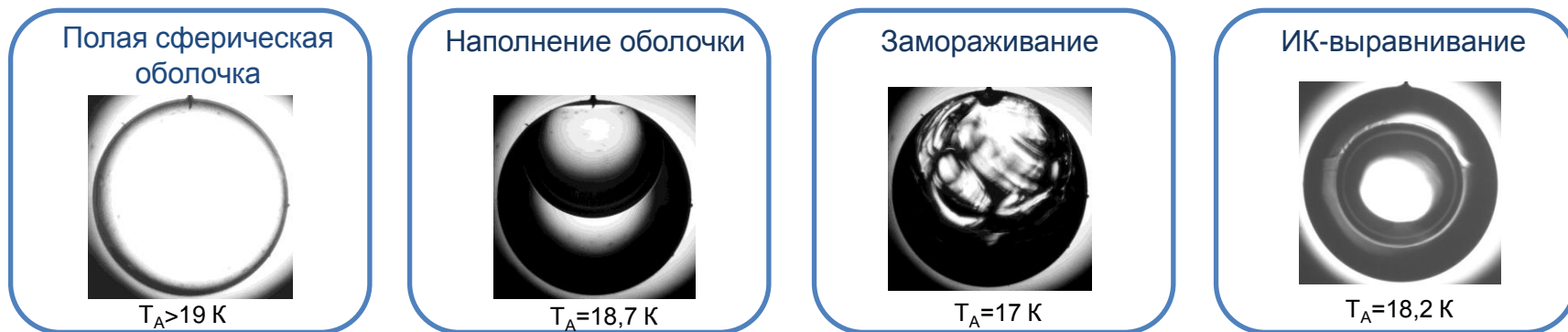
** Рогожина М.А., Чугров И.А., Зарубина Е.Ю., Батуков С.Ю. Патент №2778245 «Бокс для проведения экспериментов по инфракрасному нагреву криогенного слоя изотопов водорода в сферической оболочке».

Формирование криослоя дейтерия при ИК-нагреве

Этапы проведения эксперимента

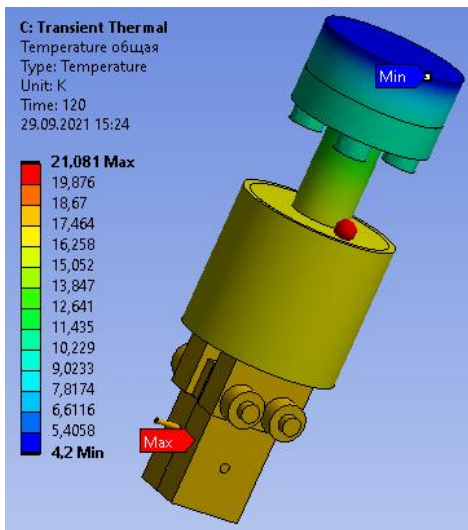


Формирование криогенного слоя

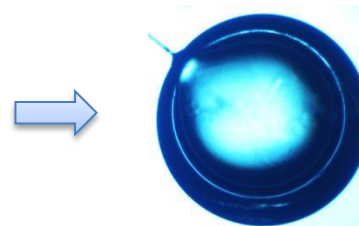
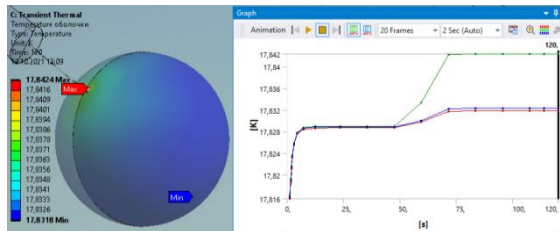


Влияние температурных градиентов на криослой

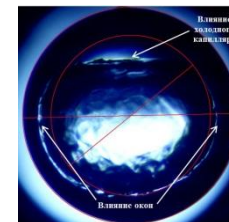
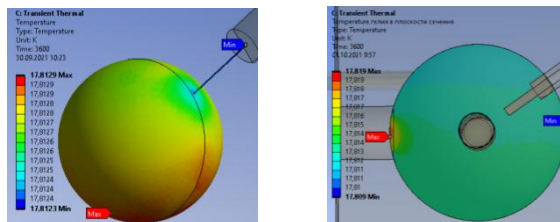
Нестационарный тепловой анализ конструкции, включение источника ИК-излучения



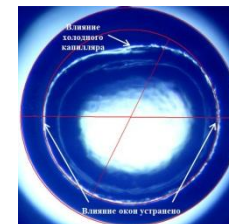
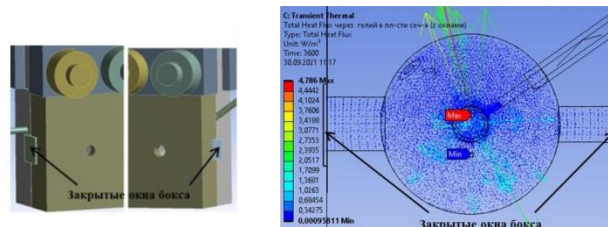
Стационарный тепловой анализ конструкции



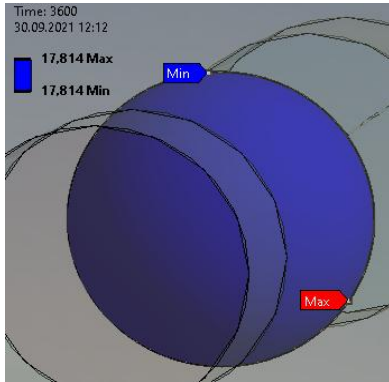
Нестационарный расчет для капилляра с золотым напылением



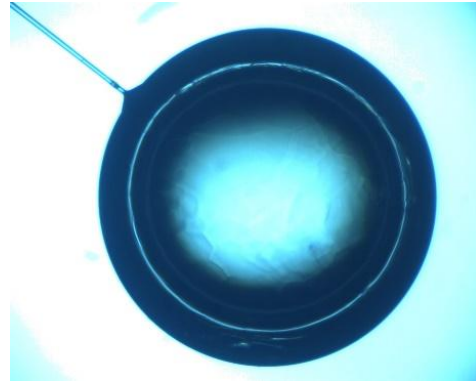
Нестационарный расчет с двумя закрытыми фольгой окнами бокса



Результаты экспериментов по формированию криослоя

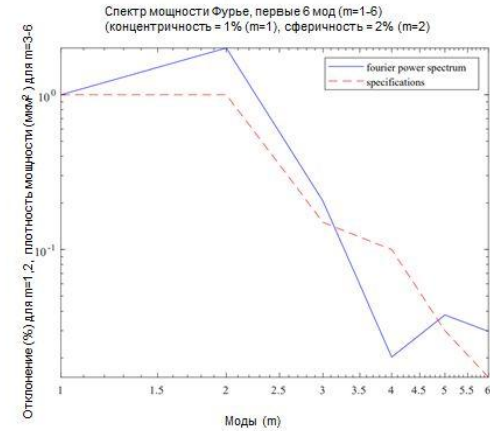


Результаты нестационарного расчета, в котором выполнены условия равномерного теплового окружения оболочки



Результаты эксперимента, в котором выполнены условия равномерного теплового окружения оболочки

Параметры оболочки:
Диаметр 1460 мкм
Толщина стенки 11 мкм



Результаты аттестации криослоя, полученного в эксперименте

Параметры криослоя*:
Средняя толщина 196 мкм
Концентричность 1%
Сферичность 2%

* 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.

Выводы по результатам экспериментов



Для получения криослоя изотопов водорода, удовлетворяющего качества, необходимо выполнить условия:

- 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.)

Проведение эксперимента по ИК-формированию слоя при выполненных предыдущих условиях составит более 15 часов.

Результаты

- ✓ Разработана концепция криомишени.
- ✓ Разработаны составные элементы криомишени и организовано их изготовление, проводится частичная аттестация готовых элементов.
- ✓ Разработана и налажена технология прецизионной сборки элементов криомишени, и аттестация сборочных узлов.
- ✓ Отрабатывается технология создания криослоя требуемого качества на нерадиоактивных изотопах водорода.
- ✓ Отрабатываются оптические и рентгеновские методы аттестации криослоя, разрабатывается программа диагностики слоя в криогенной мишени.

Спасибо за внимание

Рогожина Марина Анатольевна

Тел.: 8 (831) 302 27 81

E-mail: MARogozhina@vniief.ru

www.rosatom.ru