



РФЯЦ
ВНИИЭФ
РОСАТОМ

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ТВЕРДОГО СЛОЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В КРИОГЕННОЙ МИШЕНИ НЕПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ

XVI Международная конференция
«Забабахинские научные чтения – 2023»
22-26 мая 2023 г. Снежинск, Челябинская область, Россия

Авторы: Е.Ю. Зарубина
М.А. Рогожина

г. Саров, 2022 г.

Введение

Криогенная мишень – полая сферическая оболочка с замороженным на ее внутренней поверхности криогенным слоем изотопов водорода.

Применение – для проведения экспериментов по ЛТС.

Топливо в оболочке перераспределяется до тех пор, пока внутренняя поверхность криослоя не выстроится по **изотермической поверхности**, которая подвержена влиянию множества факторов и является неустойчивой



На всех этапах получения криомишени необходимо производить **непрерывный контроль параметров криослоя**

Неоднородности поверхностей криомишени приводят к росту гидродинамических **нестабильностей**, которые уменьшают **нейтронный выход** при сжатии мишени



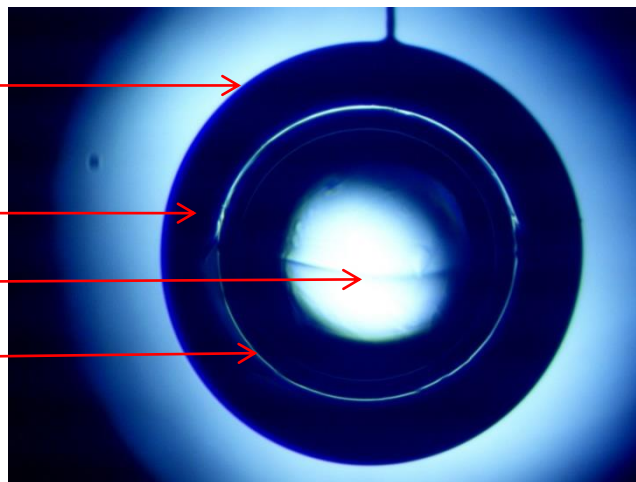
Основные требования зажигания криомишени:

Отклонение от концентричности, сферичности внутренней поверхности криослоя *

<1-2%

Шероховатость внутренней поверхности криослоя**

<1 мкм



Теневое изображение криогенной мишени

Полая сферическая оболочка
диаметром ~ 2 мм

Криогенный слой
изотопов водорода

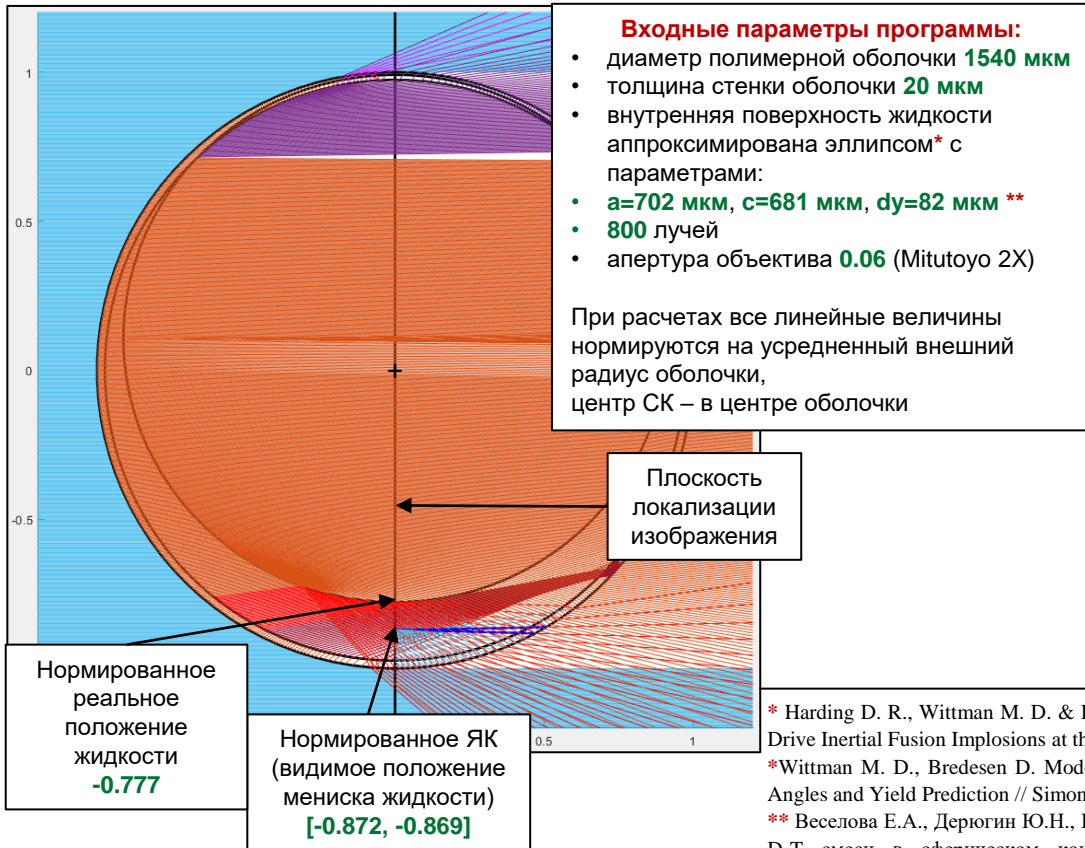
Насыщенный пар

Характеристическое
яркое кольцо (ЯК)

* Tianliang Yan. Compact, snapshot and triple-wavelength system for ICF target ice-layer refractive in-dex and thickness measurement // Optics and Laser Technology. – 2021. – Vol. 134. – P.6.

** Sangster T. C., Betti R., Craxton R. S., et.al. Cryogenic DT and D2 targets for inertial confinement fu-sion // PHYSICS OF PLASMAS. – 2007. – Vol.14. – P.1.

Двумерная модель трассировки лучей через криогенную мишень



Переменные параметры:

- неконцентричность и несферичность поверхностей мишени
- отклонение пучка от квазипараллельности и наклон пучка относительно оптической оси
- смещение плоскости локализации изображения относительно экватора мишени
- апертуру наблюдения
- показатели преломления слоев
- число лучей и др.



Исследование влияния вышеперечисленных факторов на формирование теневого изображения криомишени и вычисление параметров криогенного слоя

* Harding D. R., Wittman M. D. & Edgell D. H. Considerations and Requirements for Providing Cryogenic Targets for Direct-Drive Inertial Fusion Implosions at the National Ignition Facility // Fusion Science and Technology, 63:2, 95-105, 2013.

* Wittman M. D., Bredesen D. Modeling for Direct Drive Fusion Implosions: Cryogenic Target Filling at Arbitrary Viewing Angles and Yield Prediction // Simon Narang, Sutherland High School, Pittsford, New York, November 2019.

** Веселова Е.А., Дерюгин Ю.Н., Изгородин В.М. Соломатина Е.Ю. Методика расчета формирования криогенного слоя D-T смеси в сферическом контейнере // Супервычисления и математическое моделирование: Труды XVII международного семинара. Саров, 2019. С. 139-151.

Программа для теневого контроля количества напускаемых жидких изотопов водорода

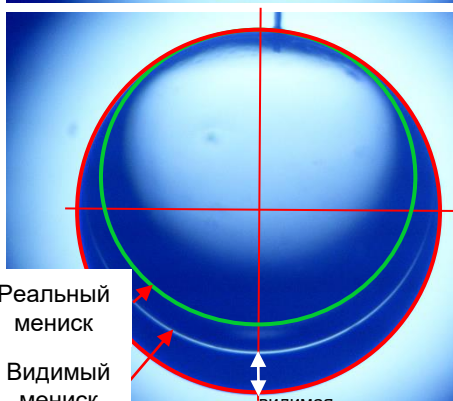
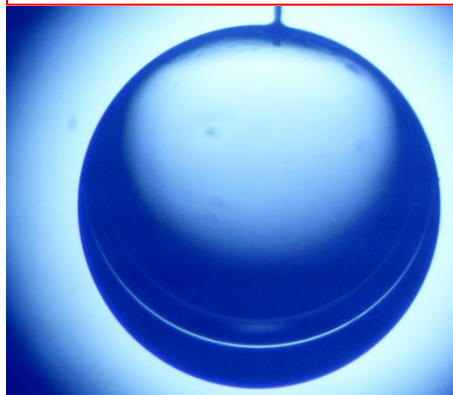
Решение обратной задачи отслеживания лучей от теневого изображения до ПВО от внутренней поверхности криосля

Зависимость положения яркого кольца от положения внутренней поверхности криосля

Программа вычисления требуемого уровня жидкости при наполнении оболочки **для получения твердого криосля заданной толщины**

Проверка с помощью программы трассировки лучей

Пример теневого изображения оболочки с жидким топливом



Реальный мениск
Видимый мениск

↑
видимая высота мениска

surf.m shadow_modeling_12.m meniscus.m

MATLAB App

VISIBLE LIQUID FUEL MENISCUS HEIGHT CALCULATION

Input data:

Shell diameter, mkm: 1540

Shell wall thickness, mkm: 20

Shell diameter, pixel: 770

Required cryolayer thickness, mkm: 44.7

Choose hydrogen isotopes: D2

Calculation

Output data:

Visible liquid fuel meniscus height, pixel: 50

Name	Value
a	0.7101
c	0.6924
delta	0.0938
dens_liq	0.1730
dens_sol	0.1970
dsh	1.5400
dshm	1540
dshpix	770
eqn	1x1 sym
eqn1	1x1 sym
eqn2	1x1 sym
hk	0.0998
hkpix	50
k1	0.9750
k2med	0.2770
m	0.0586
ncr	1.1360
nsh	1.5400
Rcrlig	0.5985
Rcrlig	0.7773
resolution	2
resolution_	0.0020
Rk	0.6702
Rk_	0.8704
Rshin	0.7500
tcr	0.0447
tcrm	44.7000
tsh	0.0200
tsh	0.0260

- Входные данные:**
- диаметр и толщина стенки оболочки (мкм)
 - диаметр оболочки (пиксели)
 - требуемая толщина криосля после выравнивания (мкм)
 - изотопы водорода

- Выходные данные:**
- видимая на теновом изображении высота мениска жидкого топлива (пиксели)

Вычисленные параметры поверхности жидкости
Трассировка:
[a=0.702 мм, c=0.681 мм, dy=0.082 мм]

Расчетное **реальное** положение мениска жидкого топлива
Трассировка:
[0.777]

Расчетное **видимое** положение мениска жидкости (ЯК)
Трассировка:
[0.872, 0.869]

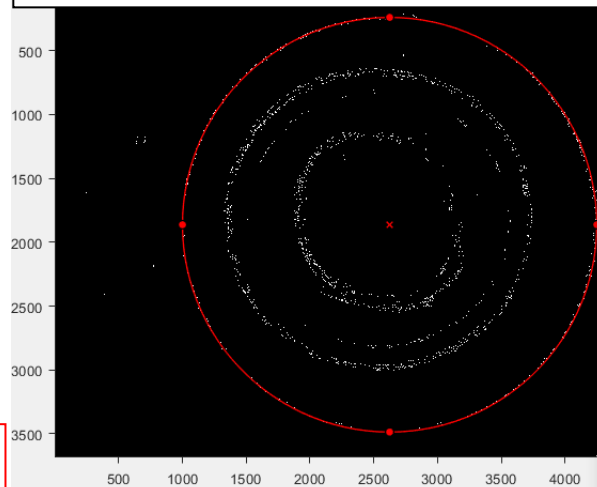
Программа для теневого контроля параметров твердого криослоя

**Теневое изображение
криогенной мишени**
(диаметр оболочки 1215 мкм,
толщина стенки 17 мкм)

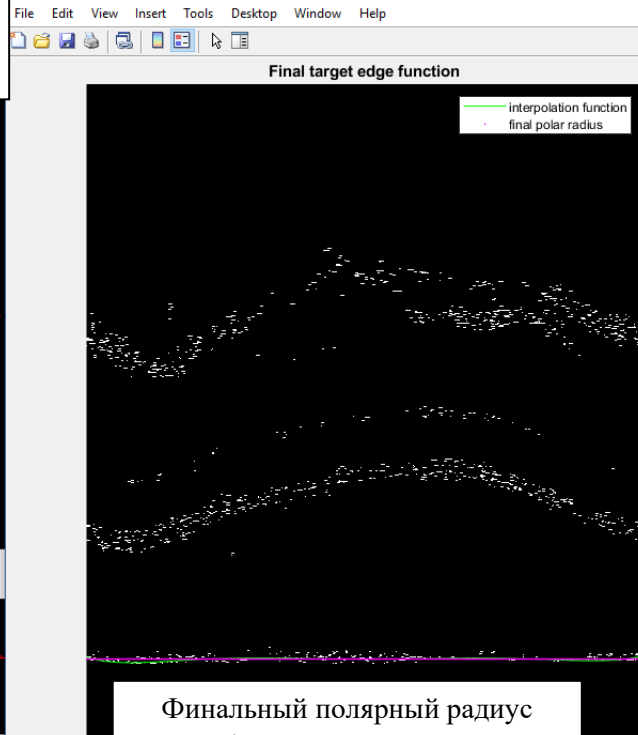


1. Выделение границ на изображении – метод Канни
2. Поиск внешней границы и центра оболочки на основе идентификации с несколькими сходящимися итерациями поиска центра.
3. Аппроксимация границы эллипсом.
4. Развертка изображения через центр.
5. Поиск внешней границы оболочки на развертке.

Найденные границы и центр внешней
поверхности оболочки



Найденные пиксели границы
оболочки на развертке

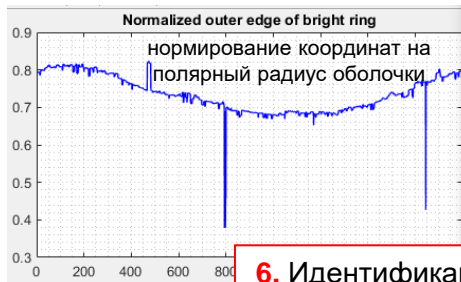


Финальный полярный радиус
оболочки на развертке

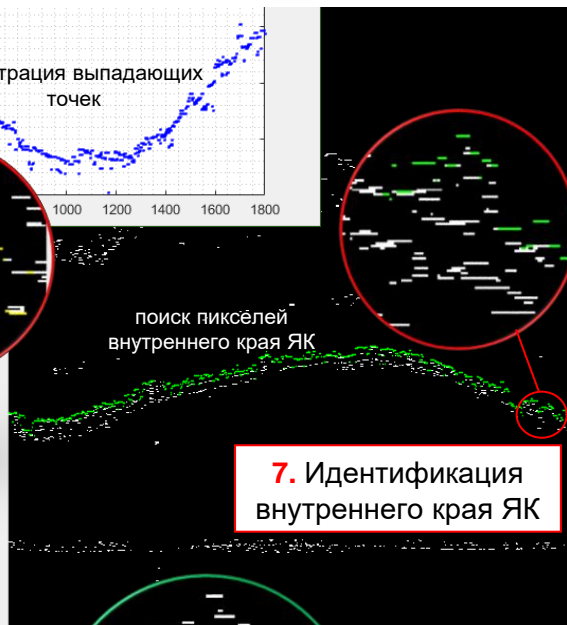
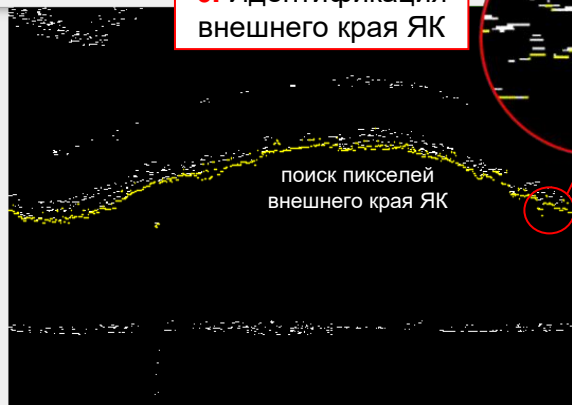
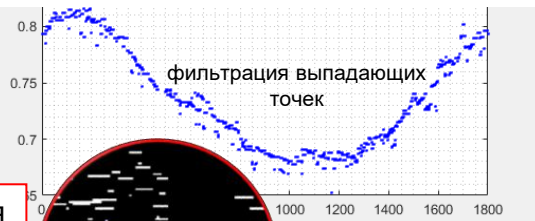
Программа для теневого контроля параметров твердого криослоя



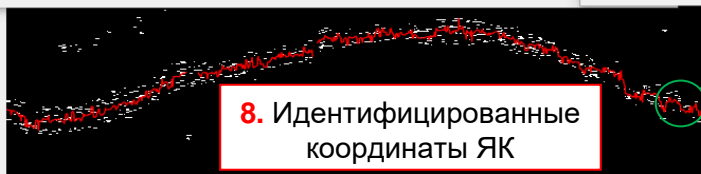
ximated bright ring



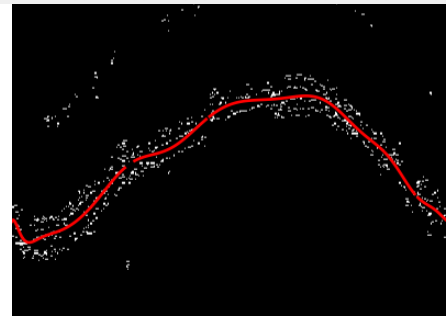
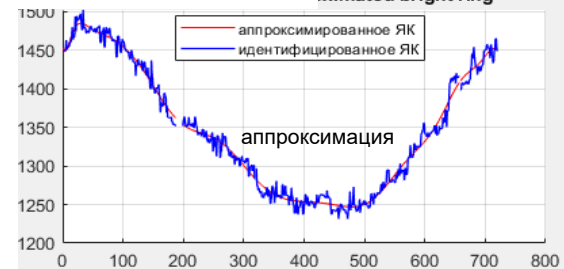
6. Идентификация внешнего края ЯК



7. Идентификация внутреннего края ЯК



8. Идентифицированные координаты ЯК



Финальный набор координат, описывающий ЯК

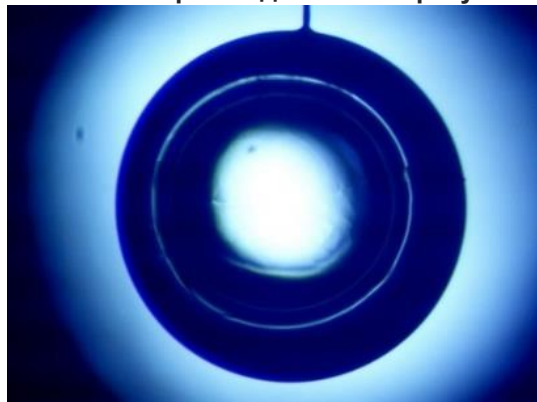
Программа для теневого контроля параметров твердого криослоя

Входные данные программы:

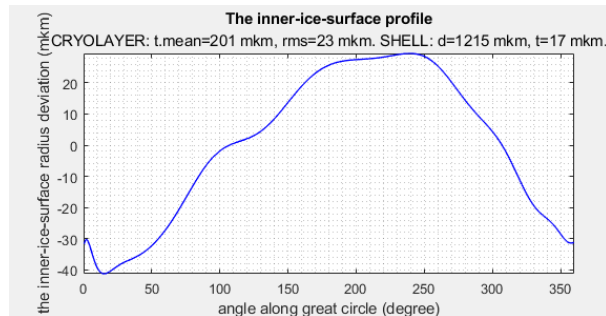
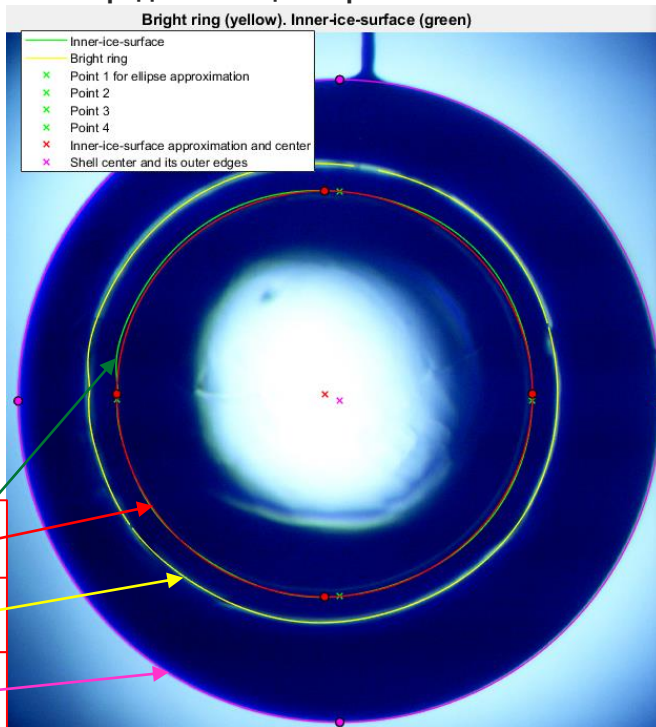
- диаметр и толщина стенки оболочки (мкм)
- необходимый угловой шаг (°)
- название изображения для обработки и название файла для записи результата

Выходные данные программы (запись в pdf-файл):

- идентифицированное ЯК
- профиль и спектр мощности Фурье, концентричность, сферичность, шероховатость внутренней поверхности криослоя в плоскости локализации изображения
- средняя толщина криослоя



диаметр оболочки 1215 мкм,
толщина стенки 17 мкм



Оболочка: диаметр 1215 мкм, толщина стенки 17 мкм.
Криослой: средняя толщина 201 мкм, rms 23 мкм.

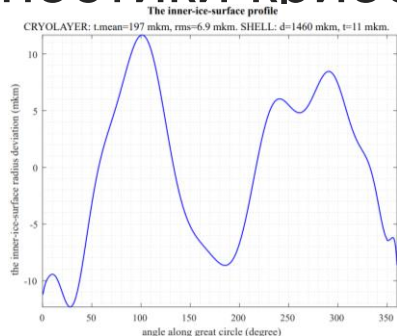
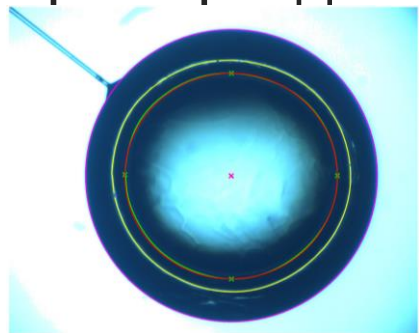
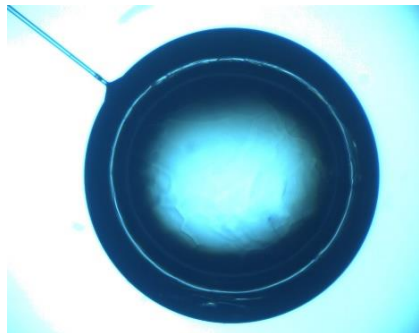
Внутренняя поверхность криослоя:
отклонение от концентричности (мода 1): 4 %,
отклонение от сферичности (мода 2): 2 %.

Вычисленная внутренняя поверхность криослоя,
ее аппроксимация эллипсом и центр

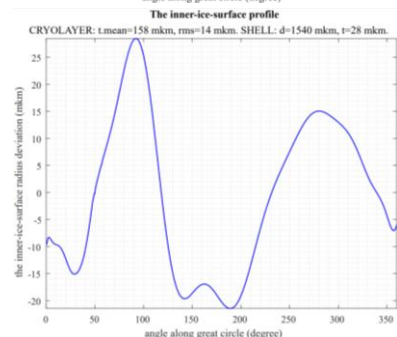
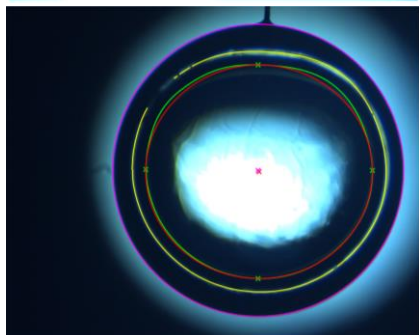
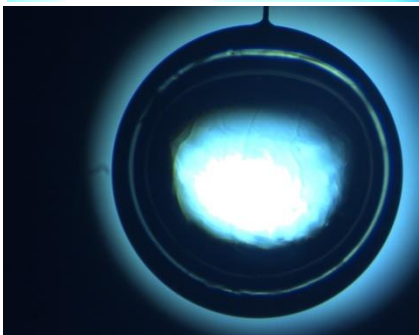
Идентифицированное
яркое кольцо

Идентифицированные
граница и центр оболочки

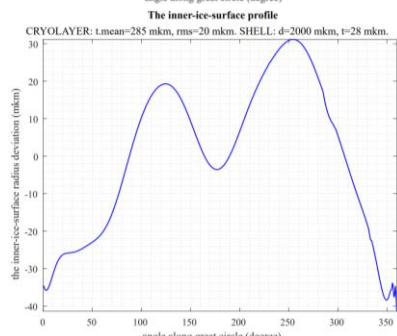
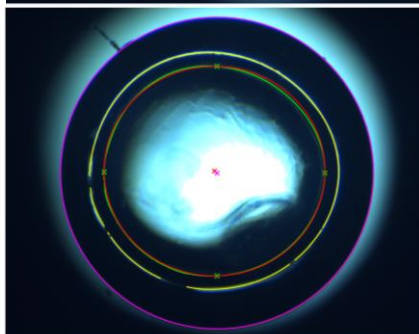
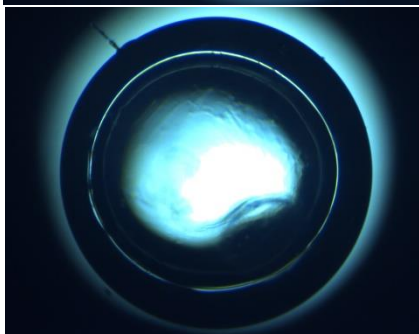
Примеры диагностики криослоя



Оболочка: диаметр 1460 мкм, толщина стенки 11 мкм.
Криослой: средняя толщина 197 мкм, rms 7 мкм.
Внутренняя поверхность криослоя:
отклонение от концентричности (мода 1): 0 %,
отклонение от сферичности (мода 2): 3 %.



Оболочка: диаметр 1540 мкм, толщина стенки 26 мкм.
Криослой: средняя толщина 158 мкм, rms 14 мкм.
Внутренняя поверхность криослоя:
отклонение от концентричности (мода 1): 1 %,
отклонение от сферичности (мода 2): 6 %.



Оболочка: диаметр 2000 мкм, толщина стенки 28 мкм.
Криослой: средняя толщина 285 мкм, rms 20 мкм.
Внутренняя поверхность криослоя:
отклонение от концентричности (мода 1): 1 %,
отклонение от сферичности (мода 2): 5 %.

Программа моделирования рентгеновского изображения криомишени

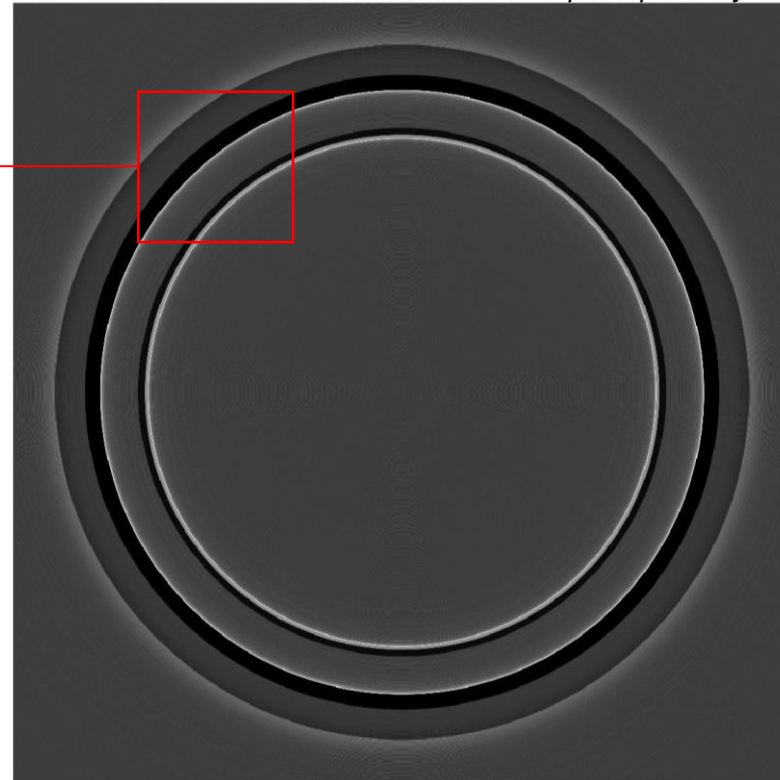
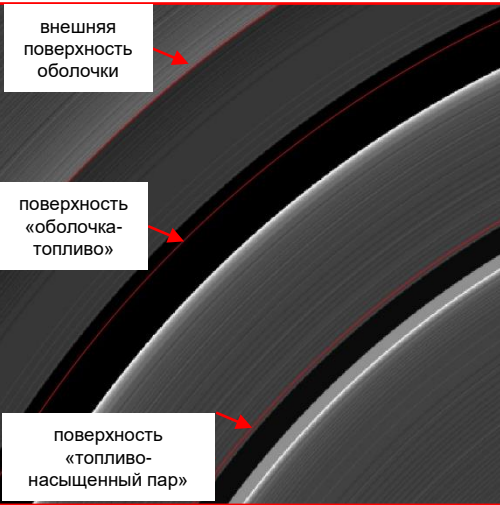
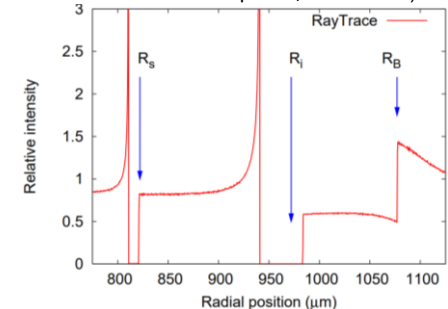
Метод трассировки лучей

Смоделированное в программе рентгеновское изображение криомишени с параметрами:

- диаметр бериллиевой оболочки 1077 мкм,
- толщина стенки оболочки 105 мкм,
- толщина криослоя DT-топлива 150 мкм,
- расстояние от криомишени до детектора 490 мм

(параметры взяты из статьи * для проверки теоретической модели)

Расчетный профиль интенсивности из статьи *
(R_s - граница «топливо-насыщенный пар»,
 R_i - граница «оболочка-топливо»,
 R_b - внешняя граница оболочки)



Входные данные программы:

- диаметр и толщина стенки оболочки (мкм)
- толщина криослоя (мкм)
- материалы оболочки и топлива
- расстояние от криомишени до детектора

Выходные данные программы:

- рентгеновское изображение криомишени с обозначенными реальными границами

Обзор мировых исследований границ применимости методов

Описанный оптический **теневого метод** может быть применен с приемлемой точностью только для усредненного положения двух ярких колец, полученных для одной плоскости наблюдения, при угле 180° между оптическими осями. Положение льда коррелирует с положением яркого кольца **только для идеальной сферической симметрии**. При этом корректны **только самые низкие моды: до шестой**. *

Рентгеновский метод дает возможность наблюдать **только канавки возле края мишени**, и можно количественно характеризовать только площадь поперечного сечения канавки, если она пересекает сегмент возле края мишени. При этом пропускается много канавок. **

С помощью **трех рентгеновских осей** (как в эксперименте по зажиганию криомишени на NIF) может быть определено **не более одной канавки**, при этом для достоверного определения канавки должны быть минимум 200 мкм в средней плоскости, примерно 2000 мкм длиной, ориентированы под углом менее 45° к оси наблюдения. ***

Но все же рентгеновский метод обеспечивает более количественные измерения шероховатости, чем оптический.

Максимально полную диагностику параметров криослоя обеспечивает **комбинация трех методов**: ***

- **теневого метод** подходит для характеристики:
 - начального механизма образования кристалла и его ориентации (если это единичный кристалл),
 - формирования и развития границ кристаллов,
 - перемещения жидких изотопов водорода в процессе выравнивания;
- **рентгеновский метод** – для вычисления шероховатости низких и высоких мод;
- **интерферометрический метод** – для детального наблюдения локальных дефектов, изучения морфологии поверхности пар-лед.



Для оценки объема канавки используются глубина и ширина из рентгеновского изображения и длина из оптического изображения, это **вероятностный подход**.

* Three-Dimensional Characterization of Spherical Cryogenic Targets Using Ray-Trace Analysis of Multiple Shadowgraph Views // LLE Review, Volume 109. C. 4

** Koch J. A., Koziolowski B. J., Salmonson J., et al. Optical and X-ray Characterization of Groove Profiles in DT Ice Layers // Target Fabrication Conference, 2008.

*** Koziolowski B. J., Mapoles E. R., et al. Deuterium-Tritium Fuel Layer Formation for the National Ignition Facility // Fusion Science and Technology, 59:1, 14-25, 2011.

Выводы

- Проведено **двумерное моделирование прохождения пучка видимого излучения через криогенную мишень методом трассировки лучей**, где переменными параметрами являются неконцентричность и несферичность поверхностей мишени, расходимость и наклон пучка относительно оптической оси наблюдения, смещение плоскости локализации изображения относительно экватора мишени, апертура наблюдения, показатели преломления слоев, число лучей и т.д. Это необходимо **для исследования влияния вышеперечисленных факторов на формирование теневого изображения криомишени и, соответственно, на вычисление параметров криогенного слоя.**
- **Для получения твердого криогенного слоя требуемой толщины** разработана **программа вычисления видимой высоты мениска жидкого топлива** при наполнении оболочки в процессе проведения экспериментов.
- Разработана **программа для теневого контроля параметров твердого криослоя**, в которой при известном диаметре и толщине оболочки по теневому изображению автоматически вычисляются и записываются в файл следующие параметры криослоя: профиль, шероховатость, спектр мощности Фурье, отклонения от концентричности и сферичности внутренней поверхности криослоя, средней толщине криослоя.
- Проведено **двумерное моделирование прохождения квазипараллельного пучка рентгеновских лучей через сферически симметричную криогенную мишень**, где переменными параметрами являются внешний диаметр мишени, толщины и материалы слоев, расстояние от криомишени до детектора. Результатом работы программы является **смоделированное рентгеновское теневое изображение** и нанесенные на него реальные границы криомишени. На основе данной теоретической модели **будет написана программа обработки рентгеновского изображения криомишени** с автоматическим вычислением параметров криослоя.

**Спасибо
за внимание**