

препринт

И.В. АЛЕКСАНДРОВА, С.В. БАЗДЕНКОВ, А.А. БЕЛОЛИПЕЦКИЙ, А.И. ГРОМОВ, Е.Р. КОРЕШЕВА, Е. Л. КОШЕЛЕВ, А.И. КУПРИЯШИН, В.И. ЛИСТРАТОВ, А.И. НИКИТЕНКО, И.Е. ОСИПОВ, Т.П. ТИМАШЕВА, И.Д. ТИМОФЕЕВ, С.М. ТОЛОКОННИКОВ, Г.С. УСАЧЕВ

КРИОГЕННЫЕ МИШЕНИ ДЛЯ РЕАКТОРА ЧАСТЬ II ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ КРИОГЕННЫХ МИШЕНЕЙ

Москва 2013

Характеризация криогенных мишеней

И.В.Александрова, С.В.Базденков, А.А.Белолипецкий¹, А.И.Громов, Е.Р.Корешева, Е.Л.Кошелев, А.И.Куприяшин, В.И.Листратов², А.И.Никитенко, И.Е.Осипов, Т.П.Тимашева, И.Д.Тимофеев², С.М.Толоконников, Г.С.Усачев²

Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Москва ¹Вычислительный Центр им. А.А.Дородницына РАН, Москва ²ОАО Красная Звезда, Москва

Введение

К настоящему времени, более чем 60-ти государствах мира приняты программы развития альтернативной энергетики, или другими словами, программы по развитию возобновляемых или неограниченных энергетических ресурсов, которые развиваются вне зависимости от наличия в стране углеводородного сырья. Предполагается, что оптимизация структуры энергетики должна быть направлена на увеличение доли экологически чистых способов генерации энергии с неограниченными ресурсами, к которым относится и управляемый термоядерный синтез (УТС) [1-3]. Он включает два направления: магнитный термоядерный синтез (МТС) и инерциальный термоядерный синтез (ИТС). Приведем в качестве примера такие цифры. Тепловая электростанция мощностью 1 млн кВт потребляет ежегодно 2 млн. 10 тыс. т угля, такой же мощности атомная электростанция — 30 т урановой руды, а термоядерная — всего 0,6 т термоядерного топлива. Поэтому управляемая термоядерная реакция является поистине неисчерпаемым источником энергии для человечества.

Исследования, проводимые в мире в области УТС, реализуются в рамках национальных и международных проектов (см. также Диаграммы 1 и 2):

– В рамках проекта *ITER* (International Thermonuclear Experimental Reactor) осуществляется международная программа построения демонстрационного термоядерного реактора, основанного на схеме MTC [4]

- В рамках программ *HiPER* (Евросоюз, [5]), *LIFE* (США, [6]) и *FIREX* (Япония, [7]) ведутся разработки, направленные на создание и запуск пилотной электростанции, действующей на основе ИТС. Реализация этих программ планируется к 2040 г.

– Россия: в 2012 году ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ (Российский федеральный ядерный центр - ВНИИ экспериментальной физики, г. Саров Нижегородской обл.) начал работы по созданию новой мощной лазерной установки мегаджоульного уровня энергии УФЛ-2М (2.8 МДж на длине волны 0.527 мкм) [8]. На первом этапе создания установки принимают участие 19 научных и промышленных организаций России. По мере развертывания работ кооперация будет расширяться. Самая мощная в мире лазерная установка должна будет заработать в России уже к 2020 году.

В своем интервью радиостанции «Голос России» от 12 февраля 2013 г., директор Института Лазерно-Физических Исследований РФЯЦ-ВНИИЭФ, член-корреспондент РАН Сергей Гаранин отметил, что создание УФЛ-2М является важным этапом

нный этап в развитии итс.	Перспективы в создании драйверов для ИТЭС: №1. <u>ЛАЗЕРЫ:</u> твердотельные лазеры (установки NIF, ОМЕGА) и газовые KrF лазеры (ВМЛ США)	№2. ИОННЫЕ ПУЧКИ: работает консорциум под руководством Лоуренсовской Берклеевской Национальной Лаборатории №3. ИМПУЛЬСНЫЕ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ: исследуются на Z- пинч установке в Национальной Лаборатории Сандиа	кт построения самого мощного в мире лазера 1 в РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров)	азмы и УТС, Звенигород, Гаранин, Ю.В. Шагалкин) роекта 45 млрд. рублей, сльность проекта: 2012–2020 гг. (, 192 лазерных пучка, энергия на мишени 2.8 МДж, 27 мкм), частота облучения – 1 раз в смену. Пасти новых источников энергии, изучение состояний вещества, новых видов ядерного оружия. <i>сти позволят сохранять России лидирующие позиции на пе</i> - утметил научный руководитель РФЯЦ-ВНИИЭФ, академик РАН 1я 2013 г.)
Диаграмма 1. СОВРЕМЕ	2012 г. Из отчета Комиссии США по разработ- ке энергетических станций ИТС	Мишенная камера	В России в 2012 г. стартовал прое (установка УФЛ-2№	 2013 Г. Доклад на XL конференции по Физике Пл 11-15 февраля, 2013 (С.А. Бельков и С.Г Длиг 11-15 февраля, 2013 (С.А. Бельков и С.Г Длиг • Общие характеристики проекта: стоимость п длиг Дараметры установки УФЛ–2М: зал 360х30 м (λ=0.5 °) • Программа новых исследований: работа в об эксперименты для моделирования и проектирования "Исследования в этой обла редовом крае мировой фундаментальной науки"- (Радий Илькаев (газета Военное Обозрение, 15 февра.

для исследований в области новых источников энергии, изучения состояний вещества, экспериментов для моделирования и проектирования новых видов ядерного оружия.

Научный руководитель ядерного центра РФЯЦ-ВНИИЭФ, академик РАН Радий Илькаев, в интервью газете *Военное Обозрение* от 15 февраля 2013 г., подчеркнул также, что исследования в области ИТС позволят сохранять России лидирующие позиции на передовом крае мировой фундаментальной науки. Кроме того, он отметил, что важно сохранять и развивать для страны уникальную специализацию Сарова как центра оборонных и гражданских высоких технологий на уровне требований 21 века.

В рамках указанных проектов быстрыми темпами развиваются многоуровневые подпрограммы, касающиеся разработки эффективных методов формирования криогенных мишеней (вымораживание твердого топливного слоя из изотопов водорода на стенке полой полимерной оболочки), а также создания импульсных лазерных установок мегаджоульного уровня энергии. При проведении экспериментов по сжатию мишеней лазерным излучением реализуются давления (P > 100 ГПа или >10⁶атм), плотности ($\rho \sim 10^2 \cdot 10^3$ г/см³) и температуры (T $\sim 10^7 \cdot 10^8$ K), при которых протекают термоядерные реакции синтеза. Возможность изучения поведения вещества в столь экстремальных условиях не только создает предпосылки для получения фундаментальных знаний об устройстве Вселенной, но и способствует развитию новых технологий и новых источников энергии.

На сегодняшний день, ИТС с лазерным драйвером превратился в самостоятельную область исследований, направленных на создание экологически чистой энергетической станции или реактора ИТС.

Значительным экономическим аспектом реактора ИТС является также его применение в качестве перспективного источника свободных нейтронов (диапазон интенсивностей 10^{15} – 10^{20} н/сек) [9]. При этом реактор ИТС, как источник нейтронов, является инструментом исследования в таких областях и направлениях как фундаментальные исследования, энергетика, нано- и биотехнологии, медицина, геология, проблемы безопасности и ряд других проблем.

Нельзя также забывать, что исследования, проводимые в области ИТС, имеют и общенаучное значение, поскольку сферическая топливная таблетка (мишень), облучаемая лазером, представляет собой уникальный физический объект, позволяющий в лабораторных условиях изучать свойства вещества, находящегося в экстремальных состояниях. Например, эксперименты по ИТС открывают широкие перспективы по исследованию такого экзотического состояния вещества, как сверхплотная высокотемпературная плазма ($10^{24} \div 10^{25}$ см⁻³), возникло новое направление в науке, изучающее процессы, происходящие при рождении сверхновых звезд – лабораторная астрофизика, появилась уникальная возможность – проводить исследования в области кварковой гравитации и взаимодействия между γ -квантами. Лазерная термоядерная мишень является также мощным источником нейтронов, нейтрино и рентгеновского излучения, позволяя решать не только фундаментальные ядерно-физические проблемы, но и ряд важных задач прикладного характера.

Фабрика мишеней для непрерывного производства и частотной доставки топливных криогенных мишеней в центр реакторной камеры – один из 4-х основных блоков энергетической станции (реактора), работающей по схеме ИТС. Для эффективной работы энергетической станции на базе нескольких реакторов [2] необходимо, чтобы фабрика мишеней осуществляла поставку топливных мишеней "конвейерным способом" (Рис.1). Это означает, что реализация проекта с числом реакторов N ≥ 5, требует разработки фабрики мишеней, способной эффективно работать с N количеством реакторов по следующей схеме: один драйвер – одна фабрика мишеней – N реакторных камер. Отметим, что "конвейерный способ" производства требуемого количества топливных мишеней (~ 500000 в день) может быть основан только на работе со свободными (т.е. незакрепленными или бесподвесными) мишенями.



Рис. 1. Конвейерная схема работы фабрики мишеней

Таким образом, основной вопрос при построении фабрики мишеней – это разработка эффективного, надежного и дешевого метода формирования незакрепленных криогенных мишеней. Такой подход был впервые предложен и экспериментально продемонстрирован в Физическом институте им. П.Н Лебедева Российской академии наук (ФИАН) [10]. Это, так называемый, метод "FST" (аббревиатура от "free-standing target", или "незакрепленная мишень"), основанный на формировании топливного слоя в движущейся незакрепленной оболочке. Внимательный анализ данной проблемы (проекты МАГАТЭ №11536 и №13871, проект РФФИ 06-08-01575-а) показал, что метод FST не имеет аналогов в мире и может служить основой для разработки технологии массового производства реакторных мишеней (диаметр 2-4 мм, толщина топливного слоя 200-300 мкм, частота подачи в камеру 5-10 Гц). В период 2009-2011 гг. коллектив специалистов ФИАН провел эскизное проектирование мишенной системы для частотного обеспечения топливом (мишени диаметром > 2 мм) экспериментов на установке ИТС нового поколения, которая строится в рамках Европейской программы. Это установка НіРЕR (**High Power laser Energy Research**, $E_l \sim 200$ kJ, $v \ge 1$ Hz) – прототип энергетической станции на основе ИТС.

Следует подчеркнуть и еще одно важное обстоятельство. Достоверность результатов, получаемых в экспериментах по ИТС, основывается на точном и надежном знании характеристик таких трёхмерных микрообъектов как криогенная мишень и лазерная термоядерная плазма, образующаяся в процессе сжатия мишени лазерным излучением. Именно поэтому при изучении вопросов формирования топливного слоя и доставки криогенных мишеней в реакторную камеру, на уровне современных требований, особое внимание уделяется разработке эффективных методов диагностики (характеризации) параметров указанных выше микрообъектов.

В настоящей работе "*Характеризация криогенных мишеней*" мы детально остановимся на вопросе обеспечения средств контроля и получения точной информации о параметрах именно криогенной мишени.

Характеризация параметров криогенной мишени является неотъемлемой стадией при ее производстве и доставке в реакторную камеру, и в рамках программы по ИТС относится к фундаментальному направлению исследований, которое включает следующие разделы:

– Диагностика криогенных мишеней для различного уровня энергии драйвера и сложности конструкции оболочки

Разработка различного класса алгоритмов реконструкции

- Создание уникального диагностического оборудования

На современном этапе пристальное внимание уделяется развитию методам быстрой характеризации мишени, которая включает минимизацию по времени всех стадий процесса диагностики, а также созданию пороговых алгоритмов (пороговая характеризация). Это обусловлено тем, что для работы энергетической станции на основе ИТС требуется, чтобы топливные мишени инжектировались в камеру реактора с частотой в диапазоне 5-10 Гц. На этой стадии система диагностики должна обеспечивать быструю отбраковку некачественных криогенных мишеней (без их детальной реконструкции), а также отслеживать скорость и траекторию движения мишени, летящей внутри камеры. Эти данные необходимы для того, чтобы обеспечить синхронизацию прихода в центр камеры мишени и импульса лазерного излучения.

Таким образом, создание алгоритмов реконструкции с различной информационной структурой, разработка сценария характеризации и построение соответствующей системы характеризации – есть важнейшие направления исследований в современной программе ИТС, нацеленной на создание энергетической станции промышленного масштаба.

Именно поэтому в своих исследованиях в области характеризации криогенных мишеней мы опирались на разработку и создание алгоритмов реконструкции с различной информационной структурой:

1. *Трехмерная (3D) реконструкция мишени:* создание надежной и высокоточной системы характеризации для применения на стадии разработки технологии формирования криогенных мишеней.

Отметим, что общепринятые методы диагностики параметров криогенной мишени (интерферометрия, голография, шлирен метод и др.) не могут обеспечить получения надежной информации о ее структуре. Причины этого следующие. Криогенная мишень представляет собой систему вложенных шаровых слоев, простейший вариант которой – полимерная оболочка и криогенный слой топлива. Под диагностикой (характеризацией) криогенной мишени понимается определение с высокой степенью точности таких ее параметров как: отклонение от сферичности и концентричности оболочки и слоя, однородность по массе оболочки и слоя, локальные неоднородности на поверхности оболочки и слоя. Очевидно, что перечисленные параметры мишени с точки зрения их измерения представляют собой локальные характеристики, т. е. зависят от координат радиус-вектора **r** в декартовой системе координат, начало отсчета, которой совпадает с центром мишени (Рис.2).



Рис.2. Параметры криогенного топливного слоя в зависимости от радиусвектора. 1- криогенный слой, 2 - оболочка

Поэтому средства их контроля должны обеспечить пространственную реконструкцию мишени на уровне предъявляемых к ней требований. Так, например, в случае криогенного слоя однородность по массе, сферичность и концентричность должны быть лучше 1%, а локальные неоднородности на поверхности конденсированного топлива не должны превышать 1 мкм. Если криогенный слой как целое (т.е. для любых значений r) удовлетворяет перечисленным выше условиям, то в этом, и только в этом случае мы можем говорить, слой что такой имеет определенную толщину, плотность требуемое И качество поверхности. Общепринятые методы позволяют оценить лишь средние (интегральные) значения величин, так как они работают в одной или нескольких

проекциях. Переход же к локальным характеристикам требует развития нового направления в области характеризации мишени, основанного на томографических методах обработки информации [11, 12].

Последовательность работы при диагностике объекта на томографе следующая:

 Зондирующее излучение, или сигнал (источник излучения выбирается в зависимости от природы объекта, например: лазерное излучение, рентгеновский или электронный пучки, оптическое излучение и др.), направляется на микрообъект согласно специально выбранной схеме сканирования.

 Измеряются два значения сигнала: первое – до взаимодействия с объектом, и второе – после прохождения сигнала через исследуемый объект по каждому из направлений в плоскости сканирования (интегральные характеристики, или проекции).

3) Формируется исходная база данных, представляющая собой определенный набор интегральных характеристик.

 Интегральные характеристики обрабатываются с помощью специального алгоритма, позволяющего получить набор локальных характеристик объекта, что и является конечной целью решения задачи характеризации криогенной мишени.

Алгоритм – это важнейшее звено в схеме томографии, так как если нет высокоразрешающего алгоритма для обработки множества интегральных характеристик, полученных в результате сканирования объекта, то никакие улучшения и усовершенствования параметров источника излучения, спецпроцессоров, а также регистрирующей аппаратуры не обеспечат получения локальных характеристик с нужной точностью и разрешающей способностью. Под схемой сканирования в томографии понимается алгоритмически и экспериментально реализуемая геометрическая схема получения интегральных характеристик микрообъекта. Выбор схемы сканирования является первым шагом при разработке любого алгоритма, так как входными данными для него являются значения интегральных характеристик. Следовательно, параметры схемы сканирования входят, как составная часть, во множество параметров алгоритма и, безусловно, влияют на его точность и разрешающую способность. Однако окончатель-

ные параметры алгоритма определяются математическими конструкциями, положенными в основу его создания.

2. Пороговая характеризация: разработка системы быстрой характеризации мишени, позволяющей обеспечивать контроль качества мишеней при их инжекции в камеру реактора с частотой в диапазоне 5-10 Гц.

Проведенные предварительные исследования показали актуальность данного направления. Действительно, необходимое обеспечение высокой симметрии при облучении криогенной мишени, вообще говоря, снимает задачу об определении направления нарушения симметрии мишени, а лишь требует установить, что возникшее возмущение превосходит некоторый порог. Именно поэтому крайне перспективными являются направления, связанные не только с построением алгоритмов для 3D реконструкции мишени, но и вопросы построения нового класса алгоритмов, так называемых пороговых [13-15], предназначенных для быстрой диагностики параметров криогенной мишени.

Исследования также показали, что некоторые методы когерентной оптики, например, основанные на использовании Фурье-голографии, могут обеспечить решение проблемы сверхбыстрой характеризации мишени [16]. Разработанный алгоритм *Holography* применим как для неподвижных мишеней, так и движущихся. В последнем случае особую значимость приобретает то обстоятельство, что предлагаемый подход работает в реальном времени, т.е. характеризация криомишени может осуществляться в процессе ее доставки.

Программа по созданию системы характеризации криогенных мишеней, предложенная и осуществляемая в ФИАН, направлена на разработку целого спектра направлений для создания технологий высокоточного контроля качества оболочки и слоя.

В рамках этой программы получены следующие результаты:

1. Paspaбomaн прямой алгоритм и соответствующее программное обеспечение (3D Ray Tracing, Shell Optic Model) для моделирования теневого изображения микросфер и криогенных мишеней. Сравнение численно сгенерированных теневых изображений с изображениями реальных оболочек подтвердили адекватность созданной модели. Отметим, что прямой алгоритм является основой для создания различных алгоритмов реконструкции параметров мишени по ее теневому изображению.

2. *Разработан обратный BBP алгоритм* (Bright Band Position) для пространственной реконструкции внутренней структуры сферических оболочек и криогенных мишеней по положению яркого кольца на теневых проекциях этих микрообъектов. Результаты численных экспериментов по тестированию созданного алгоритма показали, что среднее отклонение результатов реконструкции от параметров тестовой мишени не превышает 1 %.

3. Построен диагностический комплекс для томографии сферических оболочек и криогенных мишеней, включающий систему сканирования и систему оптической регистрации изображения, томографическую тестовую камеру, а также специально разработанное программное обеспечение *Target Studio*, действующее на основе *BBP* алгоритма для трехмерной реконструкции микрообъектов по набору теневых проекций, полученных в видимом диапазоне излучения.

Проведена серия тестовых испытаний, которая показала, что данный комплекс обладает уникальными операционными параметрами, в том числе:

 Температура микрообъекта 	комнатная; криогенная (77÷4.2К)
- Длина волны зондирующего излучения	475±15 нм; 490±7 нм
 Полный угол сканирования микрообъекта 	360^{0}
- Точность позиционирования	$\pm (1,5\div 2,5)$ мин
 Текущее число проекций 	100
- Пространственное разрешение в 1-ой проекции	1÷1.5 мкм
- Диаметр исследуемого микрообъекта, макс.	1,5 мм
- Точность реконструкции	1÷1.5 мкм

Комплекс позволяет реконструировать параметры трехмерных микрообъектов, прозрачных в видимом диапазоне излучения. К ним относится и микрообъекты, изготовленные из материала с малым Z, например, топливный криогенный слой внутри мишени, диагностику которого невозможно осуществить методом общепринятой рентгеновской томографии.

4. Предложено и разработано несколько типов пороговых алгоритмов (Functional, Threshold, Holography) и соответствующее программное обеспечение для быстрой (пороговой) характеризации параметров криогенной мишени. Работа алгоритмов продемонстрирована в компьютерных экспериментах, а также в ряде модельных экспериментов. В частности, показано, что алгоритм Holography, созданный на основе Фурье-голографии обеспечивает возможность сверхбыстрой характеризации (за время порядка нескольких микросекунд) как индивидуальной мишени, так и массива мишеней, а также одновременной диагностики параметров качества, скорости и траектории летящей мишени.

Полученные результаты могут быть использованы, в первую очередь, в экспериментальных исследования по ИТС, при формировании и доставке криогенных топливных мишеней, а также при организации производственного процесса на будущих реакторах.

В настоящее время, результаты исследований, выполненных в рамках цикла "*Характеризация криогенных мишеней*", применяются в действующих исследовательских программах:

1. Созданный диагностический комплекс является неотъемлемой частью оригинальной установки, построенной в ФИАН для производства бесподвесных криогенных мишеней. Ближайшие планы работ связаны с использованием микро-томографа для однозначной характеризации оболочек и бесподвесных криогенных мишеней, что позволит сертифицировать исследования в области оптимизации технологии FST.

2. Программное обеспечение *Target Studio* (включает программы *3D Ray Tracing* и *Shell Optics Model*) используются в рамках программы FIREX в Институте Лазерной Техники Осакского Университета (Япония) для моделирования и характеризации элементов криогенных мишеней быстрого поджига [17].

В данной работе представлены результаты, полученные ФИАН в области развития прецизионных методов для характеризации криогенных мишеней. Наиболее важные из них опубликованы в работах [11-19], а также доложены на ряде конференций. По этим материалам, д.ф.-м.н. Е.Р.Корешевой (представитель ФИАН в координационных проектах МАГАТЭ в области создания энергетических станции ИТС [20,21]), был прочитан цикл лекций в Институте Лазерной Техники Университета г. Осака и на инженерном Факультете Университета г.Гифу (Япония) [22-27].

Литература

- 1. Е.П. Велихов, С.В. Путвинский. *Термоядерная энергетика*. *Статус и роль в долгосрочной перспективе*. Доклад от 22.10.1999, выполненный в рамках Energy Center of the World Federation of Scientists
- 2. Ядерный синтез с инерционным удержанием. Современное состояние и перспективы для энергетики. Сборник статей под ред. Б.Ю. Шаркова. М.: Физматлит, 2005
- 3. *An Assessment of the Prospects for Inertial Fusion Energy*. Report, Committee on the prospects for ICF energy systems, THE NATIONAL ACADEMIES PRESS, Washington D.C., 2013
- 4. The <u>ITER project</u>, home page, <u>http://www.iter.org/</u>
- 5. The HiPER project, home page, <u>http://www.hiper-laser.org/</u>
- 6. The Laser Inertial Fusion Energy (LIFE) project, home page, <u>https://life.llnl.gov/</u>
- 7. H.Azechi and FIREX project. *The FIREX program on the way to inertial fusion energy*. J. Phys.: Conf. series, **112** (1), 012002, 2008
- С.А.Бельков, С.Г.Гаранин, Ю.В.Шагалкин. Установка УФЛ-2М первые шаги по ее созданию. Доклад на XL Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, 11 – 15 февраля 2013 г.
- 9. Б.В.Кутеев, П.Р.Гончаров, В.Ю.Сергеев, В.И.Хрипунов. *Мощные нейтронные источники* на основе реакций ядерного синтеза. Физика Плазмы, **36** №4, 307-346, 2010
- 10. I.V. Aleksandrova, S.V. Bazdenkov, V.I. Chtcherbakov, et al. *An efficient method of fuel ice formation in moving free-standing ICF/IFE targets*. J. Appl. Phys. D: **37**, 1163, 2004
- 11. I.V.Aleksandrova, E.R.Koresheva, I.E.Osipov, et al. *Microtomography data processing meth*ods for cryogenic target characterization. Laser Part. Beams. **17** (4), 729-740, 1999
- I.V. Aleksandrova, A.A. Belolipetskiy, V.I. Golov, et al. Progress in the development of tomographic information processing methods for applications to ICF target characterization. Fusion Technology 38 (2), 190, 2000
- 13. I.V.Aleksandrova, S.V.Bazdenkov, V.I.Chtcherbakov. *Inverse algorithm for tomographic analysis of backlit shadowgraphy for application to ICF targets diagnostics*. Contribution to the XXVII European Conference on Laser Interaction with Matter (Moscow, Russia, October 7-11, 2002)
- 14. A.A. Belolipetskiy, I.V. Aleksandrova, E.A. Pisarnitskaya. *On the possibility of laser target characterization on the base of a threshold algorithm*. Contribution to the XXVII European Conference on Laser Interaction with Matter (Moscow, Russia, October 7-11, 2002)
- I.V. Aleksandrova, A.A. Belolipetskiy, E.A. Pisarnitskaya. *Target quality thresholding in ICF research*. A.A. Dorodnitsyn Computing Center of Russian Academy of Sciences, Applied Mathematics, 75 pp., Moscow (2003)E.R.Koresheva, A.I.Nikitenko, I.V.Aleksandrova et al. *Possible approaches to fast quality control of IFE targets*. Nuclear Fusion 46, 890-903, 2006
- F.Ito, K.Nagai, T.Norimatsu, A.Nikitenko, S.Tolokonnikov, E.Koresheva, T.Fujimura, H.Azechi, K.Mima. Low-density-plastic-foam capsule of resorcinol/formalin and (phloroglucinolcarboxylic acid)/formalin resin for fast ignition realization experiment (FIREX) in laser fusion research. Japanese J.Appl.Phys (JJAP). 45, N11 pp.L1-L4, 2006

- E. R. Koresheva, I. E. Osipov, I. V. Aleksandrova et al. Creation of a diagnostic complex for the characterization of cryogenic laser-fusion targets by the method of tomography with probing irradiation in the visible spectrum. J.Russian Laser Research 28, N2, 163-206, 2007
- 19. E.R.Koresheva. *FST technologies for IFE targets fabrication, characterization and delivery.* Institute for Laser Engineering, Annual Progress Report 2004 (Osaka University Press, 2005)
- Elements of power plant design for inertial fusion energy. Final report of a coordinated research project 2000-2004. International Atomic Energy Agency Press, IAEA-TECDOC-1460, June 2005, 174 p.
- Pathways to Energy from Inertial Fusion: An Integrated Approach. Report of a coordinated research project 2006–2010. International Atomic Energy Agency Press, IAEA-TECDOC-1704, 2013, 194 p.
- 22. E.R.Koresheva. *Status of the Lebedev Physical Institute in ICF and IFE programs*. Lecture N1, December 11, 2003, Institute of Lase Engineering (ILE), Osaka University, Japan
- 23. E.R.Koresheva. *3D Ray Tracing Code as a research instrument in the area of ICF/IFE target characterization*. Lecture N2, December 24, 2003, ILE, Osaka University, Japan
- 24. E.R.Koresheva. *IFE target fabrication and injection using the free-standing target (FST) technologies: possibilities and restrictions*. Lecture N3, January 20, 2004, ILE, Osaka University, Japan
- 25. E.R.Koresheva. A 100-projections micro-tomograph for microshells and cryogenic targets characterization. Lecture N4, January 20, 2004, ILE, Osaka University, Japan
- 26. E.R.Koresheva. *Other approaches to target characterization*. Lecture N5, February 25, 2004, ILE, Osaka University, Japan
- 27. E.R.Koresheva. Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences and its status in the area of inertial confinement fusion. Lecture at Gifu University, January 10, 2004

Содержание

12

Раздел I. Прецизионная характеризация криогенных мишеней методом томографии с зондирующим излучением в видимой области спектра 14					
Глава 1. Реконструкция параметров исследуемого микрообъекта по его теневым изображениям					
 § 1. Спектральные характеристики исследуемого микрообъекта					
§ 3. Обратный алгоритм для 3-х мерной реконструкции параметров микро- объекта по положению яркого кольца на его теневых изображениях (ВВР ал- горитм)					
§ 4. Расширение границ применимости ВВР алгоритма с помощью схемы обратного сканирования					
Глава 2. Анализ особенностей формирования реального теневого изображения мишеней					
§ 1. Основные ограничения на техническое решение элементной базы томо-					
графа 32 § 2. Требования к источнику зондирующего излучения 34 § 3. Система формирования изображения 36 § 4. Технические требования к томографу 41					
Глава 3. Оптимизация условий формирования проекционной базы дан- ных диагностического комплекса для томографии мишеней					
 § 1. Положение плоскости наблюдения: метод настройки на экваториальную плоскость оболочки с целью снижения систематической ошибки при наборе проекций					
Глава 4. Описание и технические характеристики основных элементов диагностического комплекса для томографии мишеней					
 § 1. Томограф Shell Tester: диагностика мишени, укрепленной на подвесе 52 <i>1.1. Система оптического наблюдения</i> <i>1.2. Устройство позиционирования</i> 					
 § 2. Томограф <i>FST Tester</i>: диагностика незакрепленной мишени					
2.2. Гестовая томографическая камера 2.3. Устройства динамического позиционирования микрообъекта 2.4. Мирообъектив 2.5. Приеминк изружения (ПЗС камера)					
2.6. Навесная телескопическая вставка					
§ 3. Криогенная система 67					
Заключение к разделу І 68					

Приложение к разделу І. Протокол исследования качества полимерных оболочек, изготовленных методом микрокапсулирования	Стр. 71
Раздел II. Методы быстрой характеризации параметров криогенной ми- шени в процессе ее транспортировки в камеру реактора	71
Глава 1. Фурье голография для быстрой характеризации мишеней	81
 § 1. Физика распознавания объекта по его изображению	81 84 85 86 92 93
Глава 2. Использование вэйвлет анализа при обработке изображений сферических оболочек и криогенных мишеней	97
 § 1. Введение	97 98 99 108 113 114
Глава 3. Другие подходы созданию систем пороговой характеризации	118
 § 1. Алгоритм FUNCTIONAL. <i>1.1. Алгоритм FUNCTIONAL для 3D реконструкции мишени</i> <i>1.2. Алгоритм FUNCTIONAL для пороговой характеризации мишени</i> § 2. Алгоритм THRESHOLD. § 3. О возможности комбинированного применения алгоритмов. 	123 123 135 144 149
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	152

Раздел І

Прецизионная характеризация криогенных мишеней методом томографии с зондирующим излучением в видимой области спектра

Как отмечалось во введении, параметры мишени, с точки зрения их измерения, представляют собой локальные характеристики, т. е. зависят от координат радиус - вектора **r** в декартовой системе координат, начало отсчета которой совпадает с центром мишени (см. Рис.2, Введение). Средства контроля должны обеспечить пространственную реконструкцию мишени с требуемой степенью точности. Например, в случае криогенного слоя однородность по массе, сферичность и концентричность должны быть лучше 1%, а локальные неоднородности на поверхности конденсированного топлива не должны превышать 1 мкм. Если криогенный слой как целое (т.е. для любых значений **r**) удовлетворяет перечисленным выше условиям, то в этом, и только в этом случае мы можем говорить, что такой слой имеет определенную толщину, плотность и требуемое качество поверхности.

Общепринятые методы диагностики позволяют оценить лишь средние (интегральные) значения величин, так как они работают в одной или нескольких проекциях [1-5]. Переход же к локальным характеристикам требует развития нового направления в области характеризации мишени, основанного на томографических методах обработки информации. Поэтому в ФИАН была принята и реализована программа построения томографа для прецизионной характеризации криогенных мишеней [6,7].

Одна из схем построения томографа показана на Рис.I.1. Важнейшими элементами томографа являются (а) система сканирования для получения необходимого количества проекций микрообъекта и (б) алгорим пространственной реконструкции структуры (параметров) микрообъекта на основании полученного набора проекций.



Рис.І.1. Одна из возможных схем построения томографа 1- источник зондирующего излучения, 2- падающее излучение, 3 – система сканирования, 4- прошедшее излучение, 5- приемник излучения, 6- компьютер с монитором, 7- комплекс программ, реализующий определенный алгоритм реконструкции объекта, 8- изображение объекта в одной из проекций, 9- реконструированный объект Целью настоящей работы являлось создание программной и элементной базы томографа для осуществления однозначной и высокоточной диагностики параметров микрообъектов лазерного термоядерного синтеза (ЛТС), таких как оболочки и криогенные мишени. Ниже представлены основные результаты, полученные авторами в рамках этой задачи.

Глава 1. Реконструкция параметров исследуемого микрообъекта по его теневым изображениям

§ 1. Спектральные характеристики исследуемого микрообъекта

Алгоритм для пространственной реконструкции микрообъекта одно из важнейших звеньев в схеме томографии. Его разработка ведется параллельно с поиском оптимальной схемы сканирования для заданного источника зондирования. В связи с этим отправной точкой исследования является выбор источника зондирующего излучения на основе анализа спектральных характеристик исследуемого микрообъекта.

Выбор источника фактически означает выбор механизма взаимодействия между излучением источника и материалом микрообъекта. При этом специфика построения диагностического комплекса требует выполнения очевидных, но часто взаимно исключающих условий:

1. Взаимодействие между излучением источника и материалом микрообъекта должно быть достаточным, чтобы обеспечить его надежную регистрацию.

2. В процессе диагностики эффект влияния зондирующего излучения на измеряемые параметры микрообъекта должен быть минимальным.

3. Для выбранного диапазона длин волн должна быть обеспечена реальная возможность построения системы регистрации изображения микрообъекта с требуемым пространственным разрешением.

Мы начнем рассмотрение с рентгеновской области спектра, так как классическая томография (теоретически и экспериментально, включая коммерческие томографы) развита именно для этого диапазона длин волн, и основана на эффекте поглощения рентгеновских лучей в исследуемом образце. Такой выбор не случаен. Его мотивация обусловлена прямолинейным распространением зондирующего Х-излучения в материале образца, что представляет определенные преимущества при анализе физических принципов и математических конструкций, составляющих основу при построении обратного алгоритма.

Прежде всего, отметим, что криогенная мишень в процессе характеризации должна находиться внутри тестовой камеры криостата в зоне гелиевых температур. Поскольку рентгеновское излучение обладает значительной проникающей способностью, то в случае криогенных мишеней необходимо изучить особенности спектральных свойств не только материалов, составляющих саму мишень, но и окружающего ее пространства, включая жидкий гелий, стенки и окна криостата.

Таблица I.1.1. Массовый коэффициент ослабления μ/ρ (с m^2/r), коэффициент ослабления μ (с m^{-1}) и толщина слоев половинного ослабления d (мкм) для различных материалов в зависимости от длины волны рентгеновского излучения λ (нм) [10-13].

Пара ра- метр	Твердый водород ρ = 0.089 г / см ³		Полистирол $\rho = 1.05 \ r \ / \ cm^3$		Стекло $\rho = 2.5 \ r / cm^3$		Медь ρ = 8.96 г/см ³						
V (kV)	1.0	3.0	6.0	10.0	1.0	2.0	12	1.0	2.0	12.0	1	10	20
λ	1.23	0.41	0.20	0.12	1.23	0.62	0.10	1.23	0.62	0.10	1.23	0.12	0.06
μρ	7.3	5.6 x10 ⁻¹	4.0 x10 ⁻¹	3.8 x10 ⁻¹	2.8 x10 ³	3.9 x10 ²	5.9	1.9 x10 ³	2.3 x10 ³	4.8 x10	1.2 x10 ⁴	2.2 x10 ²	3.3 x10
μ	6.5 x10 ⁻¹	5.0 x10 ⁻²	3.6 x10 ⁻²	3.4 x10 ⁻²	$3.0 \\ x10^3$	4.1 x10 ²	6.3	4.8 x10 ³	5.8 x10 ³	1.2 x10 ²	1.1 x10 ⁵	2.0 x10 ³	$3.0 \\ x10^2$
d	1.1 x10 ³	1.4 x10 ⁵	1.9 x10 ⁵	2.0 x10 ⁵	2.3	1.7 x10	$\begin{array}{c} 1.1 \\ x10^3 \end{array}$	1.4	1.2	5.8 x10	6.1 x10 ⁻⁶	3.4	2.3 x10

Таблица I.1.2. Длина волны, соответствующая максиму поглощения в веществе криослоя [14-16]

Изотоп	H2	HD	D2	DT
λ (μm)	2.11 - 2.43	2.57	3.16	3.46



Puc.I.1.1. Горизонтальное сечение криостата в месте расположения оптической тестовой камеры (получено на томографе BT-50).

1- стеклянные окна криостата (толщина 2 мм); 2- тестовая камера; 3- внешняя стенка криостата. Как следует из Таблицы I.1.1, отношение поглощения рентгеновского излучения, прошедшего через оболочку мишени (полимерную микросферу) и криогенный слой, к поглощению рентгеновского излучения, пошедшего через стенки (металл) и окна (стекло) криостата, слишком мало, чтобы обеспечить надежную регистрацию интересующего нас объекта. Это подтверждается и результатами наблюдений, проведенных с помощью коммерческого рентгеновского томографа *BT-50* фирмы *Промышленная Интроскопия*.

На Рис.І.1.1 представлено изображение криостата *Утрекс-1-РТА* в горизонтальном сечении. Хорошо видно, что изображение полимерной оболочки, реально находящейся в центре тест камеры, на нем отсутствует. С помощью томографа *BT-50* удалось получить изображение лишь микросфер, расположенных вне криостата (см. Рис.І.1.2,а). Для сравнения, на Рис.І.1.2(б,в) даны изображения полимерных микросфер, полученные с помощью микроскопа *ИМЦЛ-100* (длина волны излучения 0.4-7 мкм).

Другая возможность построения томографа, основанного на эффекте поглощения, существует для инфракрасной (ИК) области спектра. В определенном спектральном диапазоне поглощение ИК-излучения веществом криогенного слоя существенно больше, чем для рентгеновской области спектра. Соответствующие данные приведены в Таблице I.1.2. и на Рис.I.1.3.

С другой стороны, именно значительное поглощение ИК-излучения делает заметным



Рис.1.1.2.. Изображения полистироловых оболочек в рентгеновском (а) и видимом (б,в) излучении. (а) Томограф ВТ-50: напряжение 370 кВ, ток 2 мА, медный фильтр 1.5 мм; (б, в) Микроскоп ИМЦЛ-100: длина волны излучения 0.4-7 мкм

эффект влияния зондирующего излучения на измеряемые параметры мишени в процессе ее сканирования. Кроме того, для данного диапазона длин волн достаточно высока и стоимость элементов, входящих в систему регистрации изображения мишени.

Проведенный анализ позволил прийти к заключению, что наиболее надежную информацию о качестве изучаемых микрообъектов (при минимальном воздействии на объект со стороны источника излучения) можно получить, если использовать зондирующее излучение в видимом диапазоне длин волн. В этом случае, механизм взаимодействия между излучением и материалом объекта может быть описан, преимущественно, основываясь на эффектах отражения и преломления света.



Рис.I.1.3. Спектры ИК-поглощения H₂, находящегося в газообразном, жидком (T=18 K) и твердом (T=11 K) состояниях (из работы [10])

§ 2. Моделирование микрообъекта и создание прямого алгоритма для построения изображения микрообъекта по его параметрам

При разработке алгоритма реконструкции (обратного алгоритма) важным этапом является компьютерный эксперимент, демонстрирующий его работу при реконструкции различных тест-объектов, таких, например, как симулированные изображения одно- и двух-слойных оболочек. Для создания подобных тест-объектов авторами была разработана трехмерная симуляционная модель прохождения видимого излучения через многослойную оболочку. Модель основана на законах геометрической оптики, в рамках которых прослеживается путь каждого участвующего в формировании изображения луча от источника света до плоскости наблюдения. Трассировка лучей в рамках данной модели основана на следующих соотношениях:



Рис.І.1.4. Расчёт преломлённого и отражённого лучей осуществляется на основании закона Снеллиуса.

Обозначения:

- AO = L падающий единичный луч;
- CO = N единичная нормаль;
- $A_{p}O = LI$ проекция единичной нормали на
- луч; $C_p O = Ns$ проекция единичного луча на нормаль;
- **BO** = \mathbf{R} отраженный луч;
- $\mathbf{B}_{\mathbf{p}}\mathbf{O} = \mathbf{R}\mathbf{n}$ единичный отраженный луч;
- $\mathbf{D}\mathbf{O} = \mathbf{D}$ преломленный луч;
- $D_p O = Dn$ единичный преломленный луч; ϕ угол падения; ψ угол преломления.

1. Исследуемая оболочка задается набором трёхмерных поверхностей, являющихся трехосными эллипсоидами :

$$\left(\frac{x^{i} - x_{0}^{i}}{a^{i}}\right)^{2} + \left(\frac{y^{i} - y_{0}^{i}}{b^{i}}\right)^{2} + \left(\frac{z^{i} - z_{0}^{i}}{c^{i}}\right)^{2} = 1$$
Где $\left(x_{0}^{i}, y_{0}^{i}, z_{0}^{i}\right)$ центр *i* – го эллипсоида, (a^{i}, b^{i}, c^{i}) – его полуоси.
(I.1.1)

Здесь и далее все расстояния безразмерные, отнесенные к максимальному внешнему радиусу оболочки *R*, а все вектора нормированы на единицу.

- 2. Луч с направляющим вектором L = (l, m, n) испускается из точки (x0, y0, z0).
- 3. Для нахождения точки пересечения (*x_c*,*y_c*,*z_c*) параметрически заданного луча с *i*-ой поверхностью решается система уравнений:

$$\begin{cases} \left(\frac{x^{i} - x_{0}^{i}}{a^{i}}\right)^{2} + \left(\frac{y^{i} - y_{0}^{i}}{b^{i}}\right)^{2} + \left(\frac{z^{i} - z_{0}^{i}}{c^{i}}\right)^{2} = 1 \\ x = x0 + l \cdot t \\ y = y0 + m \cdot t \\ z = z0 + n \cdot t \end{cases}$$
(I.1.2)

Система относительно t сводится к квадратному уравнению $A \cdot t^2 + B \cdot t + C = 0$, где

и далее $x_c = x0 + l \cdot t_c$, $y_c = y0 + l \cdot t_c$, $z_c = z0 + l \cdot t$

$$A = b^{i^{2}} \cdot c^{i^{2}} \cdot l^{2} + a^{i^{2}} \cdot c^{i^{2}} \cdot m^{2} + a^{i^{2}} \cdot b^{i^{2}} \cdot n^{2}$$

$$B = 2 \cdot \left(b^{i^{2}} \cdot c^{i^{2}} \cdot l \cdot (x0 - x_{0}^{i}) + a^{i^{2}} \cdot c^{i^{2}} \cdot m \cdot (y0 - y_{0}^{i}) + a^{i^{2}} \cdot b^{i^{2}} \cdot n \cdot (z0 - z_{0}^{i})\right) \qquad (I.1.3)$$

$$C = b^{i^{2}} \cdot c^{i^{2}} \cdot (x0 - x_{0}^{i})^{2} + a^{i^{2}} \cdot c^{i^{2}} \cdot (y0 - y_{0}^{i})^{2} + a^{i^{2}} \cdot b^{i^{2}} \cdot (z0 - z_{0}^{i})^{2} - a^{i^{2}} \cdot b^{i^{2}} \cdot c^{i^{2}}$$

$$\frac{x_{c} - x_{0}^{i}}{a^{i^{2}}} = \frac{y_{c} - y_{0}^{i}}{b^{i^{2}}} = \frac{z_{c} - z_{0}^{i}}{c^{i^{2}}} \qquad (I.1.4)$$

- 4. В точке пересечения (x_c, y_c, z_c) строится *N* нормаль к поверхности *i*:
- 5. Угол между падающим лучом и нормалью определяется как арккосинус их скалярного произведения: $\varphi = \arccos(L \bullet N)$.
- Расчёт преломлённого и отражённого лучей (см. Рис.І.1.4) происходит на основании закона Снеллиуса: n1 sin(φ) = n2 sin(ψ).

Используя Рис.І.1.4, находим нормализованный (единичный) вектор отражённого луча:

$$Rn = L - 2 \cdot N \cdot (L \bullet N) \tag{I.1.5}$$

и нормализованный вектор преломлённого луча:

$$\boldsymbol{D}\boldsymbol{n} = \frac{\mathrm{n1}}{\mathrm{n2}} \cdot \left(\boldsymbol{L} - \boldsymbol{N}\boldsymbol{s}\right) - \sqrt{1 - \left(\frac{\mathrm{n1}}{\mathrm{n2}}\right)^2 \cdot \left[1 - \left(\boldsymbol{L} \bullet \boldsymbol{N}\right)^2\right]} \cdot \boldsymbol{N}$$
(I.1.6)

7. Интенсивность отраженного света вычисляется по формулам Френеля:

$$I_{r} = \frac{1}{2} \cdot \left(r_{par}^{2} + r_{per}^{2}\right) \cdot I_{i},$$

$$r \partial e r_{par}^{2} = \left[\frac{tg(\varphi - \psi)}{tg(\varphi + \psi)}\right]^{2}, r_{per}^{2} = \left[\frac{\sin(\varphi - \psi)}{\sin(\varphi + \psi)}\right]^{2}$$
(I.1.7)

Можно выразить коэффициенты отражения r_{par} и r_{per} через $\cos(\varphi)$:

$$r_{par}^{2} = \left[\frac{\cos(\varphi) - N \cdot \sqrt{1 - N^{2} \cdot (1 - \cos^{2}(\varphi))}}{\cos(\varphi) + N \cdot \sqrt{1 - N^{2} \cdot (1 - \cos^{2}(\varphi))}}\right]^{2} u$$
(I.1.8)

$$r_{par}^{2} = \left[\frac{\sqrt{1 - N^{2} \cdot (1 - \cos^{2}(\varphi))} - N \cdot \cos(\varphi)}{\sqrt{1 - N^{2} \cdot (1 - \cos^{2}(\varphi))} + N \cdot \cos(\varphi)}\right]^{2}$$
(I.1.9)

- 8. Условие полного отражения: $sin(\varphi) > n$ или $cos(\varphi) < sqrt(1-n^2)$.
- 9. Интенсивность преломленного света $I_d = I_i I_r$
- 10. Изменение интенсивности за счет поглощения света в среде:

$$I_{out} = I_{in} \cdot \exp(-d/La) \tag{I.1.11}$$

(I.1.10)

где d – безразмерное расстояние между двумя последовательными точками пересечения луча с образующими оболочку поверхностями, а La=L/R – безразмерная длина поглощения для соответствующего слоя.

- 11. Набег фазы луча в *i*-ом слое: $\psi = 2\pi dR/\lambda$, (I.1.12) где λ - длина волны света.
- Путь каждого луча внутри оболочки прослеживается до тех пор, пока данный луч не выйдет из оболочки наружу или его интенсивность не станет меньше заранее заданного порога I_i < I_{lim}.

Последний этап трассировки – нахождение точки пересечения лучей, попавших в заданную апертуру, с плоскостью наблюдения.

При реализации модели в виде компьютерной программы, исходные лучи генерируются со случайными координатами в плоскости источника. Это условие позволяет избежать появления многочисленных артефактов, существенно искажающих модельное теневое изображение.

На основании созданной модели, нами разработаны две программы для построения теневого изображения по известным параметрам одно- и двухслойных сферических оболочек: *3D Ray Tracing* и *Shell Optics Model*. Алгоритмы, с помощью которых реализуется модель в этих программах, полностью трехмерны, но в каждом случае имеют свои особенности.

Возможности и интерфейсы программ также отличаются. Совместно, эти программы удовлетворяют всему комплексу требований, необходимых для решения поставленной задачи о формировании изображения прозрачного микрообъекта с помощью численного моделирования. На Рис.І.1.5 приведены результаты формирования теневых и интерференционных изображений криогенных мишеней с помощью этих программ.

Исследование корреляции между изображением реальной оболочки и ее изображением, сгенерированным с помощью разработанного программного обеспечения, подтвердило адекватность созданной модели (Рис.I.1.6).



(a) Теневое изображение двухслойной оболочки. Режим накопления лучей.

Параметры расчета: $a_1=1$; $b_1=1$; $c_1=1$; $a_2=0,9$; $b_2=0,9$; $c_2=0,9$; $x_2=0$; $y_2=0$; $z_2=0$; $a_3=0.8$; $b_3=0,8$; $c_3=0,8$; $x_3=0$; $y_3=0$; $z_3=0$; $n_1=1$; $n_2=1.5$; $n_3=1.14$; $n_4=1$; $A=60^\circ$; $I_{lim}=0,01$.



(B) Интерференционное изображение двухслойной оболочки. Параметры расчета: $a_1=1$; $b_1=1$; $c_1=1$; $a_2=0,97$; $b_2=0,97$; $c_2=0,97$; $x_2=0$; $y_2=0$; $z_2=0$; $a_3=0.87$; $b_3=0,87$; $c_3=0,87$; $x_3=-0,06$; $y_3=0$; $z_3=0$; $n_1=1$; $n_2=1.5$; $n_3=1.14$; $n_4=1$; $A=60^\circ$; $I_{lim}=0,01$; $\lambda=1600$ nm; R=500 мкм.



(б) Теневое изображение двухслойной оболочки. Режим сложения групп лучей. Параметры расчета: a₁=1; b₁=1; c₁=1; a₂=0,9; b₂=0,9; c₂=0,9; x₂=0; y₂=0; z₂=0; a₃=0.8; b₃=0,8; c₃=0,8; x₃=0; y₃=0; z₃=0; n₁=1; n₂=1.5; n₃=1.14; n₄=1; A=60°; I_{lim}=0,01.



(г) Интерференционное изображение двухслойной оболочки. Параметры расчета: $a_1=1$; $b_1=1$; $c_1=1$; $a_2=0,97$; $b_2=0,97$; $c_2=0,97$; $x_2=0$; $y_2=0$; $z_2=0$; $a_3=0.87$; $b_3=0,87$; $c_3=0,87$; $x_3=0$; $y_3=0$; $z_3=0$; $n_1=1$; $n_2=1.5$; $n_3=1.14$; $n_4=1$; $A=60^\circ$; $I_{lim}=0,01$; $\lambda=1600$ nm; R=500 мкм.





Рис.І.1.6. Тестирование прямого алгоритма

(а) Реальная оболочка из полистирола (слева - теневая проекция, справа - диаметральный профиль интенсивности). Параметры оболочки: радиус R=490 мкм, толщина стенки $\Delta R=14$ мкм (б) Расчетное изображение оболочки (слева) и диаметральный профиль интенсивности (справа). Результаты расчета по 120 млн. лучей. Расчетные параметры: 1-я поверхность: a = 1.00, b = 1.00, c = 1.00, x0 = 0.00, y0 = 0.00, z0 = 0.00; $n_1 = 1.60$ 2-я поверхность: a = 0.93, b = 0.93, c = 0.93, x0 = 0.00, y0 = 0.00, z0 = 0.00; $n_2=1.00 \parallel n_0 =$ 1.00

§ 3. Обратный алгоритм для 3-х мерной реконструкции параметров микрообъекта по положению яркого кольца на его теневых изображениях (*BBP алгоритм*)

С помощью созданной трехмерной модели прохождения света (прямой алгоритм) исследована физика формирования теневого изображения, в частности, образования яркого кольца на изображениях прозрачных микросфер и криогенных мишеней. Методами формальной математики описано положение яркого кольца и распределение интенсивности в нем. На Рис.I.1.7 (а,б) показана аналитическая зависимость, которая позволяет рассчитать толщину криогенного слоя или стенки оболочки по положению максимума интенсивности яркого кольца. На Рис.I.1.7(в,г) показано положение яркого кольца на теневых изображениях криогенной мишени и оболочки. На основании полученных результатов, разработан обратный алгоритм для решения задачи пространственной реконструкции микросфер и криогенных мишеней по положению яркого кольца на теневых этих микрообъектов (т.н. *BBP* алгоритм). Подробное описание математического формализма при создании *BBP* алгоритма дано в работах [8,9]

В соответствии с *BBP* алгоритмом, задача реконструкции разбивается на ряд операций, в том числе:

- 1. Предварительная обработка с выявлением особенностей изображения в каждой проекции без искажения информации
- 2. Определение положения яркого кольца и края оболочки для каждой проекции
- 3. Преобразование координат максимума яркости кольца в координаты внутренней поверхности
- 4. Реконструкция внутренней поверхности и определение параметров микрообъекта
- 5. 3D визуализация.

Для выполнения этих операций был разработан пакет программного обеспечения *Target Studio*, включающий программу *Shell Explorer* для предварительной обработки изобра-



Рис.I.1.7. Толщина криослоя при различных значениях внутреннего радиуса оболочки R_1 (a) и толщина стенки оболочки ΔR (б) в зависимости от положения максимума интенсивности яркого кольца. Коэффициент преломления материала оболочки $n_1=1.5$, коэффициент преломления материала криогенного слоя $n_2=1.14$; (6) и (г) яркое кольцо на изображении криогенной мишени и оболочки, соответственно; R – внешний радиус оболочки

жений, программу Bright Ring для нахождения параметров яркого кольца и программу *EasyView3D* для 3-х мерной визаулизации результатов реконструкции микрообъекта. Помимо этого, с помощью комплекта программ *Target Studio* возможно определение таких параметров мишени, как радиус внешней поверхности оболочки и ее несферичность, радиус внутренней поверхности оболочки и се несферичность, радиус внутренней поверхности оболочки и се несферичность, радиус внутренней поверхности оболочки, разнотолщинность, а также получение профилей произвольных диаметральных сечений, спектра пространственных частот и и др. На Рис.I.1.8 показано главное окно программы *Target Studio* и окно программы визуализации конечного результата.



Puc.I.1.8. Главное окно программы Target Studio (a) и окно программы визуализации конечного результата (Easy View 3D) (б)

Рассмотрим реализацию *BBP* алгоритма с помошью созданного комплекта программ более детально:

- Предполагается, что форма внешнего слоя криогенной мишени (т.е. оболочки) сферически симметрична, ее внешний радиус и толщина известны. В случае однослойной оболочки ее внешняя поверхность – правильная сфера. Известны также показатели преломления каждого слоя.

- С помощью программы *Shell Explore*г проводится предварительная обработка изображений – нормализация, фильтрация и пр.

- Исходные данные – координата яркого кольца относительно края оболочки в зависимости от угла, - получаются после обработки изображения каждой проекции с помощью программы *Bright Ring*. Полученные результаты для каждой проекции записываются в файл специального формата. Далее эти файлы будут обрабатываться программой *Target Studio*.

- На основе параметров конкретной мишени (толщины внешнего слоя, показателей преломления и пр.) программа рассчитывает зависимость толщины криослоя от координаты яркого кольца (см. Рис.I.1.7), которая будет далее использоваться для определения локальной толщины криослоя. Это делается один раз для всех проекций.

- Следующий шаг – считывание полученных ранее файлов и приведение (интерполяция) содержащихся в них данных на равномерную сетку в координатах угла подъема и азимутального угла, причем шаг этой сетки разный по каждой координате. Этот этап необходим, так как количество точек для каждой проекции может быть различно, их шаг может быть переменным, поскольку некоторые точки могут выпадать из-за наличия тех или иных дефектов на изображении.

- Каждому числу из полученной прямоугольной матрицы (это число ни что иное, как локальная координата яркого кольца) программа ставит в соответствие локальную толщину криогенного слоя, используя предварительно посчитанную зависимость толщины криослоя от положения яркого кольца. В итоге получается другая прямоугольная матрица, каждое число в которой – локальное положение внутренней поверхности криослоя. Эти данные записываются в отдельный файл.

- Конечный результат может быть визуализирован с помощью программы *EasyView3D*. Она написана на основе библиотеки *OpenGL* и позволяет представлять функции двух переменных в виде трехмерных поверхностей как в декартовой так и в сферической системе координат. Предусмотрена возможность увеличения и произвольного вращения объекта, глубокая детализация отдельных его участков, изменение формы и атрибутов представления и пр.

Тестирование BBP алгоритма и программ Target Studio проводилось следующим образом.

С помощью программы *Shell Optics Model* был сгенерирован набор из 60-ти проекций криомишени, расположенных равномерно через 6°. В качестве тестовой была использована 2-



Рис. I.1.9. Результаты тестирования BBP алгоритма: (а) изображение проекции двухслойной оболочки: угол сканирования 78°; (б) исходная поверхность оболочки, (в) поверхность оболочки, реконструированная по набору симулированных проекций, (г) разница между результатом реконструкции и исходной поверхностью. Цифры по оси Z – разница в процентах умноженная на 100 и сдвинутая в положительную область.

х слойная оболочка (криогенная мишень) со следующими параметрами. Внешний слой (оболочка из стекла) сферически симметричный, его внутренний радиус R_i =0.94 (здесь и далее все линейные размеры указаны в единицах внешнего радиуса мишени R_{BH} =1), показатель преломления n=1.5. Внутренняя поверхность криогенного слоя представляет собой трехосный эллипсоид с полуосями по X,Y и Z равными a=0.8, b=0.76 и c=0.82 соответственно, сдвинутый от центра на Δx =0.01, Δy =0.05 и Δz =-0.02. Показатель преломления второго слоя равен 1.14 (твердая DT-смесь). Апертура системы наблюдения составляла 25°. В процессе моделирования использовалось гауссовское размытие матрицей 5×5. Симулированное изображение оболочки в одной из проекций показано на Рис.I.1.9(а).

Результаты тестирования показали, что среднее отклонение восстановленной поверхности от исходной составляет около ±1% от радиуса мишени (Рис.I.1.9,б)

§ 4. Расширение границ применимости *BBP алгоритма* с помощью схемы обратного сканирования

Восстановление формы внутренней поверхности криослоя или внутренней поверхности однослойной оболочки по параметрам яркого кольца, получаемым из теневой фотографии мишени, возможно при выполнении двух условий: во-первых, кольцо наблюдается и, вовторых, оно образовано только одной, единственной группой лучей (см.§2).

С помощью программы трехмерного моделирования хода лучей *Shell Optics Model* были проведены расчеты для различных толщин криослоя и внешней оболочки при нескольких



Рис.I.1.10. Зависимость радиуса поверхности от угла подъема (θ) и азимутального угла (ϕ) – $R(\theta, \phi)$, представленная в декартовой системе координат при различных поворотах координатных осей. Слева – результат восстановления, справа – исходная поверхность.

значениях апертуры наблюдения. В расчетах полагалось, что показатель преломления оболочки n=1.5 (стекло), показатель преломления криослоя n=1.14 (жидкий DT). Различимость колец, соответствующих разным группам лучей, устанавливалась с помощью критерия Релея. Результат представлен на Рис.I.1.10.

Из Рис.I.1.11 видно, что рабочая зона ограничена и сверху и снизу. При относительной толщине стенки внешней оболочки $\Delta R/R_0 \le 0.1$ (где ΔR и R_0 - толщина и внешний радиус оболочки, соответственно), нижняя граница обусловлена тем, что яркое кольцо сливается с изображением границы оболочки и кольцо становится неразличимым. Заметим, что такое же ограничение действует и в случае однослойной оболочки. При этом, в зависимости от апертуры системы наблюдения, минимальная толщина оболочки при которой кольцо еще различимо, составляет, примерно, 0.02-0.05. При дальнейшем увеличении толщины стенки внешней оболочки яркое кольцо начинает сливаться с кольцами, образуемыми группами лучей, отразившимися от внутренней поверхности внешней оболочки или прошедшими без отражений через криослой.



Рис. І.1.11. Границы рабочей зоны ВВР алгоритма (полулогарифмическая шкала). 1 – мишень №1; 2 – мишень №2

Этот же процесс смешения групп лучей обуславливает возникновение верхней границы рабочей зоны. Эта граница может быть важной для мишеней реакторного масштаба. Из Рис.I.1.11 также видно, что величина рабочей зоны существенным образом зависит от апертуры системы наблюдения, поэтому система наблюдения должна проектироваться исходя из конкретных характеристик мишеней.

Ниже рассмотрены особенности формирования теневых изображений для криогенных мишеней реакторного масштаба. Радиус первой мишени – 3 мм, толщина стенки оболочки – 500 мкм, толщина криогенного слоя – 300 мкм. При расчете взяты следующие показатели преломления : $n_0 = 1$, $n_1 = 1.5$, $n_2 = 1.14$, $n_3 = 1$. На синтезированном изображении этой мишени (Puc.I.1.12, A) видны два ярких кольца:

1 – внешнее, более интенсивное, образованное лучами отразившимися от границы стенка оболочки – криогенный слой. Это кольцо расположено вблизи внешней границы оболочки. Заметим, что у оболочек с более тонким внешним слоем его обычно не видно.

2 - внутреннее кольцо, являющееся объектом нашего интереса (полное внутреннее отражение на границе криогенный слой-пар).



Рис.I.1.12. Синтезированные изображения и соответствующая диаметральная пропись реакторной мишени №1. А - апертура - 30⁰, В - апертура - 12⁰, плоскость наблюдения - 0.0, 200М лучей.



Рис.І.1.13. Синтезированные изображения реакторной мишени №2. Апертура - 30⁰, плоскость наблюдения - 0.0.

К сожалению, соотношения параметров первой мишени таковы, что, при апертуре наблюдения 30^0 , интересующее нас яркое кольцо образуется двумя группами лучей, одна из которых не испытывает отражения от внутренней поверхности криогенного слоя и является помехой.

Уменьшение апертуры до 12⁰ позволяет разделить эти группы, что видно на модельном синтезе изображения (см. Рис.I.1.12, В). Учитывая большой радиус и большие толщины слоев мишени, дифракционное размытие пиков интенсивности будет небольшим.

Это позволяет утверждать, что и при реальных измерениях интересующий нас пик может быть выделен.

Параметры второй рассматриваемой реакторной мишени (радиус – 2мм, толщина стенки оболочки – 47 мкм, толщина криогенного слоя – 200 мкм) соответствуют зоне, в которой яркое кольцо образуется лишь одной группой лучей, а именно той, которая и несет информацию о внутренней поверхности криогенного слоя. Кроме того, это яркое кольцо является единственным (Puc.I.1.13).

Так как все приведенные результаты получены на основе только лишь законов геометрической оптики их следует рассматривать как оценку. На практике реальные размеры рабочей зоны могут оказаться несколько уже.

С целью расширения границ применимости алгоритма для характеризации мишеней реакторного масштаба была рассмотрена возможность применения BBP алгоритма в сочетании со схемой обратного сканирования, показанной на Puc.I.1.14.



Рис. І.1.14. Схема обратного сканирования

Схема работает следующим образом. Оптическая система источника формирует растр и проецирует тонкий луч, пробегающий по растру, на объект. Объектив за объектом собирает весь свет, попавший в его апертуру, и направляет его на одноэлементный фотоприемник, например, фотодиод. Сигнал с фотодиода поступает на аналого-цифровой преобразователь. Результат преобразования записывается в память синхронно с работой сканирующего устройства, образуя некую матрицу чисел – «изображение» объекта, причем привязка координат

каждой точки осуществляется здесь уже не к плоскости наблюдения (ее просто не существует), а к плоскости сканирования.

Схема с обратным сканированием известна давно, достаточно вспомнить первые шаги телевидения (диск Нипкова). Она также использовалась успешно в коммерческих рентгеновских томографах и в других научно-технических областях.

На Рис.I.1.15 показаны смоделированные «изображения» криомишени для различной апертуры собирающей линзы, а на Рис.I.1.16 - соответствующие радиальные профили интенсивности. Как можно заметить из рисунков, характер «изображения» сильно меняется при изменении апертуры собирающей линзы. Лишь один элемент неизменно присутствует – это темное кольцо. Более детальный анализ показывает, что темное кольцо появляется именно благодаря наличию криогенного слоя. Информацию о положении внутренней поверхности криогенного слоя (R₂) несет внутренний край темного кольца, тогда как положение внешнего края этого кольца зависит, главным образом, от апертуры.



Рис. I. 1.15. «Изображение» криомишени, получаемое по схеме обратного сканирования при различной апертуре собирающей линзы(A). $R_1=0.9$; $R_2=0.8$; $n_1=1.5$; $n_2=1.14$.



Рис.І.1.16. Радиальные распределения интенсивности, соответствующие «изображениям» на *Рис. I.1.15. По оси абсцисс отложен радиус в пикселях, по оси ординат – интенсивность* в произвольных единицах.

Наблюдаемое темное кольцо обладает несколькими замечательными особенностями.

Во-первых, внутренний край его достаточно резкий, следовательно, его всегда можно легко локализовать, а его положение (R_d) измерить с большой точностью.

Во-вторых, при изменении апертуры A в пределах $50^{\circ} \div 90^{\circ}$ R_d почти исключительно зависит от R₂ и лишь незначительно от A. Так как значение апертуры задается конструктивно и не меняется при измерениях на конкретной экспериментальной установке, то A можно считать постоянной. Это позволяет с успехом использовать измерение R_d для определения локальной толщины криогенного слоя.

В-третьих, темное кольцо, в отличие от яркого кольца, наблюдаемого на обычных изображениях криогенной мишени, существует всегда, независимо от абсолютной толщины криогенного слоя и относительных толщин слоя и внешней оболочки. Положение внутреннего края темного кольца есть однозначная функция положения внутреннего края криогенного слоя. Таким образом, в данном методе снимаются ограничения, характерные для метода измерений по яркому кольцу. Это обстоятельство иллюстрирует Puc.I.1.17.

На Рис.I.1.17 (1) показано изображение криогенной мишени с очень тонким криогенным слоем (d=0.001). Вверху показано «изображение», полученное по схеме обратного сканирования, внизу – обычное теневое изображение. Темное кольцо хорошо видно, яркое же кольцо, соответствующее криогенному слою, отсутствует.

На Рис.I.1.17 (2) показана криогенная мишень реакторного масштаба (d=0.1). Ранее было показано, что для контроля такой мишени невозможно использовать яркое кольцо. В проти-



Рис. I.1.17. Вверху «изображение» криомишеней, полученное по схеме обратного сканирования (а), внизу – обычное изображение (б). R_1 =0.95; R_2 =0.949; 2- R_1 =0.83; R_2 =0.73; 3- R_1 =0.95; R_2 =0.8; Δx =0.149

воположность этому, мы можем утверждать, что темное кольцо вполне годится для этой цели.

На Рис.І.1.17 (3) показано изображение мишени с сильно несимметричным криогенным слоем. На рисунке можно видеть непрерывное темное кольцо, и лишь фрагмент яркого.

Таким образом, даже краткий оптико-физический анализ позволил выявить полезные особенности обсуждаемого метода.

В видимом диапазоне излучения метод обратного сканирования может быть легко реализован с помощью набора стандартных и доступных компонентов. В качестве источника света и сканирующего устройства может быть использован обычный компьютерный проектор. Оптические компоненты не сложнее тех, что применяются в прямой схеме сканирования. Широкий спектр усилителей и аналого-цифровых преобразователей сейчас существует в виде готовых плат, совместимых с PCI шиной компьютера и они сравнительно недороги. Небольшие дополнительные доработки потребуются лишь для обеспечения синхронизации. Написание управляющего программного обеспечения для такой системы не представляет принципиальных трудностей.

Таким образом, затраты на реализацию схемы обратного сканирования не превышают затрат на построение аналогичной по параметрам традиционной схемы, оснащенной качественной ПЗС камерой высокого разрешения.

Итак, применение схемы обратного сканирования дает определенные преимущества по сравнению с традиционным подходом получения теневых изображений мишени, в том числе:

- 1. Высокое пространственное разрешение для мишеней реакторного масштаба.
- 2. Высокая скорость получения одной проекции, которая ограничивается в основном лишь скоростью записи данных на жесткий диск (>100 Мбит/сек).
- Допускает работу в широком спектральном диапазоне от глубокой инфракрасной области до вакуумного ультрафиолета.
- 4. Позволяет расширить область значений параметров мишени доступных измерению с помощью *BBP* алгоритма.

Поэтому, при построении системы диагностики мишеней реакторного масштаба, мы рекомендуем применять именно схему обратного сканирования в сочетании с развитым в данной работе *BBP* алгоритмом.

Глава 2. Анализ особенностей формирования реального теневого изображения мишеней.

§ 1. Основные ограничения на техническое решение элементной базы томографа

Цель исследований, результаты которых представлены в настоящей главе - формулировка технических требований к элементной базе диагностического комплекса основанного на принципе томографии (или просто томографа), способного определять параметры криогенной мишени с пространственным разрешением 1-2 мкм.

Основными звеньями, составляющими элементную базу томографа являются:

- Источник зондирующего излучения (или осветитель)

- Система сканирования микрообъекта
- Система формирования изображения (или оптическая система)

Для характеризации криогенной мишени необходимо определить параметры следующих двух микрообъектов: (1) оболочки мишени и (2) сферического топливного слоя, содержащегося внутри нее. Определение параметров оболочки, как правило, осуществляется при комнатной температуре (T=300K), в то время как характеризация топливного слоя может быть проведена только когда микрообъект находится при криогенных температурах (T < 20 K).

Схема размещения криогенной мишени внутри тестовой камеры криостата показана на Рис.I.2.1. Специфические особенности работы с криогенным микрообъектом требуют выполнения следующих, часто взаимно исключающих условий.

Во-первых, криогенная мишень в процессе характеризации топливного слоя все время находится в зоне гелиевых температур внутри оптической тестовой камеры криостата, в то время как объектив системы наблюдения размещается вне криостата (см. Рис.I.2.1). Отсюда вытекает ограничение по минимально допустимому фокусному расстоянию объектива F, формирующего изображение мишени.

Кроме того, получение изображения мишени высокого качества ограничивается наличием оптических окон в тестовой камере криостата (т.е. дополнительных отражающих и пре-

ломляющих поверхностей в системе формирования изображения), что исключает возможность вращения криостата вместе с мишенью относительно светового пучка без применения соответствующих компенсаторов под каждый угол сканирования. Поэтому, при работе с криогенной мишенью остается единственная возможность для реализации сканирования: осуществлять вращение мишени относительно зондирующего излучения при неподвижном криостате.

Далее, для реализации максимального пространственного разрешения (D/F), диаметр объектива D должен быть достаточно велик при соответственно большом диаметре окон криостата и малом фокусном расстоянии F. Напротив, для сохранения требуемого уровня температуры внутри тестовой камеры и сохранения параметров криогенной мишени, размер окон криостата должен быть достаточно малым, чтобы удовлетворять условиям минимизации теплопритоков со стороны комнатного излучения.

Таким образом, важнейшими задачами при построении томографа криогенных мишеней являются (а) создание новой конструкции тестовой камеры



Рис.1.2.1. Схема размещения криогенной мишени внутри оптической тестовой камеры криостата.

1- окна, 2- свет, 3- мишень, D – диаметр окна (линейная апертура наблюдения), F- минимально допустимое фокусное расстояние

криостата, отвечающей требованиям высокого пространственного разрешения, с одной стороны, и сохранению параметров слоя, с другой, и (б) разработка малогабаритного устройства позиционирования мишени, работающего в условиях криогенных температур и, при необходимости, в условиях высокого вакуума.

Перечисленные проблемы показывают, насколько техническое решение задачи характеризации топливного слоя внутри криогенной мишени сложнее, чем решение задачи характеризации оболочки при комнатной температуре.

Поэтому, для характеризации двух различных элементов, составляющих криогенную мишень (оболочка и криогенный слой), был создан диагностический комплекс, состоящий из двух различных томографов.

§ 2. Требования к источнику зондирующего излучения

Важным элементом томографа является источник зондирующего излучения (или осветитель). Выше (см. п. 1.1) был обоснован выбор длины волны зондирующего излучения (видимый спектр). В настоящем разделе, рассмотрим основные требования к источнику, продиктованные особенностями созданного нами алгоритма реконструкции (*BBP* алгоритма).

2.1.Когерентность, расходимость и однородность излучения

Прежде всего, рассмотрим вопрос о необходимой степени когерентности излучения. Хорошо известно, что применение источника когерентного излучения (лазера) приводит к следующему:

- на теневом изображении объекта наблюдается множество дифракционных колец и полос, возникающих вблизи зон резкого изменения интенсивности волнового фронта.
- положение, интенсивность и конфигурация этих колец и полос, как правило, существенно изменяются даже при незначительном изменении настроек – апертуры, плоскости наблюдения и т. д.
- в реальном эксперименте на изображении присутствует спекл структура и паразитные интерференционные полосы, связанные с отражением света от элементов конструкции.

Таким образом, использование когерентного освещения для получения теневых проекций микрообъекта усложняет как сам эксперимент, так и интерпретацию получаемых изображений. В тоже время, в рамках разработанного *BBP* алгоритма, мы не можем использовать основное преимущество когерентной оптики – информацию о фазе световой волны.

Отсюда вытекает требование - зондирующее излучение должно быть некогерентным.

С точки зрения получения максимального пространственного разрешения оптической системы при использовании видимого излучения, разумный выбор длины волны лежит в сине-зеленой области спектра (440-520 нм).

Геометрия и интенсивность освещающего пучка определяются требованиями на снижение энергии, вводимой в тестовую криогенную камеру (с целью сохранения криомишени). В силу этого диаметр светового пятна должен быть близок к диаметру исследуемого микрообъекта.

Поскольку BBP алгоритм предполагает выполнение условий, лежащих в основе созданной математической модели прохождения света через микрообъект, пучок зондирующего излучения должен быть близок к параллельному. Допустимый угол расходимости светового пучка равен 2ω < 0.028 = 96 угл.мин, что определяется из условия равенства геометрической расходимости пучка величине соответствующего дифракционному рассеянию яркого кольца.

С помощью численной модели прохождения света через микрообъект был исследован вопрос о влиянии неоднородности облучения на положение яркого кольца на изображении криогенной мишени. Основной вывод: степень однородности излучения не влияет на расположение яркого кольца, несущего информацию о поверхности криослоя.

2.2.Влияние дисперсии излучения

Процедура нахождения показателей преломления заключалась в следующем: известные показатели преломления водорода [10] и полистирола [17] использовались для нахождения значений A и B в упрощенной формуле Коши $n \cong A + B/\lambda^2$. Затем, по этой формуле с соответствующими значениями A и B были оценены значения показателей преломления для

Таблица I.2.1. Расчетные значения показателя преломления в зависимости от длины волны излучения (λ)

ſ	Вещество	А	В	$\lambda = 0.44 \mu m$	$\lambda = 0.65 \mu m$
ĺ	Твердый Водород	1.132774	0.001051	n=1.1382	n=1.1353
ĺ	Полистирол 1.546580		0.015079	n=1.6245	n=1.5823

водорода и полистирола для длин волн 0.44 мкм и 0.65 мкм (Таблица I.2.1).

Полученные значения показателей преломления использовались для генерации двух теневых изображений криогенной мишени со следующими параметрами: $a_1 = 1$, $b_1 = 1$, $c_1 = 1$, $a_2 = 0.94$, $b_2 = 0.94$, $c_2 = 0.94$, $a_3 = 0.84$, $b_3 = 0.84$, $c_3 = 0.84$, n0 = n3 = 1, апертура 30°, 150 М лучей (т.е. 150 миллионов лучей).

Отличия этих изображений друг от друга показаны на Рис. I.2.2. Интересно, что влияние



Рис.I.2.2. Фрагмент диаметральной прописи изображений криогенной мишени. (1) $\lambda = 0.44 \mu m$, (2) $\lambda = 0.65 \mu m$

дисперсии на группы лучей, ответственных за образование ярких колец и центральной части изображения, различно – диаметр ярких колец больше у изображения, полученного в синем
свете ($\lambda = 0.44$ мкм, линия 1, Рис.I.2.2), в то время как диаметр центральной части больше у изображения полученного в красном свете ($\lambda = 0.65$ мкм, линия 2, Рис.I.2.2).

При освещении объекта белым светом дисперсия приводит к некоторому размыванию его изображения. Чтобы избежать этот эффект, при фотографировании объекта следует применять излучение, близкое к монохроматическому либо применять сфетофильтр, сужающий диапазон длин волн осветителя.

2.3.Влияние поляризации

Добиться максимальной сферической симметрии составляющих мишень слоев - основная задача технологии мишеней. Задача же характеризации – обнаружить и измерить с максимально возможной точностью даже очень небольшие отклонения формы слоев мишени от сферической симметрии.

Пучок поляризованного света несимметричен относительно своей оси. Поэтому, распределение состояния поляризации в плоскости изображения для поляризованного света даже в случае идеальной оболочки будет несимметричным.

Поскольку поляризованный свет нарушает естественную симметрию задачи, то его применение только затрудняет обнаружение и измерение отклонений от симметрии самой мишени. Поэтому, зондирующее излучение томографа мишеней должно быть неполяризованным. Только в этом случае теневая фотография идеальной мишени будет симметрична относительно центра, а всякое отклонение от этой симметрии будет служить мерой ее неидеальности и предметом измерения.

§ 3. Система формирования изображения

3.1. Выбор апертуры наблюдения

С помощью компьютерной программы 3D Ray Tracing были синтезированы изображения двухслойной оболочки (криогенной мишени) для различных апертур наблюдения. На Puc.I.2.3 показаны синтезированные изображения криогенной мишени со следующими параметрами: R1=0.95 (радиус внутренней поверхности оболочки в единицах внешнего радиуса мишени), R2=0.8 (радиус внутренней поверхности криослоя в единицах внешнего радиуса мишени), n0=1, n1=1.5, n2=1.14, n3=1 (здесь n0, n1, n2, n3 – показатели предомления среды вне мишени, материала оболочки, криогенного слоя и внутренней полости мишени, соответственно). Для получения каждого изображения использовалось 10^8 входных лучей.

Сравнительный анализ показал, что снижение апертуры наблюдения позволяет с большей точностью определить положение яркого кольца, а, следовательно, более точно реконструировать положение внутренней поверхности криослоя с помощью *BBP* алгоритма. С другой стороны, увеличение апертуры позволяет повысить пространственное разрешение оптического наблюдения.

Таким образом, при построении томографа желательно учесть возможность изменения апертуры наблюдения в достаточно широких границах (от 10^{0} до 60^{0}).



Рис.I.2.3. Синтезированные изображения криогенной мишени для различных апертур наблюдения (указаны вверху справа над каждым изображением). Параметры мишени: $R_1=0.95$, $R_2=0.8$, n0=1, n1=1.5, n2=1.14, n3=1, R_1 и R_2 – внутренний радиус оболочки и криогенного слоя, соответственно

3.2. Требования к матрице фотоприемника

Для получения изображений в настоящее время используются, в основном, матричные фотоприемники. Геометрически они характеризуются размером матрицы в пикселях N×M и размером отдельного пикселя $\Delta x \times \Delta y$, причем часто $\Delta x = \Delta y$. Динамический диапазон получаемого изображения определяется разрядностью АЦП. В данной работе мы использовали чернобелые фотоприемные матрицы размером не менее 1000×1000 пикселей, с квадратными пикселями и 12-ти битным динамическим диапазоном (4096 градаций яркости серого).

Двумерное световое поле с распределением интенсивности I(x,y), падающее на фотоприемник, преобразуется им в матрицу чисел. При таком преобразовании происходят искажения и полученная матрица W[i,j] не является полностью подобной исходному распределению интенсивности I(x,y), то есть

$$W[i,j] \neq I(i\Delta x, j\Delta y)$$
 (i=0,...N; j=0,...M) (I.1.13)

Это связано, в основном, с тремя явлениями: пикселизация, шумы и конечный динамический диапазон.

Числовые значения матрицы W[i,j] получаются путем двумерного интегрирования I(x,y) по площади отдельного светочувствительного элемента фотоприемной матрицы. Дис-

кретизированное изображение W[i,j] можно рассматривать как результат двумерной свертки исходного изображения I(x,y) с импульсным откликом отдельного пикселя P(x,y) (в нашем случае это симметричная прямоугольная функция) с последующей дискретизацией этой свертки в конечной области (площадь матрицы) с помощью дельта функции:

$$W[i,j] = [I(x,y) \otimes P(x,y)] \delta(x - i \times \Delta x, y - j \times \Delta y)$$
(I.1.14)

Исходное распределение интенсивности I(x,y) из W[i,j] можно восстановить путем пространственной интерполяции или с помощью линейной пространственной фильтрации дискретизированного изображения.

Пусть $\omega_p = 2\pi K/\Delta x$ – частота дискретизации изображения, а ω_I – максимальная пространственная частота исходного распределения интенсивности.

Очевидно, что для круглых объектов (изображение криомишени) $K \le \min\{N,M\}$. Согласно критерию Найквиста, если $\omega_I \le \omega_p/2$, то исходное изображение может быть восстановлено абсолютно точно, в противном случае это невозможно. Это означает, что шаг дискретизации не должен превышать половины периода пространственной гармоники, соответствующей самым мелким деталям изображения.

Если диаметр криогенной мишени составляет 1000 мкм и на диаметре ее изображения укладывается 1000 пикселей, то надежно можно восстановить детали с линейным размером не менее 2 мкм. Заметим, что эту цифру нельзя рассматривать как максимальную точность определения положения некоторых характерных особенностей изображения криомишени – края, яркого кольца и других – она характеризует лишь возможность обнаружения мелких локальных дефектов

Исследования, проведенные с помощью прямого алгоритма показали, что дискретный характер изображения при корректной его обработке не является препятствием для весьма



Рис.1.2.4. Определение положения яркого кольца по тестовому изображению. Изогнутые кривые – первое определение, прямые – после пересчета положения центра.

точного восстановления интересующих нас параметров с помощью *BBP* алгоритма. Размер одного чувствительного элемента (пиксела) матрицы может составлять несколько микрон,

при этом точность восстановления может достигать долей микрона при условии отсутствия шумов (см. Рис.I.2.4).

Принципиальный фактор, ухудшающий точность восстановления реального изображения из его цифрового изображения – это шумы. Основным источником шумов служит тепловая генерация электронов в ячейках фотоприемной матрицы. Этот шум по природе своей является аддитивным Гауссовским шумом. Амплитуда шумовой составляющей на реальных изображениях может достигать 1÷5%, в этом случае шум существенно превышает шаг дискретизации.

На основании проведенного анализа можно сформулировать следующие требования к фотоприемной ПЗС матрице:

- размер матрицы не менее 1000х1000 пикселей
- размер чувствительного элемента несколько микрон
- желательно принудительное охлаждение матрицы с целью снижения шумов.

С точки зрения минимизации ошибки реконструкции изображения, следует также потребовать, чтобы пространственная и временная неоднородность зондирующего излучения не превышала уровня шумов фотоприемной ПЗС матрицы.

3.3. Ориентация зондирующего излучения по отношению к матрице фотоприемника

Оценим теперь, с какой точностью направление распространения зондирующего излучения должно совпадать с ориентацией ПЗС матрицы фотоприемника.

Для определения влияния угла α между осью осветителя и нормалью к плоскости фотоприемника на точность измерения параметров мишени с помощью программы *3D Ray Tracing*, были сгенерированы 6 изображений (по 50 миллионов лучей) идеальной двухслойной мишени ($a_1 = b_1 = c_1 = 1$, $a_2 = b_2 = c_2 = 0.94$, $a_3 = b_3 = c_3 = 0.84$, n0 = n3 = 1, n1 = 1.5, n2 = 1.14, апертура 30°), при малых значениях α (0°÷5°). После этого, используя программу *Shell Explorer*, для этих изображений были рассчитаны значения среднего радиуса и его неодно-



Рис.I.2.5. Зависимость среднего радиуса от угла между осями осветителя и фотоприемника



Рис.1.2.6. Зависимость неоднородности радиуса от угла между осями осветителя и фотоприемника

родность ($100 \cdot (R_{max}-R_{min})/(R_{max}+R_{min}))$ в процентах.

Из Рис.I.2.5 видно, что средний радиус слабо зависит от величины угла α, а его изменение лежит в пределах ошибки измерения. Этого и следовало ожидать, поскольку вычисление радиуса происходит путем усреднения большого количества значений. Зависимость неоднородности радиуса от угла между осями осветителя и фотоприемника выражено значительно сильнее (см. Рис.I.2.6).

Рис.I.2.7. иллюстрирует изменение симметрии изображения идеальной мишени при появлении угла между осью осветителя и нормалью к плоскости приемной матрицы.

С помощью программы *Bright Ring* было определено положение максимума яркого кольца для углов 0^0 , 1^0 , 2^0 . На Рис.I.2.8 заштрихованная зона соответствует точности 1 мкм при соотношении 1 пиксел ≈ 1 мкм (оболочка диаметром 1 мм, ПЗС матрица фотоприемника 1000Х1000 пикселей). Из этого рисунка видно, что, для обеспечения точности измерения не хуже 1 мкм, угол между осями осветителя и фотоприемника не должен превышать $\sim 0.8^0$.



Рис.1.2.7.. Появление асимметрии изображения идеальной мишени при внеосевом освещении. Для построения изображений мишени было использовано 10 млн. лучей. 1- осветитель, 2 - мишень



Рис. I.2.8. Зависимость положения яркого кольца от полярного угла для различных углов между осями осветителя и фотоприемника. 1- угол 0^0 , 2 – угол 1^0 , 3 – угол 2^0

§ 4. Технические требования к томографу

Проведенный анализ особенностей формирования теневого изображения микрообъектов ЛТС (микросфер и криогенных мишеней) позволяет сформулировать технические требования к системе диагностики, основанной на принципе томографии:

- 1. Система оптического наблюдения должна обеспечивать пространственное разрешение 1÷2 мкм в одной проекции
- Зондирующее излучение некогерентное, неполяризованное излучение видимого спектра (длина волны ~ 440-520 нм); коллимированный пучок с пространственной расходимостью не более 96 угл.мин
- 3. Диаметр светового пятна близок к диаметру исследуемого микрообъекта
- 4. Система наблюдения должна обеспечивать возможность изменения апертуры оптического наблюдения в пределах от 10^0 до 60^0
- 5. Основные требования к фотоприемной ПЗС матрице:
 - размер матрицы не менее 1000х1000 пикселей
 - размер чувствительного элемента несколько микрон
 - желательно принудительное охлаждение матрицы с целью снижения шумов
- Несоосность зондирующего излучения и нормали к плоскости фотоприемной матрицы не должна превышать 0.8°
- Пространственная и временная неоднородность зондирующего излучения не должна превышать уровень шумов фотоприемной матрицы
- При характеризации криогенного слоя, система сканирования должна обеспечивать вращение мишени внутри неподвижного криостата; положение источника и фотоприемника должно быть фиксировано
- 9. Важнейшими элементами томографа криогенных мишеней являются:

- томографическая тестовая камера (ТТК), конструкция которой одновременно отвечает как требованию высокого пространственного разрешения, так и требованию сохранения качества криогенного слоя в процессе характеризации
- микропозиционер, расположенный внутри ТТК, который позволяет получить набор теневых проекций и обеспечивает вращение мишени внутри неподвижного криостата.

Глава 3. Оптимизация условий формирования проекционной базы данных диагностического комплекса для томографии мишеней

В соответствии с техническими требованиями, сформулированными выше, в ФИАН, совместно с ФГУП «Красная Звезда», был создан диагностический комплекс для томографии микрообъектов ЛТС. Комплекс включает томографы *Shell Tester* и *FST Tester* в комплекте со специально разработанным программным обеспечением *Target Studio*.

Томограф *Shell Tester* предназначен для характеризации микросфер, пневматически укрепленных на капилляре. Температура оболочки в процессе томографии – комнатная (300 К). Принципиальная схема и общий вид установки показан на Рис.I.3.1 (а).

Томограф *FST Tester* предназначен для диагностики не закрепленных микросфер и криогенных мишеней. Система сканирования работает с микрообъектом, находящимся при комнатной (300 K) или криогенной (77÷4.2 K) температурах. Общий вид установки показан на Рис.I.3.1 (б).

Краткое описание и технические характеристики основных элементов диагностического комплекса даны в Главе 4.

Испытания показали, что созданный комплекс обладает уникальными операционными парметрами, в том числе:

- Температура микрообъекта

- Длина волны зондирующего излучения

комнатная; криогенная (77÷4.2К) 475±15 нм; 490±7 нм



Puc.I.3.1. Диагностический комплекс для прецизионной характеризации параметров микрообъектов лазерного термоядерного синтеза методами томографии

(a) Томограф Shell Tester для работы с закрепленными оболочками при 300 К

(б) Томограф FST Tester для работы с не закрепленными (свободными) оболочками и криогенными мишенями; температура микрообъекта в процессе сканирования: комнатная (300 K) или криогенная (4.2÷77 K)

-	Полный угол сканирования микрообъекта	360°
-	Точность позиционирования микрообъекта	± (1.5÷2.5) мин
-	Текущее число проекций, максимум	100
-	Пространственное разрешение оптической системы в 1-ой проекции	1÷1.5 мкм
-	Диаметр исследуемого микрообъекта	1÷1.5 мм

Отличительной особенностью установки является возможность оптимизации условий формирования теневого изображения микрообъекта за счет изменения, в широком диапазоне значений, следующих параметров: апертура оптической системы, угловая расходимость источника излучения, интенсивность сканирующего излучения, положение предметной плоскости относительно микрообъекта и пр.

Ниже приведены результаты оптимизации условий формирования проекционной базы данных для последующей реконструкции параметров микрообъекта (оболочки) по *BBP* алгоритму с помощью специально разработанного ПО *Target Studio*.

§ 1. Положение плоскости наблюдения: метод настройки на экваториальную плоскость оболочки с целью снижения систематической ошибки при наборе проекций

В процессе сканирования неизбежно перемещение оболочки относительно элементов оптической системы, вызванное неидеальностью изготовления устройств позиционирования, а также смещением оптических элементов вследствие случайных факторов (колебания температуры, вибрации)

Сдвиг в направлении, перпендикулярном оптической оси, приводит к «выходу» оболочки за пределы поля зрения. Эти перемещения могут быть легко скомпенсированы смещением приемного блока излучения при визуальном контроле положения оболочки с помощью навесной телескопической вставки (см. Глава 4, п.2.6).

Сдвиг оболочки вдоль оптической оси приводит к ее смещению относительно плоскости наблюдения. В этом случае, положение яркого кольца на изображении оболочки изменяется.

На Рис.I.3.2 приведен набор изображений, смоделированных с помощью программы 3D Ray Tracing для различных положений экваториальной плоскости оболочки относительно плоскости наблюдения.

На графике (Рис.I.3.3) приведена зависимость положения максимума яркого кольца от положения плоскости наблюдения для различных апертур. Расчеты показали, что смещение плоскости наблюдения на $\pm 0,05$ долей от радиуса микрообъекта приводит к изменению положения яркого кольца на $\pm 0,0015$ долей радиуса. Иными словами, при пересчете на мишень диаметра 1.5 мм, смещение плоскости наблюдения на 45 мкм приводит к ошибке в определении положения внутренней поверхности мишени на ~ 1 мкм.



Изображения двухслойной оболочки (микросфера и сферический криослой) с параметрами $R_1 = 0.95$ (внешний радиус микросферы), $R_2 = 0.8$ (внутренний радиус микросферы), $n_0 = I$, $n_1 = I.5$, $n_2 = I.14$, $n_3 = I$ для различных апертур и положений плоскости наблюдения осуществлено с помощью разработанной в проекте компьютерной программы 3D Ray Tracing. Для синтеза каждого изображения использовалось 10⁸ входных лучей.

44



Рис. I.3.3. Зависимость положения максимума яркого кольца от положения плоскости наблюдения для различных апертур наблюдения (показатель преломления оболочки $n_1=1.5$, показатель преломления криослоя $n_2 = 1.14$)



Рис.I.3.4. Интерфейсное окно программы Sharp Edge а) зона исследования - край микросферы, б) информационные окна: верхнее – текущее значение градиента интенсивности, среднее – предыдущее значение градиента интенсивности, нижнее – максимальное значение градиента за все измерения.

Зона, отмеченная на графике прямоугольником представляет собой область, где положение яркого кольца является функцией формы и физических свойств слоев оболочки. Интенсивность яркого кольца максимальна именно в точке, где кривые на Рис.I.3.3 имеют максимум. Вне этой зоны интенсивность кольца резко уменьшается, а его ширина - увеличивается. Кольцо становится размытым, что значительно усложняет последующую обработку изображения и снижает точность определения положения яркого кольца. Таким образом, точность настройки оптической системы на экваториальную плоскость оболочки существенно определяет точность реконструкции параметров оболочки по набору ее теневых проекций.

Для обеспечения точной настройки была развита методика юстировки по внешней границе микрообъекта, которая основана на анализе градиента интенсивности в небольшой части изображения, включающей в себя край оболочки. Для реализации данной методики авторами была разработана специальная программа *Sharp Edge*. Программа позволяет проводить настройку по числовому критерию – значению функции градиента интенсивности вблизи края объекта, как показано на Puc.I.3.4(а). Алгоритм расчета основан на преобразовании Собеля. Настройка оптической системы осуществляется в реальном времени: оператор ищет положение с максимальным значением градиента интенсивности, руководствуясь показаниями рабочего окна программы *Sharp Edge* (Puc.I.3.4,б). Для исключения влияния случайных шумовых выбросов предусмотрен интегральный режим расчета максимального значения градиента.

Практическое применение данной методики показало, что стабильность получаемых результатов значительно выше, чем при визуальной настройке.

§ 2. Оптимизация апертуры наблюдения

Исследование влияния апертуры наблюдения на качество теневого изображения было предварительно проанализировано на синтезированных изображениях криогенной мишени (см. Рис.I.2.3). Сравнительный анализ изображений показал необходимость выбора оптимальной апертуры для каждого конкретного микрообъекта.

Дальнейшие иследования были проведены с реальными однослойными оболочками. Апертура наблюдения оптической системы варьировалась в диапазоне от A = 0.039 ($2\sigma = 4.4^{\circ}$) до A = 0.5 ($2\sigma = 60^{\circ}$).

На Рис.I.3.5 показаны теневые изображения и соответствующие профили интенсивности, полученные для реальной оболочки при различных апертурах. Как видно из рисунка, при апертуре более 30° в районе внешней границы микрообъекта появляется сильный всплеск интенсивности. Этот эффект, обусловленный отражением излучения от внешней поверхности оболочки, усложняет компьютерную обработку изображения, в частности, определение положения его внешней границы.

При апертурах менее 15° яркость внутреннего кольца становится слишком малой, что затрудняет компьютерную обработку изображения и вносит дополнительную погрешность в результаты реконструкции.

Таким образом, оптимальная апертура наблюдения лежит в диапазоне ~15÷30° и должна выбираться для каждого конкретного микрообъекта отдельно.



Рис.1.3.5. Эволюция интенсивности яркого кольца при изменении апертуры наблюдения. Параметры мишени: диаметр 1425 мкм, толщина стенки 22 мкм, материал стенки – полистирол.

§ 3. Результаты реконструкции оболочки из полистирола по большому числу проекций с помощью ПО *Target Studio*

Поскольку созданный диагностический комплекс не имеет аналогов в мире, важнейшей задачей явилось доказательство надежности его работы и соответствия результатов реконструкции необходимой точности измерения. Тестовые испытания включали два этапа: основной и демонстрационный. Получены следующие результаты.

1. Основной этап: томография одной и той же оболочки на двух различных томографах (*Shell Tester* и *FST Tester*) при обработке большого числа проекций (более 80).

На этом этапе тестирования были созданы два набора теневых проекций одной и той же оболочки: одна - при использовании системы сканирования томографа *Shell Tester* и другая - на системе сканирования томографа *FST Tester*. Базы проекционных данных были сформированы при следующих условиях наблюдения:

- FST Tester

0	апертурное число объектива микроскопа	A=0.09,
0	число проекций	N=81,
0	апертура осветителя	2δ=0.094,
0	дифракционный предел	1,012 мкм

- настройка положения предметной плоскости по критерию максимальной интенсивности яркого кольца
- Shell Tester

0 8	апертурное число ооъектива микроскопа	A=0.098,
0 1	число проекций	N=90,
0 8	апертура осветителя	2δ≥0.1,
0,	цифракционный предел	1.553 мкм
0 I	настройка положения предметной плоскост	и по критерию максимальной ин-

тенсивности яркого кольца

Параметр оболочки		Ед.	Результат		
			FST Tester	Shell Tester	Расхождение
Внешний ради-	Средний	МКМ	712.4	713.5	1.1
yc	Минимальный	МКМ	710.3	710.8	0.5
	Максимальный	МКМ	716.7	716.3	0.4
	Несферичность	%	0.4	0.4	0.0
Внутренний	Средний	МКМ	690.9	690.3	0.6
радиус	Минимальный	МКМ	687.3	684.8	2.5
	Максимальный	МКМ	694.1	695.8	1.7
	Несферичность	%	0.5	0.8	0.3
	Средняя толщина	МКМ	21.5	23.3	1.8
Стенка	Минимальная	МКМ	17.7	17.2	0.5
	Максимальная	МКМ	25.6	28.1	2.5
	Разнотолщинность	%	19.0	24.5	5.5

Таблица 1.3.1. Результат реконструкции параметров оболочки при использовании томографов

Полученные базы данных были обработаны с помощью компьютерной программы *Target Studio*. Параметры обработки (предварительная фильтрация, критерии порога определения контура, интерполяционный диапазон и т.д.), после их определения для первой проек-

ции, оставались неизменными для всего последующего набора проекций. Результаты реконструкции оболочки по набору проекций даны в Таблице I.3.1. На Рис. I.3.6 и I.3.7 приведены образцы исходных теневых изображений и 3-х мерная визуализация результатов реконструкции.

Как видно из Таблицы I.3.1, параметры реконструкции оболочки, полученные на различных томографах (*Shell Tester* и *FST Tester*) совпадают с точностью до ошибки измерения, т.е. с точностью до дифракционного предела, заданного режимом формирования изображений.

2. Демонстрационный этап: измерение параметров оболочки в 1-2 проекциях с помощью какого-либо традиционного метода и сравнение этих результатов с данными томографии. В качестве примера, на Рис.I.3.8 показаны изображения одной и той же полистироловой оболочки, полученные различными способами: на томографе *Shell Tester*, интерферометре Жамена, рентгеновском микроскопе МИР-3, а также изображение оболочки, находящейся в иммерсионной жидкости (глицерин). На втором этапе были проведены следующие измерения:



Рис. I.3.6. Реконструкция полистироловой оболочки с использованием базы данных (90 теневых проекций), сформированной на томографе Shell Tester. Реконструкция проведена с помощью ПО Target Studio. Параметры реконструкции см. Таблицу 4. (1) Теневая проекция оболочки, (2) Внешняя поверхность оболочки (реконструкция), (3) Фурье-спектр яркого кольца, (4) Внутренняя поверхность оболочки (реконструкция)



Рис. I.3.7. Реконструкция полистироловой оболочки с использованием базы данных (90 теневых проекций), сформированных на томографе FST Tester. Реконструкция проведена с помощью ПО Target Studio. Параметры реконструкции см. Таблицу 4. (1) Теневая проекция оболочки, (2) Внешняя поверхность оболочки (реконструкция), (3) Фурье-спектр яркого кольца, (4) Внутренняя поверхность оболочки (реконструкция)



Рис.I.3.8. Изображения оболочки, полученные на (а) томографе Shell Tester, (б) интерферометре Жамена и (в) рентгеновском микроскопе МИР-3; (г) изображение оболочки, находящейся в иммерсионной жидко-

Измерения толщины стенки оболочки по ее интерферограмме, полученной с помощью интерферометра Жамена.

Толщина оболочки определялась как среднее арифметическое измерений по пяти парам интерференционных колец на изображении, согласно формуле:

$$d = \lambda/2 \left[(n^2 - x_2^2)^{1/2} - (n^2 - x_1^2)^{1/2} - (1 - x_2^2)^{1/2} + (1 - x_1^2)^{1/2} \right]^{-1}$$

где x_1 и x_2 – диаметры соседних интерференционных колец, причем x_2 - диаметр большего кольца, x_1 - диаметр меньшего кольца.

Измерение толщины стенки оболочки, помещенной в иммерсионную жидкость.

Измерения проводились для 8 радиальных сечений, равномерно распределенных по периметру теневого изображения оболочки, находящейся в иммерсионной жидкости. В качестве иммерсионной жидкости использовался глицерин, инертный по отношению к материалу микрообъекта. Показатель преломления глицерина в области видимого спектра составляет n = 1.47, что достаточно близко к показателю преломления полистирола (n = 1.58).

• Измерение внешнего диаметра и толщины оболочки с помощью коммерческого металлографического микроскопа ИМЦЛ 100х50.

Измерение внешнего диаметра оболочек выполнялось для 30-ти проекций. В каждой проекции измерения проводились в 5-ти несовпадающих направлениях.

Измерения фиксировались по стандартному цифровому отсчетному устройству УЦО-201С с дискретностью измерения 0.2 мкм. С целью увеличения пространственного разрешения использовался 10-ти кратный объектив с числовой апертурой 0.2. Предел погрешности отсчетного устройства на длине 1500 мкм составлял ±0.5 мкм.

Измерения, проведенные на 2-м этапе тестирования, показали следующее:

- Значение внешнего радиуса оболочки, мкм

	Среднее	711.9
	Минимальное	710.0
	Максимальное	714,2
-	Несферичность внешней поверхности, %	0.29
-	Толщина стенки (средняя по 5 измерениям), мкм	
	по интерферограмме	22.0±2.5
	оболочка в иммерсионной жидкости	20.8±0.8

Таким образом, результаты демонстрационных измерений, в пределах погрешности, совпали с результатами томографии (ср. с данными Таблицы I.3.1).

<u>Резюме</u>

Итак, тестирование показало, что созданный диагностический комплекс позволяет проводить методом томографии достоверную и высокоточную характеризацию параметров микрообъектов ЛТС, таких как прозрачные сферические оболочки и криогенные мишени. В результате тестирования прототипа томографа, впервые осуществлена 3-х мерная реконструкция внутренней поверхности прозрачных полистироловых оболочек по большому числу теневых проекций (от 80 до 90), полученных в видимом спектральном диапазоне. Причем, осуществлена томография как оболочек, укрепленных на подвесе, так и свободных (не закрепленных) оболочек. Точность реконструкции параметров оболочек диаметром 1 мм составляет: для томографа *Shell Tester* ~1.5 мкм, для томографа *FST Tester* ~1 мкм.

Глава 4. Описание и технические характеристики основных элементов диагностического комплекса

§ 1. Томограф Shell Tester: диагностика мишени, укрепленной на подвесе.

Томограф *Shell Tester* предназначен для характеризации полых сферических прозрачных оболочек, пневматически укрепленных на стеклянном капилляре и находящихся при комнатной температуре. После осуществления диагностики параметров оболочки, она может быть использована для подготовки криогенной мишени (заполнение топливным газом, формирование криогенного слоя).

Общий вид томографа показан на Рис.І.З.1,а. Ниже дано описание основных элементов установки.

1.1 Система оптического наблюдения

Система оптического наблюдения построена на базе промышленного микроскопа ИМЦЛ 100х50. Технические характеристики микроскопа:

- диапазон перемещений координатного стола, мм:
 - в продольном направлении 0÷100
 - в поперечном направлении 0÷50
- линейное поле микроскопа 21, 7, 4.2 и 2.1 мм для линейки объективов x1, x3, x5, x10 крат, соответственно
- предел погрешности измерений, при использовании цифрового отсчетного устройства (на базе 100 мм), мкм: ±3

В микроскопе используется несерийный оптоволоконный осветитель OBC-1 с широкополосным тепловым источником излучения (лампа накаливания с цветовой температурой 2500÷3000 К) и конденсором. Питание осветителя осуществляется от сети переменного тока через стабилизирующий трансформатор. Для формирования рабочего спектрального диапазона зондирующего излучения применяется специально изготовленный полосовой светофильтр с максимумом пропускания при длине волны λ =490 нм и добротностью $\lambda_0/\delta\lambda$ =70.

Пространственная нестабильность освещённости в рабочем поле составляет ~6%, что определяется, в основном, характеристиками конденсора микроскопа. Временная нестабильность излучения в несколько раз меньше уровня собственных шумов приемника излучения.

В качестве приемника излучения используется одна из 2-х различных ПЗС-камер производства фирмы *Photometrics: Cool Snap* или *Sen Sys 3200*. Технические характеристики камер приведены в Таблице I.4.1.

ПЗС камера SenSys имеет большее число активных элементов, чем камера Cool Snap, что позволяет в ~1,5 раза увеличить поле зрения в предметной плоскости. Кроме того, ПЗС матрица Kodak KAE3200E, используемая в камере SenSys, позволяет получить изображение более высокого качества за счет ~3-х кратного снижения шумов оцифровки.

Параметры/тип камеры	Cool Snap	Sen Sys 3200
Тип ПЗС матрицы	Sony ICX285	Kodak KAE3200E
Формат матрицы:		
- число пикселей	1392 x 1040	2184 x 1472
- размер пиксела (мкм)	6,45 x 6,45	6,8 x 6,8
- размер светочувствительной области (мм)	8,77 x 6,6	14,8 x 10,0
Нелинейность	< 1%	$\leq 0,5\%$
Термостабилизация	есть	есть
Темновой ток	$1 e^{-1}/p/s$	$0,5 e^{-1}/p/s$

Таблица І.4.1. Технические характеристики ПЗС камер

Исследование пространственного разрешения оптической системы проводилось при использовании тест-объектов двух типов:

- стандартная МИРА с расстоянием между линиями 25-ого поля, равным 5 мкм
- микросхема УФ-памяти, выполненная по микронной технологии с характерным расстоянием между элементами (дорожками) ~1.5 мкм.

Анализ полученных изображений показал, что предельное разрешение оптической системы микроскопа находится на уровне 1.2 мкм (для объектива 10х). При этом контрастность изображения составляет 10-12%.

Целью характеризации оболочки является получение с высокой точностью параметров ее внешней и внутренней поверхности, а также разнотолщинности стенки исходя из набора теневых проекций (изображений). Для определения абсолютных значений этих параметров необходима информация о коэффициенте пересчета К, который определяется как отношение размера объекта в мкм к размеру его изображения в пикселах (или pix). Для определения коэффициента пересчета использовалась калибровочная шкала с шагом сетки 0.01мм и полем 1мм (набор ГОСТ7513-55 ОМП №650286). Искомый коэффициент пересчёта координат для объектива микроскопа с 3^х-кратным увеличением составил К=1.5525 мкм/пиксел ±0.01%. Среднеквадратичное отклонение размера калибровочной шкалы составило ±0.054 пиксел.

1.2 Устройство позиционирования оболочки

Схема и общий вид устройства углового позиционирования показана на Рис.I.4.1. Вращение мишени осуществляется относительно горизонтальной оси. В качестве опоры используется капилляр (13), на котором мишень удерживается пневматически, за счет вакуумной откачки внутреннего объема капилляра через штуцер (18). Диаметр острия капилляра составляет от 40 до 100 мкм. Для предотвращения повреждений внешней поверхности мишени, торцы острия оплавляются.

Особенностью конструкции является возможность совмещения оси вращения оболочки и ее центра при помощи микрометрических винтов (19). Угловой отсчет положения оболочки осуществляется по круговой шкале (8) и нониусной линейке (15).

Для контроля поверхности мишени в полярных зонах, расположенных на оси вращения, предусмотрен поворот всего устройства углового позиционирования относительно оси винта (2). Это позволяет проводить сканирование мишени в плоскости, расположенной под углами 10, 20, 30 градусов относительно горизонта. Вращение мишени происходит равномерно при полном угле сканирования, равном 360⁰.



Рис.І.4.1. Устройство позиционирования микрообъекта в томографе Shell Tester

(а) общий вид, (б) схема, (в) серия проекций оболочки из полистирола (внешний радиус 1676 мкм; толщина стенки 43 мкм; диаметр стеклянного капилляра 44 мкм); условия сканирования: число проекций 100, угловой шаг 3.6⁰±1.5′. 1 - стойка; 2 - винт; 3 – кольцо; 4 – опора шаровая; 5 – фланец; 6 – втулка; 7 – кронштейн; 8 – лимб; 9 – чашка; 10 – магнит; 11 – трубка; 12 – втулка; 13 – капилляр; 14 – чашка; 15 – линейка; 16 – стопор; 17 – сектор; 18 – штуцер; 19 – винт микрометрический.

54

Технические параметры устройства позиционирования:

1. Линейные перемещения оболочки	
- вдоль оси капилляра, мм	100
- в вертикальном направлении, мм	50
- точность перемещения, мкм	1
2. Угловые перемещения оболочки	
- относительно оси капилляра, градус	± 180
- наклон относительно оси вращения, градус	$\pm 10, \pm 20, \pm 30$
3. Точность определения угла поворота, мин	± 1.5
4. Число шагов при повороте на 360 ⁰ , максимум	1000
5. Диаметр мишени, мкм	< 2000
6. Диаметр острия капилляра, мкм	40÷400

§ 2. Томограф FST Tester: диагностика незакрепленной мишени

Томограф *FST Tester* предназначен для диагностики не закрепленных криогенных мишеней, находящихся при температурах 20÷4.2 К. При необходимости на этом томографе также может быть выполнена диагностика незакрепленных полых оболочек (при 300К или 77 - 4.2К)

Элементный состав томографа и его оптическая схема показаны на Рис.I.4.2 (a,б), общий вид установки показан на Рис.I.3.1(б). Все элементы размещаются на стандартном антивибрационном оптическом столе *Standa 1VIS95W* с пневматической подвеской, который обеспечивает эффективное «гашение» высокочастотных резонанасных колебаний вплоть до частот 1 Гц. Ниже дано описание основных элементов установки.

2.1.Источник излучения (осветитель).

В качестве источника излучения в осветителе используется узкополосный светодиод У-266С (поз.1 на Рис.I.4.2). На выходе светодиода используется диффузно-рассеивающее матовое стекло (поз.2 на Рис.I.4.2), которое улучшает пространственную равномерность излучения.

Технические характеристики светодиода:

- мощность излучения	30÷45 мВт
- сила света	4÷6 кд
- спектральный диапазон (макс. интенсивности излучения)	465÷475 нм
- расходимости излучения (по половинному углу)	40±5°
 номинальный / максимальный прямой ток 	350 / 400 мА.

Для питания светодиода используется лабораторный блок питания Б5-45А, обеспечивающий стабильность выходного тока на уровне ±0.1%.

Полевая диафрагма (поз.3 на Рис.I.4.2,а) определяет величину расходимости и мощности излучения на выходе источника излучения (осветителя). С целью уменьшения потерь





Рис.I.4.2. Томограф FST Tester : (а) схема сборки основных элементов в изометрии, (б) оптическая схема. 1- источник излучения, 2 - матовое стекло, 3 - полевая ирисовая диафрагма \emptyset 0-12 мм, 4 - блендовые диафрагмы, 5 - томографическая тестовая камера, 6 – защитные окна криостата, 7 – микрообъект (криогенная мишень) на устройстве позиционирования, 8 - микрообъектив -6.5^X, A=0.5, 9 - апертурная ирисовая диафрагма \emptyset 5÷75 мм, 10 - блендовые диафрагмы, 11-ПЗС камера, 12 - навесная вставка.

интенсивности излучения, светодиод, матовое стекло и полевая диафрагма расположены на минимально допустимых расстояниях друг от друга. Все элементы смонтированы в одном корпусе, который размещен на юстировочном столе.

Исследования интенсивности и равномерности освещения проводились после юстировки положения осветителя относительно микрообъектива. В процессе юстировки проводилось фотографирование предметного поля ПЗС камерой с временем экспозиции 0.01 сек. Поскольку в рабочих режимах длительность экспозиции может достигать 1-2 сек, запас по времени экспозиции (освещенности микрообъекта) составляет 1-2 порядка.

Для проверки равномерности освещения было проведено исследование освещенности предметного поля для 3-х различных положений ПЗС матрицы (поворот матрицы в плоскости, перпендикулярной оптической оси на 0^0 , +90°, +180°). При этом, изображение источника излучения проецировалось через микрообъектив в центр апертурной диафрагмы, а центр светового поля совпадал с центром входной линзы микрообъектива.

Анализ полученных изображений показал:

- абсолютная неравномерность интенсивности (по диагональным сечениям) составляет примерно 20 единиц амплитуды АЦП, что соответствует относительной неравномерности ±0.4% при среднем уровне освещенности 3930 единиц АЦП
- неравномерность освещенности является следствием неравномерной чувствительности элементов ПЗС матрицы, т.к. при изменении положения камеры картина неравномерности не изменялась по отношению к координатам матрицы.

Полученные результаты продемонстрировали, что качество источника излучения удовлетворяет техническим требованиям. Неравномерность освещения находится на уровне собственных шумов ПЗС матрицы и может не учитываться при использовании *BBP* алгоритма реконструкции.

Технические параметры источника излучения:

- источник излучения	голубой светодиод У-266С
- диаметр ирисовой диафрагмы, мм.	0÷12
- расстояние от диафрагмы до мишени, мм.	280
- рабочее поле в плоскости мишени, мм.	1.5÷2.0
- равномерность по рабочему полю, %	±0.4%
- диапазон регулировок расходимости излучения	
2δ на мишени Ø1мм, градусы	0.1÷ 1.3

2.2. Тестовая томографическая камера

Тестовая томографическая камера (ТТК) предназначена для проведения оптических исследований микрообъекта (оболочек или криогенных мишеней) в режиме сканирования. Для этого внутри камеры устанавливается специальное устройство динамического позиционирования микрообъекта, с помощью которого осуществляется вращение объекта в процессе сканирования. Камера монтируется в нижней части стандартного криостата KG-20 и обеспечивает апертурный угол наблюдения 63^0 (максимум) при расстоянии от микрообъекта до внешней поверхности микрообъектива ~ 54 мм.





Puc.I.4.3 Томографическая тестовая камера (TTK) (a) гелиевая камера TTK, (б) общий вид TTK; (в) TTK в сборе с криостатом КГ-20; (г) схема размещения устройства позиционирования типа VII-1 внутри TTK; 1- канал загрузки мишеней, 2- УП-1, 3- гелиевая камера (4.2-20 K), 4- азотный экран (77 K), 5 – фланец крепления подвиж-ного окна, 6 – внешний корпус (300 K), 7- змеевик гелиевого теплообменника

Габариты внутреннего объема ТТК составляют 7х5х8 см. Общий вид ТТК и схема размещения внутри нее усройства позиционирования показаны на Рис.I.4.3.

Внутренняя часть ТТК представляет собой гелиевую камеру (ГК), которая прикреплена к шахте криостата. Стенки ГК охлаждаются гелием, проходящим по теплообменнику в виде змеевика. На двух противоположных боковых стенках камеры находятся оптические окна. Снизу ГК герметично закрыта съемным фланцем, на котором размещается устройство позиционирования (УП) микрообъекта, а также герметичный электроввод для подключение питания шагового двигателя УП и вывода данных с датчиков температуры. ГК окружена азотным экраном, снижающим теплопритоки излучения от внешнего корпуса, который находится при комнатной температуре. В экране имеются два окна, соосные с окнами ГК.

Снаружи азотного экрана размещен внешний корпус ТТК, являющийся продолжением корпуса криостата. В корпусе имеются два окна, соосные с окнами ГК и азотного экрана. Одно из окон установлено неподвижно, крепление второго окна (со стороны объектива) выполнено с помощью подвижного элемента-мембраны и позволяет проводить юстировку для обеспечения плоскопараллельности окон.

ТТК позволяет изучать микрообъект при температурах 77÷4.2 К, а также при комнатной температуре (без заливки в криостат хладоагентов). Для контроля температуры на поверхности гелиевой камеры размещены два полупроводниковых термометра *DT-470*.

Тестирование ТТК при комнатных и криогенных температурах подтвердило соответствие параметров камеры техническим требованиям.

2.3. Устройство динамического позиционирования микрообъекта

Устройство динамического позиционирования (УП) является одним из ключевых элементов системы сканирования томографа *FST Tester*. Данное устройство размещается внутри томографической тестовой камеры криостата и потому должно быть достаточно миниатюрным (вписываться в габариты внутреннего объема ТТК: 7x5x8см) и обеспечивать динамический режим получения необходимых проекций при работе с незакрепленной оболочкой и криогенной мишенью, в том числе при криогенных температурах.

Уникальные требования, налагаемые на УП, потребовали разработки оригинального устройства, которое и было создано в трех различных модификациях. Ниже дано описание и технические характристики соответствующих устройств.

2.3.1. Устройство УП-1 с постоянной вертикальной осью вращения

Принципиальная схема и общий вид УП-1 показаны на Рис.I.4.4(a,б), а схема его размещения внутри ТТК на Рис.I.4.3(г). Особенности работы устройства следующие.

Свободная криогенная мишень или полая оболочка, через канал загрузки мишеней (Рис.I.4.4(а) поз.4), подается из криогенного канала в конусное гнездо опорного вала. В процессе сканирования, мишень вращается вместе с валом относительно вертикальной оси. В качестве привода вращения используется стандартный реверсивный шаговый двигатель ДШP20-18-00 (минимальный угловой шаг 18°, систематическая погрешность шага ±5%). Двигатель закреплен в нижнем фланце ТТК. Передача вращения от двигателя к опорному валу осуществляется через понижающий редуктор с коэффициентом редукции 72. На Рис.I.4.4 (в) показан ряд проекций полистироловой оболочки, полученных при вращении УП-1.

Достоинством УП-1 является простота и надежность конструкции, недостатком - наличие 2-х «теневых» зон на поверхности микрообъекта, что является следствием его вращения относительно неизменной вертикальной оси.

Рабочие характеристики УП-1 позволяют реализовать следующие условия сканирования мишени (вне зависимости от ее диаметра):

2.5

1.6

- Полный угол сканирования, град
 360
- Максимальное число проекций
 144
- Дискретность шага, град
- Точность позиционирования, минут





Рис. І.4.4. Устройство позиционирования типа УП-1.

(а) принципиальная схема конструкции устройства с детализацией положения мишени на опорном конусе: 1- криогенная мишень или оболочка, 2- вал, 3- устройство загрузки мишени, 4- редуктор, 5шаговый двигатель. (б) общий вид УП-1, смонтированного на фланце крепления в ТТК, (в) примеры теневых изображений.

2.3.2. Устройство УП-2 с переменной осью вращения мишени

В варианте УП-2 мишень вращается как относительно излучения, так и относительно опорного вала. Это дает принципиальную возможность исключить теневые зоны при сканировании мишеней за счет изменения оси вращения.

Принципиальная схема и общий вид позиционера показаны на Рис. I.4.5(a, б). В процессе работы, бесподвесная мишень (поз.1), через канал загрузки мишеней, подается на вал (поз.3) и фиксируется в плоскости сканирования с помощью стеклянной пластиныограничителя (поз.2). Перемещения мишени вдоль оси опорного вала ограничены канавкой (поз.7), прорезанной по периметру цилиндрической поверхности. При вращении вала происходит перемещение мишени вдоль канавки за счет наличия сил трения качения между мишенью и поверхностью вала.

Для изменения оси вращения мишени, в канавке вала предусмотрен поворотный участок, пройдя который мишень начинает вращаться вокруг новой оси, развернутой на 90° относительно первоначальной, как это показано на Рис. І.4.5, в (в развертке на плоскость). На участке I мишень вращается вокруг оси, параллельной оси вала. Начиная с точки Б и до точки Г мишень вращается вокруг новой оси, составляющей с первоначальной осью угол 45°. В точке Г опять происходит изменение направления оси вращения на 45°. В итоге, на участке III ось вращения мишени оказывается перпендикулярной к первоначальной оси. Таким образом, зоны мишени, бывшие на участке I "полярными", на участке III становятся "экваториальными". Таким образом удается избежать темновых зон на поверхности мишени при ее сканировании (см. Рис. І.4.5, г). После завершения сканирования, мишень легко удаляется с помощью специальной лунки (поз.5 на Рис. І.4.5,а). Отработанная мишень проваливается в лунку, освобождая место для следующей мишени.

В качестве привода вращения используется тот же шаговый двигатель и тот же блок управления, что и в модели УП-1. Передача вращения от двигателя к опорному валу осуществляется через редуктор червячного типа с коэффициентом редукции 720.

Тестирование УП-2 при комнатных и криогенных (77÷4.2К) температурах подтвердило соответствие устройства техническим требованиям.

Рабочие характеристики УП-2 позволяют реализовать следующие условия сканирования мишени (для мишени диаметра 1500 мкм):

- Полный угол сканирования, градус 360 (для 1-го направления сканирования)
- Максимальное число проекций
- Дискретность шага, градус 1.3
- Точность позиционирования, мин 4

2.3.3.Устройство *R&B cell* со случайным углом поворота

Общий вид устройства $R\&B \ cell$ (аббревиатура от rotating and bouncing cell) показано на Рис.І.4.6. Устройство представляет собой вакуумную оптическую камеру, внутри которой размещен пьезо-кристалл в виде пластины с закрепленными концами. Режим перемещения свободной оболочки или криогенной мишени относительно поверхности кристалла реализуется при подаче на него тока заданной амплитуды и частоты.

- 270 (для 1-й оси вращения)









(а) принципиальная схема УП-2, (б) общий вид УП-2; (в) схема движения оболочки с изменением оси вращения в направляющей канавке УП-2; (г) движение реальной оболочки в УП-2 с изменением оси вращения. 1– мишень, 2 – стеклянная пластинка, 3 – опорный вал, 4 – объектив микроскопа, 5 – выемка для удаления мишени, 6 – подсветка, 7 – направляющая канавка



Рис.І.4.6. Устройство R&B cell

(a) принципиальная схема устройства, (б) исследовательская гелиевая камера в сборе с R&B cell, (в) оболочка в режиме подскока на пьезо-кристалле, (г) – оболочка в режиме вращения. 1- трубка загрузки криогенной мишени, 2- камера, 3- оболочка, 4- пьезокристалл



Рис.I.4.7. Амплитуда перемещения (А) оболочки диаметром 2мм в устройстве R&B cell в зависимости от частоты управляющего импульса. (A=h/2R, где h- высота подъема мишени, R-радиус оболочки)



Рис. I.4.8. Пошаговое вращение мишени: реализовано с помощью пьезо-кристалла с закрепленными краями. Использована полистироловая оболочка диаметра 1.8 мм, содержащая «пятна» твердого D₂. Температура мишени и пьезо кристалла 6 К, амплитуда входного сигнала 75 В, частота 10.4 кГц

Управление питанием *R&B cell* осуществляется стандартным много-функциональным генератором *Г6-34*, обеспечивающим работу с импульсами прямоугольной формы в диапазоне напряжений $0.5 \div 75$ В и диапазоне частот $10^{-3} \div 10^{6}$ Гц.

Тестирование устройства при криогенных температурах (4.2÷77К) продемонстрировало возможность, в зависимости от выбора частоты вибрации пьезокристалла, измененять амплитуду перемещения мишени относительно подложки в широких пределах: от вращения с минимальной угловой скоростью до «подскоков» мишени относительно подложки на высоту от 2-х до10-ти диаметров мишени. На Рис.I.4.7 показана зависимость амплитуды перемещения мишени от частоты управляющего импульса, полученная при T = 4.2 К. На Рис.I.4.8 показано пошаговое вращение мишени при частоте входного сигнала 10.4 кГц (T = 6 К).

2.4. Микрообъектив

Микрообъектив обеспечивает формирование изображения микрообъекта на ПЗС матрице. Требования, предъявляемые к микрообъективу (разрешение ~ 1 мкм, значительный передний отрезок ~ 55 мм при высокой угловой апертуре ~ 60^{0}) потребовали создания оригинального устройства. Общий вид устройства показан на Рис.I.4.9.

Микрообъектив рассчитан для рабочей длины волны 490±7мкм. В процессе изготовления проводилась коррекция его конструкции, выполненная с учетом характеристик используемого стекла (бесцветное оптическое стекло марки К-8).

Для проверки разрешающей способности микрообъектива была разработана специальная методика тестирования.



(a)

۲



Рис.І.4.9. Высокоразрешающий микрообъектив. (а) сборочный чертеж, (б) общий вид



Рис.I.4.10. Оптическая схема для проверки разрешающей способности объектива. 1-осветительная система; 2-светофильтр λ≈0.49мкм; 3-тест-объект; 4-проекционный объектив увеличение β= -40, апертура A=0.65; 5-тестируемый микрообъектив; 6-микроскоп, увеличение ~100^x.

Определение разрешающей способности производилось путём наблюдения изображения штриховой миры, используемой в качестве тест-объекта. В соответствии со схемой тестирования (см. Рис.I.4.10), проекционный объектив (4) создаёт изображение тест объекта (3), уменьшенное в 40 раз. Это изображение передаётся через микрообъектив (5) в его плоскость изображения с увеличением 6.5 крат. Конечное изображение рассматривается наблюдателем через микроскоп (6) с увеличением около 100 крат.

Из 2-х изготовленных микрообъективов 6Х0,5, тестирование позволило выбрать наилучший образец (с максимальным пространственным разрешением). Результаты тестирования показали, что пространственное разрешение выбранного микрообъектива соответствует значениям 1400÷1600 линий/мм или 0.6÷0.7 мкм, что близко к диффракционному пределу. При этом, контрастность изображения составляет 5÷7%, что обеспечивает надежную обработку изображения (Рис.I.4.11).



Рис.. I.4.11. Результаты тестирования объектива. а) изображение МИРЫ-№3, группа №19 и №20, б) пропись интенсивности для 2-х элементов группы №20 (интенсивность дана в градациях серого).Параметры групп: группа №19 -1400 линий/мм; группа №20 - 1600 линий/мм.

Если коэффициент сопряжения микрообъектива и ПЗС камеры равен 1 (на 1 пиксел камеры проецируется 1 микрон объекта), то физическое разрешение изображения, получаемого с помощью приемного блока, составляет 1 мкм. При изменении коэффициента сопряжения вдвое разрешение может быть соответственно увеличено.

Анализ изображений миры, полученных для диапазона длин волн (λ =475±15мкм) смещенного относительно номинального (λ =490±7мкм) показал, что для одной и той же группы элементов эталонной миры изменение пространственного разрешения и сферические аберрации малы и лежат в пределах погрешности метода измерения. Полученный результат продемонстрировал возможность использования объектива в более коротковолновой области спектра. Это позволило исключить светофильтр из оптической схемы, что упростило конструкцию осветителя и обеспечило большую равномерность освещенности в предметной плоскости.

Технические характеристики созданного микрообъектива:

- Рабочая длина волны, нм	490±7
 Числовая апертура 	0.5
- Увеличение, крат	6.5
- Расчетное поле зрения, мм	1.5
- Пространственное разрешение (не хуже), мкм	1.0
- Глубина резкости, мкм	~1

66

2.5. Приемник излучения (ПЗС камера)

Для регистрации изображения была выбрана стандартная монохромная ПЗС камера типа *SenSys 3200* с качеством ПЗС матрицы –«0» (science grade 0). Общий вид и расположение приемника излучения в схеме томографа показаны на Puc.I.4.2,а.

ПЗС матрица имеет максимум чувствительности в спектральном диапазоне 470÷490 нм с квантовой эффективностью ~50%. Термостабилизация матрицы на уровне 10⁰С позволяет существенно снизить шумовую составляющую сигнала. Полный динамический диапазон составляет 12 бит при скорости оцифровки 1.4 МГц. Устройство крепления камеры к оптической арматуре томографа обеспечивает полный набор перемещений при юстировке.

Тестовые эксперименты подтвердили эксплуатационные параметры камеры, указанные в Таблице I.4.1. При полном динамическом диапазоне 4096 отсчетов АЦП, шумовая составляющая не превышала 10÷20 единиц АЦП, что обеспечивает получение достоверной и высокоточной информации при обработке изображения.

Для определения абсолютных значений реконструированных параметров микрообъекта необходима информация о коэффициенте пересчёта координат ПЗС матрицы в линейные координаты изображения, который определяется как отношение размера объекта в мкм к размеру его изображения в пикселах (или pix). По результатам исследования, коэффициент пересчёта координат составил K=1.0120 мкм/пиксел $\pm 0.02\%$. Средне- квадратичное отклонение размера калибровочной шкалы составило ± 0.16 пиксел. Измерения проводились при комнатной температуре, при полностью собранном томографе *FST Tester*. Калибровочная шкала размешалась внутри тестовой томографической камеры.

2.6. Навесная телескопическая вставка

Навесная телескопическая вставка (см. схему на Рис.I.4.2,а) обеспечивает визуальный контроль мишени в процессе предварительной (грубой) юстировки и фокусировки оптической системы. Навесная вставка позволяет получить увеличенное поле зрения, которое составляет до 5 мм (вместо 1.5 мм поля зрения основной оптической системы). В качестве фотоприемного элемента вставки используется монохромная ПЗС камера «*Матрица-440к/12*» (изготовитель фирма *DeltaTech*, научный парк МГУ). Особенностью камеры является возможность ее работы как в цифровом, так и в аналоговом режимах (в стандарте PAL).

§ 3. Криогенная система

Формирование и исследование такого микрообъекта, как криогенная мишень, проводится при температурах T= $20 \div 4.2$ К. Требования к проведению томографического эксперимента, - большая угловая апертура оптической системы ~ 60^{0} , а следовательно высокий теплоприток излучением, ограниченное расстояние от объекта исследования до объектива ~54 мм, устойчивость системы позиционирования к низкочастотным колебаниям, стабильность положения объекта после охлаждения с точностью ±500мкм, - потребовали создания специализированной криогенной системы, состоящей из криостата и модуля формирования криогенных мишеней. Общий вид криостата показан на Рис.I.4.3,в.

Криостат представляет собой модернизированный вариант стандартного криостата *КГ*-20 (разработчик: Институт Физики Твердого Тела РАН, г.Черноголовка), в нижней части которого расположена специализированная томографическая тестовая камера (ТТК). Модуль формирования, работа которого основана на оригинальном методе FST [2,12], представляет собой вставку в криостат. Порядок работы модуля достаточно подробно описан в работах [18,19]. Конструкция модуля обеспечивает формирование и подачу готовой не закрепленной криогенной мишени в канал загрузки мишеней (см. поз.1 на Рис.I.4.3,г) и, далее, в устройство позиционирования, размещенное внутри ТТК.

Заключение к разделу І

В данной работе получены следующие основные результаты:

1. Разработан прямой алгоритм и соответствующее программное обеспечение (*3D Ray Tracing, Shell Optics Model*) для моделирования теневого изображения оболочек и криогенных мишеней. Сравнение численно полученных теневых изображений с изображениями реальных оболочек подтвердили адекватность созданной модели.

2. Разработан обратный алгоритм для пространственной реконструкции внутренней структуры оболочек и криогенных мишеней по положению яркого кольца на теневых проекциях этих микрообъектов (т.н. *BBP* алгоритм). Результаты численных экспериментов по тестированию созданного алгоритма показали, что среднее отклонение результатов реконструкции от параметров тестовой мишени не превышает 1 %.

3. Создан диагностический комплекс (мультипроекционный томограф), состоящий из оригинальной системы сканирования и специально разработанного программного обеспечения *Target Studio*. Комплекс включает два различных томографа, в том числе: *Shell Tester* (предназначен для работы с закрепленными оболочками при комнатной температуре), и *FST Tester*, который позволяет работать с незакрепленными микрообъектами (сферические оболочки и криогенные мишени) при комнатной и криогенных (4.2÷77) температурах.

4. Проведена серия тестовых испытаний, которая показала, что данный комплекс обладает уникальными операционными параметрами, в том числе:

 Температура микрообъекта 	комнатная; криогенная (77÷4.2К)
 Длина волны зондирующего излучения 	475±15 нм; 490±7 нм
 Полный угол сканирования микрообъекта 	360^{0}
- Точность позиционирования	± (1,5÷2,5) мин
 Текущее число проекций 	100
- Пространственное разрешение в 1-ой проекции	1÷1.5 мкм
- Диаметр исследуемого микрообъекта, макс.	1,5 мм
- Точность реконструкции	1÷1.5 мкм

Комплекс позволяет проводить реконструкцию параметров микрообъекта, прозрачного в видимом диапазоне излучения, в том числе микрообъекта, изготовленного из материала с малым Z (например, топливный слой внутри криогенной мишени), диагностику которого невозможно осуществить методом общепринятой рентгеновской томографии.

5. Впервые осуществлена 3-х мерная реконструкция внутренней структуры прозрачных полистироловых оболочек по большому числу теневых проекций (более 80), полученных в видимом спектральном диапазоне. Причем, осуществлена томография как оболочек, укрепленных на подвесе, так и свободных (не закрепленных) оболочек. Результаты реконструкции одной и той же полистироловой оболочки на двух различных томографах, входящих в состав диагностического комплекса, показали, что точность реконструкции параметров составляет (для оболочек диаметром 1 мм): (а) для томографа *Shell Tester* ~1.5 мкм; (б) для томографа *FST Tester* ~1 мкм

Таким образом, в рамках выбранного технического подхода, продемонстрирована возможность эффективно решить одну из важнейших задач технологии лазерных мишеней: выполнить однозначную реконструкцию их параметров с высокой точностью.

Созданный комплекс обеспечивает необходимую последовательность диагностики параметров криогенной мишени, а именно:

- Стадия 1 томография полой оболочки (выполняется на томографе Shell Tester)
- Стадия 2 томография криогенного топливного слоя, сформированного на внутренней поверхности оболочки, параметры которой определены на стадии 1 (выполняется на томографе *FST Tester*).

Полученные результаты могут быть использованы, в первую очередь, в экспериментальных исследованиях по ЛТС, при формировании и доставке криогенных топливных мишеней, а также при организации производственного процесса на будущих реакторах ЛТС. В настоящее время, созданный диагностический комплекс (элементная и программная база томографа) дополняет имеющуюся в ФИАН оригинальную установку для производства бесподвесных криогенных мишеней [18,19]. Специализированное ПО, созданное в настоящей работе, используется также в Институте Лазерной Техники Осакского Университета (Япония) для характеризации полимерных оболочек [20].

Литература

- 1. T.P.Bernat, D.H.Darling, J.J.Sanchez. *Applications of holographic interferometry to cryogenic ICF target characterization.* J. Vac. Sci. Technol. **20** (4), pp.1362-1365, 1982
- V.M.Izgorodin, S.B.Kormer, G.P.Nikolaev, A.V.Pinegin. Use of Holographic Interferometry in Monitoring the Quality of Cryogenic Laser Fusion Targets. Sov. J. Quantum. Electron. 16 (1), pp. 35-37, 1986
- 3. T.R.Pattinson, W.J.Felmlee. *A real-time holographic interferometry technique far measuring cryogenic fuel layers in large inertial confinement fusion targets*. J. Vac. Sci. Technol. A **6**(3), pp.1882-1890, 1988
- 4. M.D.Wittman, D.Malacara, H.-J. Kong. *High precision characterization of gas-filled shells using Fabry-Perot interferometer*. SPIE Vol. **1553**, Laser Interferometry IV: Computer-Aided Interferometry, pp. 456-469, 1991

- 5. J.A.Koch, T.P.Bernat, G.W.Collins et al. *Quantative analysis of backlit shadowgraphy as a diagnostic of hydrogen ice surface quality in capsules.* Fusion Technology **38** (1) p.123, 2000
- I.V.Aleksandrova, A.A.Belolipetskiy, V.I.Golov et al. Progress in the development of tomographic information processing methods for applications to ICF target characterization. Fusion Technology, 38 (2), pp.190-205, 2000
- 7. E.R.Koresheva, I.E.Osipov, I.V.Aleksandrova, et al. *Creation of a diagnostic complex for the characterization of cryogenic laser-fusion targets by the method of tomography with probing irradiation in the visible spectrum.* J.Russian Laser Research, **28** (2), 163-206, 2007
- 8. E.R.Koresheva, A.I.Nikitenko, I.V.Aleksandrova et al. *Possible approaches to fast quality control of IFE targets*. Nuclear Fusion **46**, pp.890-903, 2006
- 9. I.V.Aleksandrova, S.V.Bazdenkov, V.I.Chtcherbakov et al. *An efficient method of fuel ice formation in moving free-standing ICF/IFE targets.* J. Appl. Phys. D: **37**, pp.1163-1178, 2004
- 10. H.M. Roder, G.E.Childs, R.D.McCarthy, P.E.Angerhofer. *Survey of the properties of the hydrogen isotopes below their critical temperatures.* NBS Technical Note No 641, 1973, 113 p.
- 11. Физические величины. Справочник. (ред. И.С.Григорьев, У.З.Мейлихов), М.: Энергоатомиздат, стр. 46-85, 1991
- 12. Р.Глокер. Рентгеновские лучи и испытание материалов. ГТТИ, стр.36-61, 1932
- 13. *Рентгенотехника*. Справочник в 2-х книгах. М. Машиностроение. **1**, стр.14-28; **2**, стр.179-185, 1980
- 14. General Atomics, Report GA-A23852, FY01 Annual Report, 2002
- 15. E.J.Allin, W.F.J.Hare. *Infrared absorption of liquid and solid hydrogen*. Phys.Rev.Lett. **98**, p. 554-555, 1955
- 16. G.W.Collins, D.N.Bittner, E.Monsler. *Infrared redistribution of D2 and HD layers for inertial confinement fusion*. J.Vac.Sci.Technol. A **14** (5), pp. 2897-2900, 1996
- 17. Ю.Т. Ларин, В.А. Нестеренко. Полимерные оптические волокна <u>www.informost.ru</u>
- I.V.Aleksandrova, E.R.Koresheva, I.E.Osipov et al. *Free-Standing Target Technologies for ICF*. Fusion Technology 38, N1 pp.166-172, 2000
- I.V.Aleksandrova, E.R.Koresheva, I.E.Osipov et al. Cryogenic fuel targets for Inertial Confinement Fusion: optimization of fabrication and delivery conditions. J.Russian Laser Research, 28 N3, pp.207-235, 2007
- 20. F.Ito, K.Nagai, M.Nakai, T.Norimatsu, A.Nikitenko, S.Tolokonnikov, E.Koresheva, T.Fujimura, H.Azechi, K.Mima. Low-density-plastic-foam capsule of resorcinol/formalin and (phloroglucinolcarboxylic acid)/formalin resins for fast ignition realization experiment (FIREX) in laser fusion research. Japanese J. Applied Physics, 45 N11, pp.L335-L338, 2006

ПРИЛОЖЕНИЕ К РАЗДЕЛУ І

Протокол исследования качества полимерных оболочек, изготовленных методом микрокапсулирования

1. Введение

В протоколе представлены экспериментальные результаты, полученные при использовании японских полистироловых оболочек изготовленных методом микрокапсулирования (Институт Лазерной Техники, Унив.г.Осака, Япония), в технологическом цикле подготовки и формирования криогенных мишеней на системе FSTS (Free-Standing Target System). Работа проведена в рамках проекта МНТЦ №1557ю Массив оболочек был предоставлен группе Криогенных Мишеней (ФИАН) д-ром Т.Нориматсу в октябре 2001 г.. Наряду с неразрушающими (оптическими) методами контроля, позволившими определить качество стенки и геометрические параметры оболочек, были использованы разрушающие методы для определения механических свойств оболочек.

Полный технологический цикл включал:

- отбор и характеризация оболочек на установке Shell Tester,
- исследование прочностных характеристик оболочек при комнатной температуре,
- определение величины давления внешнего разрушения при диффузионном заполнении оболочек изотопами водорода (комнатная температура),
- исследование прочности оболочек при криогенных температурах,
- исследование возможности использования метода FST для формирования внутри оболочек слоя конденсированного топлива.

Работы проводились в группе Криогенных мишеней (ФИАН) в период с октября 2001 по май 2002г.

2. Характеризация оболочек

Характеризация оболочек осуществлялась на оборудовании ФИАН методами оптического контроля при исследовании теневого и интерференционного изображений оболочки в одной или нескольких проекциях. При этом обеспечивалась следующая точность измерений:

- внешний диаметр оболочки ±3мкм,
- неконцентричность оболочки ±0,5%
- толщина стенки ±0,5мкм
- разнотолщинность ± 2%

2.1. Методика характеризации и использованное оборудование.

Предварительный просмотр и отбор оболочек из массива производился с использованием стерео-микроскопа типа МБС, производства ЛОМО(г.Санкт-Петербург, Россия), позволяющего обнаруживать достаточно крупные дефекты оболочек размером не менее 10 мкм.
Для выявления более мелких структурных дефектов стенки (микропузырьки, трещины, пыль и т.д.), предварительно отобранные оболочки контролировались с помощью биологического микроскопа типа МББ (производство ЛОМО). Разрешение микроскопа позволяет обнаруживать дефекты с характерным размером ~1мкм.

Измерение диаметра оболочек выполнялось при помощи микроскопа ИМЦЛ 100х50, производства НПЗ (г. Новосибирск, Россия). Для отсчета показаний использовалось цифровое отсчетное устройство типа УЦО-201С с дискретностью измерения 0.2мкм. Предел допускаемой основной погрешности микроскопа составляет ±3мкм. Измерения проводились в нескольких проекциях. Полученные данные использовались для оценки неконцентричности оболочки.

Для выявления мелких дефектов стенки оболочки использовалось устройство *Shell Tester* (производство ФИАН-ГПКЗ, г. Москва). Обеспечивающее оптическое разрешение 1 мкм при многоракурсной характеризации объекта (Рис. 1).

Принцип работы устройства основан на перемещении (вращении) оболочки в поле зрения микроскопа ИМЦЛ-100х50 на известный угол в пределах от 10 до 360° с точностью позиционирования $\pm 0.1^{\circ}$ (использование нониуса) и $\pm 0.5^{\circ}$ (без нониуса). Фиксирование данной проекции теневого изображения оболочки осуществлялось с помощью 12-ти битной цифровой



Рис.1 Устройство Shell Tester: а) Общий вид. б) Зона оптического контроля.

ПЗС-камеры (производство *DeltaTech*, Ltd., Москва; 1392х1040 пикселей, размер пиксела 4.65х4.65 мкм). Изображение оболочки, полученное на экране монитора, обрабатывалось с помощью программного обеспечения *Shell Explorer* и *Shell Image Processing*, разработанного в рамках проекта МНТЦ №1557.

Узел крепления в устройстве *Shell Tester* позволяет фиксировать оболочку с помощью вакуумного захвата. При этом возможен простой монтаж и демонтаж оболочки и ее дальнейшее использование в системе бесподвесных мишеней.

На последнем этапе характеризации определялась толщина стенки отобранных оболочек. Эти измерения проводились с использованием интерферометра Жамена. В качестве источника когерентного излучения использовался гелий-кадмиевый газовый лазер (длина волны 0.44 мкм) типа ЛПМ-11 (изготовитель: НИИОФА, г.Фрязино, Россия). Измерения толщины стенки оболочек проводились в 2-х различных проекциях, при этом точность измерения составляла ~0,4%.

2.2 Результаты характеризации.

Общее количество оболочек в исходном массиве составляло 1673 шт. В результате предварительного отбора, из массива была отобрана 101 оболочка. На Рис.2 представлено распределение отобранных оболочек по внешнему диаметру.

Основные дефекты, встречающиеся при изучении оболочек можно классифицировать по следующим группам:

- крупные продольные трещины,
- мелкие лучеобразные трещины, исходящие из одного центра,
- разноразмерные пузыри в стенке материала, в том числе очень мелкие, типа вакуолей, с размером от 10 мкм до 1 мкм



Рис.2 Распределение оболочек по внешнему диаметру.

- вмятины,
- несферичность формы,
- разнотолщинность,
- шероховатость поверхности,
- наличие мелких сплошных сфер на поверхности оболочки.

Изучение отобранных оболочек на установке *Shell Tester* показало, что все они имеют дефекты. Дефекты малых размеров, типа вакуолей, практически неразличимы, если они находятся в полярной зоне $R_{non} = (0.8-1)R_{ofon}$. Опыт показал, что такие дефекты обнаруживаются только при исследовании теневого изображения оболочки при использовании не менее чем в 8-ми проекций. Характерные обнаруженные дефекты стенки показаны на Рис.3. На Рис.4 показаны результаты сканирования оболочки с шагом в 40⁰.

После окончательного просмотра на интерферометре, в нашем распоряжении оказалось 20 оболочек диаметром от 1300 мкм до 2130 мкм, толщиной стенки от 18 до 72 мкм, с разнотолщинностью от 3% до 24%



Рис.3 Характерные обнаруженные дефекты стенки оболочек:

- 1. крупные продольные трещины
- 2. мелкие лучеобразные трещины, исходящие из одного центра
- 3. разноразмерные пузыри в стенке материала, в том числе очень мелкие, типа вакуолей, с размером от 10 мкм до 1 мкм
- 4. вмятины
- 5. шероховатость поверхности
- 6. наличие мелких сплошных сфер на поверхности оболочки

3. Исследование механических свойств оболочек

На этом этапе подготовки оболочек к экспериментам было проведено уточнение данных по величине внешнего и внутреннего давления разрушения полистироловых оболочек из отобранного массива. Эта работа необходима для расчета режима заполнения оболочек и режима разгерметизации кассеты с заполненными оболочками.

Методика измерения заключалась в следующем.



Рис.4 Набор проекций с шагом 40⁰ и примеры обнаруженных дефектов. а – частицы на поверхности микросферы, б – трещины в микросфере, с -вакуоли

При нагружении оболочки внешним давлением её разрушение происходит в результате потери устойчивости. Критическое давление для структурно однородной оболочки идеальной геометрической формы равно:

$$\Delta P_{cr} = P_{out} - P_{in} = \frac{2Ed^2}{R^2 \sqrt{3(1 - v^2)}}$$
(1)

где Е – модуль Юнга, а v - коэффициент Пуассона.

Для реальной оболочки внешнее давление разрушения всегда ниже давления, определяемого по формуле (1), из-за отличия ее формы от идеальной и структурных дефектов в материале оболочки.

Массив исследуемых оболочек, расположенных каждая в отдельной ячейке, помещался в герметичную камеру с прозрачными окнами. Затем в камеру подавался газ, причем его давление постепенно повышалось. Процесс разрушения оболочек наблюдался на мониторе компьютера, одновременно фиксировалось соответствующее показание манометра. Схема измерительного стенда приведена на Рис. 5.

Для измерения внешнего давления разрушения в качестве рабочего газа использовался азот. Измерения проводились в течение 1-2 мин. При этих условиях количество азота, проникающего внутрь оболочек за счет газопроницаемости пренебрежимо мало.

В экспериментах изучено 6 оболочек. Полученные значения модуля Юнга оказались приблизительно в 2 раза ниже приведенных в работе [1], что можно объяснить дефектами использованных оболочек и их разнотолщинностью.





Рис 5. Экспериментальный стенд для исследования прочностных характеристик оболочек. Схема и общий вид: 1 – испытательная камера; 2 – лампа подсветки; 3 – микроскоп с видеокамерой; 4 – капиллярная соединительная трубка; 5 – манометр; 6 – сбросной вентиль; 7 – регулировочный вентиль; 8 – баллон со сжатым газом (N₂, He)

4. Заполнение оболочек

Основываясь на полученных данных (см.п.3) проведены экспериментальные работы по заполнению оболочек изотопами водорода. При расчете режимов заполнения использовалось программное обеспечение *RampFilling*, разработанное в ФИАН. Заполнение проводилось на установке, созданной в ФИАН (описание установки см. работу [2]). Для использования оболочек диаметром более 1мм были проведены дополнительные работы по модернизации мишенного контейнера.

Для отработки режима заполнения был проведен тестовый эксперимент. Оболочки (5 штук) заполнялись газом (D₂) в режиме *Ramp Filling* (ΔP =const,) до 100 атм, после чего проводился сброс давления в том же режиме. Значение ΔP выбиралось вдвое меньшим, чем измеренное значение давления разрушения оболочек внешним давлением.

Исследования показали, что после подобной обработки оболочки оставались целыми. Однако, при сравнении результатов микроскопического анализа поверхности до и после заполнения оболочек, было обнаружено умножение дефектов в стенке. Обнаружено появление характерных дефектов 2-х типов (Рис.6):

- 1 протяженные (100-200мкм), не соединяющиеся трещины,
- 2 звездообразные трещины, исходящие из одного центра.

Известно, что при нагружении оболочки наружным и внутренним давлением, предельное давление разрушения в большой степени зависит от наличия в стенке оболочки дефектов. Вероятнее всего, трещины 1-го типа образовались из-за превышения предела прочности материала оболочки на разрыв. На это указывают ровные края и отсутствие видимых центров трещинообразования (сколы, вмятины, дефекты материала). Характерно, что оболочка при этом остается целой.



Рис.6 Характерные дефекты, обнаруженные в стенке оболочек после тестового заполнения.

Причиной образования дефектов 2-го типа, возможно, является воздействие внешнего нагружения оболочки. Как следует из проведенных наблюдений, центром трещинообразования здесь являются микроскопические пузырьки-вакуоли (на это указывает характерное яркое пятно в центре дефекта).

Тестирование процесса заполнения было проведено также с 8-ми кратным коэффициентом запаса. В этом случае, при заполнении оболочек и последующем стравливании газа из камеры заполнения, появления новых дефектов в стенках оболочек не обнаружено.

5. Исследование оболочек на устойчивость

С целью дальнейшего использования оболочек для формирования криогенных мишеней методом FST были проведены исследования их устойчивости по отношению:

- 1) к тепловым нагрузкам при охлаждении от 300 К до 4,2К,
- 2) к механическим нагрузкам, возникающим в процессе движения по каналу формирования Были изучены 2 оболочки. Оболочка №1 помещалась в оптической камере криостата, оболочка №2 в мишенном контейнере. После охлаждения канала формирования и оптической камеры до рабочих температур (5 - 25 К), оболочка №2 была проброшена в канале формирования в соответствии с технологией FST. Сравнение изображений оболочки до и после эксперимента показало отсутствие появления новых дефектов (см. Рис.7).

В связи с отсутствием необходимого количества оболочек, проведение статистического исследования их пригодности для FST-layering не представлялось возможным. Однако, на основании проведенных тестов можно надеяться, что оболочки не портятся при механической и тепловой нагрузках, возникающих в ходе криогенного эксперимента.



Рис.7 Состояние оболочки до и после охлаждения. Показано, что охлаждение до температуры T = 5 K не приводит к размножению дефектов.



6. Криогенные эксперименты

После проведения всестороннего изучения свойств японских оболочек осталось только 3 оболочки из отобранного массива.

Возможность формирования внутри газонаполненных оболочек криогенного слоя была изучена с помощью устройства "*R&B Cell*" разработанного в ФИАН (Puc.8). Устройство позволяет моделировать режим FST-формирования, когда оболочка с топливом находится непосредственно в оптической камере.

Принцип работы устройства основан на использовании вибрирующей мембраны, на которой располагается оболочка. Устройство обеспечивает перемещение оболочки в различных режимах (вращение и прыжки с амплитудой H=(0,3÷4)D, гду D – диаметр оболочки) с одновременным изменением температуры подложки. Различные режимы вибрации мембраны позволяют моделировать условия, которые соответствуют поведению мишени внутри канала FST-формирования.

Эксперименты продемонстрировали возможность формирования твердого слоя дейтерия внутри вибрирующей оболочки при ее охлаждении за счет контактной теплопроводности, что и реализуется в методе FST.

<u>Резюме</u>

1. Японские оболочки в предоставленном массиве имели специфические дефекты, обнаружение которых потребовало при отборе использовать методы многоракурсной характеризации, доступные с помощью устройства *Shell Tester*.

- 2. Измерение механических свойств оболочек при 300 К показали, что модуль Юнга в оболочках предоставленного массива имеют значения вдвое меньшие, чем измеренные в работе [1].
- 3. Наличие вакуолей в стенке приводит к умножению дефектов при нагружении оболочек внешним давлением в процессе их диффузионного заполнения.
- Для сохранения качества оболочек при их заполнении топливом, был осуществлен пере-4. ход на более мягкие, по сравнению с расчетными, режимы заполнения (с коэффициентом запаса 8). Общее время заполнения оболочек при этом увеличилось от 3 до 10 дней.
- 5. Экспериментально продемонстрирована возможность использования японских оболочек для формирования в них топливного слоя по технологии FST.

В заключение группа Криогенных Мишеней ФИАН благодарит Институт Лазерной Техники за предоставление оболочек для проведения криогенных экспериментов на установке FSTS. Работа с оболочками вызвала большой интерес в группе и желание продолжить совместные исследования.

Предлагается продолжить совместные исследования ILE-ФИАН по формированию криогенного слоя в оболочках производства ILE:

- Вклад ILE: подготовка необходимого массива оболочек и транспорт массива в ФИАН.

- Вклад ФИАН: подготовка массива к криогенным экспериментам и проведение экспериментов по формированию слоя методом FST. Криогенные эксперименты могут проводиться совместно сотрудниками ФИАН и ILE.

Литература

- 1. S. Kobayashi, T. Norimatsu, M. Nakai, et al. Annealing of polystyrene microcapsules for inertial confinement fusion experiments. Vac. Sci. Technol. A 9 (1), pp. 150-153, 1991
- 2. И.В.Александрова, А.А.Белолипецкий, Е.Р.Корешева и др. Криогенные мишени для реактора. Часть І. Диффузионное заполнение топливом сферических оболочек. Препринт ФИАН, Москва - 2012 г., 134 стр.

Протокол составили:

с.н.с., к.ф.м.н. И.Е.Осипов

Раздел II

Методы быстрой характеризации параметров криогенной мишени в процессе ее транспортировки в камеру реактора

Глава 1. Фурье-голография для быстрой характеризации мишеней

Возможность и эффективность применения метода Фурье-голографии для быстрой характеризации параметров лазерных термоядерных мишеней и траектории их полета в камере реактора подробно исследована нами в [1]. Ниже представлены основные результаты этого исследования.

§1. Физика распознавания объекта по его изображению.

Голографические методы распознавания образов основаны на использовании голограмм Фурье. Фурье голограммой называется голограмма, получающаяся в задней фокальной плоскости линзы в результате интерференции света от двух источников, расположенных в передней фокальной плоскости [2,3].

Рассмотрим схему, показанную на Рис. II.1.1(а). Когерентный световой пучок падает слева на объект и маленькую линзу, которая формирует точечный опорный источник. Они расположены в фокальной плоскости линзы L_1 . Данную плоскость называют входной или пространственной плоскостью. Задняя фокальная плоскость линзы L_1 называется частотной (иногда пространственно - частотной).

Вторая линза L₂ осуществляет обратное преобразование – ее задняя фокальная плоскость называется выходной. Если в частотной плоскости ничего нет, то показанная оптическая схема дает в выходной плоскости перевернутое изображение объекта и опорного источника.

Теперь предположим, что у нас имеется некий объект, с которым мы хотим сравнивать другие объекты. Расположим его во входной плоскости, а в частотной плоскости поместим среду для регистрации голограммы, например, фотопластинку. Первая линза создаст в частотной плоскости Фурье образ пропускания объекта. Опорный источник даст там плоскую волну с линейно меняющейся вдоль оси Y фазой, что очевидно из геометрии схемы. На голограмме будет зарегистрирован результат интерференции Фурье образа пропускания объекта с плоской опорной волной.

Посмотрим теперь, что будет, если мы после регистрации соответствующим образом проявим голограмму и поместим ее обратно в частотную плоскость (Рис. II.1.1,б). Голограмму объекта создают две волны – предметная и опорная, а в голографии хорошо известно, что эти две волны в принципе ничем не отличаются. Значит, если мы уберем объект и оставим только опорный источник, то в выходной плоскости (при наличии голограммы в частотной плоскости) сформируется изображение объекта. Аналогично, если убрать опорный источник, а оставить объект, в выходной плоскости мы получим изображение опорного источника



Рис. И. 1. 1. Оптическая схема Фурье-голографии

(а) Принципиальная оптическая схема, иллюстрирующая получение Фурье голограмм и работу коррелятора с частотной плоскостью. Двойное Фурье преобразование здесь осуществляется в масштабе 1:1.(б) Принципиальная оптическая схема распознавания исследуемого объекта: X_1Y_1 – входная плоскость, $\xi\eta$ - частотная плоскость, X_3, Y_3 – выходная плоскость, L_1 и L_2 - линзы, $t_1(y_1)$ - эталонный объект, $t_3(y_1+b)$ – исследуемый объект

(именно там, где оно появилось бы и без голограммы в частотной плоскости). А теперь вспомним, что опорный источник у нас был точечный, то есть распределение интенсивности в его изображении – это острый пик. В следующем разделе будет показано, что наблюдаемый пик является автокорреляционной функцией пропускания объекта.

Сделаем теперь последний принципиальный шаг. Оставив полученную голограмму идеального объекта в частотной плоскости и убрав опорный источник, поместим во входной плоскости другой объект. Тогда в выходной плоскости, в том месте, где у нас должно быть изображение опорного источника, мы получим сигнал пропорциональный корреляции

82

пропусканий двух объектов. Этот сигнал будет тем больше. Чем более похожи два объекта, но всегда меньше автокорреляционного пика.

Таким образом, мы показали (точные математические выкладки см. ниже), что простая оптическая схема, приведенная на Рис. II.1.1, способна производить сравнение двух объектов. Мерой сравнения является функция корреляции двух пропусканий. Такая схема называется коррелятором с частотной плоскостью [4].

Можно посмотреть на данную схему и с другой стороны. Действительно, мы видим, что она осуществляет пространственную фильтрацию изображения, причем фильтром служит голограмма. Полученный голографический фильтр называется согласованным. Следует подчеркнуть, что такой фильтр может быть изготовлен не только способом, описанным выше, но и прямым компьютерным синтезом. В этом случае нам уже не нужен реальный эталонный объект.

В частотной плоскости происходит перемножение Фурье образов пропусканий двух объектов – объекта на входе и объекта, записанного на голограмме. Если мы наложим на голографический фильтр еще один фильтр (обычный, с действительным пропусканием), например, ослабляющий высшие или низшие пространственные частоты, то появляется интересная возможность вести сравнение двух объектов в заранее заданной полосе (говоря шире, спектре) пространственных частот.

Последняя возможность нам представляется черезвычайно интересной именно для задач характеризации лазерных мишеней. Можно аппаратно оценивать вклад отдельных пространственных частот, например, мелкомасштабных неоднородностей (высшие пространственные частоты) или глобальных искажений формы (низшие частоты).

Заканчивая обсуждение физического аспекта проблемы, следует рассмотреть еще два момента.

Во-первых, схема на Рис. II.1.1 приведена для иллюстрации проблемы и удобства анализа. В принципе, о ней можно забыть. Единственное требование при получении Фурье голограмм – это тот факт, что объект и опорный источник должны быть в одной плоскости, а опознаваемый объект должен находиться там же, где находился эталонный объект при получении согласованного фильтра. Относительное расположение объекта, линз и голограммы может быть практически произвольным, более того, линзы можно просто выкинуть. Во всех этих случаях мы получим эквивалентные схемы. Подробный анализ эквивалентности таких схем проведен, например, в [2,3]. Этот факт означает, что реальная экспериментальная оптическая схема может проектироваться из соображений удобства конкретного физического эксперимента и с учетом геометрии реальной установки.

Во-вторых, в Фурье голографии предполагается, что объект является плоским транспарантом. Только в этом случае возможно точное Фурье преобразование и, соответственно, точное восстановление объекта по его голограмме. Наши же объекты (мишени) обладают пространственной протяженностью.

Тем не менее, нам кажется, что это обстоятельство не является принципиальным препятствием для предложенного метода. В поддержку этого утверждения можно привести следующие аргументы:

1. Протяженность объекта (мишени) вдоль оптической оси может быть гораздо меньше, чем фокусное расстояние первой линзы. Это легко осуществить практически, так как характерный размер мишени – несколько миллиметров. Следовательно, в первом приближении можно считать объект плоским.

2. В предложенном методе нас не интересует точное восстановление объекта по его голограмме. Задача заключается в сравнении волновых фронтов, образуемых тестируемым и эталонным объектом, говоря точнее, в сравнеии аксиальной симметрии и пространственных спектров двух этих фронтов. Трехмерность объекта может здесь рассматриваться как дополнительная помеха и ее возможно в определенной степени скомпенсировать введением в оптическую схему дополнительных фильтров и оптических элементов.

§ 2. Математические основы метода.

Обратимся снова к Рис. II.1.1. Обозначим комплексное пропускание нашего объекта во входной плоскости как $\mathbf{t}_1(y_1)$, а опорный источник будем рассматривать как второй транспарант с комплексным пропусканием $\mathbf{t}_2(y_1+b)$. Очевидно, что в случае точечного источника это будет дельта функция $\delta(y_1+b)$ – здесь это пространственный аналог импульса. Для упрощения последующих выражений мы без ограничения общности можем считать, что все переменные зависят от одной координаты.

Введем следующие обозначения: звездочка * над именем переменной означает комплексное сопряжение, F и F^{-1} – это прямое и обратное Фурье преобразование, знаком • обозначается операция корреляции, знаком * - операция свертки, *i* обозначает мнимую единицу.

Если входная плоскость освещается плоской волной единичной амплитуды, то прошедший свет будет иметь в этой плоскости комплексную амплитуду

$$\mathbf{t}_{1}(y_{1}) + \mathbf{t}_{2}(y_{1} + b)$$
 (II.1.1)

В частотной плоскости ξη комплексная амплитуда будет равна

$$\mathbf{T}_{1}(\eta) + \mathbf{T}_{2}(\eta) \exp(-2\pi i \eta b),$$

где $T_1(\eta)$ и $T_2(\eta)$ соответственно Фурье образы пропусканий $t_1(y_1)$ и $t_2(y_1)$. В (II.1.2) использована операция сдвига Фурье образа.

Если мы линейным образом зарегистрируем интенсивность световой волны в частотной плоскости $\xi\eta$, то регистрирующая среда после проявления будет иметь пропускание $t_{\rm H}$, пропорциональное данной интенсивности:

$$t_{H} \sim \mathbf{T}_{1}\mathbf{T}_{1}^{*} + \mathbf{T}_{2}\mathbf{T}_{2}^{*} + \mathbf{T}_{1}\mathbf{T}_{2}^{*}\exp(+2\pi i\eta b) + \mathbf{T}_{1}^{*}\mathbf{T}_{2}\exp(-2\pi i\eta b)$$
(II.1.3)

Давайте теперь осветим полученную голограмму с пропусканием $t_{\rm H}$ световой волной с комплексной амплитудой $T_3(\eta)$. Тогда комплексная амплитуда волны, прошедшей через голограмму будет равна $T_3 t_{\rm H}$. Особый интерес для нас представляет последний член в выражении для $t_{\rm H}$, поскольку именно он дает изображение транспаранта $t_2(y_1+b)$. Комплексная амплитуда волны, соответствующей этому члену, в плоскости $\xi\eta$ пропорциональна

$$\mathbf{T}_{3}\mathbf{T}_{1}^{*}\mathbf{T}_{2}\exp(-2\pi i\eta b) \tag{II.1.4}$$

Обусловленная этим членом комплексная амплитуда **a**(y₃) в выходной плоскости пропорциональна его обратному Фурье образу

$$\mathbf{a}(y_3) \sim F^{-1} \left[\mathbf{T}_3 \mathbf{T}_1^* \mathbf{T}_2 \exp(-2\pi i \eta b) \right]$$
(II.1.5)

Если мы теперь вспомним, что Фурье образ кросс – корреляции двух функций есть произведение комплексно сопряженного Фурье образа одной функции и Фурье образа другой, то произведение $T_3 T_1^*$ можно записать в виде

$$\mathbf{T}_{3}\mathbf{T}_{1}^{*} = F\left[\mathbf{t}_{3}^{*}(y_{3}) \bullet \mathbf{t}_{1}(y_{3})\right]$$
(II.1.6)

Тогда а(у₃) принимает вид

$$\mathbf{a}(y_3) \sim F^{-1} \{ F \left[\mathbf{t}_3^*(y_3) \bullet \mathbf{t}_1(y_3) \right] \mathbf{\Gamma}_2 \exp(-2\pi i \eta b) \}$$
(II.1.7)

Поскольку $T_2 \exp(-2\pi i \eta b)$ представляет собой $F[t_2(y_3+b)]$, получаем, используя теорему о свертке

$$\mathbf{a}(y_3) \sim F^{-1} \{ F \left[\mathbf{t}_3^*(y_3) \bullet \mathbf{t}_1(y_3) \right] \mathbf{\Gamma}_2 \exp(-2\pi i \eta b) \} \sim$$

$$\sim \left[\mathbf{t}_3^*(y_3) \bullet \mathbf{t}_1(y_3) \right] * \mathbf{t}_2(y_3 + b)$$
(II.1.8)

Из выражения (II.1.8) мы непосредственно видим, что комплексная амплитуда в выходной плоскости представляет собой свертку функции пропускания $t_2(y_3+b)$ одного объекта (опорного) с корреляцией пропускания $t_3(y_3)$ исследуемого объекта и пропускания $t_1(y_3)$ эталонного объекта, зафиксированного на голограмме. Если $t_2(y_3+b) = \delta(y_1+b)$, что означает использование точечного источника в качестве опорного, то на выходе мы будем иметь сигнал пропорциональный корреляции двух пропусканий (это прямо следует из свойств свертки). Мы также можем видеть, что корреляционный пик будет наблюдаться в том месте выходной плоскости, где должно быть изображение опорного источника в отсутствии фильтра в частотной плоскости.

Таким образом, проведенный простой математический анализ оптической схемы (аналогичные выкладки можно найти, например, в [2-4]) недвусмысленно указывает на возможность сравнения двух объектов. Кроме того, выписанные выше простые формулы могут непосредственно применяться для численных модельных расчетов, что нами и было использовано.

§3. Реализация модели.

Для проверки чувствительности предложенной схемы к искажениям мишени была разработана ее численная модель. На вход модели поступают теневые изображения мишеней, рассматривыемые как амплитудные транспаранты. Основной алгоритм модели практически полностью, за исключением непринципиальных вычислительных деталей, основан на соотношениях, приведенных в предыдущем разделе. Кроме того в модели предусмотрены и дополнительные функции.

Перечислим основные возможности модели.

- Получение и визуализация кросс – корреляционной матрицы для двух входных изображений (автокорреляционной, когда эти изображения одинаковы).

- Измерение и вывод амплитуды корреляционного пика, причем она может измеряться как в одной точке (максимуме), так и усредняться в круге заданного радиуса.

- Моделирование получения изображения объекта из его Фурье голограммы с помощью точечного опорного источника, причем размер и положение источника могут задаваться произвольно.

- Пространственная фильтрация изображений с помощью фильтров низких и высоких частот, а также режекторного фильтра. Границы фильтров в частотной области могут задаваться произвольно.

- Измерение корреляции двух изображений в сочетании с применением пространственных фильтров, причем независимо для каждого из двух изображений.

- Возможность моделирования голографических систем распознавания образов

- Визуализация спектра мощности Фурье образа изображения вдоль любой линии сканирования, проходящей через нулевую моду.

Практически модель воплощена в виде законченной компьютерной программы *"Hologram"*. Для осуществления быстрого двумерного Фурье преобразования в ней использована библиотека *FFTW* [5].

Специальных мер по оптимизации быстродействия программы не предпринималось. Так, получение Фурье образа изображения размером примерно 1500×1000 пикселей занимает не более 5 секунд. В принципе, простой учет того факта, что Фурье образ действительной матрицы есть Эрмитова матрица, мог бы увеличить быстродействие программы в 1.5-2 раза при незначительном усложнении кода. На Рис. II.1.2- II.1.5 показано несколько примеров работы программы.

§4. Полученные результаты.

С помощью разработанной модельной программы "Hologram" было проведено изучение чувствительности схемы, показанной на Рис. II.1.1, к искажениям формы мишени. Так как число возможных вариантов искажений практически бесконечно мы сосредоточились на изучении двух видов отклонения от сферической симметрии – глобальных, таких как сдвиг внутренней поверхности относительно центра (они соответствуют низким и средним пространственным частотам), и мелкомасштабных – шероховатости внутренней поверхности (высшие пространственные частоты). Как было показано в Главе 1 раздела I, искажения формы внутренней поверхности криогенной мишени приводят к сдвигу или искажению формы яркого кольца.

Для использования в качестве входных данных программы "*Hologram*" было изготовлено несколько наборов изображений криомишени (толщина внешней оболочки – 0.07, криогенного слоя – 0.12 долей от внешнего радиуса). Размер этих изображений был



Рис. II.1.2 Изображение реальной однослойной оболочки – вверху. Ее автокорреляционная матрица (слева) и Фурье спектр (справа), представленные в виде изображения в условных цветах (посередине) и в виде трехмерного графика функции двух переменных (внизу)



Рис. II.1.3. Смоделированные изображения двух немного различающихся двухслойных оболочек (вверху), их Фурье спектры (в середине) и кросс – корреляционная матрица в виде изображения и трехмерного графика (внизу).



Рис. II.1.4. Голографическое сравнение двух непохожих изображений (вверху). На кросс – корреляционной матрице (внизу) не наблюдается центрального пика. Обратите внимание, что масштаб изображений оболочек на двух фотографиях сильно отличается.



Рис. II.1.5. Голографическое распознавание образов в условиях помех. Вверху – входное изображение невысокого качества. Под ним – корреляционная матрица (изображение на выходе схемы Рис. II.1.1).

Видно, что положение корреляционных пиков соответствует положению оболочек на верхней фотографии. Здесь масштаб эталонного изображения близок к масштабу распознаваемых оболочек. 1010×1010 пикселей. Так как разработанная ранее модель прохождения света через оболочку не учитывает дифракции и протяженности источника света, то получаемые с ее помощью изображения на наш взгляд не очень подходят для данного анализа – они содержат избыток высших пространственных частот. Поэтому тестовые изображения были изготовлены другим способом – путем подбора радиального распределения интенсивности, наиболее близкого к реальному, но с учетом данных оптического моделирования.

Рассмотрим сначала, как влияет сдвиг центра внутренней поверхности криогенного слоя (относительно центра внешней поверхности) на величину корреляционного пика (Рис.II.1.6). На этом рисунке амплитуды отнормированы на амплитуду автокорреляционного пика неискаженного изображения. Кроме того две первые пространственно – частотные моды были удалены. Напомним, что нулевая Фурье мода просто пропорциональна средней освещенности. Мы можем видеть, что чувствительность схемы к таким искажениям высока, она составляет приблизительно 7% на 1% относительного сдвига (фактически, определенный таким образом сдвиг есть разнотолщинность оболочки, выраженная в процентах). На рисунке видно, что кривые, полученные при большом уровне шума, смещены вниз. Это не отражает какого-либо физического явления, а связано лишь с не совсем корректной нормировкой данных в условиях сильных шумов. Эти кривые приведены здесь, чтобы показать, что даже при очень сильных шумах тенденция уменьшения амплитуды корреляционного пика с увеличением несимметрии мишени хорошо проявляется. Следует отметить, что шум с вариацией 20% - это очень большой шум и его даже трудно получить практически.

Другой набор входных данных содержал изображения соответствующие в целом симметричной криомишени, внутренняя поверхность которой была искажена синусоидальной волной (сотая мода на длине окружности внутренней поверхности). На Рис. II.1.7. приведены



Рис. II.1.6. Относительная амплитуда корреляционного пика в зависимости от сдвига внутренней поверхности криомишени.



Рис. II. 1.7. Зависимость амплитуды корреляционного пика от амплитуды возмущений внутренней поверхности криомишени при трех различных режимах пространственно-частотной фильтрации.

полученные результаты. Видно, что если измерять интенсивность корреляционного пика в тех же условиях, что и ранее, то чувствительность будет низкой. С другой стороны, очевидно, что если мы ищем высокочастотные искажения, то низшие пространственные моды нам будут только мешать. Действительно, применение высокочастотного пространственного фильтра (high-pass filter) позволяет получить гораздо лучший результат.

Для экономии места мы здесь не приводим графиков, полученных при различных уровнях шумов. Результаты можно видеть в Таблице II.1.1, где показана относительная чувствительность, выраженная в процентах на 0.001 амплитуды искажений (то есть один процент означает, что амплитуда корреляционного пика меняется на один процент при изменении амплитуды искажений на 0.001 R_{out}).

Таблица II.1.1. Относительная чувствительность схемы к искажениям мишени	

Амплитуда искажения	моды >1	моды >30	моды >60
Гауссовский шум RMS=2%	0.17	4.5	9.1
Спекл шум RMS=20%	0.18	4.5	9.4
Гауссовский шум RMS=20%	?*	3.6	7.1

*/ невозможно надежно измерить, слишком большой разброс данных.

§5. Обсуждение и рекомендации.

Представленные выше результаты показывают, что схема, использующая Фурье голографию, обладает хорошей чувствительностью к искажениям мишени. По нашему мнению, высока вероятность того, что она может быть практически реализована и успешно использована для характеризации мишеней. Однако в первую очередь необходимо разрешить неопределенность, на которую было указано в §2 – можно ли перенести полученные результаты и выводы на реальные трехмерные объекты.

Здесь существуют два пути – прямой эксперимент или разработка полной модели прохождения света через прозрачную многослойную оболочку (с учетом дифракции).

Надеясь на оптимистическое разрешение данной неопределенности, рассмотрим далее несколько частных практических вопросов, подчеркнув предварительно, что наши результаты однозначно показывают – данный метод полностью применим, и может быть очень эффективен для обработки теневых и иных изображений (фотографий) мишеней.

5.1. Компоновка оптической схемы.

Уже указывалось, что предложенная схема черезвычайно гибка – ее компоновка может изменяться в широких пределах без потери функциональности. Поэтому мы здесь не приводим конкретных рекомендаций – они должны задаваться наиболее естественным и удобным образом из общей компоновки экспериментальной установки.

5.2. Источник света.

Источник света должен обеспечивать длину когерентности не менее характерных размеров объекта. Максимальный размер ICF мишени составляет несколько милиметров. Такую длину когерентности легко обеспечить даже с помощью нелазерных источников света. Поэтому рассмотрение вопроса о работе схемы с частично когерентным источником нам представляется бессмысленным. Наиболее удобным источником будет хороший полупроводниковый лазер, тем более, что сейчас доступны такие лазеры для синего и зеленого диапазонов длин волн, а уменьшение длины волны позволит повысить чувствительность к мелким дефектам.

5.3. Фотоприемник и электронный тракт.

В качестве фотоприемника удобно использовать фотодиод или небольшую фотодиодную матрицу. Разрядность АЦП должна быть не менее 12, а стабильность всего электронного тракта не хуже 0.1%. Это следует из данных, приведенных в предыдущем разделе, если мы хотим обнаруживать искажения порядка 1 мкм. Световой сигнал на входе фотоприемника будет по абсолютной величине достаточно большой, что следует из принципа работы схемы, поэтому шумы самого фотоприемника здесь роли не играют.

5.4. Синхронизация.

Если мы хотим проводить анализ движущейся мишени, то схема должна работать в импульсном режиме. При смещении объекта относительно оптической оси системы

положение корреляционного пика также будет меняться. Это может привести к тому, что сигнал с фотоприемника будет меняться просто за счет движения мишени, что неприемлемо. Примем для оценки, что допустимое смещение мишени за время измерений составляет 1 мкм, а ее скорость – 10м/сек, тогда длительность импульса (или точность синхронизации) будет составлять 100 нсек. Эта и приведенные в предыдущем пункте величины не представляют никакой сложности для современной электроники.

5.5. Голографический фильтр.

Он может быть как амплитудным, так и фазовым. По-видимому, фильтр с комплексным пропусканием (фазовый) предпочтительнее в силу его большей дифракционной эффективности [2]. Имеет смысл также использовать его в комбинации с обычными амплитудными пространственными фильтрами (см. предыдущий раздел), хотя это и несколько повышает требования к точности синхронизации в случае движущихся мишеней.

§6. Прецизионная диагностика скорости и траектории летящей мишени

Как показано выше, голографическая схема, представленная на Рис.II.1.1(б), способна производить пороговую характеризацию движущихся мишеней за сравнительно короткое время. Когда мишень вбрасывается в камеру реактора, необходимо контролировать два наиболее важных параметра: скорость мишени и ее траекторию в камере. В этом случае выгодно использовать стратегию, при которой все измерения делаются одновременно. В этом разделе мы рассмотрим решение данной проблемы. Для определенности мы будем считать скорость мишени равной 200-300 м/сек, что характерно для коммерческой электростанции. На Рис. II.1.8 представлена схема, основанная на дальнейшем развитии идеи, предложенной в §1. Далее мы более детально рассмотрим технические аспекты данной задачи

Пусть мишень движется сверху вниз во входной плоскости (см. Рис.II.1.8, слева) и проходит расстояние S_{in} от положения I до положения II за время t. Диафрагма с двумя отверстиями расположена между источником света и плоскостью мишени. Диаметр каждого отверстия несколько больше, чем диаметр мишени, а расстояние между их центрами - S_{in}. На рисунке показан один источник света, однако возможно и использование двух – по одному на каждое положение мишени. В выходной плоскости корреляционный максимум движется в направлении, противоположном направлению движения мишени, то есть – снизу вверх. Если конфигурация мишени близка к эталонной (а именно такой случай и представляет для нас интерес), то корреляционный пик будет достаточно интенсивным и узким.

В выходной плоскости оптической схемы (это плоскость детекторов) располагаются два фотодиода D_1 и D_2 на расстоянии S_{out} друг от друга, а также две быстрых ПЗС линейки LA₁ и LA₂. ПЗС линейки расположены недалеко от фотодиодов в плоскости перпендикулярной оптической оси и вдоль линии перпендикулярной траектории мишени (они показаны на Рис.II.1.8). Расстояние S_{out} выбрано так, чтобы во время движения мишени от положения I к положению II, корреляционный пик перемещался от D_1 к D_2 Ясно, что расстояние S_{out} всегда может быть определено для конкретной оптической схемы. Временная задержка t, измеренная между максимумами сигналов первого и второго детекторов,



Рис. П.1.8. Схема одновременного измерения параметров движущейся мишени, ее скорости и траектории



Рис. II.1.9. Электронная схема диагностики качества мишени и ее скорости. D_1 и D_2 – фотодетекторы; 1 – усилитель; 2 – аналоговый сумматор; 3 – АЦП; 4 – цифровой компаратор входных данных с эталоном; 5 – время-цифровой конвертор. Слева снизу показан расчетный профиль корреляционного пика. Осциллограммы сигналов, полученных при экспериментальном моделировании работы схемы, показаны справа внизу.

однозначно определяет скорость мишени V = S_{in}/t . Здесь мы предполагаем, что мишень движется равномерно. В случае, если это не так и мишень движется с ускорением, то схема измерения становится несколько сложнее (она должна в этом случае включать три или более детекторов), а алгоритм расчета скорости мишени соответствующим образом изменяется. Однако, это не является принципиальным и мы здесь не будем рассматривать такие варианты.

Показанная на Рис.II.1.9 схема, иллюстрирует возможное техническое решение для одновременного определения скоростей мишеней и отбора их по качеству. Мы видим, что в рассматриваемой схеме скорость мишени может быть определена сразу же как только мишень пройдет точку II. Пусть расстояние между точками II и I равно 3 см. Следовательно, мишени необходимо 10^{-4} сек, чтобы преодолеть это расстояние. Такой временной отрезок может быть легко измерен с высокой точностью. Например, если частота задающего генератора будет 10^9 Гц, точность измерения составит 10^{-3} %.

Быстрые линейки ПЗС предназначены для определения отклонения мишени от заданной траектории. Фирма «*Dalsa*» производит ПЗС линейки из 512 элементов с временем считывания 70000 линий/сек. Для таких линеек за время считывания смещение мишени будет всего лишь 4-5 мм при скорости 200-300 м/сек. Очевидно, что такое смещение не является критическим для отбраковки мишени или коррекции ее траектории. Следует учесть, что численная обработка данных детекторов, необходимая для выработки управляющего воздействия на мишень, должна быть быстрой. Для этого можно использовать, например, аппаратно реализованную и специально обученную нейросеть или быстрый спецпроцессор.

Возможная схема блока электроники для анализа траектории мишени и выработки управляющего воздействия на нее представлена на Рис.II.1.10.



В настоящее время трудно оценить предельную точность измерения траектории мишени, так как она в значительной степени зависит от особенностей реализации механических, оптических и электронных компонентов системы характеризации, а также от выбранных алгоритмов обработки данных. Можно только утверждать, что при параметрах системы, приведенных выше, возможно определение положения мишени в плоскости нормальной к ее траектории с точностью не хуже ± 2 мкм. Соответствующее угловое смещение траектории при этом будет составлять около $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ радиан.

Выше мы рассмотрели определение траектории мишени только в одной плоскости (проекции траектории на плоскость). Ясно, что для определения траектории мишени в пространстве необходимы две одинаковых взаимно ортогональных системы.

Таким образом, рассмотренная схема пороговой характеризации удовлетворяет основным требованиям по определению качества летящей мишени, ее скорости и траектории. Предложены конкретные варианты решения данной задачи, рассмотрена возможная техническая реализация электронных блоков системы, основанная на стандартных и доступных в настоящее время компонентах.

Литература

- 1. E.R.Koresheva, A.I.Nikitenko, I.V.Aleksandrova, et al. *Possible approaches to fast quality control of IFE targets*. Nuclear Fusion, **46**, 890-903, 2006
- 2. Р.Кольер,К.Беркхарт. Л.Лин., Оптическая голография. М.: Мир, 1973
- 3. А.Арсено, Ж.Априль. Голография Фурье. В сб. Оптическая голография. М.: Мир, 1982
- 4. Д. Кейсасент. *Распознавание образов и знаков*. В сб. Оптическая голография. М.: Мир, 1982
- 5. FFTW, User manual, <u>http://www.fftw.org/</u>

Глава 2. Использование вэйвлет анализа при обработке изображений сферических оболочек и криогенных мишеней

§1. Введение

Основной целью настоящей главы является изучение вопроса о возможности применения вэйвлет методов для характеризации сферических оболочек и криогенных мишеней (ICF мишеней). Для решения этого вопроса требуется пройти несколько важных этапов:

- Разобраться досконально с современным положением в теории и практике применения вэйвлет методов, чтобы понять, что от них можно ожидать в принципе и какие именно разделы этой обширной области следует взять на вооружение для практического применения в нашей задаче.
- 2. Сформулировать критерии, по которым можно было бы сравнивать результаты, полученные разными методами. Например, что дает лучшие результаты при фильтрации изображения мишени – адаптивный фильтр Винера или алгоритм, построенный на основе вэйвлет преобразования? Какого типа вэйвлет преобразование здесь должно быть применено? Ответить на эти вопросы можно, только если есть объективный количественный критерий. А подобных вопросов можно поставить немало.
- 3. Наконец, накопить опыт применения вэйвлетов и вэйвлет преобразований в конкретных задачах.

Понятно, что, прежде всего, нужен инструмент. Вы можете применять вэйвлет методы, только если у вас в руках есть соответствующая библиотека методов, функций и пр. В результате поиска в сети было обнаружено, что имеется несколько доступных библиотек вэйвлет методов, как коммерческих, так и свободно распространяемых. Однако внимательное изучение показало, что ни одна из них наших потребностей удовлетворить не может. Все имеющиеся ресурсы либо нацелены на решение какой-то конкретной узкой задачи (сжатие изображений, например), либо не полны и не поддаются модификациям.

Поэтому нами была разработана собственная библиотека вэйвлет методов. Первая ее версия содержит все необходимые базовые классы и методы для выполнения прямого и обратного вэйвлет преобразования одномерных и двумерных (таких как теневые изображения) массивов данных. Туда включены также фильтрация данных, непрерывное вэйвлет преобразование (анализ данных), вэйвлет пакеты, лифтинг алгоритм. Она написана на языке C++, построена по модульному принципу (отдельные ее части можно использовать независимо), расширяема и легко может встраиваться в любые проекты.

Для демонстрации возможностей библиотеки были также написаны две программы: "Wavelet1D" – работа с одномерными данными и "Wavelet Studio" – работа с изображениями. Эти программы, кроме демонстрационных и обучающих целей, способны также решать вполне серьезные задачи по обработке и анализу реальных данных.

§2. Среднеквадратичное отклонение (rms) от формы для отдельных слоев мишени.

Среднеквадратичное отклонение σ (root mean square deviation - rms) для набора данных r_i , состоящего из N значений определяется хорошо известной формулой:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} (r_i - \overline{r})^2}{N}}$$
 II.2.1

где – среднее значение по набору.

ГЧасто требуется найти среднеквадратичное отклонение для некоторой совокупности частотных мод данного массива данных. Например, этот массив может представлять зависимость радиуса оболочки от угла в некотором ее сечении. Для такого массива может быть вычислен спектр мощности (power spectra). В данном случае он характеризует вклад отдельных пространственных мод в форму поверхности оболочки. Рассмотрим подробнее связанные с этим вопросы.

Если функция $f(x) \in L^2[0,2\pi]$, то ее можно представить в виде ряда Фурье:

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} C_n e^{inx}$$
 II.2.2

где коэффициенты ряда определяются как

$$C_{n} = \frac{1}{2\pi} \int_{0}^{2\pi} f(x)e^{-inx} dx$$
 II.2.3

Квадрат модуля этих коэффициентов образует последовательность, называемую спектром мощности (power spectra):

$$P_n = \left| C_n \right|^2 = C_n C_n^*$$
 II.2.4

- здесь * - означает комплексное сопряжение.

Для коэффициентов ряда Фурье справедливо равенство Парсеваля, которое может трактоваться, как закон сохранения энергии:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{0}^{2\pi} |f(x)|^2 dx = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |C_n|^2$$
 II.2.5

В практических вычислениях мы всегда имеем дело с конечными массивами данных, заданных на дискретном наборе точек. В этом случае прямое преобразование Фурье для массива данных f_m длиной N:

$$C_k = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} f_m e^{-\frac{2\pi k m i}{N}}$$
 II.2.6

а обратное

$$f_{k} = \sum_{m=0}^{N-1} C_{m} e^{\frac{2\pi kmi}{N}}$$
 II.2.7

Для определения вклада отдельных наборов мод в среднеквадратичное отклонение заданного массива данных в программе "*Bright Ring*" (см. Главу 1 раздела I) нами использовался следующий алгоритм. Над массивом проводилось преобразование Фурье, затем обнулялись моды, которые нас не интересуют, проводилось обратное преобразование Фурье и определялся rms полученной кривой. В принципе, это не единственный путь и можно было бы вычислять значения rms для произвольного набора мод на основе равенства Парсеваля, но нам кажется, что использованный способ является более корректным.

Для реализации описанных возможностей в программу "Bright Ring" были внесены небольшие изменения. На форму для вывода двумерной графики было добавлено окошко выбора моды, кнопка определения rms и кнопка вывода сигнала с обрезанными модами. Значения rms для заданного набора мод появляются в отдельном окне. Мы не будем описывать здесь эти изменения подробно, так как необходимые пояснения имеются во встроенной справке (Help) программы "Bright Ring".

§3. Вэйвлеты. Основные понятия.

Введение в вэйвлет анализ часто начинают сравнением вэйвлет- и Фурье- преобразований. Действительно, Фурье анализ – это разложение сигнала f(x) по системе ортонормированных функций, в качестве которых в данном случае выступает $sin(\omega x)$, а точнее комплексная экспонента - $exp(i\omega x)$. Здесь x время или пространственная координата, а ω частота или пространственная частота соответственно. Далее везде в тексте в соответствии со спецификой данной работы – обработка изображений мишеней – мы будем рассматривать пространственные координаты, а говоря о частоте и спектре будем иметь в виду пространственную частоту и спектр.

Основная особенность Фурье анализа – его базисная функция является периодической и неограниченной. Отсюда совершенно ясно, что Фурье образ $g(\omega)$ функции f(x) содержит только частотную информацию, - пространственная информация полностью теряется. Говоря другими словами, базис Фурье не локализован в пространственной области, что не дает возможность определить частотную характеристику (спектр) для конкретного значения *x*.

Во многих практических применениях это свойство преобразования Фурье является большим недостатком. Как можно было бы преодолеть его, сохранив достоинства преобразования Фурье (гармонический анализ, прямое и обратное преобразование без потери информации, инвариантность относительно сдвига)? Можно, например, использовать базисные функции, которые достаточно хорошо локализованы в пространственной и частотной областях. Мы пока не будем обсуждать, каковы конкретно должны быть эти функции, их свойства и как их можно найти. Отметим только, что если бесконечную синусоиду с полным правом можно назвать волной, то эти функции можно было бы назвать маленькими волнами (wavelets). Собственно говоря, именно это название и прижилось, стало общеупотребительным, хотя иногда в русскоязычной литературе встречаются и другие термины (всплески, онделеты).

Вэйвлет анализ, - как его теоретические основы, так и практические приложения, - активно развивается лишь последние 30-40 лет, по сравнению с более чем столетней историей Фурье преобразования. Тем не менее, он уже стал очень обширной областью теоретической и прикладной математики и в отличие от Фурье анализа не может быть изложен со скольнибудь приемлемой полнотой на одной - двух страницах текста. Поэтому здесь мы рассмотрим в качестве примеров только некоторые практически значимые для нашей задачи частные случаи.

Следует понимать, что мотивация введения вэйвлет анализа исходя из Фурье преобразования, достаточно однобока и ее надо рассматривать лишь как иллюстрацию понятия вэйвлетов.

Совершенно независимо понятие вэйвлетов может быть получено из многомасштабного анализа. Кроме того вэйвлеты теснейшим образом связаны с таким понятием теории обработки сигналов, как банки фильтров.

3.1. Непрерывное вэйвлет преобразование.

Рассмотрим функцию $\psi(x) \in L^2(R)$ – она принадлежит пространству квадратично интегрируемых функций, - такую что

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) dx = 0$$
 II.2.8

Тогда эта функция локализована в пространстве (вот она – маленькая волна!). Она называется базисным или порождающим вэйвлетом. Из этой функции путем ее масштабирования с параметром *s* и сдвига на величину параметра *u* можно получить целое семейство функций:

$$\psi_{u,s}(x) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{x-u}{s}\right)$$
 II.2.9

причем эти функции нормированы $\|\psi_{u,s}\| = 1$

Непрерывное вэйвлет преобразование W(u,s) функции f(x) может быть определено следующим образом:

$$W(u,s) = \left\langle f\psi_{u,s} \right\rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^* \left(\frac{x-u}{s}\right) dx \qquad \text{II.2.10}$$

(здесь $\langle \rangle$ - обозначает свертку, * - комплексное сопряжение) То есть W(u,s) <u>ес</u>ть свертка функций *f* и $\psi_{u,s}$. Если для порождающего вэйвлета выполняется условие (здесь ψ (*x*) представляет собой Фурье образ вэйвлета $\psi(x)$),

$$C_{\psi} \equiv \int_{0}^{\infty} \frac{\left|\overline{\psi}(\omega)\right|^{2}}{\omega} d\omega < +\infty$$
 II.2.11

то существует обратное непрерывное вэйвлет преобразование:

$$f(x) = \frac{1}{C_{\psi}} \int_{0}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W(u,s) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{x-u}{s}\right) du \frac{ds}{s^2} \qquad \text{II.2.12}$$

Таким образом, мы видим, что непрерывное вэйвлет преобразование в принципе обладает свойством полного восстановления (perfect reconstruction - PR). Следует отметить, что непрерывность преобразования не является необходимой для обеспечения PR. Надо также более четко определить в нашем контексте – что же это такое – непрерывность преобразования. В самом деле, реально мы никогда не имеем и в принципе не можем иметь дело с непрерывными и заданными на бесконечном интервале функциями – это лишь удобная математическая абстракция. В нашем распоряжении всегда конечный (дискретный) набор значений функции, заданный в конечном числе точек. При чем же здесь непрерывность? А при том, что шкала масштабирования (параметр s) и сдвиг (параметр u) могут быть выбраны любыми. Таким образом, непрерывное вэйвлет преобразование – это разложение сигнала по всем возможным сдвигам и сжатиям (растяжениям) некоторой функции (порождающего вэйвлета). Практически, однако, непрерывное преобразование обычно выполняется над конечным сигналом и на конечном наборе сдвигов и сжатий. Естественно, в этом случае обратное преобразование не рассматривается.

В отличие от Фурье анализа, у которого всего одна базисная функция – синусоида, базисных вэйвлетов для непрерывного преобразования существует много. Обычно это непериодические, хорошо локализованные в пространстве функции (они быстро уменьшаются, а то и обращаются в 0 на бесконечности), имеющие один или несколько локальных экстремумов. Так давно и хорошо известный вэйвлет, называемый "мексиканская шляпа" – это вторая производная гауссиана.

$$\psi_{mh}(x) = \frac{2}{\sqrt{3\sqrt[4]{\pi}}} (1 - x^2) e^{-\frac{x^2}{2}}$$
 II.2.13

Вообще говоря, только немногие вэйвлеты могут быть определены с помощью аналитического выражения в пространственной или частотной области. Большинство задается только набором своих фильтров (см. ниже). Как пример можно привести хорошо известное семейство вэйвлетов Добеши.

Заметим также, что непрерывное вэйвлет преобразование черезвычайно избыточно. Функция W(u,s), как не трудно убедиться, содержит гораздо больше информации, чем исходный сигнал f(x). В этом как слабость, так и сила непрерывного вэйвлет преобразования, и именно это обстоятельство определяет области его применения. Оно, во-первых, практически никогда не используется для какой-либо обработки сигнала (например, фильтрации) – слишком велики, а главное неоправданы, накладные расходы (время вычислений, затраты памяти). Во-вторых, именно в силу своей избыточности, оно широко используется для анализа сигналов - выявления каких-то особенностей сигнала, например, разрывов сигнала и его производных, фрактальности, периодичности или плавных изменений периодичности и др. По непрерывному вэйвлет преобразованию и его применениям существует обширная литература [1-3]. Здесь же для иллюстрации мы приведем на Рис.II.2.1 как легко с помощью непрерывного вэйвлет преобразования может быть определен и локализован небольшой, практически незаметный, разрыв функции.



Рис. II. 2.1. Локализация небольшого разрыва функции с помощью непрерывного вэйвлет преобразования.

Заслуживает внимания также еще один факт. Как видно из (II.2.10) результат непрерывного вэйвлет преобразования функции одного переменного есть функция двух переменных, то есть двумерный массив данных, который может быть интерпретирован, да так всегда и делается, как некоторое изображение. Это удобно и естественно для человеческого восприятия.

Преобразование типа (II.2.10) легко обобщить для случая двумерных входных данных – формула будет почти также проста, однако результатом преобразования будет уже функция четырех переменных. Пока еще никто не придумал, как удобно, а главное достаточно понятно для человека, можно визуализировать четырехмерные массивы данных, поэтому о прямом применении непрерывного вэйвлет преобразования для анализа изображений нам неизвестно, хотя вычисления здесь достаточно просты, а современные компьютеры обладают необходимым быстродействием и объемом памяти.

Как промежуточный вариант можно рассмотреть двумерное непрерывное вэйвлет преобразование при фиксированных масштабах по обеим осям. Это может оказаться полезным в задачах распознавания образов.

3.2. Дискретное вэйвлет преобразование.

К понятию дискретного вэйвлет преобразования можно подойти простейшим способом, опираясь на непрерывное преобразование. Количество копий порождающего вэйвлета,

$$s = 2^{-i}, \frac{u}{s} = j$$
 (II.2.14)

где *i,j* – целые числа. Тогда вместо непрерывной *W*(*u,s*) функции получается конечный набор значений:

$$w_j^{(i)} = \langle f \psi_j^{(i)} \rangle \tag{II.2.15}$$

где

$$\psi_{j}^{(i)}(x) = \sqrt{2^{i}}\psi(2^{i}x - j)$$
(II.2.16)

Обратное преобразование выглядит следующим образом:

$$f(x) \sim \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{j=-\infty}^{+\infty} w_{j}^{(i)} \psi_{j}^{(i)}(x)$$
(II.2.17)

Отметим, что для того чтобы это все работало, на порождающий вэйвлет должны быть наложены некоторые ограничения, поскольку далеко не всякий вэйвлет, используемый для непрерывного преобразования, может быть использован и для дискретного. Так, например, приведенный выше вэйвлет "мексиканская шляпа" для этого непригоден (он не имеет скейлинг функции и компактного носителя).

Приведенные выше рассуждения следует рассматривать лишь как простое пояснение смысла дискретного вэйвлет преобразования. Они не являются определением и тем более не исчерпывают всех аспектов этой темы. Строгий вывод дискретного вэйвлет преобразования, его свойств, нахождение функций, являющихся вэйвлетами и пр. может быть основан на многомасштабном анализе. Здесь мы не будем приводить эти, достаточно пространные, рассуждения и доказательства, - на данную тему имеется обширная литература [3-6]. Остановимся только на некоторых важных выводах.

Существует, так называемая, порождающая скейлинг-функция $\varphi(x)$. Последовательность скейлинг функций $\varphi_j^{(i)}(x)$, получаемых из $\varphi(x)$ в соответствии с уравнением (II.2.16), если в нем заменить ψ на φ , образует ортонормированный базис. Функция $\varphi(x)$ единственным образом (если она нормализуема) определяется масштабным соотношением, которое также иногда называют уравнением измельчения (как ни странно, соответствующий английский термин при дословном прочтении имеет практически противоположный смысл - dilation equation):

$$\varphi(x) = \sqrt{2} \sum_{k} h_k \varphi(2x - k) \tag{II.2.18}$$

Каждой порождающей скейлинг функции $\psi(x)$ соответствует порождающий вэйвлет $\psi(x)$ (обратное в общем случае неверно), который определяется следующим образом:

$$\psi(x) = \sqrt{2} \sum_{p} g_{p} \varphi(2x - p) \tag{II.2.19}$$

Здесь k и p – целые числа. Обратите внимание, что, хотя выражения (II.2.18) и (II.2.19) внешне похожи, они имеют принципиально различный смысл: первое – это уравнение, а второе – выражение одной функции через другую. Из (II.2.18, II.2.19) также следует, что скейлинг- функции и вэйвлеты полностью определяются наборами коэффициентов {h_k} и {g_p}.



Рис. П.2.2-2. Вэйвлет Морле.

Последний вывод представляется черезвычайно интересным и в некоторой степени удивительным. Во-первых, форма вэйвлетов и скейлинг функций могут быть достаточно сложными (на рисунках II.2.2.-(1-5) они приведены для ряда хорошо известных вэйвлетов), а число коэффициентов, определяющих форму - очень небольшим. Для практически широко



Рис. II.2.2-3. Вэйвлет db4 и соответствующие фильтры.

используемых вэйвлетов это число обычно лежит в пределах от 2 до 20. Во-вторых, эти коэффициенты прямым и очень простым образом связаны с коэффициентами фильтров, используемых при реализации дискретного вэйвлет пребразования по алгоритму Малла (Mallat).

Смысл дискретного вэйвлет преобразования состоит в том, что входной сигнал S на каждом уровне разложения i разделяется на свое огрубленное представление v_i (низкочастотная часть или как часто ее называют - аппроксимация) и уточняющую информацию w_i , потерянную при огрублении (высокочастотная часть или детали). Оказывается, что прямое и обратное преобразование может быть записано с использованием только коэффициентов фильтров h и g. Мы приведем здесь эти выражения в векторной форме и без вывода. Прямое преобразование:

$$\mathbf{v}_{i} = \oint_{2} \left[\mathbf{v}_{i+1} \otimes \mathbf{h}^{*} \right] \qquad \mathbf{w}_{i} = \oint_{2} \left[\mathbf{v}_{i+1} \otimes \mathbf{g}^{*} \right] \qquad (\text{II.2.20})$$

Обратное преобразование:

$$\mathbf{v}_{i+1} = \uparrow_2 [\mathbf{v}_i] \otimes \mathbf{h} + \uparrow_2 [\mathbf{w}_i] \otimes \mathbf{g}$$
(II.2.21)



Рис. II.2.2-5. Биортогональный вэйвлет bior1.5 и соответствующие фильтры.

Здесь знак \otimes означает операцию свертки, * - означает перестановку элементов фильтра в обратном порядке, \downarrow_2 [**s**] – оператор прореживания сигнала **s** (выкидывание каждого нечетного

106

элемента - downsampling), \uparrow_2 [s] – оператор добавления после каждого элемента сигнала s нулевого элемента (upsampling), *i*-уровень разложения.

Выражения (II.2.20, II.2.21) описывают классический пирамидальный алгоритм быстрого вэйвлет преобразования – БВП (алгоритм Малла). Как мы видим здесь уже отсутствуют в явном виде скейлинг функция и порождающий вэйвлет.

Не углубляясь в математические детали, отметим еще, что требование ортогональности системы базисных скейлинг-функций $\varphi_j^{(i)}(x)$ можно ослабить и потребовать, чтобы система являлась базисом Рисса (пояснеие термина см., например в [4]). В таком случае мы приходим к биортогональному дискретному вэйвлет преобразованию, широко используемому на практике. Говоря иначе, при биортогональном преобразовании разложение сигнала производиться с помощью одной вэйвлет функции (фильтра), а реконструкция с помощью другой, как говорят, двойственной первой, функции (фильтра).

Количество информации. получаемой в результате дискретного вэйвлет преобразования ровно столько, сколько необходимо для полной реконструкции – сигнал длиной N разлагается ровно на N вэйвлет коэффициентов. То есть такое преобразование, в отличие от непрерывного, не обладает избыточностью.

Существует еще одна очень важная и, к сожалению, негативная особенность дискретного вэйвлет преобразования, особенно отрицательно сказывающаяся при обработке двумерных сигналов (изображений). Возвращаясь к непрерывному вэйвлет преобразованию, из приведенных формул легко заметить, что оно инвариантно относительно сдвига, то есть:

$$W_{f(x+\alpha)}(u,s) = W_{f(x)}(u+\alpha,s) \tag{II.2.22}$$

Для дискретного преобразования в той форме, как оно изложено выше, это, к сожалению, неверно. Преодолеть этот недостаток можно только введением информационной избыточности, хотя и меньшей, чем для непрерывного преобразования. Практических способов существует довольно много, и мы не будем их здесь описывать. Упомянем только о стационарном вэйвлет преобразовании (SWT) [3], комплексном вэйвлет преобразовании двойного дерева (DT CWT) [7] и вэйвлет фреймах [4].

3.3. Многомерное вэйвлет преобразование.

Простейшим случаем многомерного преобразования является прямое обобщение одномерного случая на случай большей размерности. Функциями такого преобразования являются тензорные произведения одномерных функций по размерности преобразования. Здесь мы рассмотрим только двумерный случай. Для него получается четыре порождающих функции – одна скейлинг-функция

$$\varphi\varphi(x, y) = \varphi(x)\varphi(y) \tag{11.2.23}$$

и три вэйвлета

$$\varphi \psi(x, y) = \varphi(x)\psi(y)$$

$$\psi \varphi(x, y) = \psi(x)\varphi(y)$$

$$\psi \psi(x, y) = \psi(x)\psi(y)$$

(II.2.24)
Используя эти порождающие функции нетрудно вывести все остальные соотношения. Мы не будем здесь этого делать для экономии места. Остановимся лишь на основных выводах.

Оказывается, что в двумерном случае используются без каких либо изменений те же фильтры, что и в одномерном дискретном преобразовании и все выводы полученные для одномерного случая остаются справедливыми.

Заметим, что если в одномерном случае на каждом шаге преобразования сигнал разделяется на две компоненты – аппроксимация и детали, то в двумерном случае будет четыре компоненты - аппроксимация, горизонтальные, вертикальные и диагональные детали. Таким образом, данное двумерное преобразование является четырехканальным (в трехмерном случае оно будет уже восьмиканальным).

Практическая реализация двумерного преобразования очень проста. На каждом шаге (уровне) разложения сначала производится преобразование над строками двумерного входного массива данных (изображения), а затем над столбцами полученной матрицы. Обратное преобразование выполняется в обратной последовательности.

§4. Алгоритмы вэйвлет преобразования.

4.1. Непрерывное вэйвлет преобразование (CWT).

Пусть входной сигнал – последовательность значений, заданных в N равноотстоящих точках:

$$f(x) = f_i, \quad i = 0, 1, 2...$$
N-1. (II.2.25)

Подставляя его в (II.30) получим:

$$W(u,s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \sum_{j=0}^{N-1} f_i \int_{j}^{j+1} \psi\left(\frac{x-u}{s}\right) dx$$
(II.2.26)

В соответствии с этой формулой и осуществляется практически вычисление непрерывного вэйвлет преобразования.

Нетрудно заметить, что в (II.2.26) осуществляется свертка входного сигнала с интегралом от базисного вэйвлета. Длина входного сигнала, как правило, достаточно велика (от нескольких сот до нескольких тысяч точек). Длина базисного вэйвлета для обеспечения точности вычислений также берется достаточно большой (обычно ~1000 точек). При таких условиях прямое нахождение свертки (векторное перемножение матриц) требует очень большого количества вычислений (сложность $O(N^2)$). Это количество можно существенно уменьшить, если вспомнить, что Фурье образ свертки двух функций есть произведение Фурье образов этих функций. С учетом этого факта вычисления производятся следующим образом:

- вычисляется интеграл вэйвлет функции;
- вычисляется его Фурье образ;

- вычисляется Фурье образ входного сигнала;
- находитя скалярное произведение двух Фурье образов это есть Фурье образ свертки;
- над ним осуществляется обратное Фурье преобразование.

Такой алгоритм (его сложность порядка O(NlogN)) позволяет существенно увеличить скорость вычислений (> 10 раз в некоторых случаях). Практически, для осуществления Фурье преобразований используется библиотека *FFTW* [8] – одна из самых доступных библиотек.

4.2. Дискретное вэйвлет преобразование. Классическая схема.

Для осуществления дискретного вэйвлет преобразования используется классический алгоритм Малла (Mallat). Все необходимые выражения приведены в (II.2.21, II.2.22). Все же здесь мы вернемся к этому вопросу, чтобы пояснить некоторые детали.



Рис. И.2. 3. Схема алгоритма дискретного вэйвлет преобразования



Рис. II.2. 4. Многоуровневое разложение сигнала

На Рис.II.2.3 приведена схема, по которой осуществляется дискретное вэйвлет преобразование. Входной сигнал проходит через два фильтра (фильтр верхних – (D_hi) и фильтр нижних частот – D_lo). Затем осуществляется прореживание (downsampling) результатов

фильтрации – выкидывание нечетных элементов. На выходе мы получаем две последовательности сА – аппроксимация (огрубленный сигнал) и сD – детали – фактически это высокочастотная часть сигнала. Суммарный размер сА и сD практически совпадает с размером входного сигнала (краевые эффекты мы сейчас не рассматриваем)

Реконструкция происходит в обратном порядке. В последовательности сА и сD добавляется ноль после каждого элемента (upsampling). Затем они пропускаются через фильтры нижних (R_lo) и верхних (R_hi) частот соответственно, а затем результат складывается. Если мы ничего не изменили в наборе коэффициентов сА и сD, то получим снова исходный сигнал, если же мы, например, уменьшим коэффициенты деталей, то и реконструированный сигнал будет отличаться от исходного. На этом основана фильтрация сигналов на основе вэйвлет преобразования.

Заметим, что для разложения и реконструкции сигнала используются разные наборы фильтров. Эти четыре фильтра образуют систему, которая называется квадратурными зеркальными фильтрами. В свою очередь все четыре фильтра могут быть легко получены из одного набора коэффициентов (фильтра), однозначно характеризующего вэйвлет (для биортогональных вэйвлетов таких наборов будет два).

Процесс разложения сигнала можно повторять многократно (см. Рис.II.2.4). Такая схема называется многоуровневым разложением.

4.3. Дискретное вэйвлет преобразование. Лифтинг алгоритм.

Лифтинг алгоритм (лифтинг схема) [9] – это сравнительно новый алгоритм вэйвлет преобразования, который может рассматриваться как альтернатива пирамидальному алгоритму Малла. Он обладает несколькими привлекательными чертами:

- вычисления могут выполняться in place, то есть вэйвлет коэффициенты, по мере их расчета записываются в исходный массив данных и нет необходимости в выделении дополнительной памяти;

- могут быть корректно, без введения каких-либо дополнительных предположений и расширения исходного массива данных учтены граничные условия;

- алгоритм легко обратим – при реконструкции сигнала нужно выполнить те же самые действия, что и при его разложении, но только в обратном порядке;

- алгоритм может быть легко приспособлен для целочисленных вычислений;

- лифтинг алгоритм в большинстве случаев работает быстрее классического;

- он может быть применен для обработки данных, заданных на неравномерной сетке;

- лифтинг схема может быть использована для построения вэйвлетов и вэйвлет преобразования функций заданных на сложных многомерных поверхностях, например, на сфере [10,11].

По лифтинг схеме и ее применениям существует обширная литература, мы же здесь лишь вкратце поясним ее смысл.

Основная идея данного подхода заключается в последовательности трех операций: разделения (S - splitting), предсказания (P - prediction) и обновления (U - update). Обозначим исходный массив данных как λ^0 (Здесь 0 означает уровень разложения, а не индекс). Как правило, между элементами этого массива существует корреляционная зависимость (мы, во всяком случае, можем на это надеяться). Тогда появляется возможность представить этот массив меньшим количеством значимых элементов (устранить дублирование информации). Давайте разделим исходный массив на две части – массивы λ^1 и γ^1 . Не конкретизируя способ разделения потребуем лишь, чтобы при обратном преобразовании из λ^1 и γ^1 можно было восстановить λ^0 . Как мы видим, разделение может быть произвольным. Однако, ясно, что если мы, например, возьмем просто первую и последующую половины массива, то корреляция между их элементами вряд ли будет большой. Гораздо выгоднее разделить массив на четные – это будет λ^1 и нечетные элементы γ^1 . Такая схема называется ленивым вэйвлет преобразованием (lazy wavelet transform).

На следующем этапе (предсказание) попытаемся уменьшить количество информации в γ^1 . Разумным кажется сначала попытаться предсказать значения элементов массива γ^1 используя соседние элементы из массива λ^1 . Конечно точно мы, как правило, сделать это не сможем, тем не менее мы можем получить достаточно сильное приближение – $P(\lambda^1)$. Затем заменим массив $\gamma^1 \leftarrow \gamma^1 - P(\lambda^1)$. Если предсказание выполнено достаточно хорошо, то полученный массив будет содержать больше коэффициентов с малыми и нулевыми значениями, чем оригинальный массив $\gamma^1 \leftarrow \gamma^1 - P(\lambda^1)$. Говоря другими словами, мы уменьшаем количество информации в γ^1 . Оператором предсказания $P(\lambda^1)$ обычно является интерполяционный полином степени N. Это означает, что если исходный массив представляет собой полином степени не выше N-1, то все элементы массива γ^1 окажуться нулевыми. Формулируя это в терминологии вэйвлетов, можно сказать, что на этапе предсказания устанавливается количество нулевых моментов N двойственного вэйвлета в биортогональной паре. Лифтинг схема использует фактически биортогогональные вэйвлеты из семейства *Cohen-Daubechies-Feauveau*.

Этап предсказания, как он описан выше, можно было бы повторять итеративно много раз, до тех пор, пока в массиве λ^n не останется один элемент. Но какой это будет элемент? Очевидно, что это просто некое случайное значение, не отражающее никаких интегральных свойств исходного массива. Это, естественно, нас не может устроить. Поэтому в лифтинг схеме присутствует еще один этап – обновление.

Этот этап необходим, чтобы сохранить некоторые глобальные свойства исходного массива λ^0 в его уменьшенной версии λ^1 . Идея заключается в том, чтобы к уже вычисленному нами на этапе предсказания массиву γ^1 применить некий оператор U(γ^1), такой, чтобы можно было с его помощью скорректировать значения λ^1 и тем самым сохранить в них некие скалярные характеристики исходного массива. Таким образом, на этапе обновления мы заменяем массив λ^1 его скорректированными значениями $\lambda^1 \leftarrow \lambda^1 + U(\gamma^1)$. В терминологии вэйвлетов на этапе обновления мы устанавливаем количество нулевых моментов R первичного вэйвлета.

Теперь, если мы будем итеративно повторять эти три этапа, до тех пор, пока λ^n не будет состоять из одного элемента, этот последний элемент уже не будет случайным числом, а будет равен сумме значений элементов массива λ^0 (или среднему значению элементов массива, в зависимости от использованной нормировки). Отметим, что в уже сложившейся терминологии лифтинг алгоритма, соответствующие коэффициенты называются лямбда и гамма коэффициентами, поэтому мы не случайно использовали выше такие обозначения.

Для реализации лифтинг алгоритма нами была использована открытая библиотека LIFTPACK [12]. Поскольку авторы этой библиотеки свободно распространяют исходные коды, они были нами модифицированы в соответствии с нашей задачей и переписаны на C++ (оригинальная версия написана на C).

Данная библиотека реализует лифтинг схему на интервале, - то есть автоматический учет граничных условий. Она включает в себя преобразование одномерных и двумерных (изображения) сигналов.

Следует отметить, что автоматический учет граничных условий приводит к некоторым проблемам. Упрощенно говоря, он сводится к вычислению особых вэйвлет функций вблизи границ. Это, в свою очередь, требует решения системы линейных уравнений. Размер данной системы зависит от значений параметров N и R и может быть довольно большим. Если исходный массив данных достаточно велик (длина порядка 1000 или более), N и R велики и уровень разложения также выбран большим, то коэффициенты при неизвестных в системе уравнений будут очень сильно отличаться друг от друга (в 10^{80} и более раз). Это приводит к тому, что точности вычислений, которую обеспечивают числа типа **double** или даже **long double** становиться недостаточно. В результате решение становится неустойчивым и на преобразованном сигнале или изображении могут появляться артефакты. Хотя мы и ограничили диапазон возможных значений параметров N и R, все же не исключена возможность проявления этого эффекта при некоторых сочетаниях исходных данных и параметров разложения.

4.4. Вэйвлет пакеты.

Выше, на Рис.II.2.4, была приведена схема многоуровневого разложения сигнала. В ней на каждом уровне подвергается разложению только соответствующая аппроксимация и, как видно из рисунка, существует только n (n - уровень разложения) возможных представлений сигнала: S= A1+D1 = A2+D1+D2 = A3+ D1+D2+D3.

Детали на каждом уровне также могут быть подвергнуты разложению. Тогда мы приходим к конструкции, называемой вэйвлет пакетом (Puc.II.2.5). Как мы видим элементы вэйвлет пакета образуют полное бинарное дерево, а обычное многоуровневое разложение – это лишь его одна ветвь. Здесь уже может быть более $\Re^{2^{n-1}}$ способов представления сигнала.

Вэйвлет пакеты предоставляют большую гибкость при фильтрации и сжатии сигналов. Можно определить количество информации, содержащейся в каждом узле и используя энтропийные критерии найти оптимальное дерево для разложения данного сигнала. С помощью вэйвлет пакетов могут быть также реализованы алгоритмы адаптивной вэйвлет фильтрации [13]. Пакетное разложение сходным образом может быть реализовано и для двумерных входных данных (изображений). Однако в этом случае мы получаем уже не бинарное, а тернарное дерево.



Рис. II.2.5. Пакетное вэйвлет разложение одномерного сигнала.

§ 5. Библиотека вэйвлет методов.

Для того чтобы можно было практически пользоваться всеми плодами теории вэйвлетов и вэйвлет преобразования, вкратце обрисованными выше, необходим соответствующий инструмент. Таким инструментом является библиотека вэйвлет методов.

В ней в настоящий момент реализованы следующие возможности:

Прямое и обратное вэйвлет преобразование одномерных и двумерных массивов данных по алгоритму Малла. Размеры сигналов и изображений могут быть любыми, есть несколько методов учета граничных условий. Для изображений есть методы нормализации результатов и вывода в формате Малла.

- Непрерывное вейвлет преобразование. Дает на выходе матрицу вэйвлет коэффициентов. Возможно задание произвольной, в частности, неравномерной шкалы масштабов.

- Одномерная и двумерная вэйвлет фильтрация. Поддерживаются разные режимы, возможно применение мягкого и жесткого порога.

 Одномерные вэйвлет пакеты. Разложение по бинарному дереву – полное и простая многоуровневая декомпозиция. Расчет энтропии в узлах. Различные режимы фильтрации с использованием набора энтропийных критериев, мягкий и жесткий порог.

- Поддерживаются следующие семейства вэйвлетов: вэйвлеты Добеши, симлеты и коифлеты, вэйвлет Мейера, биортогональные и обратные биортогональные вэйвлеты – для дискретного преобразования, а для непрерывного преобразования кроме того вэйвлеты Гаусса, Морле и мексиканская шляпа.

- Прямое и обратное вэйвлет преобразование одномерных и двумерных массивов данных с помощью лифтинг алгоритма на интервале. Любой размер входных данных. Автоматический учет граничных условий. Могут быть заданы параметры N и R и уровень разложения. Поддерживается фильтрация, нормализация и вывод результата преобразования изображений в формате Малла. - Независимо реализована (в отдельных шаблонных классах) поддержка построения дерева произвольной кратности. Операции с узлами и листьями. Возможность хранения в узлах любых структур данных.

Библиотека построена по модульному принципу – ее логически независимые части могут использоваться по отдельности и ее можно наращивать добавляя новую функциональность либо в виде отдельных классов или их иерархий, либо путем наследования.

Библиотека написана и протестирована в среде C++Builder5. Для демонстрации возможностей библиотеки были также написаны две программы: "*Wavelet1D*" – работа с одномерными данными и "*Wavelet Studio*" – работа с изображениями.

§ 6. Вэйвлеты и Фурье голография: сравнительные возможности применения в области характеризации мишеней.

Анализ данных – та область, где достаточно очевидно проявляется польза применения вэйвлет методов. На Рис. II.2.6 показан характерный пример: яркое кольцо очень хорошо локализуется на матрице вэйвлет коэффициентов. Конечно в данном случае это можно сделать и без применения CWT, однако при наличии шумов вопрос уже выглядит совсем иначе (см. Рис. II.2.7).

Другое полезное применение вэйвлет методов – фильтрация одномерных сигналов



Рис. II.2.6. Пропись изображения однослойной оболочки по радиусу (внизу) и результат непрерывного вэйвлет преобразования этой кривой (вверху).



Рис. П.2.7. То же, что и на Рис. 6, но исходная кривая искажена шумами.

(прописи интенсивности, зависимость радиуса оболочки от угла и пр.). Здесь, естественно, следует использовать DWT, лифтинг алгоритм или вэйвлет пакеты. На Рис. II.2.8 приведен пример такой фильтрации. Вопрос о практическом применении того или иного способа фильтрации должен решаться в каждом конкретном случае с точки зрения поставленной задачи, получаемых преимуществ, вычислительной эффективности и других подобных соображений. Интересно отметить, что при использовании вэйвлет пакетов можно реализовать адаптивную фильтрацию.

Сложнее обстоит дело с непосредственной фильтрацией изображений. Выше мы уже упомянали, что классическое DWT не обладает инвариантностью относительно сдвига, что приводит к различным негативным последствиям. На Рис.II.2.9. представлен пример фильтрации изображения оболочки. Порог фильтрации на всех уровнях разложения намеренно был выбран близким к максимальному, чтобы подчеркнуть картину.

Отличие результатов фильтрации двумя методами бросается в глаза. Это показывает, что обычные методы вэйвлет преобразований в нашем случае не годятся для фильтрации изображений оболочек и мишеней.



Рис. II.2. 8. Вэйвлет фильтрация. Показана часть кривой зависимости внешнего радиуса оболочки от угла (вверху) и результат при различной глубине фильтрации (три кривые ниже). Лифтинг алгоритм. N=4, R=2, уровень разложения –4.



Рис. II.2. 9. Фильтрация изображения. Вэйвлет db4, уровень разложения –4. Слева внизу – классическое вэйвлет преобразование (DWT), правее – стационарное вэйвлет преобразование (SWT).

Применительно к вопросам характеризации лазерных мишеней заслуживают упоминания еще две области возможного применения вэйвлетов. Как известно, качество поверхности оболочки или мишени принято представлять в виде спектра мощности Фурье. Аналогичным образом ту же самую характеристику можно представить в виде спектра мощности по вэйвлет базису. Для вэйвлет разложения также имеется аналог теоремы Парсеваля, и предложенное представление является вполне корректным. Более того, кривая вэйвлет спектра, хотя и совпадает в общих чертах с кривой Фурье спектра, более сглажена – в ней отсутствуют характерные для кривой Фурье резкие колебания [1]. Как нам кажется, спектр мощности на базе вэйвлетов более адекватно отражает физическую реальность и более нагляден. Еще один вопрос касается представления формы какой-либо поверхности оболочки или мишени. С развитием методов измерений становится возможным получить все более детальное описание поверхности. Его можно хранить и представлять в различных формах – как функцию двух переменных (радиус в зависимости от сферических углов), как набор коэффициентов, представляющих разложение формы поверхности по сферическим функциям и т. д. Одна из возможных форм представления – разложение по вэйвлет базису на сфере. Это вполне реально, так как лифтинг схема позволяет сконструировать вэйвлет базис на сфере [10]. С точки зрения анализа возмущений поверхности, такое представление нам кажется предпочтительнее, информативнее и нагляднее других.

Литература

- 1. Н.М.Астафьева. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения. УФН 166 (11), 1145-1170, 1996
- 2. J Lewalle. Введение в анализ данных с применением непрерывного вэйвлет преобразования. <u>www.autex.spb.ru</u>.
- 3. *MATLAB 6.1*, встроенная справочная система, Wavelet toolbox.
- 4. А.В.Переберин. *О систематизации вэйвлет преобразований*. Выч. методы и прогр. **2**, 15-40, 2001
- 5. I.Daubeshies. Ten lectures on wavelets, Philadelphia, SIAM, 1992
- 6. S.Mallat. A wavelet tour of signal processing, New York, Academic Press, 1998
- N.G.Kingsbury. *Image processing with complex wavelets*, Phil. Trans. Royal Society London A, 357, 2543-2560, 1999
- 8. FFTW, User manual, <u>http://www.fftw.org</u>/
- 9. W.Sweldens. The *lifting scheme: a construction of second generation wavelets.*, SIAM J. Math. Anal. **3**, N 2, 186-200, 1996
- 10. P.Schroder, W.Sweldens. *Spherical wavelets. Efficiently representing functions on sphere*, Computer Graphic (SIGGRAPH 95 Proceedings), 1995.
- 11. J.Kovacevic, W.Sweldens. *Wavelet families of increasing order in arbitrary dimensions.*, IEEE Trans. Image Processing, **9**, N 3, 480-496, 2000
- 12. A software package for wavelet transforms using lifting. www.cs.sc.edu/~fernande/liftpack
- 13. R.R.Coifman, M.V.Wickerhauser. *Entropy-based algorithms for best basis selection*. IEEE Trans. on Inf. Theory, **38** (2), 713-718, 1992

Глава 3. Другие подходы к созданию систем пороговой характеризации

Перспективы ускоренного развития исследований по ИТС с лазерным драйвером во многом определяются возможностью достоверного анализа результатов лазерного эксперимента, что в свою очередь зависит от возможности точно и однозначно определить параметры пространственных микрообъектов, таких, например, как криогенная топливная мишень и лазерная термоядерная плазма. Актуальность задачи создания надежной системы диагностики (или, другими словами, системы характеризации) стимулирует появление таких методов и технологий, разработка которых позволит получить пространственную реконструкцию микрообъекта с требуемой степенью точности.

В настоящей главе мы рассмотрим вопросы, касающиеся характеризации криогенных топливных мишеней, включая также и мишени реакторного класса. Последнее обстоятельство требует некоторых пояснений. Напомним, что непременным условием функционирования реактора ИТС является формирование и доставка криогенных мишеней с высокой частотой. При этом полный цикл производства мишеней включает три этапа, на которых выполняется диагностика либо оболочки, либо готовой криогенной мишени (см. Диаграмму 3).



Диаграмма 3 "Полный цикл FST-формирования криогенной мишени"

Подчеркнем, что на последнем этапе "*Характеризация готовой мишени, летящей в камере реактора*" необходимо осуществить сверхбыструю частотную характеризацию криогенных мишеней, что является непременным условием для сертификации работы инжекционной системы доставки топлива в реактор ИТС. Это обусловлено тем обстоятельством, что доставка криогенных мишеней в реакторную камеру должна осуществляться с частотой 5-10 Гц, т.е. характерное время процесса диагностики ограничивается величиной ~ 1мксек. В связи с поставленной задачей мы начали поиск новых возможностей в построении пороговых алгоритмов, учитывая, что они должны обеспечивать: (а) высокую повторяемость (или, другими словами, частотность) процесса контроля качества, и (б) осуществление этого процесса во время полета мишени в реакторной камере (т.е., объектом характеризации является инжектированная мишень). Работа по созданию пороговых алгоритмов основана на использовании различных физических принципов и математических конструкций, чтобы получить возможность варьировать критерии, позволяющие отбраковывать некачественные мишени. Итак, целью характеризации криогенных топливных мишеней является получение надежной информации о структуре данного микрообъекта, причем за вполне определенный конечный промежуток времени. С этой точки зрения, следующие две стадии производства мишеней для ИТС представляют особый интерес:

(1) развитие технологий формирования твердого топливного слоя, когда требуется обеспечить получение наиболее полной информации о структуре мишени (решается задача максимум, т.е. осуществляется трехмерная (3D) реконструкция структуры мишени, позволяющая определить тем или иным способом параметры мишени во всем ее объёме и их соответствие установленным нормативам – требованиям на мишень);

(2) доставка готовых топливных мишеней в коммерческий реактор (решается задача минимум, т.е. определяются такие значения параметров, по которым можно произвести отбраковку мишеней в процессе их инжекции).

Именно специфика каждой стадии производства определяет возможные направления для построения систем контроля качества и диагностики параметров криогенных мишеней. В первом случае требуется обеспечить наиболее полную информационно диагностическую поддержку развиваемой технологии формирования слоя, тогда как во втором – превалирующей задачей является сокращение времени характеризации. Это означает, что информационное поле, соответствующее структуре микрообъекта, и операционное время его обработки, являются важнейшими параметрами, которые должны учитываться при проектировании систем характеризации, ориентированных на ту или иную стадию производства мишеней. Реализация такого подхода возможна лишь в рамках специальной программы, целью которой является построение диагностических систем, позволяющих осуществлять вариации при выборе подходов и методов для решения определенного класса задач. Соответствующая программа была принята в Физическом институте им. П. Н. Лебедева (ФИАН), причем ее основная направленность обусловлена созданием алгоритмов реконструкции с различной информационной структурой [1-6]. Программа включает два основных направления развития:

– Индивидуальная характеризация мишени (создание алгоритмов для 3D реконструкции микрообъекта);

– Пороговая характеризация мишени (создание пороговых алгоритмов различного быстродействия).

Отметим, что целесообразность осуществления пороговой характеризации определяется еще и тем обстоятельством, что при проведении лазерных экспериментов к симметрии процесса сжатия (геометрия облучения, а также геометрия самой мишени) предъявляются крайне жесткие требования (см. Диаграмму 4). Действительно, необходимое обеспечение высокой симметрии при облучении мишени, вообще говоря, снимает задачу о точном определении типа нарушения симметрии, а лишь требует установить, что возникшее возмущение в структуре мишени превосходит некоторый порог. Именно поэтому в рамках программы, принятой в ФИАН, изучались вопросы, связанные не только с построением алгоритмов для 3D реконструкции мишени, но и вопросы построения нового класса алгоритмов, так называемых пороговых, предназначенных для быстрой диагностики микрообъекта.



Диаграмма 4. Схема облучения мишени мощным лазером. Отметим, что при проведении лазерных экспериментов к симметрии процесса сжатия (геометрия облучения, а также геометрия самой мишени) предъявляются крайне жесткие требования.





Проведенные исследования показали актуальность развития данного направления не только для решения задачи диагностики мишеней на стадии их доставки в реактор ИТС, но и на стадии их производства. Это связано с тем, что для пороговой характеризации требуется существенно меньшее количество проекций, причем сокращается и время обработки каждой проекции, так как определяется не весь спектр параметров, а лишь значения некоторых из них, по которым можно произвести отбраковку оболочек или криогенных мишеней.

Порядок проведения характеризации микрообъекта при таком подходе осуществляется в две ступени (см. Диаграмму 5):

– на первой осуществляется пороговая характеризация, т. е. определяется класс соответствия требуемым спецификациям качества (например, N1 мишеней имеют однородность слоя по толщине лучше 15%, N2 мишеней – лучше 10%, N3 мишеней – лучше 5%),

- на второй, исходя из задач эксперимента, осуществляется 3D реконструкция мишени (например, по одной мишени из каждой партии, или все мишени из третьей партии).

Программа по созданию системы характеризации криогенной мишени, осуществляемая в ФИАН, направлена на разработку методов надежного и достоверного контроля качества оболочки и слоя. В Разделе I дано детальное описание алгоритма для 3D реконструкции мишени (задача максимум, алгоритм *BBP*). В Разделе II рассматриваются алгоритмы, предназначенные преимущественно для пороговой характеризации. В этом направлении существует достаточно широкий спектр возможностей, поскольку определяются значения лишь некоторых параметров мишени, по которым можно произвести ее отбраковку без восстановления внутренней структуры криогенного слоя (задача минимум).

Основной проблемой при разработке пороговых алгоритмов является выбор принципа отбраковки мишеней и создание соответствующего математического аппарата, позволяющего по измерению определенного класса величин, характеризующих взаимодействие зондирующего излучения и материала мишени, определить с необходимой степенью точности, что локальные параметры мишени не удовлетворяют заданным требованиям.

Цель исследований, представленных в данной главе, заключается в анализе физических принципов и математических конструкций, позволяющих продемонстрировать возможности пороговых алгоритмов для характеризации криогенной мишени.

В рамках реализации программы по созданию системы пороговой характеризации были рассмотрены 2 подхода:

1. Алгоритм FUNCTIONAL [3,4], работа которого основана на сравнении экспериментальных изображений, полученных при сканировании мишени в парных проекциях (так называемые π - проекции), или в специальных группах проекций. При этом степень отличия двух изображений мишени описывается функционалом сравнения. Выбор такого функционала неоднозначен и существенным образом влияет на сходимость алгоритма. Поэтому, наиболее важным моментом, а, по сути, ключом к решению поставленной задачи является определение структуры оценочного функционала. В работе показано, что наиболее перспективным является построение оценочного функционала в виде суперпозиции функционалов сравнения, чувствительных к аффинным преобразованиям.

2. Алгоритм THRESHOLD [5,6], основанный на непосредственном расчете максимально допустимых отклонений в освещенности изображения (порогов) от номинальных значений, соответствующих идеальной мишени. В отличие от *BBP* алгоритма, алгоритм *THRESHOLD* имеет дело не с конкретной поверхностью, а с целым классом поверхностей, среди которых находятся и те, что дают максимальные отклонения в освещенности CCD матрицы (или экрана) от номинального значения (идеальная мишень). Поиск максимальных отклонений (которые задаются внешними технологическими требованиями на мишень) осуществляется на основе решения экстремальных задач в конечномерных пространствах.

§1. Алгоритм FUNCTIONAL

Работа алгоритма *FUNCTIONAL* может быть реализована в двух направлениях: (1) как алгоритма 3D реконструкции прозрачного микрообъекта (например, мишени по полному набору проекций), и (2) в качестве порогового алгоритма, основанного на сравнении экспериментальных изображений, полуученых при сканировании мишени в парных проекциях (так называемые π - проекции), или в специальных группах проекций. Именно поэтому разработка такого алгоритма представляет особый интерес. Ниже мы обсудим обе указанные возможности работы алгоритма *FUNCTIONAL*.

1.1. Алгоритм FUNCTIONAL для 3D реконструкции мишени

Алгоритм характеризации FUNCTIONAL основан на сравнении двух изображений мишени: изучаемого P_0 (т.е. изображение мишени, которое получено экспериментально, но при этом параметры мишени неизвестны) и текущего изображения P, полученного теоретически при известном (изменяемом!) наборе параметров. В последнем случае имеется в виду модельные функции, задаваемые аналитически, либо с помощью программы 3D Ray Trace Code (см. Раздел I, Глава 1, § 2). Цель работы алгоритма считается достигнутой, если два изображения P_0 и P достаточно мало отличаются друг от друга (в принципе могут и совпадать), т.е. набор параметров для экспериментального изображения P_0 становится известным, так что задача характеризации решена. Степень малости должна задаваться заранее, исходя из точности выполнения эксперимента и точности работы алгоритма.

Создание алгоритма восстановления структуры мишени можно условно разбить на следующие основные задачи:

Разработка регуляризатора и параметризация слоёв

Задача восстановления структуры мишени по её изображениям относится к разряду некорректно поставленных задач, когда по ограниченному набору интегральных характеристик восстанавливается структура объекта. Но её можно свести к корректно поставленной задаче, используя регуляризатор. Выбор того или иного регуляризатора диктуется существующими априорными представлениями об объекте. В нашем случае к априорной информации относится внешний радиус мишени, зона расположения топливного слоя, особенности теневого изображения идеальной мишени и т. д. Регуляризатор – это некий метаматематический оператор, являющийся, составной частью алгоритма решения некорректно поставленной задачи, привносящий в нее априорную информацию (также, например, и с помощью системы предварительного просмотра изображений). Параметризация, в данном случае, это то, как мы будем описывать объект, т.е., и оболочку, и криогенный слой. Имеется в виду следующее: их положение, толщину и пр. мы задаём в виде набора параметров. Например, и оболочка, и слой есть некие эллипсоиды вращения, задаваемые положением их центров и величиной полуосей. Это один возможный набор параметров. Можно задавать среднюю толщину оболочки и криогенного слоя, а также положение и размер локального возмущения на них. Это уже другой набор параметров, другая параметризация. Можно и иначе описывать восстанавливаемую структуру, иначе параметризировать, скажем, вводить до 256 сферических гармоник.

Согласно алгоритму решения прямой задачи, для разрабатываемого обратного алгоритма параметризация мишени осуществлена следующим образом: все слои – эллипсоиды с полуосями a_j и b_j , со сдвинутым центром (его координаты есть x_j, y_j, z_j) и ориентацией \mathcal{G}_j и φ_j . То есть,

$$\lambda_j = (a_j, b_j, x_j, y_j, z_j, \theta_j, \varphi_j), \qquad (II.3.1)$$

где j = 1,...n, а n = 2 - число слоёв. Поскольку <math>n = 2, то общее число параметров 14.

Разработка оценочного функционала

Оценочный функционал (или функционал сравнения) – это основная часть алгоритма. Совершенно неочевидно, как это сравнение будет производиться, и в этом суть того или иного функционала сравнения. Простое вычитание засветок пикселов (примитивный функционал) – это лишь один из возможных выборов функционала сравнения, причем необязательно лучший. Разработка функционала сравнения – центральный момент создания алгоритма реконструкции, тем более, порогового.

 Разработка алгоритма минимизации оценочного функционала в пространстве параметров

Минимизация функционала сравнения – это завершающая часть алгоритма, которая не представляет особых трудностей при ее реализации. Разработка алгоритма минимизации может быть выполнена различными методами.

Работу алгоритма по восстановлению структуры мишени можно кратко описать следующим образом:

1) При сканировании мишени её изображение получается на регистрирующей матрице в виде функции от степени засветки пиксела в дискретном варианте, а в непрерывном виде – это просто функция двух переменных P(x, y). Она, конечно, зависит от структуры оболочки мишени и криогенного слоя, которые будем характеризовать неким набором параметров $\lambda = (\lambda_1, ..., \lambda_n)$. Их количество зависит от способа описания мишени, т. е., ее параметризации. Итак, после параметризации имеем изображение в виде $P(x, y; \lambda_1, ..., \lambda_n)$.

2) Сравниваем два изображения, «исследуемое» $P_0(x, y)$ и «текущее» $P(x, y; \lambda_1, ..., \lambda_n)$, полученное при решении прямой задачи (программа *3D Ray Trace Code*, Раздел I, Глава 1, § 2) при помощи функционала сравнения $\Im(P_0, P)$, который по определённому правилу сопоставляет функции-изображения P_0 и P. Выбор правила сравнения – это предмет исследования. Однако, целесообразно (чтобы сразу не усложнять задачу) начать с квазилинейного случая:

$$\mathfrak{I}(P_0, P) = \iint_{photo} \left(P(x, y; \lambda_1, \dots, \lambda_n) - P_0(x, y) \right) \cdot w(x, y) \cdot dx dy , \qquad (II.3.2)$$

где w(x, y)- весовая функция.

3) Зная величину оценочного функционала $\Im(P_0, P)$, минимизируем его в пространстве параметров $\lambda = (\lambda_1, ..., \lambda_n)$, а именно: требуется решить систему $\frac{\partial \Im}{\partial \lambda_j} = 0$ и найти такой набор $\lambda = (\lambda_1, ..., \lambda_n)$, при котором изображение P мало отличается от P_0 .

4) Восстановление заканчивается, когда достигается требуемая степень малости отличия изображения P от изображения P_0 .

Основную трудность при создании алгоритма восстановления структуры мишени представляет большое время решения прямой задачи. Поэтому, параллельно ведется поиск альтернативных алгоритмов, основанных на разработке оригинальных схем сравнения изображений (алгоритм *FUNCTIONAL* для пороговой характеризации мишени, см. п. 1.2).

Итак, выбор оценочного функционала – одна из важнейших задач, поскольку степень отличия двух изображений друг от друга описывается функционалом сравнения, который и минимизируется шаг за шагом. Именно поэтому и уделяется такое внимание выбору того или иного функционала сравнения. От этого выбора зависит "измятость" гиперповерхности миимизируемого функционала, наличие у него локальных минимумов и даже "оврагов". Перечисленные особенности непосредственно влияют на точность восстановления структуры мишени. Отметим, что сравнение изображений P_0 и P можно производить, руководствуясь двумя различными подходами:

(1) оценивать лишь различие в интенсивности засветки различных точек двух изображений безотносительно к деталям формы и структуры мишени;

(2) строить оценочные функционалы, ориентированные именно на детали формы и структуры мишени.

Результаты проведенных исследований показали, что второй поход оказывается предпочтительнее. При этом, разумеется, нецелесообразно учитывать одновременно все особенности формы и структуры мишени, как то: её сферичность, наличие локальных возмущений криогенного слоя, концентричность, и т.д. Каждую подобную деталь следует "отрабатывать" отдельно, минимизируя соответствующий, всякий раз иной, функционал сравнения в пространстве не всех, а лишь вполне определенных параметров, наиболее важных именно при реализации описания рассматриваемой детали изображения мишени. Затем эти параметры уже не изменяются, а изменяются другие с целью минимизации другого функционала сравнения, ориентированного теперь уже на контроль какой-то иной детали в изображении мишени. И так далее. В качестве "базовых функционалов" (или как первое приближение) можно рассматривать функционалы сравнения, чувствительные к аффинным преобразованиям. Такие преобразования существуют, например, в аналитической геометрии, в теории пространств и т.п. Выбор же той или иной последовательности применения этих или подобных функционалов, равно как и выбор для них параметров минимизации, зависит от наличия характерных особенностей или областей в структуре изображения мишени. В нашем случае можно выделить три характерных области: край изображения, яркое кольцо и центральную зону.

Использование различных форм оценочного функционала позволяет создать своеобразную библиотеку функционалов сравнения (**БФС**), необходимую для анализа различных структур в исследуемом изображении мишени.

Учитывая перечисленные характерные области, мы остановились на функционалах сравнения, чувствительных к основным видам аффинных преобразований. Речь идёт о преобразованиях масштабирования (растяжения или сжатия по какому-либо направлению), поворота и сдвига. У таких преобразований везде существует обратное преобразование, т.е., их якобиан везде отличен от нуля. Поэтому, скажем, проецирование не является аффинным преобразованием. Обоснованием именно такого выбора может служить простая аналогия с наложением дух фигур на плоскости (например, треугольников, см. Рис.II.3.1а). Для совмещения треугольников P_0 и P необходимо осуществить преобразования сдвига, поворота и масштабирования.

На Рис.II.3.16 представлены результаты тестирования функционала масштабирования с использованием теневых изображений мишени, полученных при помощи кода 3D Ray Tracing Code (см. Раздел I, Глава 1, § 2). Параметры мишени изучаемого изображения P_0 (Studied Image) задавались следующим образом: это полимерная оболочка диаметром 1 мм и толщиной стенки 15 мкм, на внутренней поверхности которой выморожен криогенный слой толщиной 100 мкм. Результат действия функционала масштабирования достигается на 4 шаге, когда $P_0 = P_4$.

Накопленные к настоящему времени данные позволяют утверждать, что для успешного восстановления широкого класса функций, представляющих возмущения всех слоев мишени, а точнее, связанных с ними поверхностей разрыва показателя преломления, перспективным представляется направление с использованием ряда функционалов, таких как сдвиг, поворот, масштабирование, вызываемых специальными подпрограммами по определенному алгоритму следования. Это позволяет строить оценочные функционалы, ориентированные именно на детали формы и структуры мишени.

Таким образом, особенностью решения задачи характеризации мишени с использованием функционала сравнения является создание некоторой суперпозиции функционалов, чувствительных к аффинным преобразованиям. Отметим, что в оценочном функционале при необходимости может быть задействовано и неаффинное преобразование на тот случай, если только аффинное движение окажется недостаточным при построении функционалов, ориентированных на последовательную отработку деталей структуры и формы мишени. Это следует иметь в виду при дальнейшем развитии направления, связанного с созданием библиотеки функционалов сравнения.

Ниже мы приведем результаты тестирования работы алгоритма FUNCTIONAL как алгоритма 3D реконструкции прозрачного микрообъекта, представляющего собой сложную суперпозицию функционалов сравнения.

Итак, изучалась сходимость алгоритма *FUNCTIONAL*, представляющего собой следующую суперпозицию функционалов сравнения: *функционал сдвига* + *функционал вращения* +

функционал масштабирования + *примитивный функционал* (т.е. когда осуществляется простое вычитание засветок пикселов).

Сделаем несколько замечаний о выборе поверхности восстановления при тестировании алгоритма. В предыдущем случае (Рис.II.3.1б) это была сферически симметричная поверхность твердого криогенного слоя, равномерно вымороженного на поверхности полимерной оболочки (т.е. результат процесса FST- формирования). Теперь мы рассмотрим жидкий слой, являющегося исходным состоянием топлива непосредственно перед началом формирования.

Формирование твердого топливного слоя внутри массива движущихся оболочек по методу **FST** (Free-Standing Targets) [4,7,8] осуществляется при инжекционном транспорте мишени между основными элементами **FST**- системы: мишенный контейнер - модуль формирования – тестовая камера (Puc.II.3.2a). Цикл формирования реализуется следующим образом. Находящиеся в контейнере оболочки с жидким (или газообразным) топливом инжектируется в канал формирования, который представляет собой специальную вставку в криостат в виде вакуумированной трубки с охлаждаемыми стенками. В канале мишени движутся в быстрой последовательности, одна за другой, что позволяет реализовать частотную инжекцию готовых криогенных мишеней в тестовую камеру.

Пусть перед началом FST- формирования топливо в оболочке находится в жидком состоянии (Puc.II.3.2б). В этом случае топливо под действием силы тяжести стекает на дно оболочки, образуя поверхность раздела фаз в виде мениска, который отчетливо виден на фотографии. При движении мишени по каналу формирования в результате ее контакта с холодной стенкой последнего происходит охлаждение мишени, и равномерное вымораживание сконденсированной топливной смеси на стенке оболочки (так называемая *динамическая симметризация жидкого топлива*, обусловленная свободным вращением мишени при ее качении вдоль канала формирования, см. Рис..II.3.2,в).

Поставим теперь задачу восстановить поверхность раздела фаз (мениск), которую топливо имело еще до начала формирования мишени. Поверхность мениска отличается от сферической (причем отличается в разной степени для различных координат радиуса- вектора), а его расположение обладает существенной асимметрией по отношению к оболочке (см. Рис.II.3.26). Кроме того, при проведении численных экспериментов (Рис.II.3.3) функция начального приближения P₁ выбиралась из условия реализации достаточно сильного отклонения от исходного образа P₀, что хорошо видно на Рис.II.3.3a (кадр 1). Отметим, что примитивный функционал использовался лишь на тех стадиях работы алгоритма, когда различие между сравниваемыми образами P_0 и P_i (i = 1, ..., где n – номер кадра) не может считаться малым (т.е. различия между P_0 и P_i велики). Это связано с тем, что данный вид функционала реагирует лишь на разницу в освещенности двух изображений. В этом случае отсутствует какое-либо преимущественное выделение параметров минимизации (а значит и деталей изображения) уже просто по определению примитивного функционала. Поэтому использовать примитивный функционал как составную часть суперпозиции функционалов сравнения, чувствительных к аффинным преобразованиям, целесообразно лишь на тех стадиях работы алгоритма, когда отличие образов P_0 и P_i все еще остается значительным.

На каждом шаге работы алгоритма сравнение двух изображений осуществляется с помощью оценочного функционала. После выполнения процедуры его минимизации, текущему изображению P_i присваивается новый (но всегда известный) набор параметров, и инициируется новый шаг работы алгоритма. Восстановление проекции считается законченным, если два изображения P_0 и P близки, т.е. набор параметров для P_0 стал известен. Далее осуществляется переход к следующей проекции, для которой формируется свой массив P_i текущих изображений. Минимизация оценочного функционала по полной выборке всех проекций завершает работу алгоритма.

Отметим также, что работа алгоритма может быть начата с различных стартовых позиций. В этом случае перспективно построение оценочного функционала с выделением подобластей изображения вблизи зоны интереса. Это позволяет более детально исследовать структуру самой зоны путем использования в локализованной области не одной, а нескольких суперпозиций функционалов сравнения. Кроме того, указанная возможность имеет большое значение для реализации процедуры выхода из локального минимума за счет переноса работы алгоритма из опасной зоны в иную стартовую позицию и выбора соответствующего шага минимизации функционала

Для визуализации работы программы, были проведены исследования по созданию системы предварительного просмотра изображений (Preliminary Image Bowser, или **PIB**), облегчающей процедуру их анализа с помощью алгоритма *FUNCTIONAL*:

1. Разработана подпрограмма Gradient Functional (**GF**), включающая процедуру предварительного анализа изображений по компонентам вектора градиента освещённости исходного изображения.

2. Разработана подпрограмма Modified Image (**MI**) для построения освещенности изображения в нелинейной палитре. Подпрограмма **MI** ориентированна на выделение затемнений в исходном изображении мишени.

3. Разработана подпрограмма Local Minimum (LM). На данный момент она работает по следующему алгоритму: пусть в некоторой локальной области теневого изображения мишени или оболочки засветка пикселя меньше или равна засветки соседних пикселей, то этот пиксель остается видимым и рисуется белым (в общем случае серым) цветом, в противном же случае пиксель становится невидимым (рисуется чёрным цветом). Подпрограмма LM ориентированна на искусственное контрастирование исходного изображения мишени.

4. Разработана подпрограмма Editing Pattern (**EP**), фактически задающая шаблон редактирования для построения оценочного функционала в виде суммы оценочных функционалов, «чувствующих» лишь те или иные подобласти изображения.

5. Разработана программа визуализации с многооконной графикой, позволяющая наглядно представить работу всех созданных подпрограмм системы просмотра изображений.





криогенный слой толщиной

 $\mathbf{A} \mathbf{W} = 40 \text{ mkm}$

Сформирован твердый

Состояние оболочки с топливом перед началом формирования

B Hoche FST

Диагностика

Зондирующее

Излучение

Мишени

Тестовая Камера

слоя







Puc.II.3.36. Результаты реконструкции, полученные на последней стадии работы алгоритма. Кадр 12 фиксирует момент, когда суперпозиция функционалов сравнения достигает главного минимума. Работа алгоритма окончена.

Визуализация работы подпрограммы **EP** выполнена в виде перемещаемой по экрану линейки-шаблона, представляющей собой систему концентрических окружностей. Перемещение линейки осуществляется при максимизации окна "Gradient Functional". Ее смещение будет наблюдаться сразу во всех окнах, и любое из них может быть выбрано для просмотра.



(a) Подпрограмма GF показывает, что край изображения мишени имеет более сложную структуру



(b) Подпрограмма GF выделяет подобласти в изображении мишени, обладающие повышенным информационным статусом (например, Q₁).



Рис.II.3.4 на примере подпрограммы Gradient Functional, которая основана на обработке исходного изображения с помощью градиентного функционала, наглядно демонстрирует достоинства системы, позволяющей реализовать визуализацию особенностей в изображении мишени на более информативном уровне.

Так, например, из Рис.II.3.4a сразу видно, что край изображения мишени имеет более сложную структуру, чем это следует из анализа исходного изображения. На Рис.II.3.4б после обработки исходного изображения подпрограммой **GF**, стали четко выделяться скрытые особенности в изображении мишени (см., например, подобласть Q₁, обозначенную пунктирной линией). Более того, явная асимметрия в изображении мишени свидетельствует о том, что она заведомо имеет отклонения в своей структуре от требуемой конфигурации, так как только идеальная мишень характеризуется центральной симметрией всех своих проекций.

Таким образом, предварительная обработка изображения с помощью подпрограммы **GF** позволяет четко распознать скрытые области изображения, которые могут иметь повышенный интерес в последующей процедуре реконструкции мишени.

Подчеркнем еще один важный момент. Созданная **PIB** система, по существу, представляет собой источник получения априорной информации об объекте, позволяющей существенно сократить время работы алгоритма. Это является еще одним веским аргументом не только для ее создания, но и для последующего развития этого направления при разработке эффективных систем диагностики для ИТС. Сокращение времени работы алгоритма достигается за счет следующих факторов:

 – сокращается число обращений к прямой задаче, решение которой составляет основное время работы алгоритма;

различные подпрограммы могут обрабатывать сразу несколько проекций;

 обработка всего поля изображения становится необязательной для любой асимметричной проекции.

Поясним сказанное на примере анализа изображения полимерной оболочки, исходный вид которого представлен на Puc.II.3.5a (Studied Image).

Для вывода информации одновременно открываются несколько графических окон, которые имеют соответствующие заголовки (Рис.II.3.5а – Рис.II.3.5г) Так, например, подпрограмма Modified Image (Рис.II.3.5б) свидетельствует о существенной неравномерности в распределении интенсивности по полю изображения. Это может быть реализовано графически в окне Intensity Distribution Image, или ID Image (см. Рис.II.3.5в). Выбор направлений ID прописи (Y1, Y2, Y3, Y4) соответствует направлениям, предварительно заданным на Рис. II.3.5а (Studied Image). Подпрограмма Gradient Functional (Рис.II.3.5г) показывает наличие локальных возмущений на теневом изображении оболочки.

С помощью линейки-шаблона, представляющей собой систему концентрических окружностей (на рисунке показаны пунктирными линиями), легко выполнить построение оценочного функционала в виде суперпозиции оценочных функционалов. Рис. II.3.5г показывает, как выделить те области изображения, которые имеют более высокий информационный статус. Очевидно, что при работе алгоритма особый интерес будут представлять подобласти вблизи границ первого и второго кольца, а также область между третьим и четвертым кольцом, имеющие характерные локальные возмущения. Таким образом, обработка всего поля изображения становится необязательной для любой асимметричной проекции. Обработка изображения подпрограммой Local Minimum целесообразна, если изображение имеет сложную структуру в черно-белой палитре. Это относится, прежде всего, к теневому изображению криогенной мишени. В нашем случае, (имеется в виду Рис. П.3.5 – изображение полимерной оболочки) она не проводилась. Однако отметим, что РІВ система осуществляет локализацию области топливного слоя для любого класса мишеней, включая реакторные, отслеживая тем самым особую зону интереса при восстановлении структуры мишени. Подчеркнем также, что PIB система позволяет легко включать и иные возможности первичной обработки исходного кадра за счет введения дополнительных окон в состав программы (например, ID Image, см. Рис. П.3.5в), т.е. имеет определенные степени свободы, позволяющие осуществлять вариации при вводе априорной информации об объекте.

Окончательный вариант оформления структуры программы осуществляется после завершения полного цикла тестирования работы алгоритма *FUNCTIONAL*.



Рис. II.3.5. Предварительная обработка изображения с помощью созданного комплекса подпрограмм позволяет получить различную априорную информацию об объекте и выделить те области изображения, которые могут иметь повышенный интерес в последующей процедуре реконструкции объекта.

1.2. Алгоритм FUNCTIONAL для пороговой характеризации мишени

Работа алгоритма *FUNCTIONAL* в качестве порогового алгоритма основана на сравнении экспериментальных изображений, полуученых при сканировании мишени в парных проекциях (так называемые π - проекции), или в специальных группах проекций. Непосредственно само сравнение изображений мишени осуществляется с помощью оценочного функционала, построенного в виде суммы оценочных функционалов, «чувствующих» лишь те или иные подобласти в изображении мишени (*Q* - число таких подобластей), имеющие повышенный информационный статус (например, подобласти, обладающие той или иной степенью асимметрии):

$$\mathfrak{I}(P_1, P_2) = \sum_{k=1}^{k=Q} \mathfrak{I}_k =$$

$$= \sum_{k=1}^{k=Q} \left(\sum_{i=1}^{i=N} \sum_{j=1}^{j=M} \left(\left(\chi_1 \frac{P_1(i,j)}{P_{1norm}} \right)^{\alpha} - \left(\chi_2 \frac{P_2(i,j)}{P_{2norm}} \right)^{\alpha} \right)^{\beta} \right) w_k(i,j) \cdot \alpha_k \cdot \Delta s$$
(II.3.3)

где P_1 и P_2 – сравниваемые изображения мишени, полученные экспериментально, $N, M, \Delta s$ соответственно размерность ССD матрицы и площадь одного пиксела, χ_1 и χ_2 – масштабные коэффициенты, а параметры P_{1norm} и P_{2norm} отражают тот факт, что освещённости изображений должны быть нормированы. Далее, α_k здесь – это численные коэффициенты, способ определения которых лежит в очень широком диапазоне. Например, он может основываться на изучении закономерностей в формировании неких особенностей в изображении мишени (положение и яркость колец, асимметрия освещенности изображения, и т.д.). Или α_k находятся из каких-либо других соображений, в частности, с учётом частных мнений исследователей, основанных на проставлении рейтинговых оценок ω_k экспериментальным изображения по степени их непохожести на «опорное» изображение P_0 , представляющее собой изображение идеальной мишени. Система рейтинговых оценок также может быть включена в построение оценочного функционала через соответствующую систему уравнений:

$$\sum_{k=1}^{k=Q} \mathfrak{I}_{k} = \omega_{l}, \quad l = 1, \dots Q.$$
(II.3.4)

Принцип сканирования мишени для решения задачи ее пороговой характеризации с помощью алгоритма *FUNCTIONAL* легко понять исходя из следующих соображений:

1) только идеальная мишень обладает одинаковыми, причем центральносимметричными проекциями для любого угла сканирования,

2) если изображения мишени, полученные в π - проекциях (сканирование под углами, отличающимися на 180 градусов, например, $\alpha 1 = 0^{\circ}$ и $\alpha 2 = 180^{\circ}$ или $\alpha 1 = 30^{\circ}$ и $\alpha 2 = 210^{\circ}$) отличаются друг от друга или не являются центрально-симметричными, то структура мишени, безусловно, отличается от идеальной конфигурации,

3) при одинаковых π - проекциях проекция, дополняющая пару, берется в направлении, нормальном паре (например, угол $\alpha 3 = 90^{\circ}$ к паре $\alpha 1 = 0^{\circ}$ и $\alpha 2 = 180^{\circ}$ или угол $\alpha 3 = 120^{\circ}$ к паре $\alpha 1 = 30^{\circ}$ и $\alpha 2 = 210^{\circ}$),

4) организация любой другой группы (см. Рис.II.3.6) строится по аналогичному принципу, причем маркировка группы проводится по верхнему индексу для каждого угла группы (например, α₁³– означает первый угол сканирования в третьей группе).



Рис.II.3.6. Схемы сканирования: (a) – для 3D реконструкции, (б) – для пороговой характеризации.

Очень наглядно пример построения группы осуществляется с помощью системы предварительного просмотра изображений, которая включает определенный набор подпрограмм для получения априорной информации о степени асимметрии экспериментального изображения мишени (см. Раздел II, Глава 1, § 1).

Для проведения экспериментов в качестве исходной базы данных будем использовать набор из 60-ти проекций криогенной мишени, численно сгенерированных с помощью 3D Ray Trace Code (см. Раздел I, Глава 1, § 2).

Ниже приведены параметры криогенной мишени, все линейные размеры которой нормированы на внешний радиус оболочки, а также схемы сканирования:

Внешний слой (оболочка мишени) задается сферически симметричным, и его внутренний радиус $R_i = 0.94$, показатель преломления n = 1.5 (стекло),

Внутренняя поверхность второго слоя (криогенный слой) представляет собой трехосный эллипсоид с полуосями по X, Y и Z равными 0.8, 0.76 и 0.82 соответственно, сдвинутый относительно центра на $\Delta x = 0.01$, $\Delta y = 0.05$ и $\Delta z = -0.02$, показатель преломления второго слоя равен 1.14 (DT смесь),

■ Данные сканирования: общее число проекций - 60, шаг по углу равен 6°.

Собственно сама группа представляет собой выборку из указанных 60-ти проекций криогенной мишени. Построение группы проведем по следующей схеме. Выберем из 60-ти проекций криогенной мишени какую-либо одну проекцию, например, полученную при сканировании под углом $\alpha 1 = 114^{\circ}$. Чтобы образовать пару (π -проекции), необходимо добавить проекцию под углом $\alpha 2 = 114^{\circ} + 180^{\circ} = 294^{\circ}$. Для образования группы проекций возьмем проекцию, отличающуюся от $\alpha 1$ на 90°: $\alpha 3 = 114^{\circ} + 90^{\circ} = 204^{\circ}$.

На рисунках (П.3.7, П.3.8, П.3.9) представлены результаты по обработке указанной группы проекций P¹¹⁴, P²⁹⁴ и P²⁰⁴ с помощью системы предварительного просмотра изображений (PIB). Основной результат заключается в следующем: все три проекции различны, и все, в той или иной мере, асимметричны, причем наибольшие возмущения имеет проекция P²⁰⁴. Следовательно, структура мишени, безусловно, отличается от идеальной конфигурации. Каждая из подпрограмм фиксирует указанные различия в изображениях проекций. Работу подпрограммы GF хорошо иллюстрирует изображение мишени в проекции P¹¹⁴ (Puc.II.3.7). Подобласти изображения, находящиеся в зонах $Q_1, Q_2, ..., Q_n$ (для определенности мы положили n = 5) безусловно имеют повышенный интерес при анализе асимметрии проекции как целого, что очевидно из сравнения с исходным изображением (Studied Image), которое визуально выявленным видом асимметрии не обладает. Подпрограмма MI, ориентированная на выделение затемнений в исходном изображении мишени, хорошо отслеживает структуру яркого кольца, которая оказывается различной для каждой из проекций (P¹¹⁴, P²⁹⁴ и P²⁰⁴). Отметим также, что для изображений, имеющих сложную структуру, подпрограмма LM более эффективна, чем подпрограмма GF. Достаточно сравнить работу этих подпрограмм для проекции **Р²⁰⁴** (Рис. II.3.9). Наконец, на всех трех рисунках **ID-**подпрограмма фиксирует распределение интенсивности вдоль выделенных линий (№ = 1, 2, 3, 4), заданных одинаково для всех трех проекций, входящих в группу. По существу, это окно является иллюстративным, и дано с одной лишь целью – еще раз подчеркнуть перспективность анализа теневых изображений, полученных при сканировании мишени в *π*-проекциях, или в специальных группах проекций. Это хорошо видно из асимметрии ID прописей в центральной части кадра, в области яркого кольца ($N_{2} = 1$), а также по его краям ($N_{2} = 2, 3, 4$). Конечно, одной группы может оказаться недостаточно. Но по предварительным оценкам итоговое количество групп должно быть не более трех – четырех (четвертая, по существу, является контрольной). Поэтому, общее число проекций не превышает 9 или 12 (если иметь в виду контрольную группу). Таким образом, для пороговой характеризации требуется существенно меньшее количество проекций, причем сокращается и время обработки каждой из проекций, так как определяется не весь спектр параметров, а лишь значения некоторых из них, по которым можно произвести отбраковку исследуемых микрообъектов.

С практической точки зрения такой подход очень близок к подходу, использующемуся в оптических системах распознавания образов. Обычно распознавание образов осуществляться с помощью сравнения исследуемого сигнала (в нашем случае это изображение тестируемой мишени) с изготовленным (причем вполне определенным способом) изображением эталонной мишени. Сигнал опознавания при такой схеме сравнения будет пропорционален корреляции изображения тестируемой мишени с образом эталонной мишени, и будет тем больше, чем ближе соответствие между тестируемой и эталонной мишенью.

Однако распознавание образов можно осуществить и на основе иного принципа сравнения, когда анализируются изображения исключительно тестируемой мишени без привлечения операции сравнения с эталоном. В этом случае сигнал опознавания будет тем больше, чем меньше соответствие тестируемой мишени требуемым спецификациям качества.















Рис. II.3.10. Разностный сигнал (#2) при вычитании двух исходных изображений – проекций P¹¹⁴ (#1) и P²⁰⁴ (#3).



Рис. II.3.11. Различие в локализации яркого кольца для двух проекций P¹¹⁴ и P²⁰⁴ после их обработки подпрограммой GF.

Рассмотрим возможность реализации именно такого подхода на основе алгоритма *FUNCTIONAL*. Для проведения экспериментов в качестве исходной базы возьмем ту же группу проекций, которая использовалась нами ранее для анализа асимметрии изображений, а именно P^{114} , P^{294} и P^{204} . Чтобы понять принцип формирования сигнала опознавания, выберем какие-либо две проекции из группы, например, P^{114} и P^{204} . В качестве сигнала опознавания может использоваться как простой разностный сигнал для выбранных двух проекций (Рис.II.3.10), так и разностный сигнал для тех же проекций, но обработанных с помощью **PIB** системы (Рис.II.3.11). Как отмечалось ранее, только идеальная мишень обладает одинаковыми, причем центрально-симметричными проекциями для любого угла сканирования. Следовательно, чем ближе тестируемая мишень к идеальной конфигурации, тем меньше разностный сигнал (т.е., сигнал опознавания). В нашем случае разностный сигнал существенно ненулевой и обладает значительной асимметрией, что свидетельствует об отклонении тестируемой мишени от идеальной конфигурации.

Вопрос количественной оценки, безусловно, связан со структурой сигнала, которая при непосредственном вычитании изображений может оказаться достаточно сложной (см. Рис. II.3.10), так как отражает структуру всего кадра для каждой из проекций. На рисунке пунктирными линиями отмечено, как особенности исходных проекций P^{114} и P^{204} проявляются на разностном сигнале.

Однако, ситуация значительно упрощается, если исходные проекции обработать с помощью системы предварительного просмотра изображений, например, с помощью подпрограммы **GF** (см. Рис.II.3.11). Фактически, это означает, что **PIB** система позволяет осуществить оптимизацию процедуры выбора разностного сигнала. Рис.II.3.11 с очевидностью иллюстрирует этот подход: на разностном сигнале отчетливо видно различие в локализации яркого кольца для каждой из проекций **P**¹¹⁴ и **P**²⁰⁴, что может быть непосредственно использовано для пороговой, но именно количественной оценки качества мишени. Это обусловлено тем, что локализация яркого кольца на теневом изображении мишени однозначно связана с конфигурацией криогенного слоя внутри оболочки (см. в Разделе I принципы построения алгоритма **BBP** для трехмерной реконструкции мишени).

Подчеркнем, что оптимизация процедуры выбора разностного сигнала может быть осуществлена и с помощью других подпрограмм, входящих в систему предварительного просмотра изображений, например, с помощью подпрограммы **MI** или подпрограммы **LM**. Выбор конкретной подпрограммы (а мы не исключаем и случая разработки серии новых подпрограмм) определяется конкретными условиями проведения эксперимента по пороговой характеризации мишени. Например, важным параметром является отношение величин "сигнал / шум" для выбранной системы регистрации изображения мишени. При этом весьма существенным является наличие в используемом алгоритме процедуры нормализации изображений. Это необходимо, когда рассматриваются изображения одного и того же объекта при возникающей в эксперименте вариации экспозиции или освещенности. Наиболее вероятна такая ситуация при сканировании криогенной мишени, находящейся внутри криостата. Поэтому в алгоритме *FUNCTIONAL* предусмотрена возможность учета экспериментальных ограничений, связанных, например, с функцией источника, или учета особенностей в процедуре обработки изображения мишени в зоне интереса. В заключение данного параграфа отметим, что к достоинствам алгоритма *FUNCTIONAL* можно отнести следующие специфические особенности его работы:

■ Осуществление мало проекционной томографии для различных объектов лазерного термоядерного синтеза, таких как полые оболочки (стеклянные и полимерные), криогенные топливные мишени, лазерная плазма, образующаяся в процессе сжатия мишени, и т.д.

■ Возможность обработки, как целого кадра, так и отдельных его частей при наличии асимметрии в изображении мишени (построение результирующего функционала в виде суммы оценочных функционалов), что позволяет существенно снизить время обработки даже одной проекции.

■ Быстрая пороговая характеризация микрообъекта, основанная на двух возможных вариантах сравнения:

 (a) взаимное сравнение экспериментально полученных изображений мишени при ее сканировании мишени в π - проекциях, или в специальных группах проекций (общее число проекций не превышает 9 или 12 проекций, если иметь в виду контрольную группу);

(б) или сравнение экспериментально полученных изображений мишени с эталоном, т.е. изображением идеальной мишени (общее число проекций – 3 (соответственно, вдоль осей X, Y, Z)). В этом случае существует проблема модельного формирования эталонного изображения мишени в условиях, близких к эксперименту. Степень сложности поставленной задачи, безусловно, зависит от выбора зондирующего излучения и схемы получения изображения в одной проекции.

Одновременный контроль качества массива криогенных мишеней (это имеет первостепенное значение при разработке эффективных методов для массового производства криогенных мишеней реакторного класса).

■ Контроль качества мишеней с нанесенным внешним защитным криогенным слоем. Наличие таких слоев позволяет избежать сильных тепловых перегрузок в камере реактора. Здесь имеются в виду следующие соображения. Криогенная мишень должна иметь в момент облучения лазером температуру не выше 18.5 К. При этом температура стенки самой реакторной камеры может достигать значительных величин. Так, например, для камеры реактора SOMBRERO указанная величина составляет ~ 1758 К.

■ Использование специализированной **PIB** системы, которая позволяет:

(1) существенно сократить основное время работы алгоритма,

(2) производить избирательную обработку кадра для любой асимметричной проекции (т.е., для любой асимметричной проекции обработка всего поля изображения становится необязательной),

(3) осуществить оптимизацию процедуры выбора разностного сигнала при пороговой характеризации мишени.

Подчеркнем также, что **PIB** система, по существу, представляет собой источник получения априорной информации об объекте. Расширяя и совершенствуя ее, мы можем выйти на уровень сверхбыстрой пороговой характеризации мишени. Это представляется крайне актуальным, так как позволит в еще более значительной степени сократить время работы алгоритма *FUNCTIONAL*, что является необходимым условием при переходе к диагностике мишеней реакторного класса.
§ 2. Алгоритм *THRESHOLD*

В настоящем параграфе описан подход к характеризации мишени, основанный на непосредственном расчете максимально допустимых отклонений в освещенности изображения (порогов) от номинальных значений, соответствующих идеальной мишени (эталон). Если реальные освещенности выходят за границы порогов, то можно сделать вывод о том, что такая мишень технологически недопустима. Данный алгоритм реализуется только в схеме сравнения экспериментально полученных изображений мишени с эталоном.

В работе впервые предложен и теоретически обоснован пороговый метод диагностики мишеней с использованием центральной группы лучей. Основное отличие в построении алгоритма *THRESHOLD* от *BBP* алгоритма заключается в следующем. Пороговый алгоритм имеет дело не с конкретной поверхностью (как это имеет место в случае *BBP* алгоритма), а с целым классом поверхностей, среди которых находятся и те, что дают максимальные отклонения в освещенности от номинального значения. Поиск максимальных отклонений (которые задаются внешними технологическими требованиями на мишень) осуществляется на основе решения экстремальных задач в конечномерных пространствах. Формализм задачи и построение самого алгоритма можно пояснить исходя из следующих рассуждений.

Итак, пусть мишень сканируется параллельным пучком света заданной длиной волны (см. Рис.II.3.12). Рассматривается прохождение излучения через центральную часть мишени, которое затем реализуется на экране, расположенном вдоль оси z, в виде некоторого распределения интенсивности (см. Рис.II.3.13). Внутренняя поверхность криогенного слоя (или оболочки) описывается в полярной системе координат с помощью функции $r(\beta,\psi)$, где r есть длина радиус вектора, а β,ψ есть, соответственно, сферические углы. Функция распределения интенсивности (Intensity Distribution или ID) в плоскости экрана представляет собой образ функции $r(\beta,\psi)$. Пусть параметры $\varepsilon_0, \varepsilon_1$ определяются внешними технологическими требованиями на мишень (сферичность и шероховатость поверхности, соответственно). Оператор $F(\bullet)$ задан в области определения D с образом $E = \{E(y,z)\}$, где E(y,z) есть ID-функция, то есть F(r) = E:

$$D = \left\{ r(\beta, \psi) \middle| \left| r - r_0 \right| \le \varepsilon_0, \left| \frac{\partial r}{\partial \beta} \right| \le \varepsilon_1, \left| \frac{\partial r}{\partial \psi} \right| \le \varepsilon_1 \right\}$$
(II.3.5)

Рассмотрим два случая: идеальную, или реперную мишень, конфигурация которой отвечает всем технологическим требованиям, и реальную, или тестируемую мишень, параметры которой должны быть определены. В первом случае $r_0(\beta, \psi) \equiv r_0 = const$, т.е. внутренняя поверхность криогенного слоя не имеет возмущений (Рис.II.3.126 и Рис.II.3.136). Определим **ID**функцию такой мишени $E_0(y,z) = F(r_0)$ как номинальную функцию распределения. Тогда во втором случае отклонения E(y,z) = F(r) от номинальной **ID**-функции естественно рассматривать как меру отклонения реальной мишени от идеальной конфигурации. Другими словами, задача порогового алгоритма при определении пригодности (или непригодности) тестируемой мишени для лазерных экспериментов заключается в возможности установить, что возникшее возмущение в структуре мишени превосходит некоторый порог. Проиллюстрируем формализм решения задачи на следующем примере. Пусть точки $M_{ij} = (y_i, z_j)$ принадлежат плоскости экрана. Для каждой точки M_{ii} решим две вариационные задачи:

►Для всех поверхностей $r \in D$ найти $\Delta E_{\max}(y_i, z_i) = \max(E(y_i, z_i) - E_0(y_i, z_i))$ (II.3.6)

► Для всех поверхностей $r \in D$ найти $\Delta E_{\min}(y_i, z_j) = \min(E(y_i, z_j) - E_0(y_i, z_j))$ (II.3.7)

Решение задач (II.3.6) – (II.3.7) является крайне сложным, так как мы должны учесть все поверхности $r(\beta, \psi)$. Поэтому был предложен другой, причем достаточно эффективный подход, основанный на расчете предельно допустимого верхнего $\Delta E_{\max}^{\circ}(y_{i}, z_{j}) \ge \Delta E_{\max}(y_{i}, z_{j})$ и нижнего отклонений от номинальных величин, с которыми и сравнивается реально измеренная картина освещенности. Именно этот метод и был реализован при построении алгоритма *THRESHOLD*. Особо отметим, что предельно допустимые отклонения в освещенности изображения мишени вычислялись на основе решения некоторых задач математического программирования на классе ограниченных вариаций толщины криогенного слоя без какого-либо привязывания к определенному типу возмущений слоя (имеются в виду низкие и высокие гармоники). Полученный результат можно сформулировать в виде важного с прикладной точки зрения правила отбраковки:

Если хотя бы для одного значения угла сканирования α_1 найдется освещенная точка экрана z_0 , в которой измеренное значение отклонения освещенности от номинала $\Delta E(z_0, \alpha_1)$ больше $\Delta E_{\max}(z_0, \alpha_1)$ или меньше $\Delta E_{\min}(z_0, \alpha_1)$, то такая мишень не удовлетворяет технологическим требованиям и должна быть отбракована.

Практическая реализация описанного принципа работы порогового алгоритма при отбраковке мишеней заключается в следующем. Рассчитываются (еще до эксперимента) таблицы величин $\Delta E_{\max}(z_0, \alpha_1)$ и $\Delta E_{\min}(z_0, \alpha_1)$, строки которых соответствуют точкам экрана z_0 , а столбцы углам сканирования α_1 . Проводится эксперимент по сканированию мишени зондирующим излучением под разными углами. Измеренные значения $\Delta E(y_i, z_j, \alpha)$ табулируются. Следующий шаг – применение правила отбраковки при сравнении расчетных и экспериментально полученных значений освещенности.

Используя созданную программу, были проведены расчеты для случая однослойной конфигурации мишени, т. е. полимерная оболочка и криогенный слой рассматривались независимо. Параметры мишени были выбраны с тем расчетом, чтобы оценить эффективность пороговой характеризации в случае реакторных мишеней. Рассматривалась классическая реакторная мишень типа CHGT-1 (classical high gain target), которая представляет собой 4-х миллиметровую полимерную оболочку с толщиной стенки 45 мкм и толщиной криогенного слоя 200 мкм. Мишень впервые была описана в работе S. Nakai и G.N. Miley "Physics of high power laser and matter interactions" (Word Scientific Publishing, Singapore, 1992). Другие величины, используемые в расчетах, имели следующие значения: коэффициенты преломления материала оболочки и топливного слоя равнялись соответственно $n_{shell} = 1.5$ и $n_{layer} = 1.15$, отклонения от сферичности и концентричности – не более 1%, локальные неоднородности на поверхности топливного слоя (шероховатость) не превышают 1 мкм. В обоих случаях (полимерная оболочка и криогенный слой) наблюдается сходное поведение номинальной **ID**функции, а также величин $\Delta E_{\max}(z_0, \alpha_1)$ и $\Delta E_{\min}(z_0, \alpha_1)$.

На Рис.II.3.13а приведены характерные зависимости для интересующего нас случая криогенного слоя. Отметим, что траектория луча при прохождении идеального криогенного слоя показана на Рис.II.3.126, а освещенность изображения на Рис.II.3.136. Согласно правилу отбраковки, если для некоторой точки экрана экспериментальное значение интенсивности для тестируемой мишени лежит вне серого поля сегмента отклонений, то такая мишень не удовлетворяет техническим требованиям, и должна быть отбракована.

Поскольку исследования по созданию порогового алгоритма проводятся с целью создания диагностических систем для быстрой характеризации криогенных мишеней (что является непременным условием для случая мишеней реакторного класса), то в заключении параграфа приведем некоторые соображения по этому поводу. Предлагаемый алгоритм позволяет сократить время характеризации, поскольку не требуется каждый раз решать задачу *3D Ray Tracing* для мишени с конкретной внутренней поверхностью криогенного слоя. Указанные выше экстремальные задачи (II.39)–(II.40) решаются методами асимптотического анализа для целого класса допустимых поверхностей. Кроме того, пороговый алгоритм сравнительно легко реализуем технически, так как позволяет использовать различные схемы сканирования, включая и схемы с произвольным шагом по углу. Минимальное число проекций при прямом и обратном прохождении излучения равно трём (так называемые π -проекции). Это становится очевидным из того факта, что при $\beta = \beta_0 \le \pi/4$ (см. Рис.II.3.12a) отношение зондируемой площади мишени к площади ее внешней поверхности составляет ~ 87 %. Таким образом, к достоинствам алгоритма можно отнести следующие его свойства:

■ Быстрая характеризация микрообъекта. Снижается как время обработки одной проекции, так и необходимое число проекций при определении пригодности (или непригодности) тестируемой криогенной мишени;

 Использование различных схем сканирования, включая и схемы с произвольным шагом по углу;

■ Одновременный контроль параметров массива криогенных мишеней;

■ Возможность использования зондирующего излучения в широком спектральном диапазоне (от рентгеновских лучей до видимого излучения, что зависит от конфигурации тестируемого микрообъекта).

Подчеркнем, что задача характеризации криогенной мишени принадлежит к классу сложнейших задач математической физики, а именно, к классу, так называемых, обратных некорректных задач. Тем не менее, ситуация представляется не такой безнадёжной, если учесть, что нас интересует не сама функция распределения возмущений внутри мишени, а лишь её отклонения от некоторой номинальной функции, соответствующей идеальной мишени. В нашем случае это могут быть, например, отклонения освещенности от номинала, или отклонения в распределении коэффициента преломления, который в идеальных шаровых слоях, представляющих оболочку мишени и криогенный топливный слой, полагается постоянным для каждого слоя.



Рис. II.3.12. Сканирование мишени параллельным пучком света заданной длиной волны (рассматривается прохождение излучения лишь через центральную часть мишени). Возмущения криогенного слоя рассматриваются для целого класса допустимых поверхностей.



Рис. II.3.13. Отклонения в освещенности экрана от номинального значения для классической реакторной мишени типа СНGТ-1. Согласно правилу отбраковки, если для некоторой точки экрана экспериментальное значение интенсивности для тестируемой мишени лежит вне серого поля сегмента отклонений, то такая мишень не удовлетворяет техническим требованиям, и должна быть отбракована.

§ 4. О возможности комбинированного применения алгоритмов

В заключении кратко остановимся на вопросе о возможности комбинированного применения всех трех алгоритмов: *BBP*, *THRESHOLD* и *FUNCTIONAL*. На Puc.II.3.14 приведен профиль интенсивности, полученный для экваториального сечения изображения мишени. При своей работе указанные алгоритмы используют информацию с разных областей кадра: 1 (область яркого кольца) – *BBP* алгоритм, 2 (центральная часть кадра) – алгоритм *THRESHOLD*, 3 (полный кадр) – алгоритм *FUNCTIONAL*.



Рис.II.3.14. Профиль интенсивности, полученный для экваториального сечения изображения мишени.

Алгоритм *BBP* обрабатывает информацию лишь в области яркого кольца и предназначен для 3D реконструкции микрообъекта.

Алгоритм *THRESHOLD* использует центральную часть кадра и позволяет определить только те значения параметров, по которым можно произвести отбраковку мишени (задача минимум). Информация о модах, которые вызвали нарушение симметрии объекта, будет потеряна.

Алгоритм FUNCTIONAL может работать как для осуществления 3D реконструкции микрообъекта, так и как пороговый алгоритм. В первом случае производится сравнение изображений мишени, полученных экспериментально, и симулированных с помощью решения прямой задачи (3D Ray Tracing Code). Основную трудность при этом представляет большое время, необходимое для формирования симулированных изображений на один шаг процедуры минимизации функционала сравнения. Поэтому была разработана система предварительного просмотра изображений (**PIB**), позволяющая существенно сократить количество обращений к прямой задаче, решение которой составляет основное время работы алгоритма. Во втором случае сравниваются только экспериментальные изображения мишени, которые получены при сканировании мишени в парных проекциях (π -проекции), или в специальных группах проекций. Принцип сканирования мишени для решения задачи ее пороговой характеризации изложен в Разделе II, Глава 3, § 2. Там же очень наглядно дан пример построения группы, которое осуществляется с помощью **PIB** системы. Подчеркнем, что **PIB** система, по существу, представляет собой источник получения априорной информации об объекте и позволяет производить избирательную обработку кадра для любой асимметричной проекции.



агностики параметров криогенных мишеней. Для второй стадии необходимо развивать новый класс алгоритмов, так называемые пороговые Диаграмма 6. Специфика каждой стадии производства определяет возможные направления для построения систем контроля качества и диалгоритмы. Система диагностики, построенная на этом принципе, требует определить лишь те значения параметров, по которым можно произвести отбраковку мишени. Информация о модах, которые вызвали нарушение симметрии объекта, будет потеряна. Таким образом, в рамках программы ФИАН по созданию эффективных систем диагностики для ИТС, изучались вопросы, связанные не только с построением алгоритмов для 3D реконструкции криогенной мишени, но и вопросы построения нового класса алгоритмов, так называемых пороговых, предназначенных для быстрой характеризации исследуемых микрообъектов. Впервые была поставлена и решена задача о комбинированном применении всех трех алгоритмов. Показана перспективность проведения диагностики микрообъекта (будь то полимерная оболочка, или криогенная мишень) в две ступени: сначала быстрая пороговая характеризация с помощью алгоритмов *THRESHOLD* или *FUNCTIONAL*, и уже исходя из результатов первой ступени, осуществляется 3D реконструкция с помощью алгоритма *BBP* или *FUNCTIONAL*.

Подводя краткий итог проведенным исследованиям, необходимо подчеркнуть, что создание алгоритмов реконструкции с различной информационной структурой является необходимым условием построения эффективной (имеется в виду функционирование на каждой стадии производства мишени) и надежной системы диагностики для высокоточного определения параметров криогенной мишени. Полный сценарий проведения характеризации, относящийся к работе такой системы, представлен на Диаграмме 6.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. I.V.Aleksandrova, E.R.Koresheva, I.E.Osipov, et al. *Microtomography data processing methods for cryogenic target characterization*. Laser Particle Beams. **17 (4)**, 729-740, 1999
- I.V. Aleksandrova, A.A. Belolipetskiy, V.I. Golov, et al. Progress in the development of tomographic information processing methods for applications to ICF target characterization. Fusion Technology. 38 (2), 190-205, 2000
- I.V.Aleksandrova, S.V.Bazdenkov, V.I.Chtcherbakov. Inverse algorithm for tomographic analysis of backlit shadowgraphy for application to ICF targets diagnostics. Contribution to the 27th European Conference on Laser Interaction with Matter (Moscow, Russia, October 7-11, 2002)
- 4. I.V.Aleksandrova, S.V. Bazdenkov, V.I. Chtcherbakov, et al. *An efficient method of fuel ice formation in moving free-standing ICF/IFE targets*. J.Phys.D: Appl.Phys. **37**, 1-16, 2004
- 5. A.A. Belolipetskiy, I.V. Aleksandrova, E.A. Pisarnitskaya. *On the possibility of laser target characterization on the base of a threshold algorithm*. Contribution to the XXVII European Conference on Laser Interaction with Matter (Moscow, Russia, October 7-11, 2002)
- I.V. Aleksandrova, A.A. Belolipetskiy, E.A. Pisarnitskaya. *Target quality thresholding in ICF* research. A.A.Dorodnitsyn Computing Center of Russian Academy of Sciences, Applied Mathematics, 75 pp., Moscow, 2003
- I.V.Aleksandrova, E.R.Koresheva, I.E.Osipov, et al. Cryogenic fuel targets for inertial fusion: Optimization of fabrication and delivery conditions. J.Russian Laser Research, 28 (3), 207-235, 2007
- 8. I.V.Aleksandrova, A.A.Belolipetskiy, V.A.Kalabuhov, et al. *FST- technologies for high rep-rate production of HiPER scale cryogenic targets*. Proc. SPIE **8080**, 80802M, 2011

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Характеризация параметров криогенной мишени является неотъемлемой стадией при ее производстве и доставке в реакторную камеру, и в рамках программы ИТС относится к фундаментальному направлению исследований.

Программа по созданию системы характеризации криогенной мишени, осуществляемая в Физическом институте им. П. Н. Лебедева, направлена на разработку технологий для прецизионного контроля качества оболочки и слоя, и включает следующие основные разделы:

1) Диагностика криогенных мишеней для различного уровня энергии драйвера и сложности конструкции оболочки,

2) Разработка алгоритмов реконструкции с различной информационной структурой,

3) Создание уникального диагностического оборудования.

Проведенный в работе анализ показал, что дальнейший прогресс в решении поставленной задачи связан с развитием новых направлений в области характеризации криогенной мишени.

Первое направление основано на томографических методах обработки информации, позволяющих осуществить пространственную реконструкцию микрообъекта (криогенной мишени, причем одновременно оболочки и слоя) с требуемой степенью точностью, что необходимо для сертификации методов формирования топливного слоя.

Второе направление предполагает построение нового класса алгоритмов, так называемых пороговых, предназначенных для быстрой диагностики мишени, летящей в камере реактора. При этом требуется осуществить сверхбыструю частотную характеризацию параметров мишени, что является непременным условием для сертификации работы инжекционной системы доставки топлива в реактор ИТС. В зависимости от выбора принципа отбраковки возможно построение различных пороговых алгоритмов.

В настоящей работе проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, направленных на создание алгоритмов реконструкции с различной информационной структурой (*BBP*, *HOLOGRAPHY*, *THRESHOLD*, *FUNCTIONAL*), а также на построение микротомографа для применения в системах ИТС. Представлены результаты анализа физических принципов и математических конструкций, позволяющих продемонстрировать возможности созданных алгоритмов.

В работе также обсуждаются возможности применения вэйвлет преобразований или, говоря шире, вэйвлет методов для решения проблем, возникающих при характеризации сферических оболочек и криогенных мишеней. Представлены демонстрационные программы, написанные на основе разработанной библиотеки вэйвлет методов. Первая ее версия содержит все необходимые базовые классы и методы для выполнения прямого и обратного вэйвлет преобразования одномерных и двумерных (таких как теневые изображения мишеней и оболочек) массивов данных. В библиотеку включены также фильтрация данных, непрерывное вэйвлет преобразование (анализ данных), вэйвлет пакеты, лифтинг алгоритм. Она написана на языке C++, построена по модульному принципу (отдельные ее части можно использовать независимо), расширяема и легко может встраиваться в любые проекты.



Диаграмма 7. Установки Shell Tester и FST Tester, обеспечивающие проведение прецизионного контроля при комнатных и криогенных температурах.

Проведенные исследования также показали, что некоторые методы, основанные на использовании Фурье-голографии, могут обеспечить решение проблемы частотной характеризации криогенной мишени на стадии ее инжекции в камеру взаимодействия реактора ИТС.

Разработаны уникальные диагностические установки (см. Диаграмму 7, а также Таблицу 1), обеспечивающие проведение прецизионного контроля параметров оболочек и криогенных мишеней. Исследуемые микрообъекты: мишени и полые оболочки из стекла или полимера, диаметром Ø = 0.5 – 2.0 мм и толщиной стенки 5 - 30 микрон, заполненные топливом из изотопов водорода в газообразном или сконденсированном состоянии. Установки созданы в рамках проекта МНТЦ №1557 и использовались в следующих проектах ФИАН: проекты МАГАТЭ № 11536 и № 13874, проекты МНТЦ № 1557 и № 3927, проект РФФИ № 06-08— 1575-а. Специализированное программное обеспечение *Target Studio*, созданное в проекте МНТЦ №1557, используется в рамках энергетических программ FIREX (Япония) и УФЛ-2М (Россия).

Установка	Рабочая темпе- ратура	Тип микрообъекта	Условия сканирования	Точность реконструкции
Shell Tester	300 K	Сфорические оболоч- ки: полимерные и стеклянные	Микрообъект укреплен на подвесе	1.5 мкм
FST Tester	300 К и 4.2-77К	Сферические оболоч- ки и криогенные ми- шени	Бесподвесный микрообъект	1.0 мкм

Таблица 1. Основные характеристики созданных установок.

Создана научная и инженерно-техническая база для построения систем контроля для мишеней следующего энергетического класса – реакторных. Актуальность этой задачи диктуется необходимостью достоверного анализа результатов при проведении современных экспериментов по ИТС, а также при переходе к реакторным технологиям частотного производства криогенных топливных мишеней.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают особую признательность профессору Ю.А. Меркульеву за консультации и предоставление полимерных и стеклянных оболочек для проведения криогенных FST- экспериментов, а также профессору Т. Норимацу за предоставление полимерных оболочек для микротомографических исследований.

Подписано в печать 21.08.2013 г. <u>Формат 60х84/8. Заказ №47. Тираж 60 экз. П.л 19,5.</u> Отпечатано в РИИС ФИАН с оригинал-макета заказчика 119991 Москва, Ленинский проспект, 53. Тел. 499 783 3640