

На правах рукописи

ГУБСКИЙ КОНСТАНТИН ЛЕОНИДОВИЧ

**ЛАЗЕРНАЯ АНЕМОМЕТРИЯ В ИССЛЕДОВАНИЯХ УДАРНО-
ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ И ЭКСТРЕМАЛЬНОГО
СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА**

01.04.21 – «Лазерная физика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Автор



Москва 2012

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете
«МИФИ»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент
Кузнецов Андрей Петрович,
НИЯУ МИФИ, г. Москва

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Губин Михаил Александрович
ФИАН, г. Москва
кандидат физико-математических наук
Николаев Дмитрий Николаевич,
ИПХФ РАН, г. Черноголовка

Ведущая организация: Объединённый институт высоких температур
Российской академии наук (ОИВТ РАН),
г. Москва

Защита диссертации состоится «29» февраля 2012 года в 11 час. 00 мин.
на заседании диссертационного совета Д212.130.05 при НИЯУ МИФИ
по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ

Автореферат разослан «27» января 2012 года

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном
экземпляре, заверенном печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Ученый секретарь
диссертационного совета,



О.Б. Ананьин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В последние годы достижения в увеличении энергии и мощности лазеров, пучков заряженных частиц, Z-пинч генераторов открыли возможность создания материи с экстремально высокой удельной плотностью энергии и, как следствие, с высокими давлениями и температурами [1]. Новое поколение экспериментальных установок способно обеспечить концентрацию энергии в веществе более чем 10^{11} Дж·м⁻³ и создавать температуру и давление вещества, существенно превосходящие 10^4 К и 10^{11} Па, соответственно. Это открывает возможность лабораторного изучения явлений, свойственных по масштабу астрофизическим объектам. В частности, ускорители тяжелых ионов в ближайшем будущем смогут обеспечить интенсивные высокоэнергичные пучки вплоть до 10^{11} – 10^{12} частиц за импульс при длительности ионного пучка менее 100 нс [2]. Короткое время выделения энергии (меньшее, чем время гидродинамического разлета) обеспечивает режим изохорического нагрева. Кроме того, поглощение энергии ионного пучка характеризуется возрастанием удельных энергетических потерь ионов в конце пробега (пик Брэгга), что можно использовать для повышения концентрации поглощенной энергии на глубине, примерно равной пробегу иона в веществе мишени.

Исследования, проводимые в физике экстремального состояния вещества (в дальнейшем ФЭСВ), связаны с получением не только фундаментальных знаний о поведении материи в области экстремальных состояний, но и имеют большое практическое значение в атомной энергетике, управляемом термоядерном синтезе, оборонном комплексе, синтезе сверхпрочных материалов, материаловедении, технологии ядерных материалов и т.д.

Получение экспериментальной информации о процессах, проходящих при интенсивных внешних воздействиях на вещество, сопряжено с принципиальными трудностями, связанными как с малой длительностью этих процессов, так и с физико-химическими особенностями объектов исследования. Уникальность проводимых экспериментов и сложность исследования вещества в экстремальном состоянии выдвигают высокие требования к методам исследования и их аппаратной реализации. Особое значение при проведении исследований в области ФЭСВ приобретает использование диагностических комплексов, в кото-

рых комбинация различных методик позволяет максимально увеличить число одновременно измеряемых параметров объекта. Каждая подобная диагностическая установка должна представлять собой комплекс приборов, разработанных непосредственно для этой задачи.

В ФЭСВ основными измеряемыми в эксперименте параметрами служат плотность, давление и температура. Практически единственным способом исследования внутренней структуры образцов в быстропротекающем динамическом эксперименте является импульсная радиография с использованием рентгеновского излучения или высокоэнергетических пучков заряженных частиц, в частности протонов. Протонно-радиографические измерения позволяют с высоким разрешением определить пространственное распределение плотности вещества и его динамические характеристики при ударно-волновом нагружении [3]. На основе получаемых в протонографическом эксперименте данных с применением уравнений гидродинамики ударно-сжатых сред удается вычислить ряд важнейших параметров состояния вещества, в частности, распределение в нем давления и массовой скорости. Однако временная детализация динамических процессов в протонографии ограничена относительно небольшим количеством кадров (обычно до 10) и временным разрешением >10 нс, что требует привлечения дополнительных диагностик, позволяющих получать непрерывную по времени информацию о давлении и массовой скорости вещества. Непрерывное по времени измерение этих параметров, вместе с тем, позволяет получать информацию о механических и кинетических свойствах ударно-сжатого вещества [4].

В отличие от измерений давления, методы определения скорости вещества имеют первичный характер, так как не связаны с построением тарировочных зависимостей. Из всех существующих на сегодняшний день способов непрерывной регистрации массовой скорости, наиболее универсальными являются лазерные методики. Большим достоинством лазерных измерительных и диагностических методов является их бесконтактность, то есть отсутствие воздействия на измеряемый объект в процессе измерения. Немаловажное значение имеет дистанционность измерений. Лазерные методы обладают высоким временным разрешением, в пределах ограниченной скоростью распространения электромагнитных волн. Пространственное разрешение при измерениях определя-

ется дифракционным пределом и может быть доведено до величины порядка длины волны зондирующего излучения.

В связи со всем вышесказанным существует необходимость в создании диагностического комплекса для ударно-волновых экспериментов, состоящего из протонно-радиографической установки и лазерного измерителя скорости, обеспечивающего возможность проведения измерений широкого класса исследуемых объектов.

Для бесконтактного измерения температуры нагретого вещества обычно используются оптические пирометры (радиационные, яркостные, цветовые (пирометры спектрального отношения), пирометры исчезающей нити). Однако их применение возможно только при температурах нагрева, обеспечивающих высокую светимость исследуемого вещества в ближнем ИК и видимом диапазоне спектра (обычно > 1500 К). Бесконтактное определение температуры конденсированного вещества в ФЭСВ при практически любых температурах остается нерешенной проблемой.

Таким образом, существует необходимость разработки лазерных методик измерения термодинамических параметров конденсированного вещества: температуры и массовой скорости для экспериментальных исследований нестационарных физико-химических процессов и экстремальных состояний вещества при интенсивном импульсном воздействии.

Цель работы:

Целями диссертационной работы являются:

1. Разработка лазерной методики непрерывного во времени измерения массовой скорости конденсированного вещества и создание сдвигового квадратурно-дифференциального интерферометра на её основе для экспериментальных исследований нестационарных физико-химических процессов и экстремальных состояний вещества при интенсивном импульсном воздействии.
2. Разработка лазерной методики определения температуры конденсированного вещества, подвергнутого импульсному воздействию интенсивных пучков тяжелых ионов, по изменению скорости звука в исследуемом образце.

Для достижения поставленных целей в работе решены следующие задачи.

1. Разработан лазерный квадратурно-дифференциальный сдвиговый интерферометр, проведено теоретическое и экспериментальное исследование его рабочих характеристик.
2. Проведены тестовые испытания разработанной лазерной интерференционной системы в условиях динамических экспериментов по ударно-волновому нагружению релаксирующих сред и верификация результатов измерений.
3. Разработана система интегрирования лазерного сдвигового квадратурно-дифференциального интерферометра в состав протонно-радиографической установки ТВН-ИТЭФ.
4. Отработана методика совместного использования сдвигового квадратурно-дифференциального интерферометра и протонно-радиографической установки ТВН-ИТЭФ в экспериментах по исследованию нестационарных физико-химических процессов и экстремальных состояний вещества.
5. Разработана лазерная методика измерения температуры конденсированного вещества при импульсном воздействии интенсивных пучков тяжелых ионов, основанная на измерении скорости звука по времени прохождения зондирующего оптоакустического импульса в веществе.
6. Разработана бесконтактная лазерная методика детектирования акустического сигнала в конденсированном веществе на основе шлирен-метода визуализации оптических фазовых неоднородностей.

Научная новизна результатов, полученных в диссертации, состоит в следующем:

1. Предложена оптическая схема квадратурно-дифференциального сдвигового интерферометра, обеспечивающая высокую светосилу, помехозащищенность, автокалибровку измерительных сигналов.
2. Выявлены основные факторы, приводящие к ошибкам измерений массовой скорости квадратурно-дифференциальным сдвиговым интерферометром:
 - изменение коэффициента преломления и наведённое двулучепреломление в диагностических окнах при прохождении ударной волны;
 - девиация проекции скорости объекта на направление оптической оси зондирующего лазерного излучения;
 - дисперсия света в оптической линии задержки;

- 2π -неоднозначность при восстановлении из интерференционных сигналов динамики изменения скорости.

Предложены способы устранения влияния указанных факторов.

3. Впервые применение квадратурно-дифференциального сдвигового интерферометра совместно с протонно-радиографическими измерениями позволило провести исследования динамических характеристик металлического ударника, разгоняемого компактным взрывным устройством и откольных процессов и струеобразования в металлах при ударно-волновом нагружении.
4. Предложена оптоакустическая методика исследований теплофизических параметров конденсированного вещества при импульсном разогреве интенсивным пучком тяжелых ионов. Впервые для регистрации акустического отклика применена бесконтактная лазерная методика детектирования оптических фазовых неоднородностей в отражённом от поверхности исследуемого объекта излучении.

Научная и практическая ценность

1. Разработан и испытан квадратурно-дифференциальный сдвиговый интерферометр, обладающий высокими рабочими характеристиками:
 - диапазон измерения скоростей: 100 -10000 м/с;
 - временное разрешение измерений: $1 \cdot 10^{-9}$ с;
 - пространственное разрешение: $1 \cdot 10^{-2}$ см;процедура калибровки и обработки измерительных сигналов интерферометра, позволяет проводить измерения с погрешностью 1 %.
2. Создан лазерный диагностический комплекс, включающий в себя интерферометр, систему транспортировки и ввода излучения во взрывозащищённую камеру, системы регистрации и обработки результатов для непрерывных во времени измерений ударных профилей массовой скорости вещества.
3. Показано, что квадратурно-дифференциальный сдвиговый интерферометр позволяет получать экспериментальные данные об упруго-пластических, прочностных и кинетических свойствах материалов различных классов, в том числе и химически активных веществ, в условиях ударно-волнового нагружения.
4. Показано, что разработанный интерферометр может быть использован для получения экспериментальных данных о физико-химических и конструкци-

онных свойствах материалов, используемых в атомной энергетике, оборонном комплексе, материаловедении, при синтезе сверхпрочных материалов и т.д.

5. Показано, что разработанный лазерный метод оптоакустического измерения теплофизических свойств конденсированных веществ, основанный на измерении скорости звука, может быть использован для исследования процессов взаимодействия интенсивных пучков заряженных частиц с веществом.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Оптическая схема квадратурно-дифференциального сдвигового интерферометра, обеспечивающая высокую светосилу, помехозащищённость, автокалибровку измерительных сигналов.
2. Квадратурно-дифференциальная методика обработки экспериментальных сигналов, позволяющая проводить измерения при малом отношении сигнал/шум в системе фоторегистрации ($S/N < 2$), и обеспечивающая возможность исследования динамических характеристик объектов с слабоотражающими поверхностями, в том числе диффузного характера.
3. Оптоволоконная система транспортировки лазерного излучения к интерферометру, позволяющая устранить влияние поляризационных эффектов в оптических окнах, подвергнутых воздействию ударной волны.
4. Диагностический комплекс в составе квадратурно-дифференциального сдвигового интерферометра и протонно-радиографической установки, позволяющий проводить измерения ударно-волновых характеристик материалов различных классов, в том числе и химически активных веществ, в динамических процессах при скоростях до 10 км/с.
5. Оптоакустическая методика исследований теплофизических параметров конденсированного вещества при импульсном разогреве интенсивным пучком тяжелых ионов с бесконтактной лазерной методикой регистрации оптических фазовых неоднородностей в отражённом от поверхности исследуемого объекта излучении.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и списка литературы. Работа изложена на 132 страницах, содержит 58 рисунков, 2 таблицы и список цитируемой литературы из 162 наименований.

Личный вклад автора

Все выносимые на защиту результаты и положения диссертационной работы получены и разработаны автором лично, либо при его непосредственном участии. Автор участвовал в постановке, проведении и обработке результатов всех экспериментов.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных семинарах и конференциях: научная сессия МИФИ - 2006, 2007, 2008, 2009; научная сессия НИЯУ МИФИ - 2010, 2011; 5-ый Российский семинар «Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды» (Москва, Россия, 2006); XII Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы» (Звенигород, Россия, 2007); 7-й Международный семинар по проблемам ускорительной техники памяти В.П. Саранцева (Алушта, Россия, 2007); European Particle Accelerator Conference EPAC'08 (Генуя, Италия, 2008); 6-я, 8-я Курчатовская молодёжная научная школа (Москва, Россия, 2008, 2010); 3 Всероссийская молодёжная школа-семинар с международным участием «Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики» (Москва, Россия, 2009); XIII международная телекоммуникационная конференция студентов и молодых учёных «Молодёжь и наука» (Москва, Россия, 2010); Четвёртая Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых учёных и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям (Саров, Россия, 2010); Четвёртая международная конференция «Современные достижения бионаноскопии» (Москва, Россия, 2010).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 14 работ в научных журналах и сборниках трудов международных и российских конференций, в том числе, 5 статей в реферируемых журналах из перечня ВАК.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность разработки лазерных методов и создания диагностических комплексов на их основе для исследования вещества

в экстремальном состоянии; сформулирована цель работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен литературный обзор и анализ существующих на данный момент в России и за рубежом методов исследования экстремального состояния вещества. Описаны основные оптические методы измерения температуры и массовой скорости в ФЭСВ. Дано обоснование использования в подобных экспериментах методик, основанных на методе лазерной анемометрии. Приведено описание, проанализированы достоинства и недостатки наиболее распространённых схем лазерных интерферометров, использующихся для измерения скорости поверхности в быстропротекающих динамических экспериментах. По результатам анализа литературы обоснован выбор оптической схемы неравноплечного сдвигового интерферометра в качестве основы для создания диагностической системы измерения массовой скорости вещества в экспериментах по ударно-волновому нагружению релаксирующих сред и физики экстремального состояния вещества.

Во второй главе проведён теоретический и экспериментальный анализ принципов работы квадратурно-дифференциального сдвигового интерферометра. Проанализированы источники возможных ошибок в интерпретации экспериментальных данных, предложены способы их устранения.

В основу измерения скорости неравноплечным интерферометром положен метод частотного анализа излучения, отражённого от поверхности движущегося объекта. Это достигается за счёт размещения в одном из плеч интерферометра линии оптической задержки (см. рис.2). Её наличие приводит к тому, что разница фаз между интерферирующими на делительном зеркале световыми пучками будет связана не с положением объекта (как в традиционных двухлучевых интерферометрах перемещения), а с его скоростью. Система поляризационного кодирования, подробно рассматриваемая в Главе 3, позволяет сформировать четыре квадратурно-дифференциальных измерительных канала. Точность определения скорости, в конечном счете, определяется процедурой совместной обработки сигналов. В работе был проведён анализ методов обработки экспериментальных данных.

Рассмотрена процедура вычисления текущей величины разности фаз из четырёх информационных каналов, позволяющая минимизировать влияние аддитивных и мультипликативных помех.

Рассмотрены методы расчета величины скорости объекта по измеренной разности фаз:

- динамический, в котором значение скорости напрямую рассчитывается по измеренной величине сдвига интерференционных полос;
- итеративный, в котором скорость находится вычислением текущего значения смещения объекта с последующим численным дифференцированием;
- параметрический, в котором общий характер временной зависимости скорости известен и требуется подобрать коэффициенты этой зависимости для максимального соответствия динамики разности фаз экспериментальным данным.

Проведенный сравнительный анализ этих методов показал, что если характерные времена изменения скорости существенно больше времени оптической задержки в интерферометре, то наибольшей точностью обладает динамический метод. Однако, применимость динамического метода ограничена тем, что в случае, если характерное время изменения скорости сравнимо с временем оптической задержки в интерферометре динамический метод будет искажать временную динамику скорости. На рис. 1 представлены результаты численного моделирования процедуры обработки квадратурно-дифференциальных сигналов динамическим методом для трёх соотношений характерного времени изме-

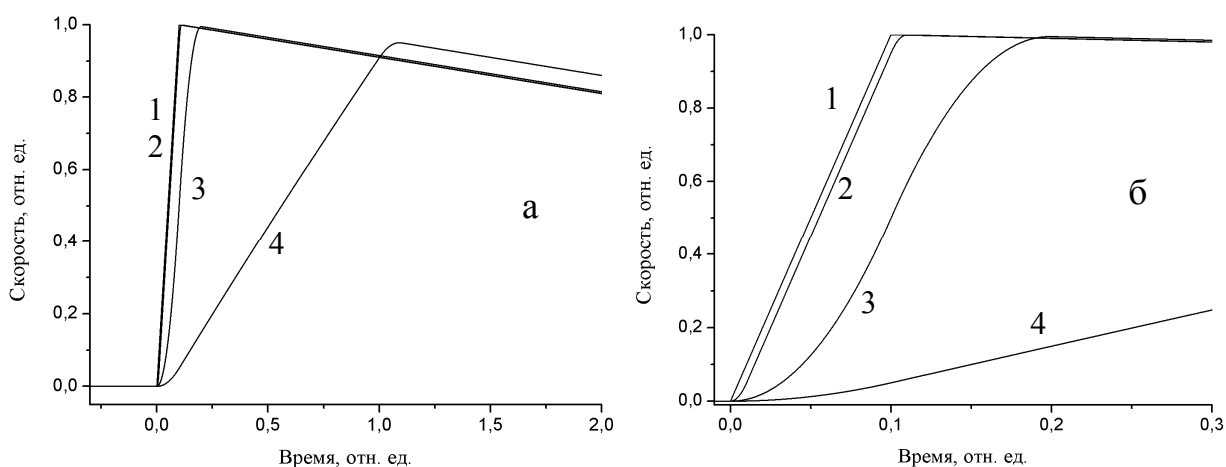


Рис. 1. Результаты численного моделирования работы динамического метода вычисления массовой скорости. Эталонная временная зависимость скорости (1); результат обработки при $t = 10\tau_0$ (2), $t = \tau_0$ (3) и $t = 0,1\tau_0$ (4)

нения скорости t и времени задержки интерферометра τ_0 (графики (а) и (б) отличаются только разным масштабом по оси времени). Если характерное время изменения скорости меньше времени задержки интерферометра для обработки экспериментальных данных требуется использовать итеративный метод.

В работе были выявлены и проанализированы основные факторы, приводящие к ошибкам измерений массовой скорости квадратурно-дифференциальным сдвиговым интерферометром: изменение коэффициента преломления и наведённое двулучепреломление в диагностических окнах при прохождении ударной волны; девиация проекции скорости на направление оптической оси зондирующего лазерного излучения; дисперсия света в оптической линии задержки; 2π -неоднозначность при восстановлении из интерференционных сигналов динамики изменения скорости. Предложены способы их устранения.

Подробно рассмотрены проблемы обработки экспериментальных данных. Исследованы точностные характеристики алгоритмов амплитурно-фазовой нормировки измерительных сигналов.

Рассмотрены причины возможной потери сигналом динамического контраста и связанная с ней проблема 2π -неопределённости фазы.

Проведённый анализ предельной величины погрешности измерений квадратурно-дифференциального сдвигового интерферометра показал, что при ограничении амплитудного разрешения измерений разрядностью аналого-цифрового преобразования и реализуемой в эксперименте точностью настройки квадратур погрешность можно оценить в 0,5 % от измеряемой величины.

В третьей главе представлено описание созданного лазерного диагностического комплекса и результаты тестовых экспериментов по верификации его рабочих характеристик.

На рис.2а представлена общая схема разработанной лазерной системы, в основу которой положены принципы неравноплечной сдвиговой интерферометрии. Конструктивно система состоит из трех частей, оптически связанных между собой оптоволоконными кабелями: лазера и оптической системы транспортировки и сбора отраженного от поверхности объекта излучения; оптического блока интерферометра (рис. 2б, 3) и модуля фотодетектирования. В качестве зондирующего используется излучение непрерывного одночастотного твердотельного лазера на кристалле $YVO_4:Nd^{3+}$ с внутриврезонаторной генерацией

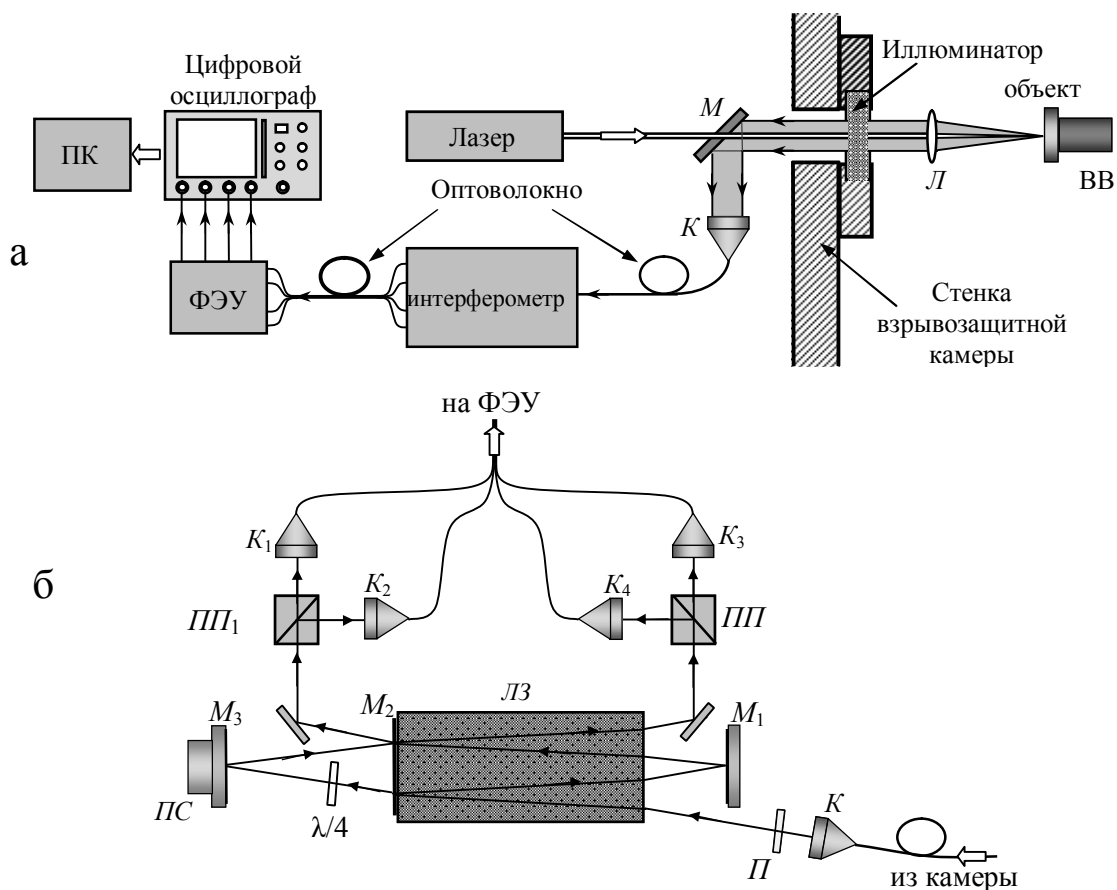


Рис. 2. Общая схема лазерной системы для измерения массовой скорости конденсированных веществ в ударно-волновых экспериментах (а) и оптическая схема интерферометра (б) (пояснения в тексте)

второй гармонике ($\lambda=532$ нм) мощностью 50 мВт (ширина спектральной линии <5 МГц, уровень оптических шумов $\sim 0,1\%$ RMS). Обычно из-за больших потерь при сборе отраженного излучения применяют одночастотные, маломощные лазеры мощностью от 1 Вт и выше, однако за счет оптимизации оптической схемы в разработанной системе стало возможным использовать относительно маломощный лазер. Излучение через отверстие в зеркале M и иллюминатор вводится во взрывозащитную камеру. Мишень с зарядом взрывчатого вещества (ВВ), зеркало и линза крепятся на деревянных штангах, конструкция которых позволяет подстраивать их взаимное положение. Оптические элементы, расположенные внутри камеры, разрушаются взрывной волной и являются расходным материалом. Линза L осуществляет фокусировку излучения на объекте, а также сбор и коллимацию отраженного излучения. Собранный линзой свет отражается зеркалом и направляется в оптоволоконный коллиматор и далее по оптическому волокну в интерферометр. Ввод излучения в интерферометр, образованный зеркалами $M_1 - M_3$, осуществляется через оптоволокон-

ный коллиматор K . За счет введения в одно из плеч интерферометра, образованного зеркалами $M_1 — M_2$, оптической линии задержки $ЛЗ$ время двукратного прохождения света в этом плече больше, чем в плече $M_2 — M_3$, на величину $\Delta t = \frac{2\ell}{c} \left(n - \frac{1}{n} \right)$, где c – скорость света в вакууме, ℓ длина $ЛЗ$, n – показатель преломления материала $ЛЗ$.

В качестве делительного зеркала M_2 используется грань стеклянного блока $ЛЗ$, на которую нанесено многослойное диэлектрическое покрытие с коэффициентом деления по интенсивности 50/50. Зеркало M_3 интерферометра закреплено на пьезоэлектрическом сдвигателе ($ПС$), что упрощает юстировку оптической схемы и позволяет проводить предварительную калибровку измерительных каналов.



Рис. 3. Общий вид оптического блока интерферометра

При изменении скорости отражающей поверхности интерферирующие на делительном зеркале M_2 волны за счет временной задержки в $ЛЗ$ отличаются по частоте. Изменение интенсивности света I на выходе из интерферометра связано с изменением скорости V отражающей поверхности гармонической зависимостью, подобной аппаратной функции традиционного двухлучевого интерферометра. Линия задержки выполнена из стекла К8 и представляет собой параллелепипед длиной 100 мм с гранями 50×50 мм. Для такой длины $ЛЗ$ масштабный коэффициент интерферометра, т.е. изменение скорости на один период интерференционной полосы, составляет 488 м/с.

Оптическая схема интерферометра обеспечивает оптимальную сводимость интерферирующих пучков и, как следствие, позволяет обеспечить высокий интерференционный контраст даже при работе с излучением, пространственная когерентность которого нарушена из-за отражения от диффузной поверхности.

Амплитуда сигнала в ходе эксперимента существенно изменяется, что связано с: изменением коэффициента отражения поверхности объекта при его разрушении; расфокусировкой системы коллимации излучения из-за смещения поверхности объекта на величину, большую чем глубина фокуса линзы L ; по-

терей контраста при быстром, по сравнению с полосой системы регистрации, смещении интерференционных полос на площадке фотодетектора. Для минимизации влияния такого рода мультипликативных помех традиционно в неравноплечных интерферометрах с двухканальной (квадратурной) системой фоторегистрации вводится дополнительный канал контроля интенсивности входящего в интерферометр излучения. Однако, аддитивные помехи, вызванные, например, собственной светимостью объекта не могут быть скомпенсированы при обработке сигналов такой системы. Кроме того, в трёхканальной системе используется только половина излучения, интерферирующего на светоделительном зеркале M_2 .

Обеспечить однородную дифференциальную чувствительность и широкий динамический диапазон, а также устранить влияние аддитивных и мультипликативных помех в оптическом сигнале позволило использование квадратурно-дифференциальной методики фоторегистрации. Для ее реализации формируются четыре интерференционных измерительных канала, сигналы в которых сдвинуты по фазе последовательно друг относительно друга на четверть периода. Квадратурные каналы в интерферометре формируются внесением в одно из плеч интерферометра четвертьволновой фазовой пластинки $\lambda/4$, оптическая ось которой ориентирована под углом 45° к плоскости поляризации зондирующего излучения, задаваемой поляризатором P , установленным на входе в интерферометр (рис.2б). Четвертьволновая пластинка в этом случае преобразует поляризацию излучения из исходной, линейной, в круговую, которая может быть представлена, как известно, суперпозицией двух линейно поляризованных компонент, сдвинутых по фазе на $\pi/2$. При оптическом смешении излучения, прошедшего разные плечи интерферометра на делительном зеркале M_2 , линейно поляризованная электромагнитная волна интерферирует с каждой компонентой волны, имеющей круговую поляризацию. В результате образуется два луча, фаза сигнала в которых сдвинута на $\pi/2$ относительно друг друга. Пространственное разделение квадратурных компонент проводится с помощью поляризационных призм (III).

Фазовый скачок на π при отражении от делительного зеркала M_2 даёт возможность применить дифференциальную методику, сформировав две пары квадратурных каналов ($I_1 I_2$) и ($I_3 I_4$). Такая модификация оптической схемы по-

звояет вдвое повысить уровень сигнала и значительно снизить уровень оптического шума, связанного с аддитивной помехой $A(t)$. Таким образом, в интерферометре формируются четыре измерительных канала:

$$I_1 = I_0(t) \sin \varphi(t) + A(t)$$

$$I_2 = I_0(t) \cos \varphi(t) + A(t)$$

$$I_3 = -I_0(t) \sin \varphi(t) + A(t)$$

$$I_4 = -I_0(t) \cos \varphi(t) + A(t).$$

Световые пучки в каждом измерительном канале собираются коллиматорами и по оптоволоконным кабелям направляются в модуль фотоэлектрического преобразования.

В условиях реального эксперимента со слабоотражающими, диффузными поверхностями из 50 мВт исходной мощности лазера к фотодетектору подводятся лишь доли микроватт. При таких малых интенсивностях регистрировать сигналы с необходимым отношением сигнал/шум возможно только с использованием фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) в токовом режиме. Основным параметром, характеризующим работу ФЭУ в этом режиме, является максимальный средний анодный ток. Типичные значения этой величины для серийно выпускаемых ФЭУ не превышают 100 мкА. Для повышения величины анодного тока были разработаны и изготовлены «активные» делители высокого напряжения, основанные на стабилизации напряжения на всех диодах фотоумножителя с помощью цепочки эмиттерных повторителей, выполненных на высоковольтных транзисторах.

Обработка сигналов интерферометра проводится в ПК в специально разработанном программном пакете. После программной обработки и нормализации сигналов в соответствии с процедурами, описанными в Главе 2, временная динамика массовой скорости вещества рассчитывается по формуле:

$$V(t) = \frac{c\lambda}{8\pi \ell \left(n - \frac{1}{n} \right)} \operatorname{arctg} \frac{I_1 - I_3}{I_2 - I_4} .$$

Тестовые эксперименты по ударно-волновому нагружению стальных пластин взрывными генераторами показали, что разработанная лазерная система позволяет измерять скорости свободной поверхности образцов в ударно-

волновых экспериментах с погрешностью не хуже 1 % во всем диапазоне реализуемых в эксперименте скоростей. Временное разрешение измерений ограничивается быстродействием используемых ФЭУ (Hamamatsu R7400U) и составляет 1 нс.

В четвёртой главе представлена система интеграции разработанной лазерной анемометрической системы и протонно-радиографического комплекса, используемого на ускорителе ТВН-ИТЭФ для диагностики быстропротекающих процессов. Приведено описание системы ввода излучения в малую взрывозащищённую камеру, позволяющей вакуумировать рабочий объём перед проведением экспериментов (рис.4).

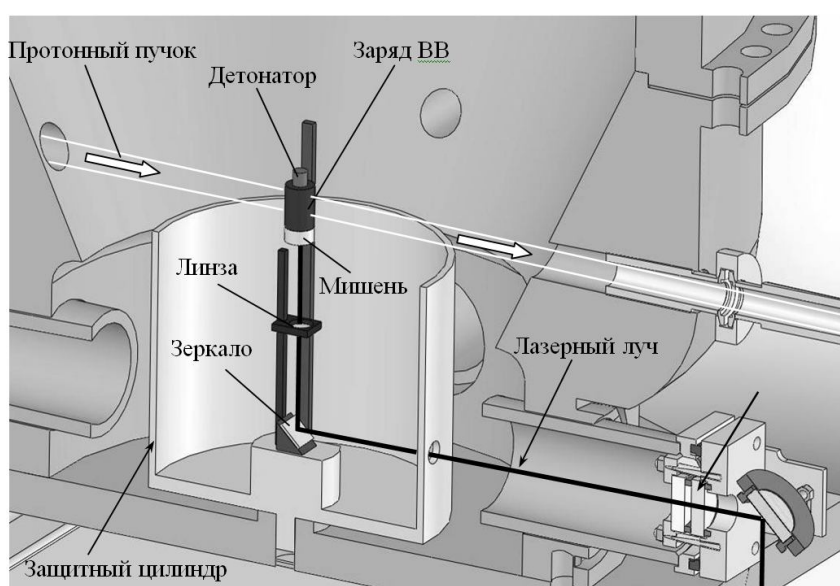


Рис.4. Взрывозащитная камера для проведения ударно-волновых экспериментов на протонно-графической установке ИТЭФ-ТВН

Применение в лабораторных условиях небольших взрывозащищённых камер в составе установок для исследования ударно-волновых и детонационных процессов, например, методом с использованием синхротронного излучения или протонной радиографии обусловило необходимость разработки взрывных метательных устройств с малой массой заряда (несколько десятков грамм), не уступающих по своим характеристикам (плоскостности полёта и достижимым скоростям) традиционно используемым. Исследование динамических характеристик алюминиевого ударника, представляющего собой плоскую пластину диаметром 20 мм и толщиной 2 мм, разгоняемую взрывным генератором нового типа [5] проводилось при совместном использовании методов лазерной анемометрии и протонной радиографии. Результаты исследования показали, что на

базе полёта в 11 мм ударник сохраняет плоскостность своего полёта (рис.5 б), при этом он достигает скорости (2700 ± 40) м/с (рис. 5 г). Скорость растёт скачкообразно, что обусловлено циркуляцией ударной волны в ударнике. Такие характеристики ударника достаточны для использования его в качестве источника плоской ударной волны в экспериментах, проводимых во взрывозащищённых камерах малого объёма. Присутствие в записях сигналов двух импульсов (рис. 5в в районе 6 мкс) вызвано действием вторичных частиц, возникающих при прохождении «банчей» протонного пучка, что позволяет привязать по времени две используемые методики.

Также в работе приводятся результаты исследования воздействия мощных ударных волн на профилированные металлические ударники и режимы струеобразования в них, аналогичные кумулятивным (рис. 6). Средняя скорость этих струй, рассчитанная на основе протонорадиографических изображений, составила 2,64 км/с, что существенно выше средней скорости движения свободной поверхности (1,17 км/с). На динамическом кадре наблюдается откол сегментов по краям пластины. Рис. 6,в представляет собой результат обработки экспериментальных данных, полученных с интерферометра. Интерференционные измерения проводились при фокусировке лазерного излучения в центр мишени. На временной зависимости скорости наблюдаются два скачка: первый определяется приходом ударной волны непосредственно от заряда ВВ, примыкающего к пластине, второй представляет собой вероятный результат взаимодействия косых ударных волн, возникших при схлопывании пропилов, с поверхностью мишени.

Отработка методики использования диагностических окон проводилась в экспериментах по исследованию детонационных процессов в различных видах эмульгированных взрывчатых веществах.

В пятой главе приводится описание разработанной лазерной методики определения температуры конденсированного вещества по изменению скорости звука в нём.

Способность пучков тяжёлых ионов проводить объёмный разогрев вещества требует создания диагностических методик исследования пространственно распределённых термодинамических параметров, в особенности энергетических. Широкий диапазон температур внутренних областей вещества, находящегося в конденсированном состоянии, может быть измерен по величине скорости звука в нём.

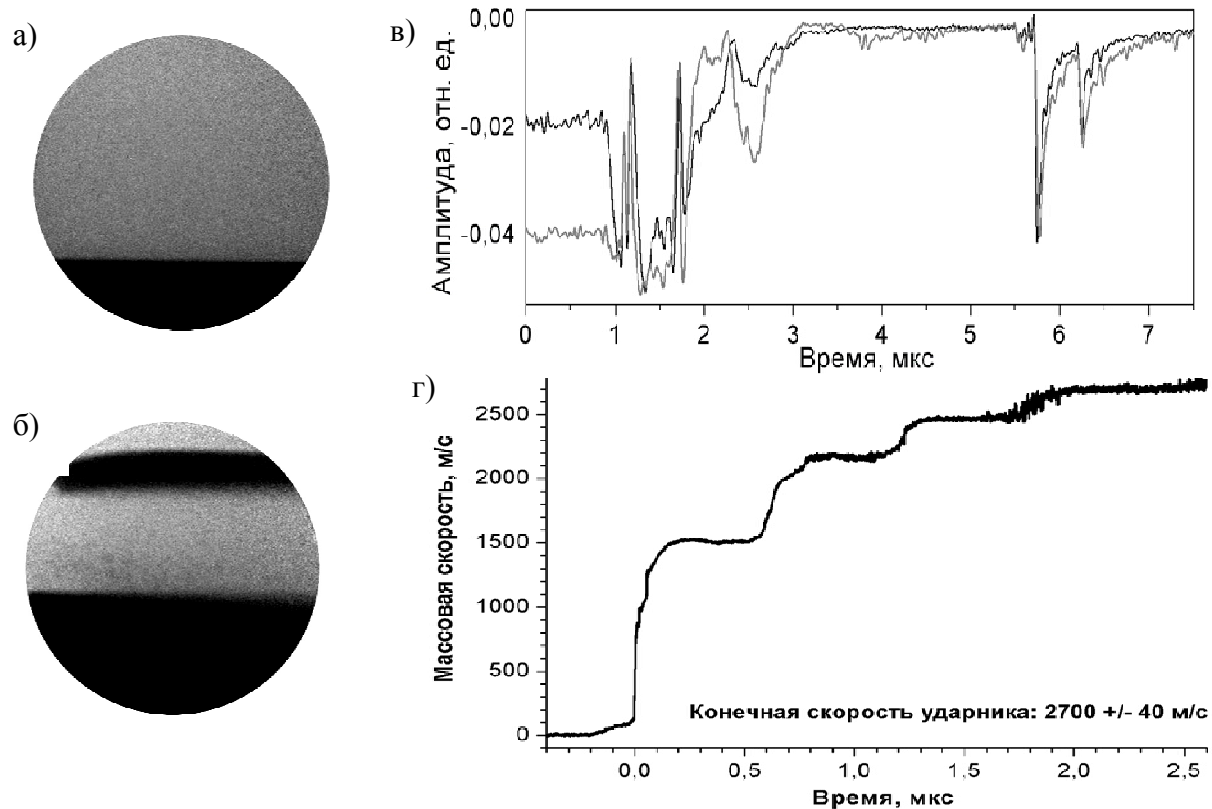


Рис. 5. Результаты эксперимента по метанию пластины взрывным генератором плоских ударных волн: протонно-радиографические изображения статической мишени (а) и через 4,75 мкс от начала движения (б); в) осциллограммы сигналов по двум квадратурным каналам интерферометра; г) зависимость скорости свободной поверхности пластины от времени

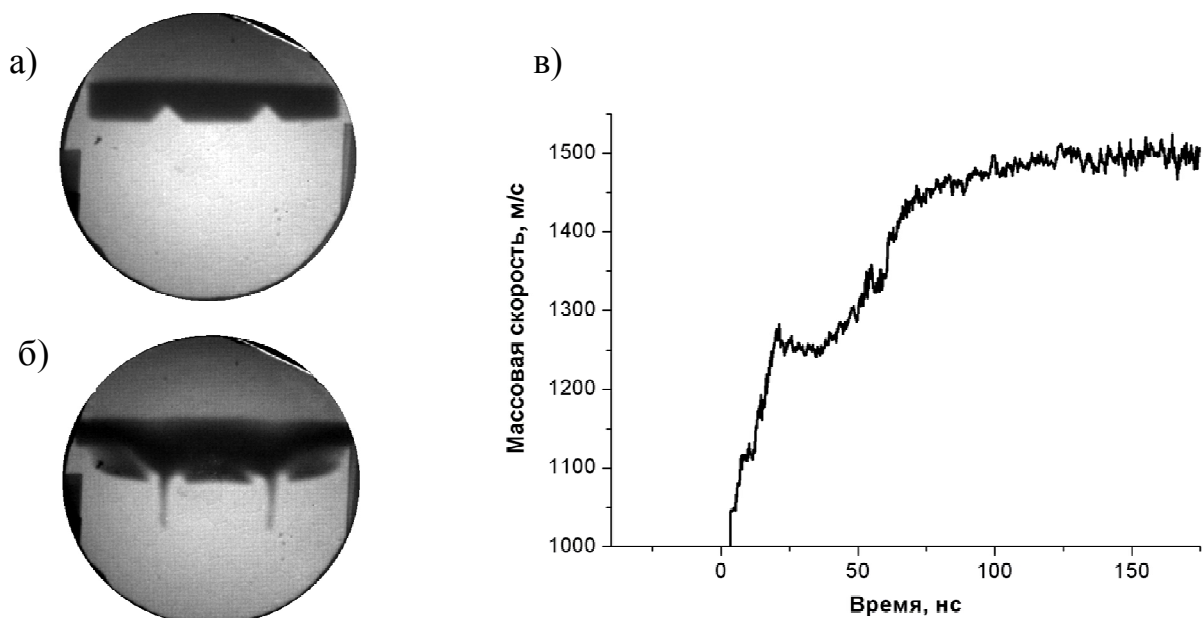


Рис. 6. Результаты эксперимента по исследованию процессов откольного разрушения и струеобразования при ударно-волновом нагружении медной пластины: протонно-радиографические изображения статической мишени (а) и через 1,94 мкс после выхода ударной волны на свободную поверхность пластины, в) зависимость скорости свободной поверхности пластины от времени

Акустическая волна проходит в веществе путь L за время $t: t=L(T)/ V_s (T)$, где V_s - скорость звука, возбуждаемой в образце продольной волны. Дифференцируя это выражение по температуре и пренебрегая тепловым расширением вещества при нагреве, можно получить:

$$\frac{dt}{dT} = -\frac{L}{V_s(T)} \left(\frac{1}{V_s(T)} \cdot \frac{dV_s(T)}{dT} \right) = -\mu \frac{L}{V_s}$$

где температурный коэффициент скорости звука $\mu = \frac{1}{V_s(T)} \cdot \frac{dV_s(T)}{dT}$ является характеристикой вещества, связывая изменение скорости звука в веществе с изменением температуры.

Для измерения скорости звука в конденсированном веществе, в том числе и в ходе воздействия на него высокоэнергетичных пучков тяжёлых ионов была разработана бесконтактная, дистанционная методика, обладающая высоким пространственным и временным разрешением. Создание и приём акустических импульсов в ней осуществляется оптически с помощью лазерного излучения.

Оптическая схема экспериментальной установки представлена на рис.7. Излучение импульсного Nd:YAG-лазера (длина волны $\lambda = 1,064$ мкм) фокусируется на поверхности мишени линзой L_1 . Сфокусированное на поверхности мишени излучение возбуждает акустическую волну, которая распространяясь в

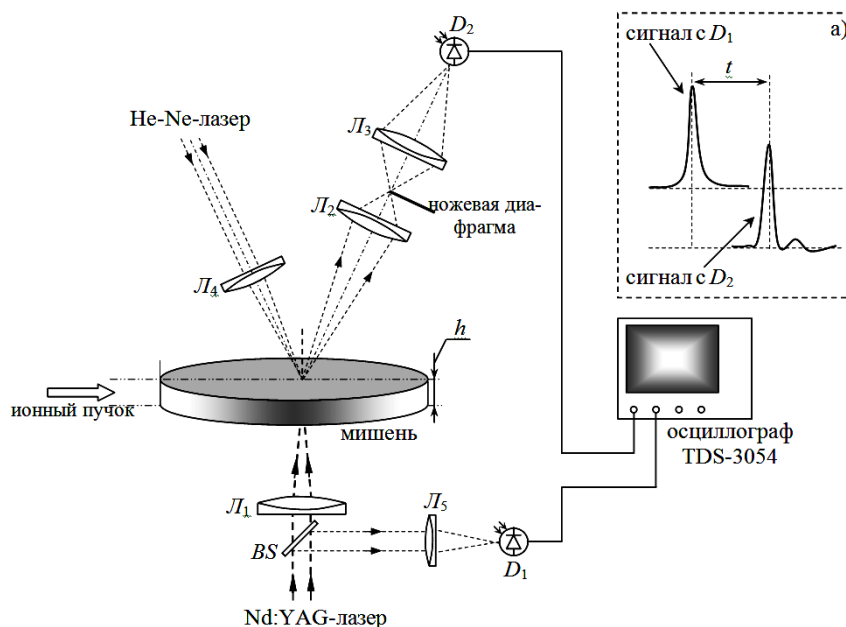


Рис.7. Принципиальная схема теневого метода регистрации оптоакустического сигнала в экспериментах по измерению скорости звука в веществе при разогреве мишеней ионным пучком: $L_1 - L_5$ – линзы, BS – светоделительная пластинка, D_1, D_2 – фотоприемники

веществе со скоростью V_s , через время t выходит на поверхность образца с противоположной стороны.

Для детектирования акустического отклика была разработана оптическая схема на основе шлирен-метода. Данный метод использует процедуру Фурье фильтрации светового пучка с неоднородным по сечению распределением фазы с помощью линзы L_2 (приемного объектива) и расположенного в ее фокальной плоскости (плоскости пространственных частот) амплитудного фильтра (ножевой диафрагмы) – непрозрачного для света экрана с острым прямолинейным краем. С помощью линзы L_3 (визуализирующего объектива) осуществляется обратное преобразование Фурье. Нож Фуко (knife edge), перекрывающий половину Фурье-плоскости реализует, по существу, одномерное преобразование Гильберта оптического сигнала. Это во многом аналогично дифференцированию, что и объясняет визуализацию фазовых неоднородностей. Ножевая диафрагма в фокальной плоскости линзы преобразует искажения волнового фронта в отраженной волне в изменение интенсивности, которое и регистрируется фотодетектором.

Шлирен-метод регистрации акустического сигнала, в отличие от интерференционных методик, не требует прецизионной юстировки системы, имеет линейную зависимость амплитуды сигнала от амплитуды акустического импульса и не требует проведения процедуры «развёртывания фазы».

Линза L_4 , фокусирует зондирующий луч на образец. Система регистрации отраженного луча состоит из линз L_2 , L_3 , ножевой диафрагмы и фотоприемника D_2 . Для фотоэлектрической регистрации импульса Nd:YAG лазера используется делительная пластинка BS и линза L_5 , фокусирующая излучение на фотодетектор D_1 . В качестве фотодетекторов D_1 , D_2 используются *pin*-диоды с временем нарастания $\tau_{0,1-0,9} = 0,3$ нс.

Тестовые эксперименты по измерению скорости звука в алюминии позволили верифицировать разработанную методику (рис.8). В качестве мишени использовался алюминиевый диск диаметром 10 мм и толщиной 1,83 мм. Наличие двух пиков в сигнале фотодетектора, регистрирующего шлирен-сигнал, соответствует приходу двух акустических волн – продольной и поперечной. Измеренная скорость звука продольной волны при температуре 25 ° составила $V_s = (6,27 \pm 0,02) \cdot 10^5$ см/с. (Табличное значение скорости продольной звуковой

волны в чистом алюминии $V_s^l = 6,26 \cdot 10^5$ см/с). Температурная зависимость скорости звука в алюминии, снятая в процессе остывания нагретого до 400°C образца (рис. 8 б) была аппроксимирована прямой. Коэффициент наклона прямой составил $\Delta V_s^l / \Delta T = (-149 \pm 9)$ см/(с \cdot °C) (Табличное значение 153 см/(с \cdot °C)).

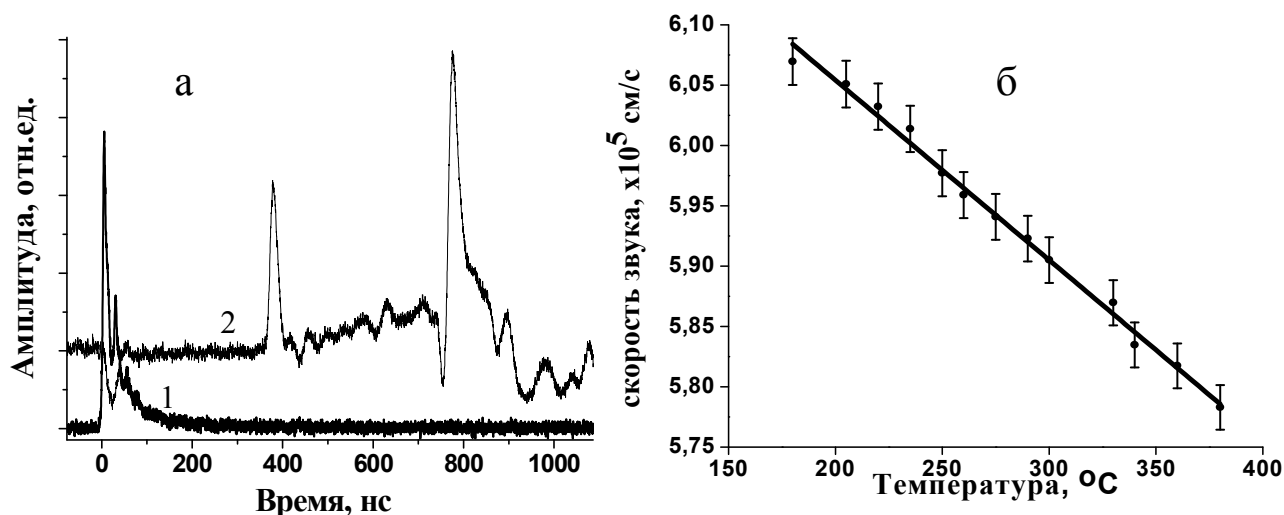


Рис.8. Результаты экспериментов по верификации оптоакустической методики:
 а) Осциллограммы сигналов с фотодетекторов D_1 (1) и D_2 (2) (см. рис.7);
 б) Экспериментальная зависимость скорости звука от температуры в алюминиевой мишени

Поскольку объемное поглощение пучка ионов в мишени приводит к тепловому расширению среды, а, следовательно, и к появлению волн сжатия–разрежения, то амплитуда и спектр подобных колебаний поверхности может стать помехой при измерении скорости звука акустической волны в исследуемом образце при оптоакустическом воздействии. Для оценки влияния на регистрируемый сигнал ширен–системы смещения поверхности мишени из-за импульсного энерговыклада ионного пучка была проведена серия измерений. Исследования проводились на углеродном пучке C^{6+} с энергией 216 МэВ/а.е.м. Количество частиц в импульсе можно было изменять от $5 \cdot 10^8$ до $3,2 \cdot 10^9$ ионов.

На рис.9 приведена характерная осциллограмма токового сигнала с трансформатора (пояса Роговского) (1) и ширен-сигнала (2). В акустическом отклике наблюдается слабо выраженный пик с временной задержкой относительно максимума импульса ионного пучка ~ 300 нс. Этот акустический отклик соответствует возмущению поверхности образца продольной звуковой волной из области максимального поглощения ионов определяемой положением пика Брэгга в веществе мишени. Появление нерегулярных осцилляций в ширен-

сигнале, начиная со второй микросекунды, определяется возмущениями поверхности образца в результате переотражений акустических волн внутри мишени.

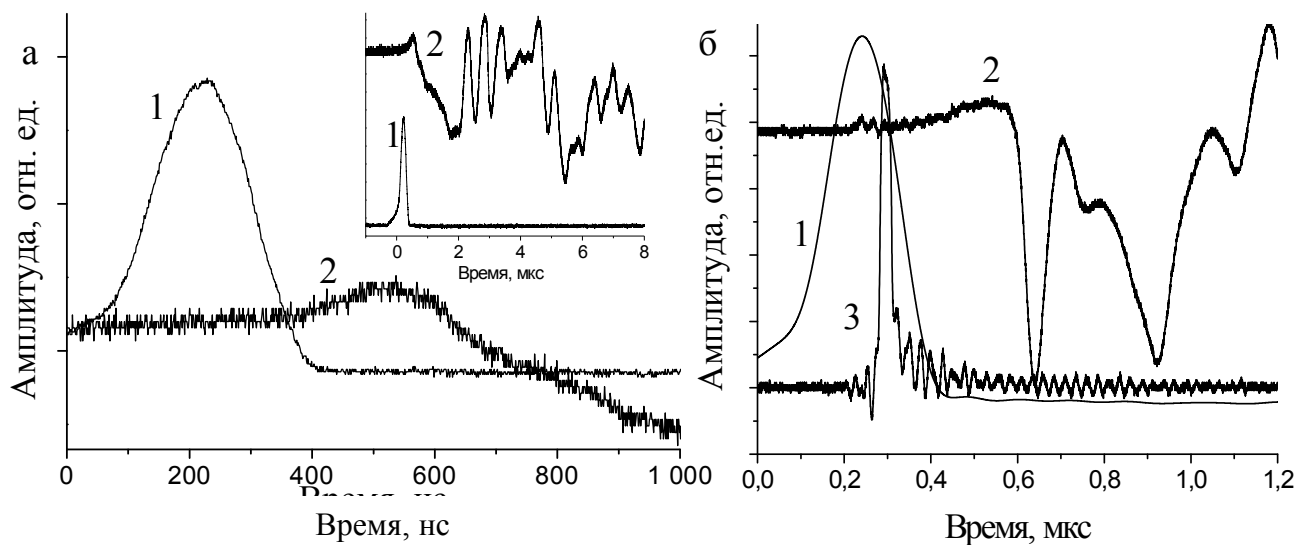


Рис.9. Результаты исследования акустического возмущения, вызываемого тяжело-ионным пучком. а) в отсутствии лазерного импульса; и б) при его наличии: (1) - временной профиль ионного пучка; (2) акустическое возмущение мишени, зарегистрированное детектором D_2 ; (3) - сигнал с фотоприёмника D_1

В Заключение представлены **основные результаты работы:**

1. Разработана оптическая схема лазерного квадратурно-дифференциального сдвигового интерферометра, позволяющая обеспечить высокую светосилу, помехозащищённость, автокалибровку измерительных сигналов.

2. Создан квадратурно-дифференциальный сдвиговый интерферометр, позволяющий измерять массовые скорости в диапазоне 100 -10000 м/с с погрешностью 1 %. Он может быть использован для получения экспериментальных данных об упруго-пластических, прочностных и кинетических свойствах материалов различных классов, в том числе и химически активных веществ, в условиях ударно-волнового нагружения.

3. Выявлены основные факторы, приводящие к ошибкам измерений массовой скорости квадратурно-дифференциальным сдвиговым интерферометром: изменение коэффициента преломления и наведённое двулучепреломление в диагностических окнах при прохождении ударной волны; девиация проекции скорости на направление оптической оси зондирующего лазерного излучения; дисперсия света в оптической линии задержки; 2π -неоднозначность при восста-

новлении из интерференционных сигналов динамики изменения скорости. Предложены способы их устранения.

4. Применение квадратурно-дифференциального сдвигового интерферометра совместно с протонно-радиографическими измерениями позволило провести исследования откольных процессов и струеобразования в металлах при ударно-волновом нагружении, и динамических характеристик металлического ударника, разгоняемого компактным взрывным устройством нового типа.

5. Показано, что разработанная лазерная методика измерения температуры конденсированного вещества, основанная на измерении скорости звука по времени прохождения зондирующего оптоакустического импульса в веществе может быть использована для исследований теплофизических параметров объектов, подвергнутых импульсному разогреву интенсивным пучком тяжелых ионов.

6. Показано, что бесконтактная лазерная шлирен-методика регистрации оптических фазовых неоднородностей в отражённом от поверхности исследуемого объекта излучении может быть использована для исследования процессов взаимодействия интенсивных пучков заряженных частиц с веществом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТРАТУРЫ

1. Фортов В.Е. Экстремальные состояния вещества. –М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 304 с.
2. Интенсивные ионные пучки для генерации экстремальных состояний вещества [Текст] // В.Е. Фортов, Д. Хоффманн, Б.Ю. Шарков // Успехи физических наук. -2008. –Том 178. -№2. –с. 113-138.
3. Применение пучков ускорительно-накопительного комплекса ТВН для диагностики быстропротекающих процессов [Текст] // А.А. Голубев, В.С. Демидов, Е.В. Демидова [и др.] // Атомная энергия. -2008. -Том 104. -В. 2. -с. 99.
4. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортов В.Е. Экспериментальные профили ударных волн в конденсированных веществах. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 248 с.
5. Компактное взрывное устройство для разгона алюминиевых ударников до скорости 3 км/с [Текст] // В.В. Якушев, А.В. Уткин, С.А. Колдунов [и др.] // Приборы и техника эксперимента. -2011. -№3. –с. 149-153.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Лазерный оптоакустический метод измерения теплофизических свойств конденсированных веществ при воздействии интенсивных пучков тяжелых ионов [Текст] / А. П. Кузнецов, А. А. Голубев, К. Л. Губский, [и др.] // Приборы и техника эксперимента -2010. -№ 3. -с. 97-103.
2. Визуализация плазмоиндуцированных процессов проекционной системой с усилителем яркости на основе лазера на парах меди [Текст] / А. П. Кузнецов, К. Л. Губский, А. С. Савёлов, [и др.] // Физика плазмы. -2010. -Том 36. -№4. -с. 463-472.
3. Нанометрология и особенности метрологического обеспечения измерений параметров шероховатости и рельефа наноструктурированных поверхностей [Текст] / К. Л. Губский, В. Г. Лысенко, В. В. Соловьев, [и др.] // Измерительная техника. -2010. -№ 11. –с. 17-21.
4. Разработка методики лазерной очистки поверхности зеркал для систем оптических диагностик на ИТЭР [Текст] / А. С. Александрова, А. П. Кузнецов, К. Л. Губский, [и др.] // Ядерная физика и инжиниринг. -2011. -Том 2. -№ 6. –с. 557-563.
5. Лазерный интерферометр для измерения массовой скорости конденсированных веществ в ударно-волновых экспериментах на протонно-радиографической установке ТВН-ИТЭФ [Текст] / А. П. Кузнецов, К. Л. Губский, С. А. Колесников, [и др.] // Приборы и техника эксперимента. -2011. -№ 3. –с. 57-68.
6. Plasma Lens for the Heavy Ion Accelerator at IТЕР [Text] / K. L. Gubskii, M. M. Basko, A.P. Kuznetsov, [et al.]// Physics of Particles and Nuclei Letters. -2008. - vol. 5. -No.7. -p. 34-37.
7. Лазерный доплеровский измеритель скорости для исследования ударно-волновых процессов в конденсированных средах [Текст] / А. А. Голубев, К. Л. Губский, А. П. Кузнецов // Сборник научных трудов научной сессии МИФИ. -2008. –Том 2. –с.76-77.
8. Применение лазерного доплеровского измерителя скорости в экспериментах по ударно-волновому нагружению вещества [Текст] / А. А. Кузнецов, К. Л. Губский, А. П. Кузнецов // Сборник трудов научной сессии НИЯУ МИФИ. - 2010. -Том 4. -с. 196-200.

9. Комплекс оптических диагностик в исследовании параметров плазмы Z-пинча новой фокусирующей системы пучка ионов [Текст] / А. А. Голубев, К. Л. Губский, А. П. Кузнецов [и др.] // Сборник трудов научной сессии МИФИ. -2008. -Том 2. -с. 90-91.
10. Диагностика плазмы z-пинча для фокусирующей системы пучка тяжелых ионов / М. М. Баско, А. А. Голубев, К. Л. Губский, [и др.] // Тезисы докладов XII Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы». -2007. -с. 130-132.
11. Экспериментальные исследования динамики электронной плотности периферийной области микропинчевой плазмы [Текст] / К. Л. Губский, А. П. Кузнецов, А. С. Савелов [и др.] // Тезисы докладов 5-го Российского семинара «Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды». -2006. –с.103-104.
12. Разработка лазерного доплеровского измерителя скорости для экспериментов по ударно-волновому нагружению вещества [Текст] / А. С. Серкина, К. Л. Губский, А. П. Кузнецов // IV Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых учёных и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям. Сборник докладов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». -2010. –с. 262-269.
13. Лазерная анемометрия в исследовании детонационных и ударно-волновых процессов в конденсированном веществе на ускорителе ТВН-ИТЭФ [Текст] / А.А. Голубев, К.Л. Губский, А.П. Кузнецов [и др.] // Сборник трудов научной сессии МИФИ. -2011. –Том 2. -с. 83-84.
14. Метрологическое обеспечение измерений геометрических и механических величин в нанометровом диапазоне методами СЗМ [Текст] / В.В. Соловьев, В.Г. Лысенко, К.Л. Губский [и др.] // Труды Четвертой международной конференции «Современные достижения бионаноскопии». -2010. -с.70.