

На правах рукописи

КУЗНЕЦОВ АНДРЕЙ ПЕТРОВИЧ

**ЛАЗЕРНАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ В ДИАГНОСТИКЕ  
ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЫ**

01.04.21 – лазерная физика

01.04.08 – физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Автор



Москва 2012

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете  
«МИФИ»

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор,  
зам. директора ИОФ РАН по научной работе,  
заведующий Отделом колебаний  
**Гарнов Сергей Владимирович**  
*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН*

доктор физико-математических наук, профессор,  
начальник отдела лазерной технологии  
**Глова Александр Федорович**  
*ФГУП ГНЦ РФ ТРИНИТИ*

доктор физико-математических наук,  
начальник комплексного научно-исследовательского отдела ИЛФИ  
**Литвин Дмитрий Никитович**  
*РФЯЦ ВНИИЭФ*

Ведущая организация: Физический институт им. П.Н. Лебедева  
Российской академии наук (ФИАН)

Защита диссертации состоится «27» марта 2013 года в 15 час. 00 мин.  
на заседании диссертационного совета Д 212.130.05 при НИЯУ МИФИ  
по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ

Автореферат разослан «21» февраля 2013 года

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в двух  
экземплярах, заверенных печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Р.С. Стариков

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Исследования, проводимые в настоящее время в области физики плазмы, связаны не только с получением фундаментальных знаний о поведении материи при экстремальных состояниях, но имеют и большое практическое значение в энергетике, промышленности, оборонном комплексе. К настоящему времени на созданных установках получено необычайное разнообразие параметров лабораторной плазмы. Так, диапазон изменения электронных плотностей превышает пятнадцать порядков (от  $10^9$  см<sup>-3</sup> в газовом разряде до  $10^{24}$  см<sup>-3</sup> в лазерной плазме). Температура увеличивается на пять порядков при переходе от долей электронвольт в низкотемпературной плазме газового разряда к десяткам килоэлектронвольт в горячей плазме разрядов типа Z-пинч. Линейные размеры плазмы изменяются от  $10^{-3}$  см в установках инерциального синтеза до  $10^3$  см в установках с магнитным удержанием (токамаки и стеллараторы). Время существования короткоживущей плазмы может составлять всего несколько пико- или даже десятков фемтосекунд (лазерная плазма), а в электрическом разряде постоянного тока плазма может существовать стационарно. Величина магнитного поля также охватывает широкий диапазон: от нуля до нескольких мегаэрстед (плазменный фокус).

Современная физика высокотемпературной плазмы родилась на заре исследований по управляемому термоядерному синтезу (УТС) [1, 2]. В настоящее время по-прежнему УТС остается наиболее притягательным приложением сил исследователей высокотемпературной плазмы. Эту задачу пытаются решить, основываясь на двух подходах: в импульсном режиме с использованием силы инерции, препятствующей разлету плазмы и позволяющей прореагировать достаточному количеству вещества (инерциальный термоядерный синтез (ИТС)), и удержанием плазмы в стационарном состоянии сильным магнитным полем (термоядерный синтез с магнитным удержанием).

Несмотря на активное развитие исследований по лазерному инерциальному термоядерному синтезу: NIF (National Ignition Facility) (США), LMJ (Laser MegaJoule) (Франция), HiPER (High Power laser Energy Research facility) (Великобритания), GEKKO XII (Япония), Искра-5, Луч и строящаяся установка УФЛ-2М (РФЯЦ ВНИИЭФ, Россия) – в Соединенных Штатах, Европе, Японии и России ведутся исследования по альтернативным направлениям на основе импульсной токонесущей плазмы Z-пинчей и пучков заряженных частиц [3].

Мегаамперные Z-пинчи являются эффективным источником мягкого рентгеновского излучения, с помощью которого можно сжать и поджечь термоядерную мишень. Рекордная в экспериментах по УТС величина мощности

мягкого рентгеновского излучения более 200 ТВт (1,8 МДж за 5 нс) достигнута именно при сжатии многопроволочной сборки током в 20 МА [4]. Среди плазменных сильноточных устройств, на основе которых разрабатываются импульсные источники мощного рентгеновского излучения, можно выделить установки «Ангара-5-1» (ТРИНИТИ), С-300 (РНЦ «Курчатовский институт»), установка Z-Machine (Сандия, USA). Особенностью этих установок является малая длительность импульса разрядного тока (порядка 100 нс), большое значение максимального тока (единицы или десятки мегампер), высокий выход мягкого рентгеновского  $\sim 10^{14}$  Вт и нейтронного  $\sim 10^{12}$  нейтр./имп. излучений. Однако все это достигается за счет исключительной сложности экспериментальных установок и, соответственно, высокой их стоимости.

Еще одним подходом при создании импульсных источников излучений является метод генерации высокотемпературной плазмы, основанный на применении пинчевых установок с разрядами типа «плазменный фокус» (ПФ) и «низкоиндуктивная вакуумная искра» (НВИ). Высокие температуры и плотности плазмы, достигаемые на этих установках при относительно небольшой стоимости затрат, делают их перспективными не только для задач УТС, но и для технологических применений. К настоящему времени накоплен богатый экспериментальный материал, созданы теоретические модели и проведено численное моделирование физических процессов, протекающих в пинчевых разрядах. В основном, все это касается стадии сжатия плазмы и образования пинча: плазменного объекта с размерами  $r \leq 10$  мкм, временем существования  $\tau \leq 10$  нс, температурой  $T_e = 1 \div 3$  кэВ и электронной плотностью  $n_e \geq 10^{21}$  см<sup>-3</sup>. Для понимания физических явлений, которые происходят при нагреве импульсной плазмы до высоких температур, необходимы еще и исследования начальной и завершающей стадий всего процесса плазмообразования. Более того даже на стадии существования высокотемпературной плотной плазмы важную роль имеет информация о менее горячей периферийной плазме. Наличие в периферийной области разрядного промежутка плазмы с относительно невысокой плотностью ( $\sim 10^{13}$  см<sup>-3</sup>) может приводить к образованию шунтирующих токов и, соответственно, к уменьшению энерговклада в основной разряд. Не менее актуальной и до настоящего времени также не решенной задачей на пути создания импульсных источников ионов и новых методов рентгеновской литографии является получение информации о параметрах корпускулярных потоков из области разряда НВИ.

Другой подход в разработке систем инерциального термоядерного синтеза основан на использовании в качестве драйвера ускорителя пучков тяжелых ионов [5]. Сейчас в Европе, России и США наблюдается бурное развитие как расчетно-

теоретических, так и экспериментальных работ в области ИТС на пучках тяжелых ионов. Так, проектные параметры международного проекта FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) (Дармштадт, Германия) позволят достичь уровня энерговложения в мишень  $\sim 100$  кДж·г<sup>-1</sup>.

Возможность создать плотную, высокотемпературную плазму пучком тяжелых ионов определяется удельной вложенной энергией ионного пучка  $E_s$  в вещество плотностью  $\rho$ . В свою очередь, величина  $E_s$  пропорциональна количеству частиц в пучке  $N_i$ , удельным тормозным потерям ионов в веществе  $dE/\rho dx$  и обратно пропорциональна квадрату радиуса пятна фокусировки  $R_0$ . Соответственно, для получения больших значений  $E_s$  необходимо увеличивать интенсивность пучка и стремиться к уменьшению площади пятна фокусировки. Для финишной фокусировки может быть использована плазменная линза на основе линейного сильноточного электрического разряда типа Z-пинч в газе низкого давления. Разработка плазменных систем фокусировки пучков заряженных частиц проводилась в США (Брукхэвенская национальная лаборатория), в Германии (GSI, Дармштадт), в России (РНИИ ИТЭФ). Например, в GSI на ускорителе SIS-18 при фокусировке ионов Ne<sup>10+</sup> с энергией 300 МэВ/а.е.м. при токе разряда в плазменной линзе 350 кА диаметр пучка в плоскости фокусировки составил 300 мкм [6]. Эффективность работы плазменной линзы во многом зависит от оптимального подбора электрофизических параметров разряда: напряжения и тока разряда, состава и начального давления рабочего газа, которые определяют пространственное распределение и временную динамику плазмы. В этой связи актуальной задачей является разработка диагностик, позволяющих исследовать развитие процесса пинчевания линейного разряда и обеспечивающих возможность измерения электронной плотности плазмы с пространственным и временным разрешением.

Крайне важным при разработке мишеней инерциального термоядерного синтеза, в радиационной медицине, материаловедении, ускорительной физике является вопрос об энергетических потерях пучков заряженных частиц в холодном веществе и плазме. Для изучения процессов, происходящих при торможении ионов в ионизированном веществе, широко используются плазменные мишени (разряд в газе, капиллярный разряд, лазерная плазма, плазма взрывного генератора), включенные в линию транспортировки пучка ионов от ускорителей. При этом важнейшим аспектом данного класса экспериментов является сопоставление потерь энергии ионами с параметрами ионизованного вещества: электронной плотностью, температурой и степенью ионизации. Проведенные до настоящего времени эксперименты по количественному измерению энергетических потерь ионов в ионизованном веществе наглядно продемонстрировали необходимость прямых

измерений временной динамики электронной плотности и степени ионизации плазмы в мишенях. До настоящего времени измерения этих параметров носили лишь оценочный характер.

На термоядерных установках с магнитным удержанием также существуют нерешенные до конца проблемы, связанные с рядом оптических диагностик, применяющихся для определения характеристик плазмы. В частности, оптические элементы диагностических систем, расположенные внутри разрядных камер, подвергаются интенсивному радиационному воздействию, распылению атомами перезарядки и загрязнению за счет переосаждения распыленных материалов конструктивных элементов. Подобное загрязнение или деградация поверхности зеркал приводит к значительному ухудшению работоспособности оптических методик или вообще невозможности дальнейшего их использования. Например, как показывают расчеты, в определенных режимах работы ИТЭР на первом зеркале системы регистрации томсоновского рассеяния может образоваться углеродная полимерная пленка толщиной  $\sim 400$  нм за  $10^5$  с [7]. Режим работы этой установки предусматривает выполнение около 1000 имп. в год длительностью  $\sim 500$  с каждый. Соответственно, пленки толщиной в сотни нанометров будут образовываться за несколько месяцев работы. В этой связи актуальной задачей является разработка новых методов диагностики, способных работать с отражателями с низким коэффициентом отражения, в том числе и диффузного характера.

Еще одна актуальная проблема на крупномасштабных установках, в частности токамаках, – мониторинг состояния поверхностей дивертора и первой стенки плазменной камеры непосредственно во время рабочего цикла. Эта же проблема существует и при контроле за модификацией поверхности материалов при электронно-ионной бомбардировке, при воздействии плазменных потоков на поверхность конструктивных материалов, мониторинге состояния поверхности электродов в пинчевых разрядах, при оптимизации технологических процессов лазерной сварки. Традиционные оптические методы, как правило, не позволяют наблюдать какой-либо объект через слой ярко излучающей плазмы, так как излучение плазмы обычно значительно превосходит по интенсивности свет, рассеянный исследуемой поверхностью. Создание и практическое внедрение методики, позволяющей наблюдать области взаимодействия плазменных потоков с поверхностью различных веществ, а также изучать динамические процессы плазмообразования в пространственном и временном масштабах, характерных для многих научных и технологических задач, является важной и до настоящего времени нерешенной проблемой.

Перечисленные выше задачи требуют разработки измерительной аппаратуры с характеристиками, позволяющими с необходимой точностью, временной и пространственной детализацией исследовать требуемые параметры плазменных процессов. Сегодня невозможно представить физику плазмы без широкого ассортимента средств измерения и контроля ее параметров. При этом важным требованием, которое предъявляется к измерительным методикам, является отсутствие контакта диагностического инструмента с плазмой, в противном случае возможно изменение ее состояния. В этой связи бесконтактные оптические методы наиболее предпочтительны в плазменных исследованиях.

При разработке диагностической методики ее метрологические характеристики определяются особенностями конструкции конкретной плазменной установки, требованиями к пространственному и временному разрешению измерений. В ряде случаев для понимания физических явлений, которые происходят, например, при нагреве плазмы до высоких температур, возникает необходимость в исследовании начальной и завершающей стадий всего процесса плазмообразования. Поэтому даже на стадии существования высокотемпературной, плотной плазмы важно учитывать роль менее горячей периферийной плазмы с относительно низкой плотностью. В связи с этим возникает необходимость в разработке и использовании диагностических методов, обеспечивающих возможность измерения различных параметров плазмы в широком диапазоне их значений.

Применение лазеров в качестве средств измерения физических величин кардинальным образом изменило экспериментальную технику и многократно повысило возможности экспериментатора и информативность получаемых результатов. За счет высокой спектральной яркости (в миллионы раз превосходящей тепловые источники электромагнитного излучения), уникальной временной и пространственной когерентности, малой расходимости (близкой к дифракционному пределу) использование лазеров в качестве источников зондирующего излучения позволяет обеспечить метрологические характеристики ранее недоступные оптической диагностике плазмы.

Один из наиболее информативных параметров при описании состояния плазмы – ее электронная плотность. Наиболее точная информация о концентрации электронов в плазме может быть получена из измерений фазовых возмущений в зондирующей волне методами лазерной интерферометрии.

Все вышесказанное определило актуальность выполнения диссертационной работы, заключающейся в разработке лазерных интерферометрических методик диагностики импульсной плазмы и обеспечивающих возможность их аппаратной

реализации и интегрирования в широкий класс лабораторных плазменных установок.

### **Цели и задачи диссертационной работы**

Целью диссертационной работы является решение крупной научной проблемы в области создания новых лазерных методов диагностики импульсной плазмы, а именно: разработке методов лазерной интерферометрии и диагностической аппаратуры на ее основе для измерений плазмы в широком диапазоне электронных плотностей, что позволяет исследовать физические закономерности процессов, происходящих в импульсной плазме широкого класса экспериментальных установок.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Разработан гомодинный квадратурный интерферометр, позволяющий проводить измерения электронной плотности плазмы в диапазоне  $10^{13}–10^{19}$  см<sup>-3</sup>. Проведены экспериментальные исследования параметров плазмы в разряде низкоиндуктивной вакуумной искры: пространственного распределения и временной динамики электронной плотности плазмы в периферийных относительно оси разряда областях; временной динамики электронной плотности плазмы иницирующего разряда; газокINETического давления корпускулярных потоков из области разряда.
2. Разработан двухволновый квадратурный лазерный интерферометр для исследования электронной плотности частично ионизованной импульсной плазмы. Проведены экспериментальные исследования временной динамики электронной плотности в слабоионизованном газе эрозионного капиллярного разряда атмосферного давления и временной динамики электронной плотности и степени ионизации плазмы водородной мишени.
3. Предложен и реализован новый тип лазерного интерферометра-рефлектометра на основе метода внутрिलाзерного приема отраженного излучения, позволяющего измерять электронную плотность плазмы и контролировать изменение коэффициента отражения поверхности зеркала. В качестве зеркала в интерферометре может быть использован любой обращенный к плазме конструкционный элемент плазменной установки, в том числе поверхность диффузного характера.
4. Разработан двухволновый гетеродинный интерферометр для измерения импульсной слабоионизованной плазмы атмосферного давления в диапазоне электронной плотности  $10^{10}–10^{13}$  см<sup>-3</sup> в условиях сильных вибраций.



5. Проведены исследования параметров линейного сильноточного разряда типа Z-пинч в газе низкого давления для системы плазменной фокусировки пучка тяжелых ионов.
6. Разработана активная проекционная лазерная система для исследований плазмоиндуцированных процессов и процессов взаимодействия интенсивного лазерного излучения и потоков плазмы с поверхностью различных материалов в условиях сильной фоновой засветки.

**Научная новизна работы** заключается в следующем

1. Разработанные средства диагностики позволили впервые провести исследования особенностей динамики развития (начиная от момента инициирования) микропинчевого разряда с радиальной инжекцией эрозионной плазмы от вспомогательных источников, вынесенных из области его прямого воздействия, при различной геометрии электродной системы и разных значениях вкладываемой в разряд энергии. Обнаружено наличие достаточно высокой электронной плотности в периферийных областях микропинчевого разряда ( $N_e > 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ). Выявлен трубчатый характер распределения электронной плотности.
2. Впервые с применением разработанной лазерной методики удалось провести измерения временной динамики и пространственного распределения газокINETического давления корпускулярных потоков из области разряда низкоиндуктивной вакуумной искры.
3. Предложен и реализован двухволновый квадратурный интерферометр, позволивший впервые с высоким временным разрешением провести измерения линейной электронной плотности и степени ионизации плазмы водородной мишени, предназначенной для экспериментов по торможению пучков тяжелых ионов в ионизованном веществе.
4. Применение двухволнового квадратурного интерферометра для исследований динамики плазмы эрозионного капиллярного разряда в воздухе атмосферного давления позволило впервые выделить вклад электронной компоненты на фоне теплового перераспределения нейтральных частиц.
5. Впервые проведены измерения электронной плотности объемного импульсно-периодического газового разряда наносекундной длительности методами многолучевой лазерной интерферометрии.
6. Показано, что лазер в качестве приемника оптического излучения является двухканальным гетеродинным приемником, включающим в себя функцию детектирования гетеродинного сигнала. Гетеродинными сигналами служат

изменения мощности и частоты генерации лазера-приемника. Чувствительность внутрилазерного приема выше, чем у обычного лазерного гетеродина и определяется двумя факторами: накоплением поля отраженной волны в резонаторе лазера-приемника и автодинным усилением сигнала, величина которого возрастает при приближении к порогу генерации. Впервые произведено прямое сравнение чувствительности внутрилазерного приема и метода прямой фоторегистрации. Выигрыш в обнаружительной способности при внутрилазерном приеме составил не менее  $2,5 \cdot 10^2$ .

7. Предложен и реализован новый тип лазерного интерферометра-рефлектометра на основе внутрилазерного приема отраженного излучения. При использовании в качестве зеркала элемента конструкции установки даже в случае деградации его поверхности интерферометр позволяет получать одновременно информацию, как о временной динамике электронной плотности плазмы, так и об изменении свойств поверхности отражателя.
8. Разработана проекционная система с внутрилазерным усилителем яркости изображения на основе Си-лазера, которая впервые позволила исследовать область взаимодействия плазменных потоков с поверхностью различных веществ и изучать динамические процессы плазмообразования в пространственном и временном масштабах, характерных для многих научных и технологических задач.
9. Предложена и реализована новая внутррезонаторная схема теневого фотографирования фазовых объектов с использованием проекционного лазерного микроскопа.

### **Практическая значимость результатов диссертационной работы**

1. Разработан квадратурный лазерный интерферометр, позволяющий проводить измерения электронной плотности в диапазоне  $10^{13} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Технические решения, использованные в конструкции интерферометра, обеспечивают возможность его интегрирования в широкий класс лабораторных плазменных установок.
2. Проведенные квадратурным интерферометром измерения электронной плотности форплазмы НВИ позволили обосновать выбор плазмообразующего диэлектрика системы инициирования разряда.
3. Обнаруженная с использованием разработанного интерферометра достаточно высокая электронная плотность ( $N_e > 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) на расстоянии в несколько миллиметров от оси микропинчевого разряда указывает на возможность

протекания шунтирующих токов в периферийных областях межэлектродного промежутка и их влияния на процесс пинчевания.

4. Работы по созданию квадратурного интерферометра стали основой для создания квадратурно-дифференциального сдвигового интерферометра, позволяющего 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. Разработанный интерферометр может быть использован для получения экспериментальных данных о физико-химических и конструкционных свойствах материалов, используемых в атомной энергетике, оборонном комплексе, материаловедении, при синтезе сверхпрочных материалов и т.д.
5. Применение двухволнового квадратурного лазерного интерферометра для измерения электронной плотности и степени ионизации плазмы линейного электрического разряда в водороде позволило провести калибровку режимов плазменной мишени для экспериментов по торможению пучков тяжелых ионов в ионизованном веществе.
6. Разработан двухволновый гетеродинный интерферометр, обеспечивающий возможность проведения измерений предельно малых электронных плотностей  $10^{10}-10^{13} \text{ см}^{-3}$  в слабоионизованном газе атмосферного давления в условиях сильных акустических и вибрационных помех.
7. Работы по созданию двухволнового гетеродинного интерферометра стали основой для создания трехкоординатного интерферометра, предназначенного для метрологического обеспечения измерений линейных размеров в нанометровом диапазоне.
8. Исследования амплитудно-частотных характеристик генерации лазеров различных типов при инъекции слабого оптического излучения показали, что функциональные особенности, присущие внутрилазерному приему, дают возможность для разработки интерферометрических устройств с эксплуатационными характеристиками, ранее не доступными традиционным интерферометрам.
9. Разработан новый тип лазерного интерферометра-рефлектометра на основе внутрилазерного приема слабого отраженного излучения, что открывает перспективу использования такого типа интерферометров для диагностики плазмы на крупномасштабных установках с термоядерными параметрами, где поверхность зеркал быстро деградирует под действием облучения и

пересадения материалов обращенных к плазме поверхностей конструктивных элементов установки.

10. Разработан комплекс оптических диагностик для исследования параметров плазменной линзы. Это позволило на стадии финишной фокусировки пучка ионов  $C^{+6}$  сфокусировать пучок диаметром 20 мм в пятно размером 350 мкм. Полученный результат близок к расчетному и соответствует лучшим мировым достижениям.
11. Разработана проекционная система с усилителем яркости изображения на основе Cu-лазера для исследований областей взаимодействия плазменных потоков с поверхностью различных веществ. Лазерный мониторинг может быть использован для контроля состояния внутренних поверхностей плазменных камер непосредственно во время рабочего цикла установки. В частности, с его помощью можно проводить исследования процессов модификации поверхности материалов при электронно-ионной бомбардировке, а также изучать в режиме реального времени воздействие плазменных потоков на поверхность конструктивных материалов, электроды плазменных разрядных устройств и диверторные пластины в разрядной камере токамака.
12. Проекционная активная оптическая система на основе лазера на парах меди позволила провести исследование механизмов взаимодействия лазерного излучения с веществом сварочного факела в процессе сварки низколегированных сталей излучением волоконного лазера большой мощности.

Результаты диссертационной работы были использованы в научно-исследовательской работе в ФГУП "ГНЦ РФ – ИТЭФ" им А.И. Алиханова, ФГУП ВНИИМС, ФГБНУ ТИСНУМ, ГУ МФТИ. Акты о внедрении результатов диссертационной работы в перечисленных выше организациях представлены в Приложении к диссертации.

#### **Основные результаты и положения, выносимые на защиту**

1. Разработан квадратурный лазерный интерферометр, позволяющий проводить измерения фазовых сдвигов интерферирующих волн в диапазоне от долей до единиц и более интерференционных полос с высокой однородной дифференциальной чувствительностью  $3 \cdot 10^{-7}$  рад·Гц<sup>-1/2</sup>.
2. Результаты комплексного исследования пространственного распределения электронной плотности плазмы низкоиндуктивной вакуумной искры в периферийных относительно оси разряда областях. Обнаруженная достаточно

высокая электронная плотность ( $N_e > 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) указывает на возможность протекания шунтирующих токов в периферийных областях межэлектродного промежутка и их влияния на процесс пинчевания.

3. Установленная прямыми измерениями зависимость эффективности инициирования разряда в межэлектродном промежутке НВИ от геометрии системы инициирования и материала плазмообразующего триггерного диэлектрика.
4. Лазерный квадратурный интерферометр для измерения газокINETического давления импульсных плазменных потоков внутри разрядной камеры и полученные с его помощью результаты измерения временной динамики и пространственного распределения газокINETического давления из области разряда низкоиндуктивной вакуумной искры.
5. Установленная прямыми измерениями зависимость линейной электронной плотности и степени ионизации плазмы от режимов разряда в межэлектродном промежутке водородной мишени, предназначенной для экспериментов по измерению энергетических потерь пучков тяжелых ионов в ионизованном веществе.
6. Двухволновый гетеродинный лазерный интерферометр, предназначенный для измерения временной динамики электронной плотности слабоионизованного газа атмосферного давления и обеспечивающий динамический диапазон измерений  $10^6$  при чувствительности  $10^{10} \text{ см}^{-3}$ .
7. Результаты комплексных исследований параметров линейного сильноточного разряда типа Z-пинч в газе низкого давления для системы плазменной фокусировки пучка тяжелых ионов, позволившие на стадии финишной фокусировки пучка ионов  $\text{C}^{+6}$  сфокусировать пучок диаметром 20 мм в пятно размером 350 мкм.
8. Результаты комплексных исследований амплитудно-частотных характеристик генерации лазеров различных типов при инжекции в их резонатор слабого оптического излучения. Прямыми измерениями показана более высокая чувствительность внутрилазерного приема по сравнению с методом прямой фоторегистрации.
9. Рабочие характеристики двухволнового интерферометра на основе внутрилазерного приема отраженного излучения: минимальный коэффициент отражения, при котором интерферометр сохраняет работоспособность:  $10^{-12} (\text{Гц}^{-1/2})$ ; чувствительность измерений оптической длины:  $5 \cdot 10^{-7} \lambda (\text{Гц}^{-1/2})$ ; чувствительность измерений линейной электронной плотности:  $2,5 \cdot 10^{10} (\text{см}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1/2})$ ; временное разрешение измерений:  $\sim 10 \text{ нс}$ .

10. Внутриврезонаторная схема теневого фотографирования фазовых объектов с использованием проекционного лазерного микроскопа, позволяющая исследовать процессы плазмообразования, ударные волны в газах, газовые струи, вихри, зоны турбулентности.

**Авторский вклад.** Все выносимые на защиту результаты и положения диссертационной работы получены и разработаны лично автором или под его руководством при его непосредственном участии. Практическая аппаратная реализация предложенных автором методик и диагностических комплексов, а также проведение экспериментальных исследований с их помощью выполнены в соавторстве с сотрудниками, аспирантами и дипломниками под его руководством.

**Достоверность и обоснованность результатов,** полученных в диссертационной работе, определяется комплексным подходом к исследованиям, использованием большого количества различных, в ряде случаев взаимно дополняющих, методов диагностики и достаточной статистикой измерений, полученной как в большом числе опытов, так и на нескольких экспериментальных стендах, а также сравнением экспериментальных данных с результатами численного моделирования.

**Апробация работы.** Результаты проведенных по теме диссертации исследований докладывались и обсуждались на отечественных и международных симпозиумах, конференциях, семинарах и школах:

◆ XXIV Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, Звенигород, 1997 г. ◆ 1-7 Российский семинар «Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды», Москва, 1998, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008, 2010 гг. ◆ XI Конференция по физике газового разряда Рязань, 1998 г. ◆ III Международная научно-техническая конференция «Инженерно-физические проблемы авиационной и космической техники», Егорьевск, 1999 г. ◆ Международная конференция «Физика атмосферного аэрозоля», Москва, 1999 г. ◆ International symposium Plasma'99 "Research and applications of plasmas" July 7-9, Warsaw, Poland, 1999 г. ◆ 21<sup>st</sup> Summer School and International Symposium on Physics of Ionized Gasses. August 2002 г. Sokobanja, Yugoslavia. ◆ X–XIV Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы», г. Звенигород, 2003, 2005, 2007, 2009, 2011 гг. ◆ 30<sup>th</sup> EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys., St. Petersburg, 2003 г. ◆ International Workshop on Physics of High Energy Density in Matter, 2005 г., Hirschegg, Austria. ◆ XXXII – XXXIV Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. г. Звенигород, 2005, 2006, 2007 гг. ◆ 6 и 7-й Международные семинары по проблемам ускорительной

техники памяти В.П. Саранцева г. Алушта, 2005, 2007 гг. ♦ 32<sup>nd</sup> EPS Plasma Physics Conference, 8<sup>th</sup> International Workshop on Fast Ignition of Fusion Targets, 27 June - 1 July 2005 г. Tarragona, Spain. ♦ XX<sup>th</sup> Russian Conference on Charged Particle Accelerators, Novosibirsk, Russia. ♦ 17<sup>th</sup> International Laser Physics Workshop June 30-July 4, 2008 г. Trondheim, Norway. ♦ 35<sup>nd</sup> EPS Plasma Physics Conference, 10<sup>th</sup> International Workshop on Fast Ignition of Fusion Targets, Hersonisios, Crete, Greece 9-13 June 2008 г. ♦ European Particle Accelerator Conference, June, 2008 г. ♦ 19<sup>th</sup> International Laser Physics Workshop, July 5-9, 2010 г., Foz do Iguacu, Brazil. ♦ 2<sup>nd</sup> Workshop on High Energy Proton Microscopy Chernogolovka, June 2–4, 2010. ♦ 1-6 Всероссийская школа по лазерной физике и лазерным технологиям, г. Саров, 2007-2012 гг. ♦ Научно-координационная сессия "Исследования неидеальной плазмы" 1 - 2 декабря 2010 г., Президиум РАН. ♦ XV Конференция «Взаимодействие плазмы с поверхностью», Москва, 2-3 февраля 2012 г. ♦ 20<sup>th</sup> International Conference on Plasma Surface Interactions 20-25 May 2012 г, Aachen, Germany. ♦ 21<sup>th</sup> International Laser Physics Workshop Calgary, July 23-27, 2012 г. ♦ Международная конференция «Лазеры измерения информация», Санкт-Петербург, 5-7 июня 2012 г. ♦ Симпозиум “Лазеры на парах металлов”, 24–28 сентября 2012 г. ♦ VIII Конференция "Современные методы диагностики плазмы и их применение", 2012 г. ♦ Научная сессия МИФИ 1998 – 2010 гг., Научная сессия НИЯУ МИФИ 2010– 2012 гг.

Семинарах в ФИ РАН, ОИВТ РАН, ИОФ РАН, РФЯЦ ВНИИЭФ, ГНЦ РФ ТРИНИТИ, ГНЦ РФ ИТЭФ, ИПХФ РАН, ГУ МФТИ, НИЯУ МИФИ.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 110 печатных работ, включая 21 статью в реферируемых журналах, включенных в перечень ВАК РФ: «Квантовая электроника», «Физика плазмы», «Приборы и техника эксперимента», «Измерительная техника», «Письма ЖТФ», «Письма в ЭЧАЯ», «Ядерная физика и инжиниринг», Laser Physics, Journal of Technical Physics, Physics of Particles and Nuclei Letters, Measurement Techniques, 2 монографии, 2 патента на полезную модель, 38 статей в сборниках научных трудов и 49 тезисов международных и всероссийских конференций.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, приложения и изложена на 278 страницах машинописного текста, включая 170 рисунков, 8 таблиц и список литературы, содержащий 348 наименований, в том числе публикации автора по теме диссертации.

## Основное содержание диссертации

**Во введении** к диссертации обоснована актуальность работы, определены цель и задачи диссертации, представлены научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы защищаемые положения. Кратко изложено содержание разделов диссертации.

**В первой главе** приведен обзор интерферометрических методов диагностики лабораторной плазмы. Описаны общие принципы работы интерферометрических систем, предназначенных для диагностики импульсной плазмы. Предложена классификация существующих методов лазерной интерферометрии в диагностике плазмы. Проведен анализ рабочих характеристик интерферометров, представлены результаты оценок чувствительности, динамического диапазона и временного разрешения измерений.

**Вторая глава** посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию точностных характеристик квадратурного метода фоторегистрации интерференционных сигналов в гомодинной двулучевой интерферометрии и разработке квадратурных интерферометров для проведения комплексных исследований плазмы микропинчевого разряда.

В первой части главы описан квадратурный лазерный интерферометр, разработанный для исследования параметров плазмы в разряде низкоиндуктивной вакуумной искры и обеспечивающий возможность измерения электронной плотности в диапазоне  $10^{13}$ – $10^{19}$  см<sup>-3</sup>.

Фазовый сдвиг  $\delta$ , измеряемый интерферометрическими методами в плазменном эксперименте, определяется изменением показателя преломления  $n$  плазмы вдоль зондирующего луча:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \int_{\ell_1}^{\ell_2} (n - n_0) d\ell, \quad (1)$$

где  $n_0$  – показатель преломления окружающей среды,  $\ell_1$  и  $\ell_2$  – координаты границ плазмы вдоль распространения зондирующей волны. Показатель преломления  $n$ , в оптическом диапазоне длин волн зондирующего излучения при степени ионизации плазмы более 1÷10% в основном определяется концентрацией электронов  $N_e$ . Поэтому в отсутствии магнитного поля и при условии пренебрежения соударениями  $n$  приближенно можно записать:

$$n \approx 1 - 4,49 \cdot 10^{-14} \lambda^2 \int_{\ell_1}^{\ell_2} N_e d\ell. \quad (2)$$

Измерение  $n$  позволяет определить величину  $\int_{\ell_1}^{\ell_2} N_e d\ell$ , которую обычно называют линейной электронной плотностью [см<sup>-2</sup>].



При измерении электронной плотности в таком широком диапазоне ее значений фаза  $\delta$  зондирующей электромагнитной волны может изменяться от доли периода, равного  $2\pi$ , до одного или нескольких периодов. В этих условиях из-за нелинейной дифференциальной чувствительности гомодинной интерферометрии, особенно при немонотонном изменении плотности плазмы во времени, восстановление действительного закона изменения фазы представляет серьезную проблему, устранить которую позволяет методика квадратурной фоторегистрации. Для этого формируются два измерительных канала, в которых переменные составляющие интерференционных сигналов  $U_1$  и  $U_2$  сдвинуты друг относительно друга на четверть периода:

$$U_1(t) = U_0(t) \sin \delta(t), \quad (3)$$

$$U_2(t) = U_0(t) \cos \delta(t). \quad (4)$$

Преобразование этих сигналов в виде

$$\delta(t) = \arctg[U_1(t)/U_2(t)] \quad (5)$$

восстанавливает закон изменения фазы зондирующей электромагнитной волны.

Квадратурный интерферометр позволяет однозначно измерять практически любые значительные набег фазы с высокой однородной дифференциальной чувствительностью. Для определения предельных точностных характеристик разработанного квадратурного интерферометра было проведено прямое сличение с измерениями гетеродинного интерферометра, входящего в состав метрологического зондового микроскопа NanoScan 3Di. Показано, что применение данной оптической схемы и разработанных алгоритмов обработки сигналов позволяет обеспечить точность измерений фазового сдвига ( $3 \cdot 10^{-7}$ ) рад·Гц<sup>-1/2</sup>.

Во второй части главы приводятся результаты исследований лазерным интерферометром пространственного распределения электронной плотности плазмы на периферии микропинчового разряда на установке «Зона-2», созданной в НИЯУ МИФИ для изучения физических процессов в высокотемпературной импульсной плазме. Электродная система и геометрия разрядного промежутка установки «Зона-2» представлена на рис. 1а. Анод в виде заостренного стержня диаметром 3 мм располагается по оси установки. Катод (соединен с землей) имеет плоскую разрядную поверхность, которая образована основанием цилиндра диаметром 20 мм. Electroды изготовлены из стали Ст 3. При начальном зарядном напряжении 10 кВ запасаемая энергия в конденсаторах составляет 1 кДж. Период разрядного тока 8,5 мкс. Четыре триггерных электрода, с помощью которых осуществляется инициирование основного разряда, расположены симметрично и перпендикулярно оси установки.

Необходимость проведения исследований была обусловлена тем, что до сих пор, несмотря на длительную историю изучения микропинчевых разрядов, в том числе и типа «низкоиндуктивная вакуумная искра», остается целый ряд не до конца изученных плазменно-динамических процессов, существенно влияющих на эмиссионные свойства разрабатываемых источников излучений и корпускулярных и плазменных потоков. Трудность проведения подобных исследований связана с тем, что необходимо измерять электронную плотность не только на стадии существования высокотемпературной, плотной плазмы в области с характерным размером менее 100 мкм, но необходима информация о пространственном распределении и временной динамике периферийной плазмы низкой плотности. Поэтому интерферометр для проведения исследований в разряде НВИ должен удовлетворять ряду требований: обеспечивать возможность проведения измерений в широком диапазоне электронных плотностей плазмы ( $10^{13}$ – $10^{19}$  см<sup>-3</sup>), в том числе с пространственным разрешением; обладать высоким временным разрешением (~ 1 нс); сохранять работоспособность в условиях экспериментального зала при повышенном уровне механических вибраций; обеспечивать возможность проведения измерений при наличии высокого уровня электромагнитных помех, характерных для импульсных электрофизических установок.

Принципиальная схема разработанного интерферометра, удовлетворяющего всем этим требованиям, изображена на рис. 1б. В качестве излучателя использован He-Ne лазер с генерацией на длине волны 633 нм. Квадратурные каналы

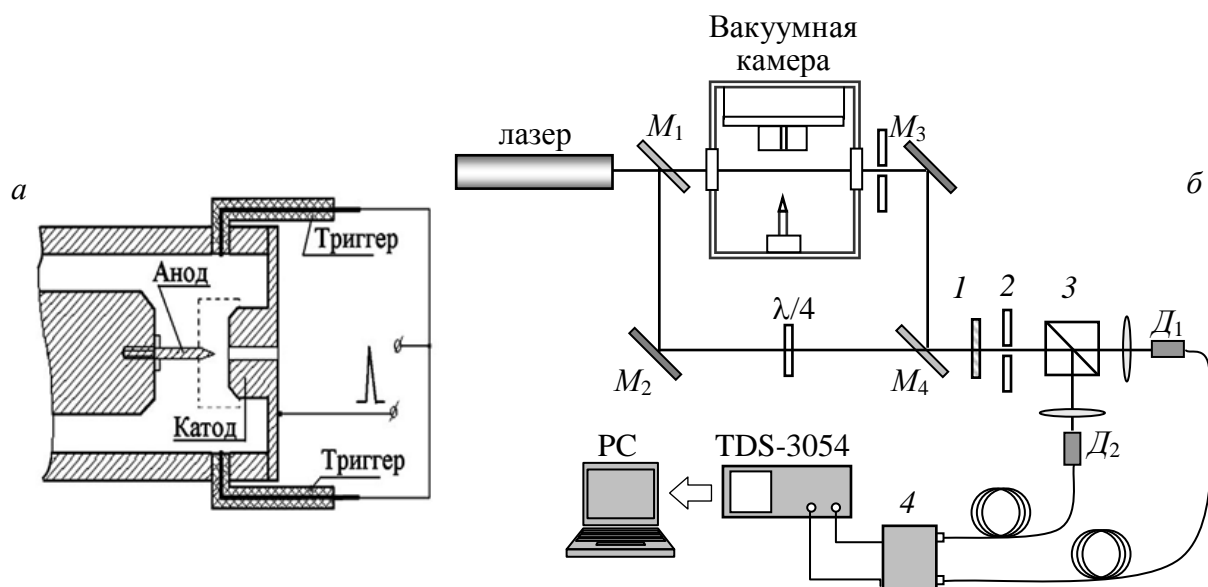


Рис. 1. Электродная система установки для получения микропинчевого разряда (а) и принципиальная схема квадратурного интерферометра (б):  $M_1$ – $M_4$  – зеркала интерферометра Маха-Цендера, 1 – интерференционный светофильтр, 2 – апертурная диафрагма, 3 – поляризационная призма, 4 – фотоприемный модуль

регистрации формируются методом поляризационного кодирования с использованием поляризационной призмы 3 и четвертьволновой пластинки ( $\lambda/4$ ), установленной в опорном плече под углом в  $45^\circ$  к исходной плоскости поляризации. Из-за того, что микропинчевой разряд сопровождается высоким уровнем электромагнитной помехи, регистрирующая часть интерферометра вынесена из экспериментального зала на расстояние более 10 м. Для этого излучение фокусируется на торцах оптоволоконных кабелей, закрепленных в двухкоординатных юстируемых оправках ( $D_1, D_2$ ) и далее транспортируется на вход фотоприемного модуля 4 с полосой регистрации 125 МГц. Необходимая жесткость конструкции, устраняющая угловую разъюстировку интерферометра, обеспечивается размещением оптических элементов на общей массивной плите, которая механически развязана с вакуумной камерой. После фотоэлектрического преобразования информативные сигналы регистрируются цифровым осциллографом и передаются в компьютер для последующей обработки.

Проведение зондирования в различных сечениях разрядного промежутка с прицельными параметрами  $\rho$ , варьируемыми от 1 до 10 мм относительно оси разряда, показало, что периферийные области НВИ заполнены плазмой с линейной плотностью  $(0,2-1,0) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ . Для перехода от среднего к локальным значениям электронной плотности применено интегральное преобразование полученных в эксперименте поперечных распределений плотности плазмы. Аксиальная симметрия электродной системы НВИ, а также характер тенеграмм и ФЭР-грамм области разряда позволяют проводить обработку результатов измерений в предположении осевой симметрии плазмы. На рис. 2 приведены рассчитанные сечения локальной электронной плотности в координатах:  $r$  – радиус от оси разряда,  $L$  – расстояние от поверхности катода вдоль оси разряда. Моменту времени в начальной стадии развития разряда соответствует рис. 2,а. На оси разряда в 2-х мм от среза анода ( $L = 4$  мм) электронная концентрация достигает значения  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . В момент времени, предшествующий образованию микропинча, как можно видеть на рис. 2,б, максимальное значение электронной плотности увеличивается почти на два порядка при  $L = 4$  мм,  $r = 0$  мм. Для этого момента времени на периферии наблюдаются достаточно протяженные области с  $n_e > 10^{18} \text{ см}^{-3}$  при координатах  $L \approx 4, 6, 8$  мм.

Интерферометрические измерения показали, что в распределении электронной плотности в поперечном к оси разряда направлении существуют выделенные пространственные области повышенной концентрации электронов на различных расстояниях от оси разряда. Наибольшая пространственная неоднородность концентрации электронов наблюдается вблизи катода.

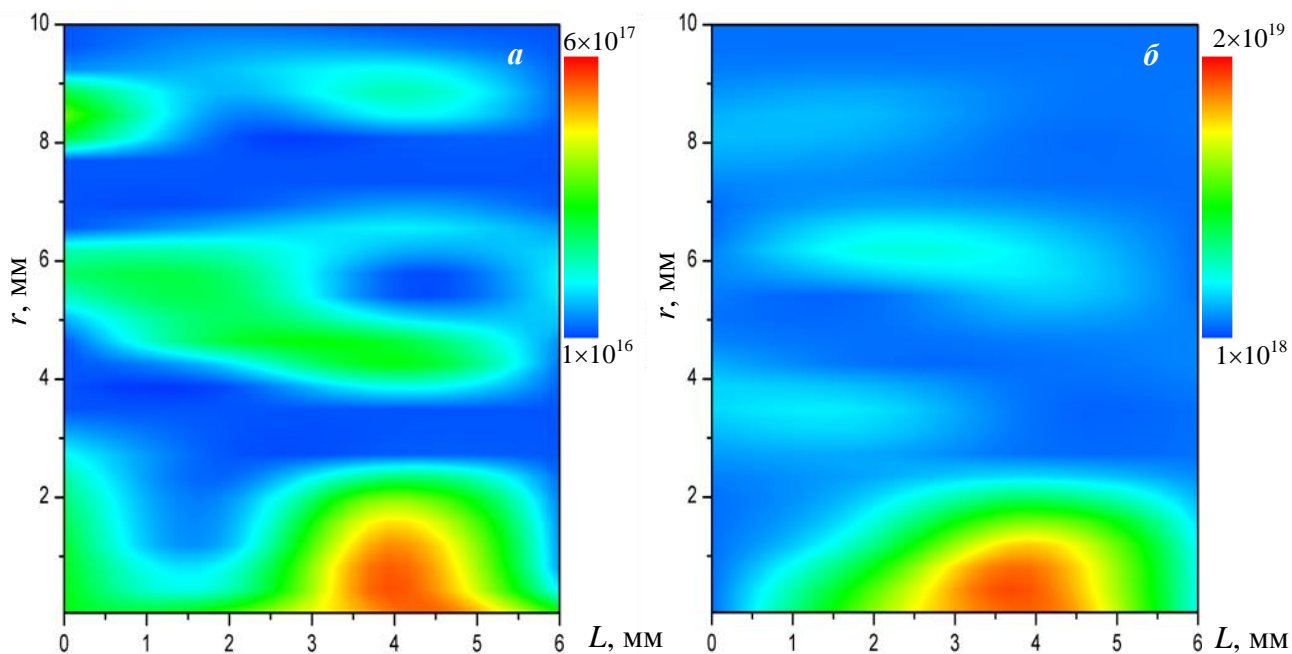


Рис. 2. Зависимость локальной электронной плотности от радиуса  $r$  и расстояния  $L$  вдоль оси разряда относительно поверхности катода для двух моментов времени: *а*) в начальной стадии развития разряда; *б*) в момент времени, предшествующий пинчеванию

В третьей части главы приводятся результаты интерферометрических измерений временной динамики линейной электронной плотности плазмы инициирующего разряда НВИ для набора различных материалов диэлектрика триггера и геометрий инициирующей системы. Проведенные измерения являлись частью комплексного исследования влияния триггерной системы поджига на основной разряд и стабильность пинчевания. Одним из критериев выбора оптимальной геометрии системы поджига и материала диэлектрика была максимальная электронная плотность в разряде предимпульса. Измерения показали, что выбором материала диэлектрика и геометрии инициирующей системы можно в четыре раза изменять максимальную электронную плотность форплазмы при неизменной энергии поджига.

В четвертой части главы приводится описание разработанной лазерной методики измерения давления плазмы микропинчевого разряда. Получение информации о механизмах распада плазмы (как в межэлектродном промежутке, так и за его пределами), а также о параметрах корпускулярных потоков из области микропинчевого разряда актуально для многих практических применений. Потоки плазмы из области разряда можно характеризовать величиной газокINETического давления. Прямые измерения давления потоков плазмы в разряде пьезоэлектрическими датчиками зачастую невозможны по причине недостаточной электрической прочности датчика. В данной работе в качестве детектора был применен акустический звукопровод в виде тонкого стержня,

встроенный в оптическую схему лазерного интерферометра. Стержень, изготовленный из кварцевого стекла  $\varnothing 2,0$  мм и длиной 250 мм, через вакуумное уплотнение вводится в плазменный объем (рис. 3). Один торец стержня помещается в области разряда с возможностью регулировки его положения  $h$  относительно оси электродного промежутка. Противоположный торец, отполированный с оптическим качеством и покрытый алюминием, используется в качестве зеркала  $M_2$  интерферометра Майкельсона, образованного зеркалами  $M_1-M_3$ . В процессе генерации плазмы происходит рост давления в камере, что приводит к возбуждению в стержне продольной волны. Массовая скорость этой волны в стержне, равная половине скорости движения свободного торца, однозначно связана с давлением плазмы. Если давление  $P(t)$  перпендикулярно поверхности торца стержня длины  $L$ , то смещение  $\ell$  частиц на расстоянии  $x$  от начала торца стержня можно записать:

$$\ell(x, t) = \frac{1}{\rho c_0} \int_0^t P\left(t - \frac{x}{c_0}\right) dt, \quad t \geq \frac{x}{c_0}, \quad (6)$$

$c_0$  – скорость основной моды продольной волны и  $\rho$  – плотность материала стержня. При  $x = L$  соответствующее смещение поверхности торца, с учетом граничных условий, дается выражением:

$$\ell(L, t) = 2 \frac{1}{\rho c_0} \int_0^t P\left(t - \frac{L}{c_0}\right) dt. \quad (7)$$

Тогда давление описывается следующим соотношением

$$P\left(t - \frac{L}{c_0}\right) = \frac{\rho c_0}{2} \frac{d\ell(t, L)}{dt}. \quad (8)$$

В основу измерительной схемы также положен квадратурный принцип фотоэлектрического преобразования интерференционных сигналов. Жесткая конструкция интерферометра позволила применить наиболее простую схему формирования квадратурных сигналов перемещением диафрагмированных

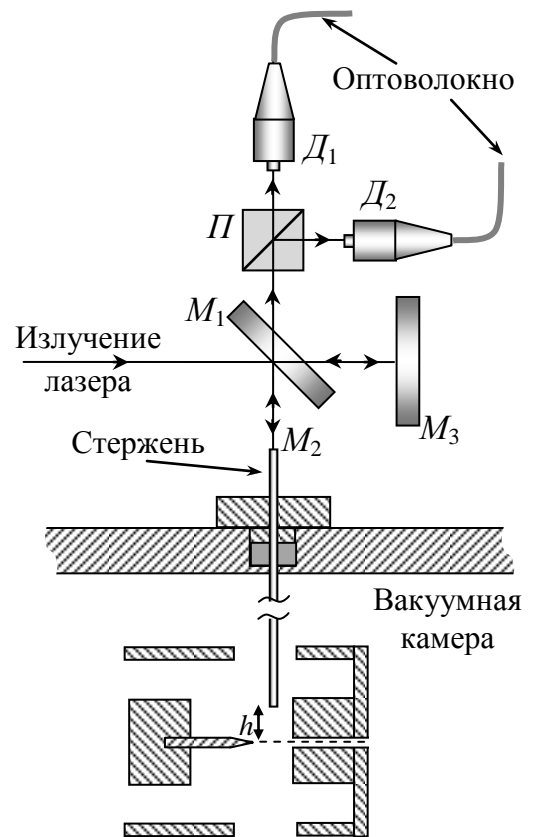


Рис. 3. Общий вид интерферометра

детекторов  $D_1$ ,  $D_2$ , в качестве которых используются торцы оптоволоконного кабеля  $\varnothing 50$  мкм, поперек направления интерференционной полосы.

С помощью интерферометра проведены исследования давления потоков плазмы в зависимости от запасенной в конденсаторной батарее энергии и расстояния от оси разрядного промежутка. Так, на расстоянии 8 мм от оси разряда при энерговкладе в 2,5 кДж давление составляло  $68,0 \pm 0,7$  бар, а на расстоянии 30 мм и при энергии в накопителе 0,5 кДж –  $0,29 \pm 0,02$  бар ( $1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$ ).

Разработанная методика позволяет измерять газокинетическое давление в плазме в диапазоне 0,01–800 бар. Нижняя граница определяется уровнем шумов системы фотоэлектрической регистрации интерференционных сигналов, верхняя – пределом упругости материала стержня.

**Третья глава** посвящена разработке и применению двухволнового квадратурного лазерного интерферометра для измерений электронной плотности и степени ионизации плазмы водородной мишени, предназначенной для экспериментальных исследований энергетических потерь пучков тяжелых ионов в ионизованном веществе.

В ФГУП "ГНЦ РФ – ИТЭФ" для экспериментов по торможению пучков заряженных частиц в ионизованном веществе была разработана плазменная мишень на основе линейного электрического разряда в водороде. Плазма в мишени создается при электрическом разряде в двух соосных кварцевых трубках с внутренним диаметром 6 мм и длиной 78 мм каждая (рис. 4). Конденсаторная батарея емкостью 3 мкФ, разряжаясь при напряжениях 2–5 кВ, инициирует ток до 400 А в каждом разрядном канале, при этом обеспечивается противоположное

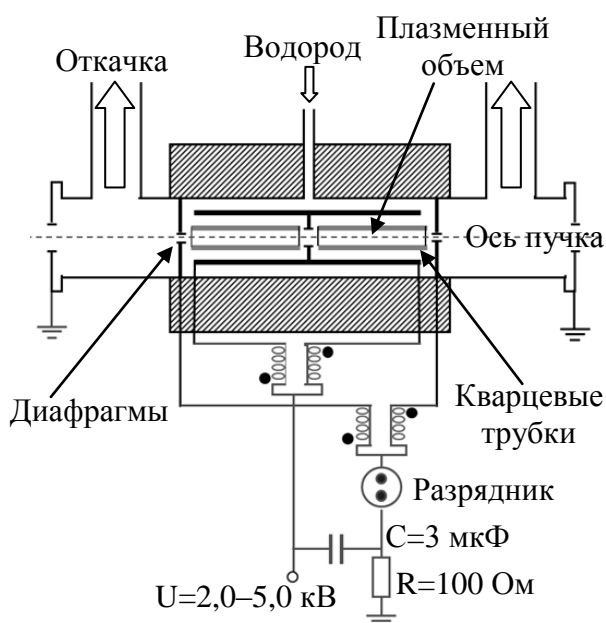


Рис. 4. Принципиальная схема водородной плазменной мишени

направление тока в каналах. Данная конструкция плазменной мишени позволяет снизить эффект фокусировки ионного пучка из-за магнитного поля тока разряда.

Водородная мишень в процессе электрического разряда переходит из состояния холодного нейтрального газа в состояние частично-ионизованной плазмы. Энергетические потери  $dE$  заряженных частиц в холодном водороде пропорциональны линейной плотности связанных

электронов  $N_{be}$  газовой мишени, тогда как потери в частично-ионизованной плазме – аддитивному вкладу плотности связанных  $N_{be}$  и свободных  $N_e$  электронов. Поэтому при сравнительном анализе торможения заряженных частиц в плазме и холодном веществе необходимым условием является установление однозначного соответствия между тормозной способностью плазмы и ее параметрами: плотностью свободных электронов  $N_e$  и средней степенью ионизации вещества. Поскольку линейная плотность свободных электронов  $N_e$  и средняя степень ионизации  $\alpha$  в плазме зависят от времени, то основной задачей является экспериментальное определение временной динамики этих параметров.

Первоначально плазменная мишень была использована в экспериментах по исследованию энергетических потерь протонов с энергией 1 МэВ, результатом которых стало измерение отношения кулоновского логарифма свободных электронов водородной плазмы к логарифму связанных электронов молекулярного водорода  $L_{fe}/L_{bec} = 3,1 \pm 0,6$  [8]. Основным источником ошибки определялся погрешностью измерения степени ионизации плазмы.

Первые исследования энергетических потерь тяжелых ионов в плазменной мишени были проведены на линейном тяжелоионном ускорителе с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (установка ТИПр). Эксперименты проводились на ионах меди ( $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Cu}^{3+}$ ) с энергией 100 кэВ/а.е.м. Были измерены потери энергии в плазме, которые составили  $S_{pl} = 158,0$  МэВ/(мг/см<sup>2</sup>), и в холодном водороде  $S_{gas} = 27,1$  МэВ/(мг/см<sup>2</sup>) при начальном давлении водорода в мишени 0,95 мбар. Полученные результаты носили оценочный характер, так как не удалось измерить степень ионизации плазмы и расчеты были проведены при условии полностью ионизованной плазмы.

Для измерения электронной плотности и степени ионизации плазмы мишени была разработана двухволновая квадратурная методика и создана соответствующая аппаратура. Погрешность измерений линейной электронной плотности составила менее 1 % во всем диапазоне изменяемых параметров плазмы, что позволяет существенно повысить точность измерения энергетических потерь тяжелых ионов в ионизованном веществе.

При интерферометрии импульсной плазмы с временем существования  $\tau$ , много меньше характерных времен вибраций  $t > 1$  мс, фазовый сдвиг  $\delta$  из-за вибропомех в зондирующей волне за время измерений можно считать постоянным. В этом случае  $\delta$  определяется аддитивным вкладом свободных электронов и вариациями плотности нейтральных частиц за счет газодинамических процессов в нагретом газе, и для двух длин волн может быть записан в виде

$$\delta_{1,2} = -4,49 \times 10^{-14} 2\pi \lambda_{1,2} \int_{\ell_1}^{\ell_2} N_e d\ell + \frac{2\pi}{\lambda_{1,2}} C_k \int_{\ell_1}^{\ell_2} N_k d\ell, \quad (9)$$

где  $C_k$  – рефракция частиц  $k$ -го сорта в расчете на одну частицу;  $N_k$  – число соответствующих частиц в единице объема. По измеренным фазовым сдвигам одновременно на двух длинах волн можно получить значения линейной электронной плотности  $N_e$  и плотности атомов водорода  $N_H$ :

$$\int_{\ell_1}^{\ell_2} N_e d\ell = \frac{\delta_1 \lambda_1 - \delta_2 \lambda_2}{4.49 \times 10^{-14} (\lambda_1^2 - \lambda_2^2)} \quad \int_{\ell_1}^{\ell_2} N_H d\ell = \frac{1}{2\pi C_H} \frac{\delta_2 \lambda_1 - \delta_1 \lambda_2}{\lambda_1 / \lambda_2 - \lambda_2 / \lambda_1} \quad (10)$$

где  $C_H = 0,51 \cdot 10^{-23} \text{ см}^3$ . Интерферометрические измерения динамики средней степени ионизации возможны только в случае водородной плазмы, так как атом водорода может находиться только в двух зарядовых состояниях: либо нейтральном, либо полностью ионизованном.

Для тестирования методики были проведены измерения электронной плотности плазмы эрозионного капиллярного разряда (ЭКР) в воздухе атмосферного давления. Плазма в ЭКР возникает в результате инициации высоковольтным импульсом разряда вдоль поверхности капилляра. Поток плазмы и возбужденных атомов формирует светящийся факел длиной 12–15 см и диаметром до 3 см. Длительность разряда 10 мс. Максимальное значение температуры 8600 К достигается в области капилляра и быстро спадает вдоль его оси до 1600 К. За счет газодинамического радиального вытеснения нагретого воздуха и его турбулентного перемешивания с холодным воздухом на периферии, экспериментальное измерение линейной электронной плотности такого плазменного объекта методами оптической интерферометрии крайне затруднено. Разработанный интерферометр позволил решить эту задачу и выделить вклад электронной компоненты на фоне теплового перераспределения нейтральных частиц воздуха атмосферного давления. Максимальное значение линейной электронной плотности составило  $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ .

Принципиальная схема разработанного интерферометра изображена на рис. 5. Излучения газового He-Ne лазера ( $\lambda = 633 \text{ нм}$ ) и непрерывного одночастотного твердотельного лазера на кристалле  $\text{YVO}_4:\text{Nd}^{3+}$  с внутриврезонаторной генерацией второй гармоники ( $\lambda = 532 \text{ нм}$ ) пространственно совмещаются зеркалом  $M_1$  и направляются в интерферометр Маха-Цендера, образованный зеркалами 1–4. В одно из плеч интерферометра помещена плазменная мишень. В блоке фотоэлектрической регистрации зондирующие излучения дисперсионной призмой  $\Pi$  разделяются по длинам волн. Формирование квадратурных сигналов осуществлялось перемещением



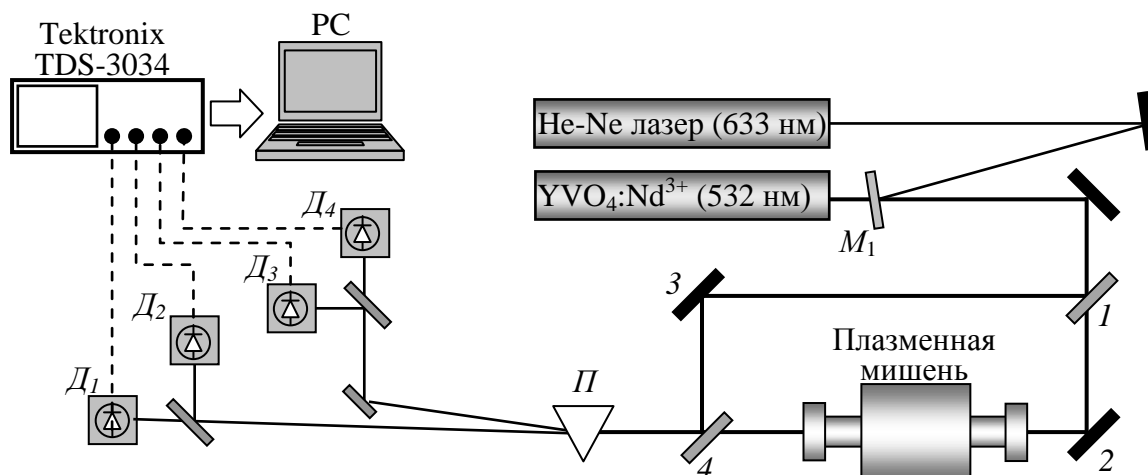


Рис. 5. Принципиальная схема двухволнового квадратурного интерферометра: 1–4 – зеркала интерферометра,  $M_1$  – дихроичное зеркало,  $\Pi$  – дисперсионная призма,  $D_1$ – $D_4$  – фотодетекторы

диафрагмированных детекторов  $D_1$ – $D_2$  и  $D_3$ – $D_4$  поперек направления интерференционных полос. После фотоэлектрического преобразования на фотодетекторах  $D_1$  –  $D_4$  информативные сигналы по всем четырем каналам (по два канала на каждую длину волны) регистрируются цифровым осциллографом и передаются в компьютер для последующей обработки.

Измерения линейной плотности свободных электронов и степени ионизации плазмы водородной мишени были проведены для диапазона начальных давлений водорода 1–8 мбар и напряжений на конденсаторной батарее 2–5 кВ. С увеличением напряжения  $U$  и начального давления электронная плотность  $N_e \ell$  возрастает практически линейно (рис. 6,а) и при напряжении в 5 кВ и давлении 8 мбар достигает своего максимального значения.

Проведенные измерения показали, что изменением начального давления водорода и тока разряда можно изменять величину линейной электронной плотности в диапазоне от  $3,3 \cdot 10^{17}$  до  $1,3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ . Максимальная степень ионизации водорода, как и следовало ожидать, создается при наименьшем количестве рабочего газа (рис. 6,б). Величина степени ионизации в диапазоне начального давления водорода 1–8 мбар, в пределах экспериментальной погрешности, практически не зависит от напряжения на конденсаторной батарее  $U$ . Максимальная степень ионизации плазмы была достигнута при начальном давлении 1 мбар и составила величину  $0,62 \pm 0,05$ .

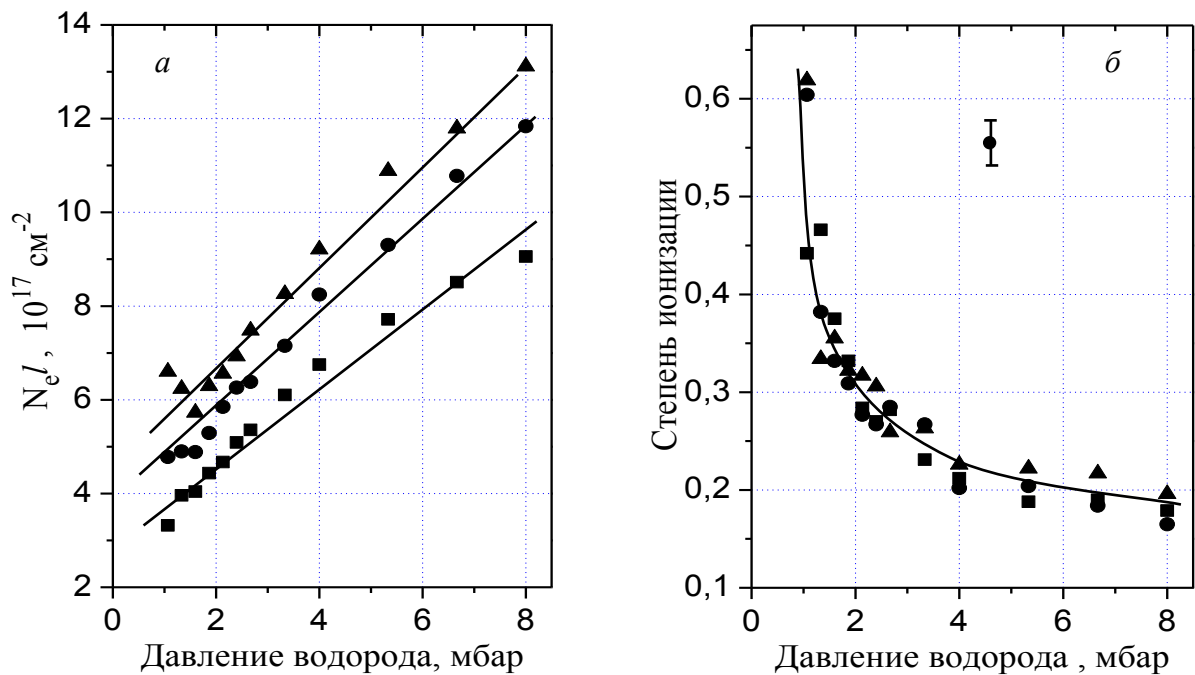


Рис. 6. Зависимость линейной электронной плотности плазмы (а) и степени ионизации плазмы (б) в максимуме тока разряда от начального давления водорода для различных значений напряжения на конденсаторной батарее (■ – 3 кВ, ● – 4 кВ, ▲ – 5 кВ)

**В четвертой главе** изложены результаты разработки двухволнового гетеродинного лазерного интерферометра, предназначенного для измерения пространственного распределения и временной динамики предельно малых электронных плотностей в слабоионизованном газе атмосферного давления в условиях сильных акустических и вибрационных помех. Параметры исследуемой плазмы: диапазон электронной плотности плазмы  $10^{10}$ – $10^{13} \text{ см}^{-3}$ ; диаметр плазменной камеры  $\sim 100 \text{ см}$ ; температура газа  $700$ – $1300 \text{ К}$ ; скорость газового потока  $40$ – $100 \text{ м/с}$ ; давление в камере:  $\sim 100 \text{ кПа}$ ; время существования плазмы  $10$ – $1000 \text{ мкс}$ .

При низкой степени ионизации газа показатель преломления плазмы  $n$  определяется аддитивным вкладом электронов, ионов и нейтральных частиц (атомов, молекул). Если плазма возникает в воздушно-газовой смеси при давлении, близком к атмосферному, а зондирование проводится с использованием электромагнитного излучения видимого или ближнего инфракрасного диапазонов спектра, вклад нейтральной компоненты в изменение фазы зондирующего излучения становится преобладающим. В общем случае, т.е. при учете вклада в фазовый сдвиг дисперсии в частично ионизованном газе и возможного изменения геометрической длины измерительного плеча интерферометра из-за вибраций плазменной камеры, фазовый сдвиг  $\delta$  электромагнитной волны в плазме определяется:

$$\delta = -4,49 \cdot 10^{-14} 2\pi\lambda \int_{\ell_1}^{\ell_2} N_e d\ell + \frac{4\pi^2}{\lambda} \sum_k C_k \int_{\ell_1}^{\ell_2} N_k d\ell + \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L. \quad (11)$$

Это выражение справедливо, если пренебречь столкновениями электронов с тяжелыми частицами, т.е. выполняется условие:  $\omega \gg \nu_{\text{эф}}$ , ( $\omega = 2\pi/\lambda$  – частота зондирующего излучения,  $\nu_{\text{эф}}$  – эффективная частота электронных кулоновских столкновений). В случае слабоионизованной плазмы  $\nu_{\text{эф}}$  в основном определяется частотой столкновений электронов с нейтральными частицами  $\nu_{\text{эф}} \approx 4 \cdot 10^{-14} \cdot T^{1/2} \cdot N_k$ . Для расчетных параметров плазмы  $\nu_{\text{эф}} \approx 1 \cdot 10^{12}$  Гц, что позволяет использовать для интерференционных измерений излучение среднего ИК и видимого диапазонов (для  $\lambda = 10$  мкм  $\omega/\nu_{\text{эф}} > 100$ ).

Для разделения вкладов в фазовый сдвиг зондирующей электромагнитной волны, вносимый электронами и тяжелыми частицами на фоне возможных вибраций оптических элементов, необходимо проводить интерферометрические измерения одновременно на нескольких, по возможности существенно разных, длинах волн, с последующей обработкой результатов измерений. Точность разделения вкладов электронов и тяжелых частиц методами двухволновой интерферометрии в большой степени определяется точностью измерения фазовых сдвигов на каждой длине волны. При этом высокий уровень фазовых шумов, вызванных вибрациями оптических элементов интерферометра, и рефракция зондирующего излучения в плазменной камере из-за температурных градиентов в горячем газе диктуют необходимость измерения больших суммарных фазовых сдвигов. Для проведения измерений электронной плотности был разработан гетеродинный интерферометр с использованием He-Ne лазера ( $\lambda = 0,633$  мкм) и CO<sub>2</sub> лазера ( $\lambda = 10,6$  мкм). В полной мере реализовать преимущества гетеродинной интерферометрии возможно только при условии, что фазовый детектор, входящий в систему регистрации, обеспечивает широкую частотную полосу регистрации сигналов, обладает высокой чувствительностью и большим динамическим диапазоном  $> 10^6$ . Традиционные схемы фазовых детекторов основаны на прецизионном измерении длительности каждого периода синусоидальной несущей. Фазовые детекторы, основанные на измерении временных интервалов, обычно имеют ограничение по ширине полосы частот измеряемых сигналов  $< 100$  кГц. По этой причине в диагностике плазмы гетеродинные интерферометры традиционно применяются для исследований медленно меняющейся во времени плотности плазмы, что наиболее характерно для установок с магнитным удержанием. Применение гетеродинных интерферометров в диагностике импульсной плазмы с характерными временами

существования  $\sim 10^{-6}$  с требует разработки широкополосных фазовых детекторов. Оригинальная схема фазового детектора, разработанная на основе прямого аналого-цифрового преобразования фазомодулированного сигнала, обеспечила возможность измерения фазовых сдвигов с точностью  $10^{-5}$  рад в полосе 1 МГц, что при использовании излучения  $\text{CO}_2$  лазера позволяет проводить измерения электронной плотности плазмы с чувствительностью  $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ .

В пятой главе представлены результаты работ по созданию комплекса оптических диагностик плазменной линзы, предназначенной для фокусировки пучка тяжелых ионов на ускорительно-накопительном комплексе ТВН-ИТЭФ. Фокусировка ионного пучка в плазменной линзе осуществляется в аксиально-симметричном азимутальном магнитном поле линейного сильноточного газового разряда. В этом поле на пролетающие ионы действует сила Лоренца, направленная к оси разряда, что и приводит к фокусировке ионного пучка. Для обеспечения необходимой временной стабильности и пространственной однородности магнитного поля был использован импульсный разряд типа Z-пинч. Разряд создавался в атмосфере аргона при давлении 2–10 мбар в керамической трубке с внутренним диаметром 20 мм (рис. 7,а). Система электропитания плазменной линзы позволяет обеспечить импульс тока с амплитудой до 300 кА длительностью 10 мкс.

Эффективность работы плазменной линзы во многом определялась подбором основных параметров разряда: тока, состава и начального давления рабочего газа,

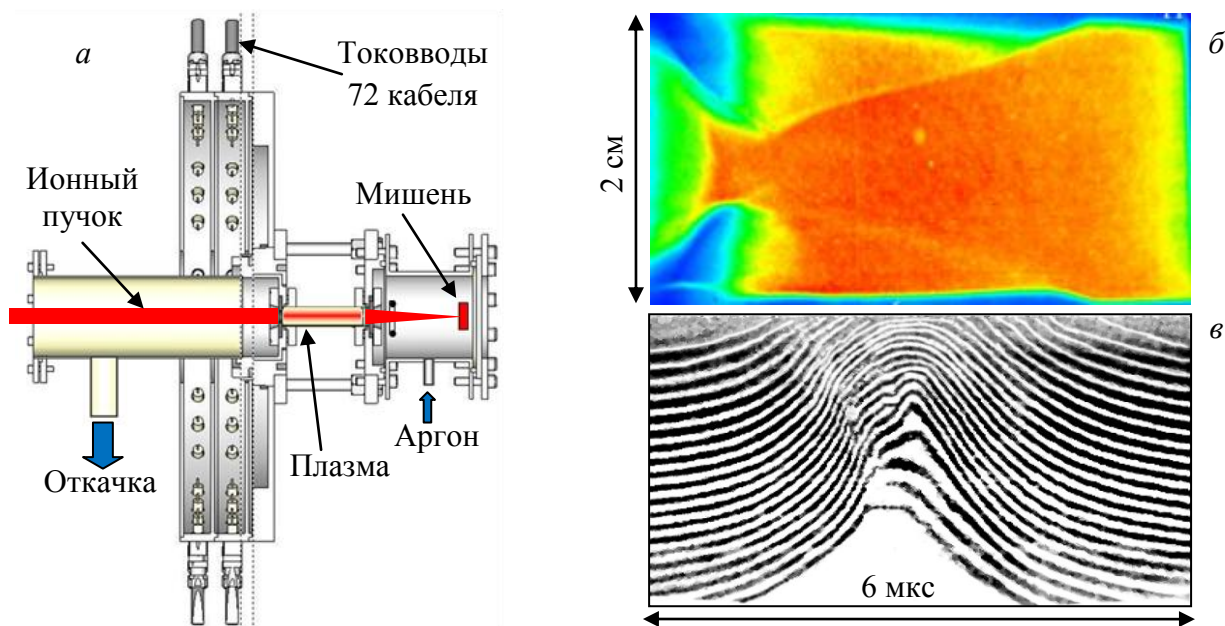


Рис. 7. Принципиальная схема плазменной линзы (а), временная динамика развития плазмы (б) и интерферограммы в режиме щелевой развертки (в) (ток разряда 30 кА, начальное давление аргона 4 мбар)

пространственного распределения электронной плотности плазмы. Для проведения исследований режимов работы плазменной линзы был создан комплекс оптических диагностик, включающий в себя оптические спектральные и интерферометрические методики.

С использованием электронно-оптической камеры в кадровом режиме и в режиме щелевой развертки было проведено исследование временной динамики пространственного распределения плазмы по сечению разрядной трубки (рис. 7,б), что позволило определить диапазон давлений рабочего газа. Установлено, что при давлениях аргона 4–8 мбар в максимуме тока пространственное распределение плазмы однородно по сечению газоразрядной трубки. С увеличением тока разряда максимальное сжатие плазмы наступает значительно раньше максимума тока и не приводит к снижению эффективности фокусировки.

В мощных импульсных разрядах из-за сильного взаимодействия плазмы со стенками уже на довольно ранней стадии разряда газовая атмосфера существенным образом изменяется из-за появления примесей. Чем меньше начальное давление газа и чем больше мощность, выделяющаяся в трубке, тем раньше начинает сказываться влияние примесей. Оценка эрозии материала разрядной трубки была получена при определении газокинетической температуры плазмы разряда методами спектральной пирометрии [9]. Показано, что газокинетическая температура плазмы линейно растет при увеличении тока разряда и при токе в 150 кА достигает 16000 К.

Для детального исследования динамики появления примесей в рабочем газе была разработана методика эмиссионной спектроскопии импульсной плазмы Z-пинча с временным и пространственным разрешением. В результате проведенных исследований показано, что для разрядного тока до 150 кА расчет динамики Z-пинча может производиться в предположении, что состав плазмы в разрядном промежутке определяется составом исходного газа.

В работе были приведены исследования пространственного распределения электронной плотности плазмы для токов в диапазоне 10–150 кА с использованием интерферометра Маха-Цендера с визуализацией интерференционной картины в режиме щелевой развертки (рис. 7,в). В качестве источника излучения использовался He-Ne лазер мощностью 25 мВт ( $\lambda = 633$  нм, TEM<sub>00</sub>). Два вида фильтрации (пространственная и спектральная), позволили снизить уровень фоновой засветки плазмой в  $10^5$  раз. При токе разряда в 30 кА линейная электронная плотность в максимуме тока составила  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ .

Результаты стендовых исследований плазменной линзы были использованы при создании плазменной фокусирующей системы для фокусировки пучка

тяжелых ионов в камере взаимодействия ТВН-ИТЭФ. Оптимизация параметров плазменной линзы позволила на стадии финишной фокусировки пучка ионов  $C^{+6}$  сфокусировать пучок диаметром 20 мм в пятно размером 350 мкм.

**Шестая глава** посвящена разработке интерферометрических методик диагностики плазмы на основе внутрилазерного приема отраженного излучения.

Первая часть главы посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию амплитудно-частотных характеристик одномодовых и двухмодовых лазеров с различной инерционностью активных сред при инжекции слабого внешнего излучения и изучению факторов, позволяющих повысить чувствительность внутрилазерного приема. Теоретический анализ был проведен в общей постановке, когда лазер-приемник, в качестве которого может быть использован как одно-, так и двухчастотный лазер, регистрирует внешнее излучение: излучение другого однотипного лазера, или собственное отраженное излучение. В результате расчета определены величины изменения мощности  $p$  и частоты  $\delta\omega$  генерации лазера-приемника с безынерционной активной средой, при инжекции в него внешнего излучения отраженного от отражателя, установленного на расстоянии  $\ell$  от лазера-приемника.

В случае одномодовой генерации лазера-приемника:

$$\delta\omega = \rho \frac{\Delta\Omega^*}{2} \sin(ft - 2k_e\ell), \quad (12)$$

$$p^{(I)} = \rho \sqrt{P_{in}P_{out}} \frac{\Delta\Omega^*}{\Delta\Omega} \frac{\eta_0}{\eta_0 - 1} \frac{\Gamma_1}{\sqrt{\Gamma_1^2 + f^2}} \cos(ft - 2k_e\ell) \quad (13)$$

В случае двухмодовой генерации (регистрируемое излучение имеет ту же поляризацию, что и  $p_1$ ):

$$p_1^{(II)} = p^{(I)} \frac{1}{S} \frac{a}{a+b} \frac{\Gamma_2}{\sqrt{\Gamma_2^2 + f^2}}, \quad p_2^{(II)} = -\frac{b}{a} p_1^{(II)}, \quad \Gamma_2 = S\Gamma_1. \quad (14)$$

Здесь,  $\rho$  – эффективный амплитудный коэффициент отражения внешнего отражателя;  $P_{out}$  – мощность регистрируемого излучения;  $P_{in}$  – средняя мощность генерации лазера-приемника;  $f$  – разность частот регистрируемого излучения с волновым числом  $k_e$  и излучения лазера-приемника;  $\Delta\Omega = c(1 - \rho_1\rho_2)/L$  – полоса резонатора лазера длиной  $L$ , образованного зеркалами с амплитудными коэффициентами отражения  $\rho_1, \rho_2$ ;  $c$  – скорость света; величина  $\Delta\Omega^* = (c/L)(\sigma_2^2/\rho_2)$  может рассматриваться как полоса фиктивного резонатора с коэффициентом пропускания выходного зеркала  $\sigma_2$ , и не имеющего других потерь;  $\Gamma_1 = \Delta\Omega(\eta_0 - 1)/\eta_0$  – полоса реакции одномодового лазера-приемника на

внешнее излучение,  $\eta_0$  – превышение ненасыщенного усиления над потерями;  $S=(a-b)/(a+b)$  – фактор межмодовой связи;  $a$  – параметр собственного насыщения усиления;  $b$  – параметр перекрестного насыщения, слабо отличающийся от  $a$ .

Выражение (13) показывает, что регистрация на лазер является гетеродинной. Об этом свидетельствует линейная зависимость  $p$  от амплитудного коэффициента отражения или корневая – от мощности регистрируемого излучения. Отношение  $\Delta\Omega/\Delta\Omega^*$  свидетельствует о том, что в резонаторе лазера накапливается поле отраженной волны, как в интерферометре Фабри-Перо. В то же время лазерный гетеродин является нелинейным, выполняющим функцию квадратичного фотодетектора обычных оптических гетеродинов. Гетеродинный сигнал  $p$  формируется уже в активной среде лазера, а роль фотодетектора заключается в фотоэлектрическом преобразовании сигнала. Амплитуда модуляции мощности может достигать очень больших значений вблизи порога генерации ( $\eta_0 \rightarrow 0$ ), величина  $\eta_0/(\eta_0-1)$  определяет автодинное усиление при внутрилазерном приеме. При использовании двухмодовых лазеров чувствительность внутрилазерного приема значительно повышается за счет конкуренции мод в активной среде. Повышение определяется величиной  $1/S$ , для лазеров с сильной конкуренцией  $S \sim 10^{-1}-10^{-2}$ . Однако при этом в  $S$  раз уменьшается полоса реакции  $\Gamma_2$ . Выводы теоретического анализа были проверены в эксперименте. Использовался He-Ne зеемановский лазер и He-Ne лазер с фазоанизотропным резонатором ( $\lambda = 3,39$  мкм) с генерацией на круговых и линейных ортогонально поляризованных модах соответственно.

Теоретически выявлен и экспериментально подтвержден (при использовании  $\text{CO}_2$  лазера волноводного типа) резонансный характер реакции мощности лазера-приемника с сильной инерционностью активной среды.

Экспериментально, с использованием YAG: Nd лазера с полупроводниковой накачкой, определена зависимость частоты резонанса автодинного сигнала от уровня накачки.

Произведено сравнение чувствительности внутрилазерного приема и метода прямой фоторегистрации при использовании  $\text{CO}_2$  лазера с накачкой тлеющим разрядом. Выигрыш в обнаружительной способности при внутрилазерном приеме составил не менее  $2,5 \cdot 10^2$ . Показано, что использование оптовольтаического эффекта качественно не уступает оптической регистрации и может быть эффективно использовано при регистрации автодинного сигнала внутрилазерного приема излучения.

Вторая часть главы посвящена разработке квадратурного интерферометра на основе внутрилазерного приема отраженного излучения. Как видно из (12) и (13),

изменения мощности и частоты генерации лазера-приемника при регистрации собственного отраженного излучения гармонически зависят от оптической длины пути света до отражателя. Поэтому внутрилазерный прием может быть положен в основу интерферометрических методик для измерений перемещений или изменений показателя преломления среды. Вместе с тем внутрилазерный прием, обладающий высокой чувствительностью, позволяет проводить такие измерения при использовании удаленных отражателей с низким коэффициентом отражения, в том числе при использовании отражателей с диффузным характером поверхности.

Принцип работы интерферометра основан на перекрестном воздействии отраженного излучения на моды двухмодового лазера-приемника. Для этого на пути света к отражателю устанавливается четвертьволновая фазовая пластинка, взаимно преобразующая поляризации излучений мод с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . В результате перекрестного воздействия отраженных волн на моды возникает модуляция мощности обеих мод на разностной частоте  $f = \omega_2 - \omega_1$ :

$$p_{1,2} = \pm \rho P \frac{\Delta\Omega^*}{\Delta\Omega} \frac{1}{S} \frac{\eta}{\eta - 1} \frac{\Gamma}{\sqrt{\Gamma^2 + f^2}} \sin(2k\ell) \sin(ft), \quad (15)$$

и появляется вторая гармоника в сигнале межмодовых биений:

$$U_b = \frac{1}{2} \rho P \frac{\Delta\Omega^*}{f} \cos(2k\ell) \cos(2ft). \quad (16)$$

Информационные сигналы реализуются на высоких несущих частотах  $f$  и  $2f$ , существенно превышающих диапазон фликкер-шумов фотоприемников. Изменение оптической длины пути вызывает соответствующие изменения в амплитудах модуляций по каждому из каналов. Сигналы демодулируются при гетеродинировании с сигналом межмодовых биений и сигналом удвоенной частоты и поступают на вход быстродействующей платы аналого-цифрового преобразователя компьютера. Использование двух сигналов (15) и (16) позволяет реализовать идеологию квадратурного интерферометра и дает возможность измерять с высокой фотоэлектрической точностью изменения оптической длины, много большие длины волны излучения, и одновременно контролировать коэффициент отражения поверхности отражателя.

В работе были проведены экспериментальные исследования эффективности внутрилазерного приема диффузно отраженного излучения. Исследовались диффузные отражатели, в том числе кандидатные материалы первой стенки термоядерного реактора (ТЯР). Показано, что применение диффузных отражателей в качестве внешнего зеркала позволяет сохранять работоспособность



лазерного интерферометра при длительном воздействии факторов, приводящих к деградации поверхности зеркала. С другой стороны, использование диффузных отражателей снижает требования к юстировке, повышая надежность и универсальность интерферометрического комплекса.

Третья часть главы посвящена разработке двухволнового квадратурного лазерного интерферометра-рефлектометра для измерения плотности плазмы и экспериментальной оценке быстродействия и чувствительности интерферометра (рис. 8). Выходные излучения He-Ne лазеров с длинами волн 3,39 и 0,63 мкм сбиваются с помощью алюминиевого зеркала  $M_1$  и диэлектрического зеркала  $M_2$ . Полупрозрачными зеркалами  $M_3$  и  $M_4$  излучение каждого лазера разделяется на два измерительных канала. Фотоприемники  $D_1$  и  $D_3$  при помощи соответствующих четвертьволновых фазовых пластинок и поляризаторов  $P_1$  и  $P_3$  регистрируют сигналы модуляции мощности одной из мод лазеров. Фотоприемники  $D_2$  и  $D_4$  при помощи поляризаторов  $P_2$  и  $P_4$  регистрируют сигналы межмодовых биений. На вставке рис. 8 показаны ориентации осей пропускания поляризаторов  $P_1, P_3$  и  $P_2, P_4$  относительно состояний поляризации излучений мод генерации лазеров. В блоке электронной обработки из сигналов межмодовых биений лазеров полосовыми фильтрами выделяются основные гармоники на частотах 5 МГц и 500 кГц и вторые, соответственно, на 10 и 1 МГц. Сигналы основных гармоник поступают на смесители и удвоители частот. На смесителях сигналы модуляции мощностей мод смешиваются с первыми гармониками сигналов биений. Вторые гармоники смешиваются с выходными сигналами удвоителей частот на смесителях. После низкочастотных усилителей информативные сигналы обоих лазеров поступают на вход быстродействующей платы АЦП. Программными средствами определяются

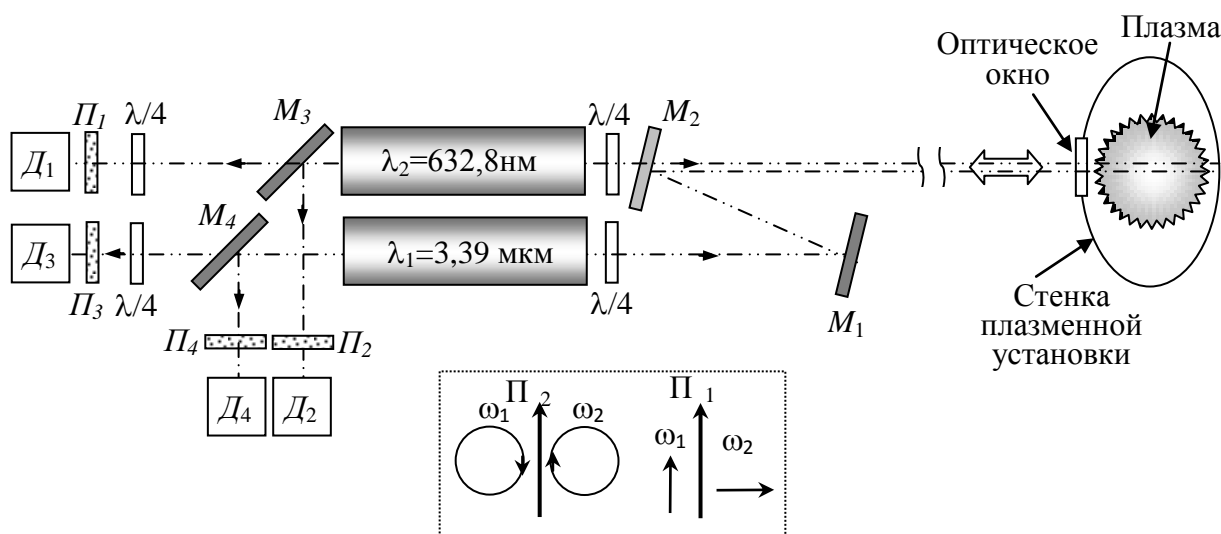


Рис. 8. Принципиальная оптическая схема двухволнового квадратурного интерферометра с внутрилазерным приемом отраженного излучения

временные зависимости оптической длины пути до отражателя  $\ell$ , и его амплитудного коэффициента отражения  $\rho(t)$ .

В работе была проведена оценка чувствительности и точности измерений разработанного интерферометра, которые ограничиваются естественными флуктуациями излучения используемых в нем лазеров. Были проведены измерения спектров для естественных флуктуаций мощности генерации соответствующих лазеров. Точность измерений интерферометра ограничивают естественные шумы мощности инфракрасного лазера, так как минимальный регистрируемый сигнал, ограниченный уровнем его естественных шумов, составил  $3,2 \cdot 10^{-6} (\text{Гц}^{-1/2}) P \Delta f^{1/2}$ , тогда как для красного лазера  $3,5 \cdot 10^{-7} (\text{Гц}^{-1/2}) P \Delta f^{1/2}$ . Минимальная регистрируемая модуляция мощности в моде соответствует изменению оптической длины  $\ell_{\min} = 5 \cdot 10^{-7} (\text{Гц}^{-1/2}) \lambda \Delta f^{1/2}$ . В пересчете на линейную электронную плотность плазмы эта величина составляет  $N_e^{\min} = 2,5 \cdot 10^{10} (\text{см}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1/2}) \Delta f^{1/2}$ . Временное разрешение интерферометра было оценено по измерению полосы спектрального распределения естественных флуктуаций мощности лазеров, которая является, по сути, полосой реакции лазеров на внешнее оптическое воздействие.

Интерферометр был использован для исследования плазмы эрозионного капиллярного разряда в воздухе. Сложность эксперимента заключалась в том, что в наиболее интересном варианте зондирования разряда вдоль его оси можно было использовать только отражение от поверхности графитового катода с  $\rho_{ef} \sim 0,1$ . К тому же, в процессе развития разряда поверхность катода деградировала и менялся коэффициент отражения. Проведенные эксперименты показали, что разработанный интерферометр позволяет при использовании в качестве внешнего отражателя элемента конструкции установки и при наличии деградации его поверхности получать одновременно информацию как о плотности плазмы, так и о модификации поверхности отражателя.

**В седьмой главе** представлены результаты разработки метода исследования процессов взаимодействия мощных потоков энергии с поверхностями различных веществ непосредственно во время взаимодействия. Основной фактор, затрудняющий наблюдение зон воздействия потоков излучения на вещество, заключается в образовании над поверхностью ярко светящейся плазмы. В традиционных оптических устройствах повышение яркости изображения может быть достигнуто увеличением светового потока осветителя, что не всегда возможно, или повышением чувствительности регистратора изображения. Повышение чувствительности может быть достигнуто за счет предварительного усиления пространственно модулированного светового потока электронно-

оптическими преобразователями (ЭОП) или микроканальными пластинами (МКП). Принципиально новые возможности усиления яркости изображения появились после создания импульсных лазеров на парах металлов, в частности меди, генерация в которых осуществляется на самоограниченных переходах с резонансных уровней атомов на метастабильные [10]. Такие лазерные среды обладают высоким коэффициентом усиления до 100 дБ/м, что позволяет получить однопроходное усиление слабого сигнала  $\sim 10^4$  за время длительности импульса 10–30 нс. Усиление яркости в таких активных проекционных системах достигается за счет использования когерентного усиления собственного излучения, отраженного от исследуемого объекта, в узком спектральном диапазоне  $\Delta\lambda < 10^{-3}$  нм, определяемом шириной линии усиления активной среды.

По своей сути процесс формирования изображения в такой активной проекционной системе подобен рассмотренному в гл. 6 методу внутрилазерного приема. Однако если в первом случае инжекция внешнего излучения приводит к возмущению амплитуды и фазы собственной пространственной модовой структуры поля в резонаторе лазера-приемника, то в случае лазеров на самоограниченных переходах, работающих в однопроходном режиме суперлюминесценции, модовая структура отсутствует, что обеспечивает возможность формирования изображения с пространственным разрешением, определяемым угловой апертурой лазерной трубки.

Высокая яркость изображения на выходе системы обеспечивается усиливающими свойствами. Разработанная проекционная система позволила исследовать область взаимодействия плазменных потоков с поверхностью различных веществ и изучать динамические процессы плазмообразования в пространственном и временном масштабах, характерных для многих научных и

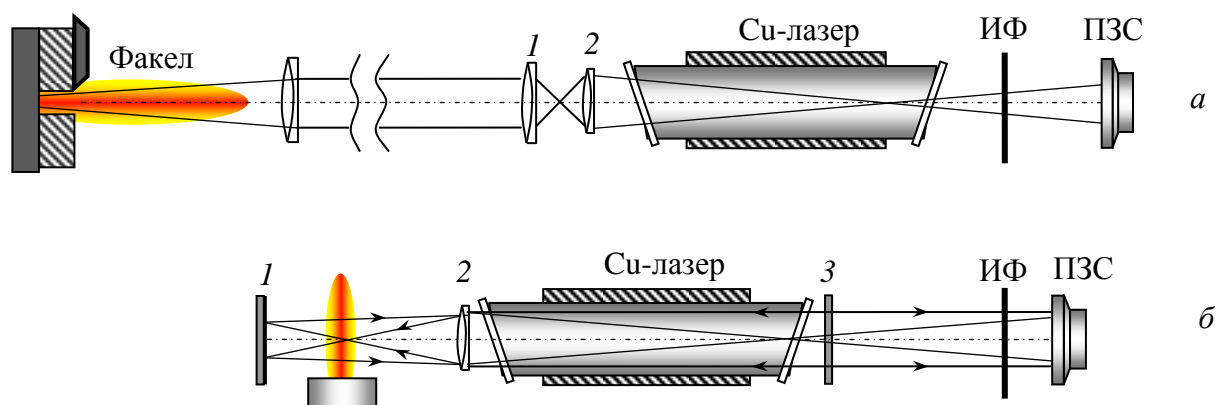


Рис. 9. Схема лазерного проекционного микроскопа с усилителем яркости на основе Cu-лазера для исследования процессов модификации плазмой поверхности графитового электрода при наблюдении через разрядный канал ЭКР (а) и оптическая схема внутрилазерного метода теневого фотографирования (б): ИФ – интерференционный светофильтр

технологических задач. Проведены исследования зависимости контраста получаемого изображения от параметров оптической схемы. За счет достаточно короткой длительности импульсов лазер на парах меди, работающий в однопроходном режиме суперлюминесценции, позволяет регистрировать контрастные изображения быстропротекающих процессов. В работе исследована возможность наблюдения поверхности объектов в условиях сильной фоновой засветки. В качестве источника засветки использовалась плазма эрозионного капиллярного разряда в воздухе. На рис. 9,а представлена оптическая схема, позволившая визуализировать поверхность графитового электрода, наблюдаемого через разрядный канал диаметром 1,5 мм в диэлектрике толщиной 3 мм. Излучение, выходящее из лазерной трубки, проходит через коллиматор и попадает на исследуемый образец. Применение линзового коллиматора 1–2 позволило получать изображение поверхности объекта, удаленного от лазера на расстояние до 5 м, причем максимальное удаление ограничено временем существования инверсии в активной среде лазера. Отраженное от поверхности объекта излучение возвращается обратно в лазер и усиливается в его активной среде. Регистрация изображения осуществляется цифровой ПЗС фотокамерой.

Усилитель яркости был впервые применен для теневого фотографирования динамических процессов плазмообразования. Предложена и разработана внутрилазерная схема теневого фотографирования фазовых объектов с использованием проекционного лазерного микроскопа (рис. 9,б). При внутрилазерном методе получения тенеграмм излучение лазера просвечивает исследуемый объект и с помощью зеркала 3 возвращается в активную среду. Если угол отклонения луча на градиенте плотности исследуемого объекта превышает апертурный угол разрядного канала лазерной трубки, то в изображении, формируемом лазерной проекционной системой на экране, область пространства, в которой произошло отклонение, будет выглядеть более темной. Для повышения чувствительности к локальным возмущениям оптической плотности необходимо использовать оптические пучки с минимальной, дифракционной расходимостью. В работе это было достигнуто за счет формирования плоского резонатора, образованного алюминиевым зеркалом 1 с коэффициентом отражения  $\approx 80\%$  и стеклянной пластины 2 с коэффициентом отражения 4%. Плазменный факел размещался внутри резонатора вблизи фокальной плоскости визуализирующей линзы 2.

По существу такой принцип формирования теневого изображения аналогичен прямо теневому методу. Для осесимметричной неоднородности относительные изменения освещенности на матрицы ПЗС описываются соотношением:

$$\frac{\Delta I}{I} \approx L \int_{z_1}^{z_2} \left( \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n}{\partial y^2} \right) dz, \quad (17)$$

т.е. определяются второй производной от показателя преломления, проинтегрированной по линии наблюдения. По этой причине методика внутрिलाзерного тенеграфирования особенно удобна для визуализации ударных волн, где изменение второй производной велико. Перед ударной волной  $\partial^2 n / \partial x^2 > 0$  и лучи расходятся, образуя на экране область с пониженной освещенностью; за ударной волной лучи сходятся и увеличивают освещенность. Так, на рис. 10,*а* приведена тенеграмма, полученная при времени задержки кадра относительно инициации эрозионного капиллярного разряда в 20 мкс. На снимке отчетливо виден фронт ударной волны, формирующейся в момент импульсного электроразрядного плазмообразования внутри капилляра. Используя режим стробоскопирования (рис 10,*б*), была определена скорость распространения фронта ударной волны, которая составила  $\approx 290$  м/с.

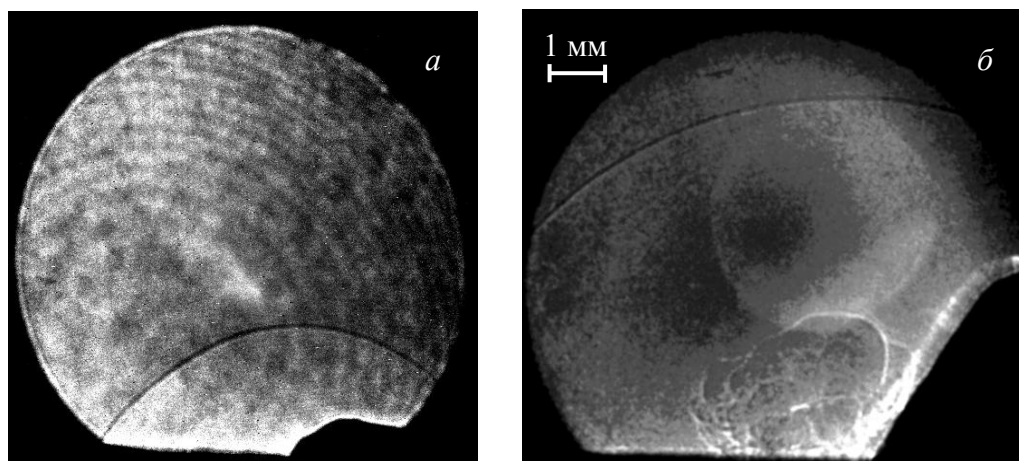


Рис. 10. Изображения эрозионного капиллярного разряда на начальных стадиях его развития, полученные методом внутрिलाзерного тенеграфирования

Проекционная система на основе Cu-лазера была применена для исследований динамических процессов плавления металла непосредственно в процессе лазерной сварки непрерывным иттербиевым волоконным лазером мощностью 10 кВт. При использовании скоростной видеокамеры (15000 кадров/с) проекционная система позволила визуализировать процесс сварки в реальном масштабе времени: ванну расплава, формирование волновых структур в сварном шве, течение и колебание ванны расплава.

**Восьмая глава** посвящена разработкам в области физики экстремального состояния вещества и метрологического обеспечения измерений линейных

размеров в нанометровом диапазоне, в основу которых положены методики, созданные автором для решения задач диагностики плазмы.

В первой части главы описан квадратурно-дифференциальный неравноплечный интерферометр (КДНИ), разработанный для измерения массовой скорости конденсированного вещества при исследовании нестационарных физико-химических процессов и экстремальных состояний вещества при интенсивном импульсном воздействии. Интерферометр позволяет проводить измерения скоростей в диапазоне до 10 км/с с погрешностью 1 % и с временным разрешением  $10^{-9}$  с.

На протонно-радиографической установке ТВН–ИТЭФ были проведены совместные исследования методами протонной радиографии и лазерной интерферометрии ударно-волнового нагружения металлических мишеней и процессов откольного разрушения и струеобразования на свободных поверхностях в металлах. На рис. 11 представлены результаты эксперимента по метанию алюминиевой пластины при помощи компактного взрывного генератора плоских ударных волн. На рис. 11,*а,б* показаны протонно-радиографические изображения мишени статической и динамической соответственно. На рис 11,*а* изображено положение пластины, запрессованной в массивное металлическое кольцо до начала движения. На рис 11,*б* сверху изображена та же пластина, разогнанная взрывным генератором, снизу – разлет продуктов взрыва и движение кольца. Второй кадр соответствует моменту времени 4,75 мкс от начала движения

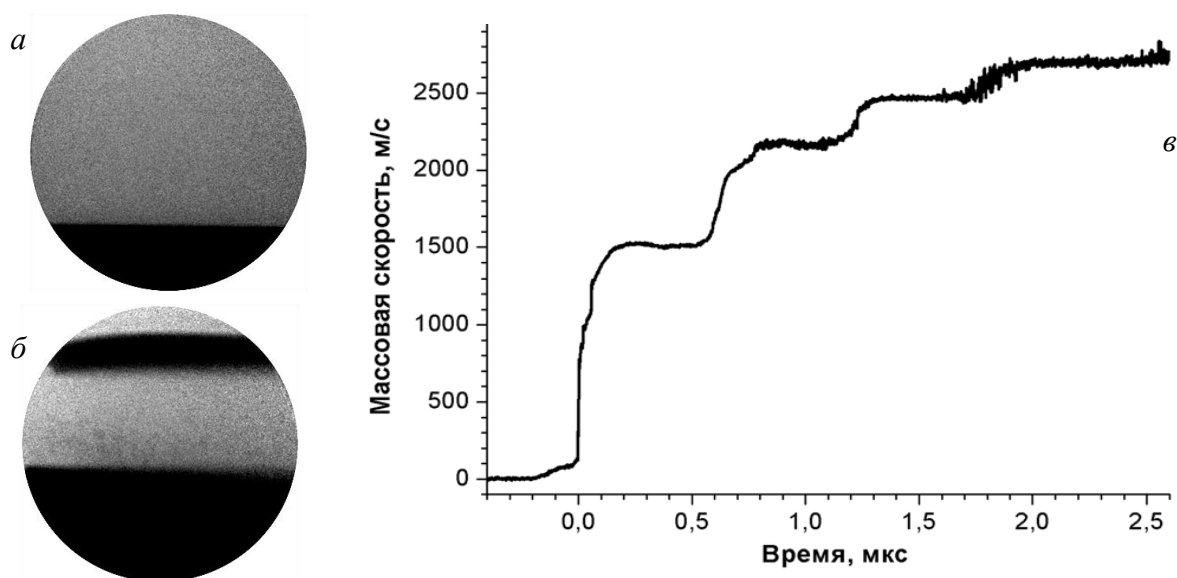


Рис. 11. Результаты эксперимента по метанию пластины взрывным генератором плоских ударных волн: протонно-радиографические изображения статической мишени (*а*) и через 4,75 мкс от начала движения (*б*) и зависимость скорости свободной поверхности пластины от времени измеренная интерферометром (*в*)

пластины. За это время свободная поверхность пластины сместилась на 11 мм, что дает среднюю скорость ее полета на данной базе 2,3 км/с. На рис. 11,в представлена зависимость скорости полета пластины от времени, полученная в результате программной обработки интерференционных сигналов, записанных в ходе эксперимента. Характерный «ступенчатый» вид этой зависимости определяется циркуляцией волн сжатия и разрежения в алюминиевой пластине, приводящей к ее ступенчатому разгону. Максимальная скорость разгона пластины составила  $2700 \pm 40$  м/с.

Во второй части главы описан разработанный трехкоординатный гетеродинный лазерный интерферометр перемещений, встраиваемый в сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) NanoScan-3D. В основу системы обработки сигналов трехкоординатного интерферометра положена квадратурная схема прямого аналого-цифрового преобразования фазомодулированного сигнала, разработанная для гетеродинного интерферометра, описанного в гл. 4. Основные технические характеристики интерферометра: диапазон измеряемых перемещений  $500 \times 500 \times 50$  мкм; разрешение по всем трем осям 0,01 нм; уровень собственных шумов интерферометра (СКО в полосе частот от 1 Гц до 1 кГц) 1 нм; диапазон измеряемых сдвигов фаз  $\pm 10^4$  рад; разрешение системы измерения фазового сдвига  $1 \cdot 10^{-5}$  рад.

Для определения метрологических характеристик измерительного комплекса NanoScan 3Di, оборудованного трехкоординатным интерферометром, были измерены тестовые структуры TGZ 01, TGZ 02, TGZ 03 (MicroMasch). Данные изделия представляют собой периодические структуры в виде ступеней известной высоты и используются в качестве калибровочных мер для СЗМ. Период всех мер составлял 3 мкм. Результаты измерений сравнивались с аналогичными данными, полученными при калибровке тех же экземпляров мер в РТВ (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) (Германия) на метрологическом зондовом микроскопе (табл. 1).

Таблица 1

**Данные измерений тестовых структур**

Мера	Высота ступеней, нм	
	NanoScan-3Di	РТВ
TGZ 01	$18,1 \pm 0,2$	$18,4 \pm 1,0$
TGZ 02	$100,0 \pm 0,4$	$101,1 \pm 1,6$
TGZ 03	$488,0 \pm 0,9$	$489,0 \pm 1,8$

Погрешность измерений на СЗМ NanoScan-3Di определялась как два среднеквадратичных отклонения. Для всех трех эталонных структур значения, измеренные на СЗМ NanoScan-3Di, попали в 95 % - ный доверительный интервал, приведенный при аналогичной калибровке в РТВ. Среднеквадратичное отклонение (СКО) измеренных на СЗМ NanoScan-3Di значений высот ступенек составило менее 1 нм. Данные о периоде данных структур, полученные на «НаноСкан-3Di», также совпали с данными РТВ. При этом рассогласование данных о среднем значении периода решеток не превысило 2 нм.

На базе метрологического сканирующего зондового микроскопа, оснащенного трехкоординатным интерферометром, совместно с ФГУП «ВНИИМС» создан Государственный первичный специальный эталон единицы длины в области измерений геометрических параметров шероховатости в диапазоне от 1 до 1000 нм.

Среди основных особенностей данного прибора следует отметить то, что в настоящее время он является единственным в России метрологическим СЗМ с привязкой к длине волны стабилизированного лазерного источника в процессе измерения. Прибор предназначен для измерения комплекса физических величин и параметров (линейных, механических, электрических и др.) продукции наноиндустрии, которые, как правило, требуются при контроле ее эксплуатационных показателей и качества продукции в целом.

### **Основные результаты работы**

Среди наиболее значимых результатов докторской диссертации можно выделить следующие.

1. Разработан квадратурный лазерный интерферометр, обладающий линейной дифференциальной чувствительностью и обеспечивающий точность измерения фазового сдвига  $(3 \cdot 10^{-7})$  рад·Гц<sup>-1/2</sup>. Технические решения, использованные в конструкции интерферометра, обеспечивают возможность его интегрирования в лабораторные плазменные установки широкого класса параметров.
2. Обнаруженная с использованием разработанного интерферометра относительно высокая электронная плотность в периферийных областях микропинчевого разряда указывает на возможность протекания шунтирующих токов в периферийных областях межэлектродного промежутка и их влияния на процесс пинчевания.
3. Разработана лазерная методика измерения газокINETического давления плазмы внутри разрядной камеры, обеспечивающая возможность проведения



измерения давления в диапазоне 0,01–800 бар. Впервые проведены исследования газокINETического давления корпускулярных потоков из области разряда низкоиндуктивной вакуумной искры.

4. Разработан двухволновый квадратурный интерферометр, предназначенный для проведения измерений динамики линейной электронной плотности частично ионизованной импульсной плазмы. Его применение для измерения электронной плотности и степени ионизации плазмы линейного электрического разряда в водороде позволило провести калибровку режимов плазменной мишени для экспериментов по торможению пучков тяжелых ионов в ионизованном веществе.
5. Разработан двухволновый гетеродинный интерферометр, обеспечивающий возможность проведения измерений предельно малых электронных плотностей  $10^{10}$ – $10^{13}$  см<sup>-3</sup> в слабоионизованном газе атмосферного давления в условиях сильных акустических и вибрационных помех.
6. Разработан комплекс оптических диагностик для исследования параметров плазменной линзы, что позволило на стадии финишной фокусировки пучка ионов C<sup>+6</sup> сфокусировать пучок диаметром 20 мм в пятно размером 350 мкм. Полученный результат близок к расчетному и соответствует лучшим мировым достижениям.
7. Разработан новый тип лазерного интерферометра-рефлектометра на основе внутрилазерного приема слабого отраженного излучения, зеркалом которого может служить обращенный к плазме конструкционный элемент плазменной установки, что открывает перспективу использования такого типа интерферометров для диагностики плазмы на крупномасштабных установках с термоядерными параметрами, где поверхность зеркал быстро деградирует под действием облучения и переосаждения материалов.
8. Впервые произведено прямое сравнение чувствительности внутрилазерного приема и метода прямой фоторегистрации. Выигрыш в обнаружительной способности при внутрилазерном приеме составил не менее  $2,5 \cdot 10^2$ .
9. Разработана проекционная система с внутрилазерным усилителем яркости на основе Си-лазера, которая позволяет исследовать область взаимодействия плазменных потоков с поверхностью различных веществ и изучать динамические процессы плазмообразования в пространственном и временном масштабах, характерных для многих научных и технологических задач.
10. Предложена и разработана внутриврезонаторная схема теневого фотографирования фазовых объектов с использованием проекционного лазерного микроскопа.

### Цитируемая литература

1. Курчатов И.В. О возможности создания термоядерных реакций в газовом разряде // Атомная энергия. 1956. Вып. 3.
2. Арцимович Л.А. Управляемые термоядерные реакции. М.: Физматгиз. 1961.
3. Ядерный синтез с инерциальным удержанием. Современное состояние и перспективы для энергетики // Под ред. Б.Ю. Шаркова. М.: Физматлит. 2005.
4. Nash T.J., Derzon M.S., Chandler G.A., et al. Diagnostics on Z // Rev. Sci. Instr. 2001. V. 72. № 1. P.1167–1172.
5. Duderstadt J.J., Moses G.A. Inertial Confinement Fusion. New York: Wiley. 1982.
6. Stetter M., Neuner U., Stöwe S. et al. Current Plasma Lens - Investigations on Fine Focusing of High Energy Heavy Ion Beams // Fus. Eng. Des. 1996. V. 32-33. P. 503.
7. Mukhin E., Vukolov K., Semenov V. et al Progress in the development of deposition prevention and cleaning techniques of in-vessel optics in ITER // Nucl. Fusion, 2009. V. 49. 085032.
8. Belyaev G., Basko M., Cherkasov A. et al. Measurement of the Coulomb energy loss by fast protons in a plasma target // Phys. Rev. E. 1996. V. 53. P. 2701.
9. Магунов А.Н. Спектральная пирометрия. М.: Физматлит. 2012.
10. Петраш Г. Г. Оптические системы с усилителями яркости. М.: Наука. 1991.

### Список основных публикаций по теме диссертации

1. Кузнецов А.П., Губский К.Л., Проценко Е.Д., Савелов А.С. Измерение давления потоков импульсной плазмы методами квадратурной интерферометрии // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 23. С. 46-54.
2. Елистратов Е. А., Кузнецов А. П., Масленников С. П., Протасов А. А. Измерение параметров импульсного объемного разряда наносекундной длительности в воздухе атмосферного давления // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 17. С. 31-38.
3. Кузнецов А.П., Губский К.Л., Шаповалов И.П. Патент на полезную модель RU 122166 от 30.07.2012 Интерферометр для измерения линейных перемещений.
4. Кузнецов А.П., Бялковский О.А., Голубев А.А. и др. Измерение электронной плотности и степени ионизации плазмы водородной мишени в экспериментах по торможению пучков тяжелых ионов в ионизованном веществе // Ядерная физика и инжиниринг. 2012. Т 3. № 6. С. 526-533.
5. Гоголинский К.В., Губский К.Л., Кузнецов А.П. и др. Исследование метрологических характеристик измерительного сканирующего зондового

- микроскопа с применением калибровочных решеток типа TGZ // Измерительная техника. 2012. № 4. С. 18-21.
6. Губский К.Л., Кузнецов А.П., Голубев А.А., и др. Лазерная анемометрия в исследованиях детонационных и ударно-волновых процессов в конденсированном веществе на ускорителе ТВН-ИТЭФ // Ядерная физика и инжиниринг. 2012. Т. 3. № 6. С. 513-518.
  7. Gogolinskii K.V., Gubskii K.L., Kuznetsov A.P. et al. Investigation of the metrological characteristics of a scanning probe measuring microscope using TGZ type calibration gratings // Measurement Techniques. 2012. V. 55. № 4. P. 400-405.
  8. Гоголинский К.В., Усеинов А.С., Кузнецов А.П., Решетов В.Н. Метрологическое обеспечение измерений линейных размеров в нанометровом диапазоне // Наноиндустрия. 2012. № 1. С. 48-52.
  9. Александрова А.С., Кузнецов А.П., Бужинский О.И. и др. Метод лазерной абляции для очистки поверхностей зеркал для систем оптических диагностик ИТЭР // Вестник национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». 2012. Т. 1. № 2. С. 155-161.
  10. Alexandrova A.S., Kuznetsov A.P., Buzhinskiy O.I. et al. Development of the Optical Surfaces Laser Cleaning Method 21<sup>th</sup> International Laser Physics Workshop Calgary. Book of abstract. 2012. P. 366.
  11. Кузнецов А.П., Колесников С.А., Голубев А.А. и др. Лазерный интерферометр для измерения массовой скорости конденсированных веществ в ударно-волновых экспериментах на протонно-радиографической установке ТВН-ИТЭФ // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 3. С. 116-125.
  12. Yermachenko V.M., Kuznetsov A.P., Petrovskiy V.N. et al. Specific Features of the Welding of Metals by Radiation of High-Power Fiber Laser// Laser Physics. 2011. V. 21. № 8. P. 1530-1537.
  13. Александрова А.С., Кузнецов А.П., Бужинский О.И. и др. Разработка методики лазерной очистки поверхности зеркал для систем оптических диагностик на ИТЭР // Ядерная физика и инжиниринг. 2011. Т. 2. № 6. С. 557-563.
  14. Кузнецов А.П., Голубев А.А., Губский К.Л. и др. Лазерный оптоакустический метод измерения теплофизических свойств конденсированных веществ при воздействии интенсивных пучков тяжелых ионов // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 3. С. 97-103.
  15. Гоголинский К.В., Кузнецов А.П., Решетов В.Н., и др. Патент на полезную модель № 96429 от 27.07.2010. Сканирующий зондовый микроскоп-нанотвердомер, совмещенный с оптической системой линейных измерений.

16. Кузнецов А.П., Бужинский Р.О., Губский К.Л., и др. Визуализация плазмоиндуцированных процессов проекционной системой с усилителем яркости на основе лазера на парах меди // Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 5. С. 463-472.
17. Yermachenko V.M., Kuznetsov A.P., Petrovskiy V.N. et al. Peculiarities welding of the metals by radiation of powerful fiber laser // Book of abstracts 19th International Laser Physics Workshop. Foz do Iguacu. Brazil. 2010. P. 472.
18. Кузнецов А.П., Башутин О.А., Бялковский О.А. и др. Интерферометрические исследования динамики электронной плотности плазмы в периферийной области микропинчового разряда // Физика плазмы. 2008. Т. 34. №3. С. 219-225.
19. Баско М.М., Кузнецов А.П., Дроздовский А.А. и др. Плазменная линза для ускорителя тяжелых ионов ИТЭФ // Письма в ЭЧАЯ. 2008. Т.5. №7. С. 64-69.
20. Basko M.M., Golubev A.A., Kuznetsov A.P. et al. Plasma Lens for the Heavy Ion Accelerator at ИТЭФ // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2008. V. 5. № 7. P. 34-37.
21. Вовченко Е.Д., Кузнецов А.П., Савёлов А.С. Лазерные методы диагностики плазмы // М.: МИФИ, 2008.
22. Yermachenko V.M., Kuznetsov A.P., Petrovskiy V.N. Regimes of generation Nd:YAG laser with a semiconductor pumping at injection weak radiation // 17<sup>th</sup> International Laser Physics Workshop. Trondheim. Norway. Book of abstract. 2008. P. 266.
23. Yermachenko V.M. Kuznetsov A.P, Kopotkov K.E. Petrovskiy V.N. Amplitude-frequency characteristics of the single and double mode diode-pumped Nd:YAG lasers with external small signal injection // Book of abstracts of the 16<sup>th</sup> International Physics Workshop. Leon. Mexico. 2007. P. 307-308.
24. Кузнецов А.П., Савёлов А.С. Двухволновая лазерная интерферометрия в диагностике плазмы // Энциклопедия низкотемпературной плазмы под ред. В.Е. Фортова. Серия Б, том V-1. Москва. ЯНУС-К. 2006. С. 586-613.
25. Голубев А.А., Козин Г.И., Кузнецов А.П. и др. Двухволновый квадратурный интерферометр для диагностики импульсных процессов в водородной и эрозионной плазме // Приборы и техника эксперимента. 2006. № 2. С. 109-115.
26. Basko M.M., Kuznetsov AP., Sharkov B.Yu. et al. Investigation of the plasma lens for heavy ion accelerator ИТЭФ –TWAC // XX<sup>th</sup> Russian Conference on Charged Particle Accelerators. Novosibirsk. Abstracts brochure. 2006. P. 91-92.
27. Козин Г.И., Кузнецов А.П., Лебединский М.О. Лазерное гетеродинамирование гауссовых пучков с частичной пространственной когерентностью // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. № 5. С. 429-434.

28. Козин Г.И., Кузнецов А.П. Оптимальное детектирование излучения с нарушенной пространственной когерентностью с применением оптических квантовых усилителей // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. № 11. С. 1009-1012.
29. Козин Г.И., Кузнецов А.П., Лебединский М.О. и др. Двухволновой лазерный интерферометр – рефлектометр «ЛИРА» для диагностики плазмы на крупномасштабных установках // Приборы и техника эксперимента. 2003. № 2. С. 53-59.
30. Fertman A., Golubev A., Kuznetsov A. et al. Investigation of 110 keV/u heavy ion beams interaction with hydrogen plasma // 30<sup>th</sup> EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys. St. Petersburg. 2003. ECA V. 27A, P-3.63.
31. Kozin G.I., Kuznetsov A.P., Bashutin O.A. et al. Laser apparatus for plasma diagnostics in a wide range of electron densities // Contributed papers 21<sup>st</sup> Summer School and International Symposium on Physics of Ionized Gasses. Sokobanja, Yugoslavia. 2002. P. 534.
32. Козин Г.И., Кузнецов А.П., Башутин О.А. и др. Двухканальный интерферометр на основе внутрिलाзерной регистрации отраженного излучения // Измерительная техника. 1999. №7. С. 36-39.
33. Kozin G.I., Kuznetsov A.P., Bashutin O.A. et al. Novel active double-channel laser interferometer // Journal of Technical Physics. 1999. V. 40. №1. P. 407-409.
34. Козин Г.И., Кузнецов А.П., Корнилов С.Т., и др. Регистрация рассеянного на аэрозолях лазерного излучения методом двухчастотного внутрिलाзерного приема // Труды международной конференции «Физика атмосферного аэрозоля». М., 1999. С. 200-208.
35. Козин Г.И., Кузнецов А.П. Пространственная когерентность и интенсивность отраженного лазерного излучения // Квантовая электроника. 1998. № 12. С. 1079-1083.