

На правах рукописи

БЯЛКОВСКИЙ Олег Александрович

КВАДРАТУРНЫЕ МЕТОДЫ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ В  
ИССЛЕДОВАНИЯХ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЫ

01.04.21 - лазерная физика

01.04.08 – физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Автор



Москва 2012

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете  
«МИФИ»

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

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, г.н.с.  
**Ковальский Николай Григорьевич,**  
*ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Троицк*

доктор физико-математических наук, в.н.с.  
**Сасоров Павел Васильевич,**  
*ФГУП ГНЦ РФ ИТЭФ, г. Москва*

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

Защита диссертации состоится «29» февраля 2012 года в 17 час. 00 мин.  
на заседании диссертационного совета Д212.130.05 при НИЯУ МИФИ  
по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ

Автореферат разослан «27 » января 2012 года

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

Ученый секретарь  
диссертационного совета



О.Б. Ананьин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Подавляющее число экспериментальных исследований плазмы, в настоящее время, проводится в лабораторных условиях. На многочисленных установках получено необычайное разнообразие параметров 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 четыре порядка 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 нескольких пико- или даже десятков фемтосекунд (лазерная плазма), а в электрическом разряде постоянного тока плазма может существовать стационарно. Величина магнитного поля также охватывают широкий диапазон: от нуля до нескольких мегаэрстед (плазменный фокус).

Необходимость в получении информации о параметрах столь различающихся плазменных объектов закономерно привела к разработке и внедрению в плазменный эксперимент большого количества диагностических методик. При этом важным является отсутствие контакта диагностического инструмента с плазмой, в противном случае возможно изменение ее параметров. В этой связи большое значение имеют оптические методы диагностики как пассивные – основанные на регистрации собственной светимости плазмы, так и активные – на основе лазерного зондирования. Оптические методы позволяют определять химический состав плазмы, измерять температуру и концентрации электронов, ионов и нейтральных атомов. В отличие от пассивных оптических методик лазерное зондирование позволяет получить наиболее достоверную и полную информацию о параметрах плазмы. Причина этого – прямая связь между измеренной величиной и исследуемым параметром плазмы.

Обычно при разработке диагностической методики ее метрологические характеристики определяются особенностями конструкции конкретной плазменной установки, требованиями к динамическому диапазону, пространственному и временному разрешению измерений. Кроме того, часто для понимания физических явлений, которые происходят, например, при нагреве плазмы до высо-

ких температур, возникает необходимость в исследовании начальной и завершающей стадий всего процесса плазмообразования. Вместе с тем, 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 лазерных диагностических методов, обеспечивающих возможность измерения различных параметров плазмы в широком диапазоне их значений. Одним из наиболее информативных параметров при описании состояния плазмы, является ее электронная плотность. Наиболее точная информация о концентрации электронов в плазме может быть получена из измерений фазовых возмущений в зондирующей волне методами оптической интерферометрии.

Таким образом, **актуальность работы** связана с необходимостью разработки лазерной интерферометрической методики для измерения электронной плотности плазмы в широком диапазоне значений с высоким временным разрешением и обеспечивающей возможность ее аппаратной реализации и интегрирования в широкий класс лабораторных плазменных установок.

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

Целями диссертационной работы являются:

1. Разработка лазерной интерферометрической методики измерения линейной электронной плотности плазмы в широком диапазоне значений ( $10^{13} - 10^{19} \text{ см}^{-2}$ ) с высоким временным разрешением.
2. Применение разработанной методики и ее аппаратных реализаций для исследования плазмы в импульсных разрядах различного типа: низкоиндуктивной вакуумной искре, эрозионном капиллярном разряде в воздухе атмосферного давления и линейном электрическом разряде в водороде.

В соответствии с поставленными целями в диссертации решаются следующие задачи:

1. Разработка квадратурного лазерного интерферометра для исследований электронной плотности импульсной плазмы. Теоретическое и экспериментальное исследование его рабочих характеристик.
2. Применение разработанного интерферометра для проведения комплексных исследований в разряде низкоиндуктивной вакуумной искры (НВИ):

- пространственного распределения и временной динамики электронной плотности плазмы в периферийных относительно оси разряда областях;
  - временной динамики электронной плотности плазмы инициирующего разряда;
  - газокINETического давления корпускулярных потоков из области разряда.
3. Разработка двухволнового квадратурного лазерного интерферометра для исследования электронной плотности частично ионизованной импульсной плазмы.
  4. Применение двухволнового квадратурного интерферометра для исследований:
    - временной динамики электронной плотности в слабоионизованном газе эрозионного капиллярного разряда атмосферного давления;
    - временной динамики электронной плотности и степени ионизации плазмы линейного разряда в водороде.

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

1. Разработанный квадратурный лазерный интерферометр, позволяет проводить измерения фазовых сдвигов интерферирующих волн в диапазоне - от долей до единиц и более  $2\pi$  с высокой однородной дифференциальной чувствительностью  $(3 \cdot 10^{-7})$  рад·Гц<sup>-1/2</sup>.
2. С использованием разработанного интерферометра проведены исследования пространственного распределения электронной плотности плазмы в разряде низкоиндуктивной вакуумной искры в периферийной относительно оси разряда области. Показано наличие достаточно высокой электронной плотности в периферийных областях микропинчового разряда ( $N_e > 5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>). Выявлен трубчатый характер распределения электронной плотности.
3. Разработана лазерная методика измерения газокINETического давления плазмы внутри разрядной камеры. Измерена временная динамика и пространственное распределение газокINETического давления корпускулярных потоков из области разряда низкоиндуктивной вакуумной искры.

4. Разработан двухволновый квадратурный лазерный интерферометр, предназначенный для проведения измерений динамики линейной электронной плотности частично ионизованной импульсной плазмы.
5. Применение двухволнового квадратурного интерферометра для исследований динамики плазмы эрозионного капиллярного разряда в воздухе атмосферного давления позволило выделить вклад электронной компоненты на фоне теплового перераспределения нейтральных частиц.
6. С использованием двухволнового квадратурного интерферометра проведены измерения временной динамики линейной электронной плотности и степени ионизации плазмы водородной мишени, предназначенной для экспериментов по торможению пучков тяжелых ионов в ионизованном веществе.

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

1. Разработан квадратурный лазерный интерферометр, позволяющий проводить измерения в широком диапазоне линейных электронных плотностей  $10^{13} - 10^{19} \text{ см}^{-2}$ . Технические решения, использованные в конструкции интерферометра, обеспечивают возможность его интегрирования в широкий класс лабораторных плазменных установок.
2. Выявлены основные факторы, приводящие к ошибкам в квадратурной методике фоторегистрации интерференционных сигналов и ограничивающие точность измерения электронной плотности плазмы гомодинными квадратурными интерферометрами. Предложены способы полного или частичного устранения их влияния.
3. Проведенные квадратурным лазерным интерферометром измерения электронной плотности форплазмы НВИ позволили обосновать выбор плазмообразующего диэлектрика системы инициирования разряда.
4. 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.
5. Применение двухволнового квадратурного лазерного интерферометра для измерения электронной плотности и степени ионизации плазмы линейного электрического разряда в водороде позволило провести калибровку режи-

мов плазменной мишени для экспериментов по торможению пучков тяжелых ионов в ионизованном веществе.

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

1. Разработанный квадратурный лазерный интерферометр, позволяющий проводить измерения фазовых сдвигов интерферирующих волн в диапазоне - от долей до единиц и более  $2\pi$  с высокой однородной дифференциальной чувствительностью ( $3 \cdot 10^{-7}$ ) рад·Гц<sup>-1/2</sup>.
2. В результате экспериментальных исследований пространственного распределения электронной плотности плазмы на периферии разряда НВИ, обнаружена относительно высокая электронную плотность на периферии ( $N_e > 5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>), что указывает на возможность протекания шунтирующих токов в периферийных областях межэлектродного промежутка и их влияния на процесс пинчевания.
3. Разработанная лазерная интерферометрическая методика измерения газодинамического давления импульсных плазменных потоков.
4. Установленная прямыми измерениями зависимость эффективности инициирования разряда в межэлектродном промежутке НВИ от геометрии системы инициирования и материала плазмообразующего триггерного диэлектрика.
5. Разработанный двухволновый квадратурный интерферометр для проведения измерений динамики линейной электронной плотности частично ионизованной импульсной плазмы.
6. 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.

### **Личный вклад соискателя**

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

### **Объем и структура работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения и изложена на страницах машинописного текста, включая 80 рисунков, 3 таблицы и список литературы, содержащий 225 наименований.

### **Апробация работы**

Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на следующих научных семинарах и конференциях: 6-я Международная научная конференция «Экология человека и природа», Москва–Плес, Россия, 2004; 5-ый Российский семинар «Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды», Москва, Россия, 2006; XII Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы», Звенигород, Россия, 2007; XII Всероссийская конференция "Диагностика высокотемпературной плазмы (ДВП-12)", Звенигород, Россия, 2007; ежегодная конференция «Научная сессия МИФИ» 2007, 2008, 2009, Москва, Россия; ежегодная конференция «Научная сессия НИЯУ МИФИ - 2010, 2011, 2012, Москва, Россия; 8-я Курчатовская молодёжная научная школа, Москва, Россия, 2010; 9-я Курчатовская молодёжная научная школа, Москва, Россия, 2011; 7-й Российский семинар «Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды», Москва, Россия, 2010; XIV международная телекоммуникационная конференция студентов и молодых учёных «Молодёжь и наука», Москва, Россия, 2011; 5-я Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых учёных и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям, Саров, Россия, 2011; XIV Всероссийская конференция "Диагностика высокотемпературной плазмы (ДВП-14)", Звенигород, Россия, 2011; XIV международная телекоммуникационная конференция студентов и молодых учёных «Молодёжь и наука», Москва, Россия, 2011

### **Публикации**

По теме диссертации было опубликовано 18 работ в научных журналах, сборниках трудов и тезисов международных и российских конференций, в том числе, 2 статьи в реферируемых журналах из перечня ВАК.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность и сформулирована цель работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

**Глава 1** содержит литературный обзор лазерных интерферометрических методов диагностики лабораторной плазмы. Рассмотрены общие принципы работы интерферометрических систем предназначенных для диагностики плазмы, методы регистрации интерференционных сигналов, динамический диапазон измерений, точность, быстродействие. Проведен их сравнительный анализ с целью выбора наиболее универсального метода диагностики плазмы в широком диапазоне линейных электронных плотностей от  $10^{13}$  см<sup>-2</sup> до  $10^{19}$  см<sup>-2</sup>, и возможностью его интегрирования в широкий класс лабораторных плазменных установок. Анализ показал, что, несмотря на большое разнообразие существующих методов лазерной интерферометрии плазмы наиболее универсальными, обладающими возможностью интеграции в широкий класс плазменных установок, являются приборы, основанные на методах гомодинной интерферометрии с двухканальной квадратурной фоторегистрацией. Преимуществами таких приборов является высокая однородная дифференциальная чувствительность, принципиально неограниченный сверху диапазон измерений и простота реализации. На основании проведенного анализа формулируются основные задачи, которые необходимо решить в диссертации.

**Глава 2** посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию точностных характеристик квадратурного метода фоторегистрации интерференционных сигналов лазерных гомодинных интерферометров.

Фазовый сдвиг  $\delta$ , измеряемый интерферометрическими методами в плазменном эксперименте, определяется, как изменением вдоль зондирующего луча показателя преломления  $n$  самой плазмы размером  $\ell$ , так и изменением геометрической длины  $\Delta L$  плеч интерферометра, вызванной вибрациями оптических элементов:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ \int_{\ell} (n - n_0) dl + \Delta L \right], \quad (1)$$

где  $n_0$  – показатель преломления окружающей среды.

Показатель преломления  $n$ , в оптическом диапазоне длин волн зондирующего излучения при степени ионизации плазмы более  $1 \div 10\%$  в основном определяется величиной концентрации электронов  $N_e$  [1]. Поэтому в отсутствии магнитного поля и при условии пренебрежения соударениями показатель преломления приближенно можно записать в виде:

$$n \approx 1 - 4.49 \cdot 10^{-14} \lambda^2 N_e. \quad (2)$$

При измерениях электронной плотности в широком диапазоне значений фаза  $\delta$  зондирующей электромагнитной волны может изменяться от долей до единиц или более  $2\pi$ . В этих условиях из-за нелинейной дифференциальной чувствительности одноканальных интерференционных измерений, особенно при немонотонном изменении плотности плазмы во времени и при условии, что значительная доля фазовых сдвигов приходится на область с близкой к нулю дифференциальной чувствительностью, восстановление действительного закона изменения фазы представляет серьезную проблему.

Для устранения этих проблем в работе было предложено использовать два канала фоторегистрации, переменные составляющие интерференционных сигналов в которых  $U_1$  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 позволяет восстановить закон изменения оптической длины

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

Квадратурный интерферометр позволяет однозначно регистрировать практически любые набеги фазы с высокой однородной дифференциальной чувствительностью  $dU/d\delta$ . На сегодняшний день наиболее эффективная реализация алгоритма обработки квадратурных сигналов возможна с использованием цифровых систем сбора данных с их последующей компьютерной обработкой. Преобразование (5) позволяет однозначно измерить сдвиг фаз только в области главных значений функции  $\arctg$ , в пределах одного фазового цикла  $-\pi/2 < \delta \leq \pi/2$ , поэтому, если в процессе измерений изменение разности фаз происходит на величину превышающую  $\pi$ , то происходит скачок текущего значения  $\arctg(U_1/U_2)$  с потерей предыдущей информации о фазе.

Точность алгоритмов «развертывания фазы», позволяющих восстанавливать непрерывность фазовой траектории, ограничена погрешностью в настройке фазового сдвига между измерительными каналами интерферометра и уровнем амплитудных и фазовых шумов в интерференционных сигналах. В этой связи в работе был разработан и использован в качестве функциональных модулей в специализированной программе комплекс помехоустойчивых алгоритмов обработки сигналов.

Для определения предельных точностных характеристик разработанного квадратурного интерферометра были проведены тестовые эксперименты по измерению малых перемещений ( $< 1$  нм). Измерения проводились в условиях пассивного термостатирования в акустически изолированном боксе, с применением активных систем виброизоляции. Для определения точности измерений было проведено прямое сличение с измерениями на метрологическом зондовом микроскопе «NanoScan 3Di» [2]. Показано, что применение разработанных алгоритмов обработки сигналов позволяют обеспечить точность измерений фазового сдвига ( $3 \cdot 10^{-7}$ ) рад·Гц<sup>-1/2</sup>.

**В главе 3** представлены результаты разработки трех модификаций квадратурного лазерного интерферометра для исследования параметров плазмы в разрядах типа «низкоиндуктивная вакуумная искра» (НВИ).

В первой части главы приводятся результаты исследований лазерным интерферометром пространственного распределения электронной плотности плазмы на периферии микропинчового разряда.

Режим микропинчевания может реализовываться во многих сильноточных импульсных разрядах и к настоящему времени накоплен богатый экспериментальный материал, однако, в основном, все это касается стадии образования самого микропинча, 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>. Интерес к плазменному объекту со столь высокими параметрами стимулируется прикладными задачами, поскольку микропинчи являются мощными источниками мягкого рентгеновского излучения, формирующегося в момент максимального сжатия.

Относительно малоизученными в разрядах типа «низкоиндуктивная вакуумная искра» до настоящего времени являются процессы в периферийной, от-

носителю оси разрядного промежутка, области и физические явления, протекающие на начальной стадии развития такого типа разрядов. Наличие в периферийной области относительно плотной плазмы  $>10^{13} \text{ см}^{-3}$  может приводить к образованию шунтирующих токов и, соответственно, к уменьшению энерговклада в основной разряд, а отсутствие информации об условиях инициирования плазмы не позволяет построить адекватную модель развития разряда.

Исследования периферийной плазмы НВИ проводились на установке «Зона-2» [3], созданной в НИЯУ МИФИ для изучения физических процессов в высокотемпературной импульсной плазме. Электродная система и геометрия разрядного промежутка представлена на рис. 1. Анод в виде сменной иглы диаметром 3 мм располагается по оси установки. Катод (соединен с землей) представляет собой цилиндр с плоским основанием диаметром 20 мм. Электроды изготовлены из стали Ст3. При начальном зарядном напряжении 10 кВ запасаемая энергия в двух конденсаторах КМК-30-10 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.

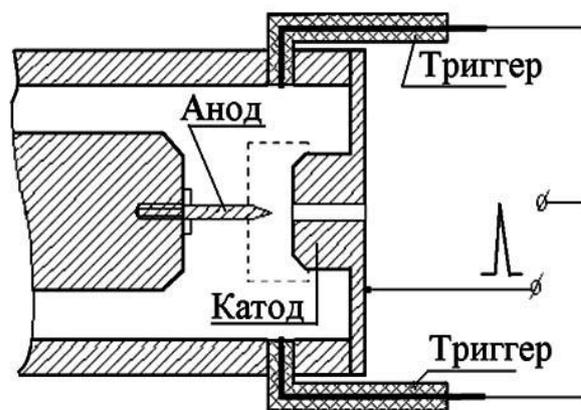


Рис. 1. Электродная система установки для получения микропинчевого разряда

Интерферометр, способный измерять электронную плотность в разряде типа НВИ должен удовлетворять ряду требований: иметь возможность проведения измерений в широком диапазоне электронных плотностей плазмы ( $10^{13} - 10^{19} \text{ см}^{-2}$ ); обеспечивать временное разрешение измерений  $\sim 10 \text{ нс}$ ; сохранять юстировку 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. 2. В качестве излучателя использован He-Ne лазер мощностью 5 мВт, с генерацией на длине волны 633 нм. При юстировке интерферометр, образованный зеркалами  $M_1 - M_4$ , настраивается в режим бесконечно широкой полосы.

Квадратурные каналы регистрации формируются методом поляризационного кодирования с использованием четвертьволновой пластинки ( $\lambda/4$ ), установленной в опорном плече под углом в  $45^0$  к исходной плоскости поляризации, и поляризационной призмы 3.

Из-за того, что микропинчевой разряд сопровождается высоким уровнем электромагнитной наводки, регистрирующая часть интерферометра вынесена из экспериментального зала на расстояние  $> 10$  м. Для этого излучение фокусируется на торцах оптоволоконного кабеля, закрепленных в двухкоординатных юстируемых оправках ( $D_1, D_2$ ), и транспортируется на вход фотоприемного модуля 4 с полосой регистрации 125 МГц. Применение узкополосного интерфе-

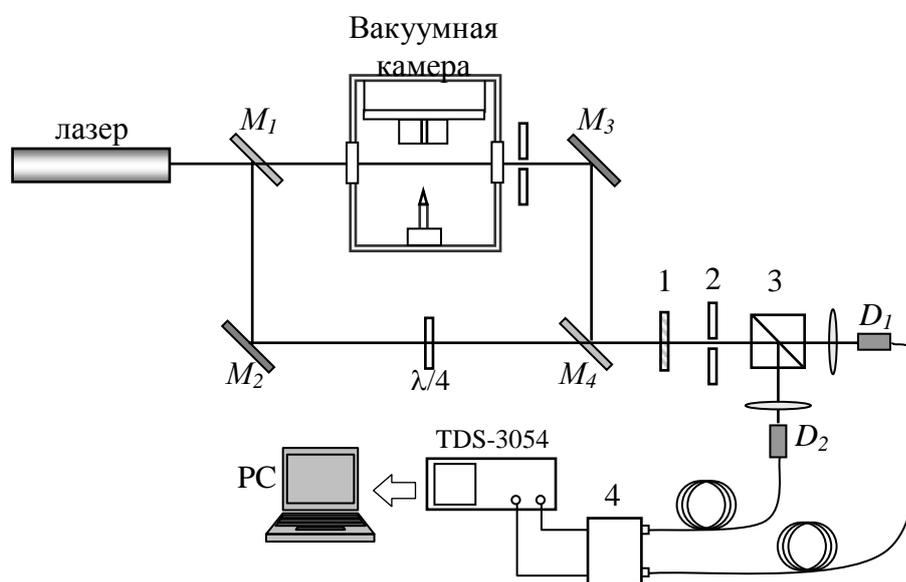


Рис. 2. Принципиальная схема квадратурного интерферометра.  $M_1$ — $M_4$  – зеркала интерферометра Маха-Цендера, 1 – интерференционный светофильтр, 2 – апертурная диафрагма, 3 – поляризационная призма, 4 – фотоприемный модуль

ренционного фильтра 1 ( $\Delta\lambda \sim 6$  нм) и пространственной фильтрации (апертурная диафрагма 2 и торец оптоволоконна  $\varnothing 62,5$  мкм) позволяет практически полностью устранить фоновую засветку от плазмы. Необходимая жесткость конструкции, устраняющая угловую разъюстировку интерферометра, обеспечивается размещением оптических элементов на общей массивной плите, механически развязанной с вакуумной камерой. После фотоэлектрического преобразования информативные сигналы регистрируются цифровым осциллографом и передаются в компьютер для последующей обработки.

Зондирование плазмы осуществлялось в поперечном сечении межэлектродного промежутка через диагностические окна вакуумной камеры. Пространственное разрешение измерений определялось размерами каустики лазерного пучка. В области разряда диаметр каустики (TEM<sub>00</sub>) составлял 0,5 мм. Зондирование проводилось с шагом в 1 мм, для чего в конструкции интерферометра была предусмотрена возможность вертикального перемещения оптической плиты относительно вакуумной камеры. На рис. 3а изображены характерные осциллограммы изменения интенсивности в квадратурных каналах интерферометра при зондировании плазмы вблизи анода на расстоянии 8 мм от оси разряда. Напряжение на емкостном накопителе  $U=10$  кВ. На рис. 3б представлена зависимость линейной электронной плотности плазмы  $N_e l$  (т.е. интегральной по хорде зондирования) от времени, восстановленная из квадратурных сигналов.

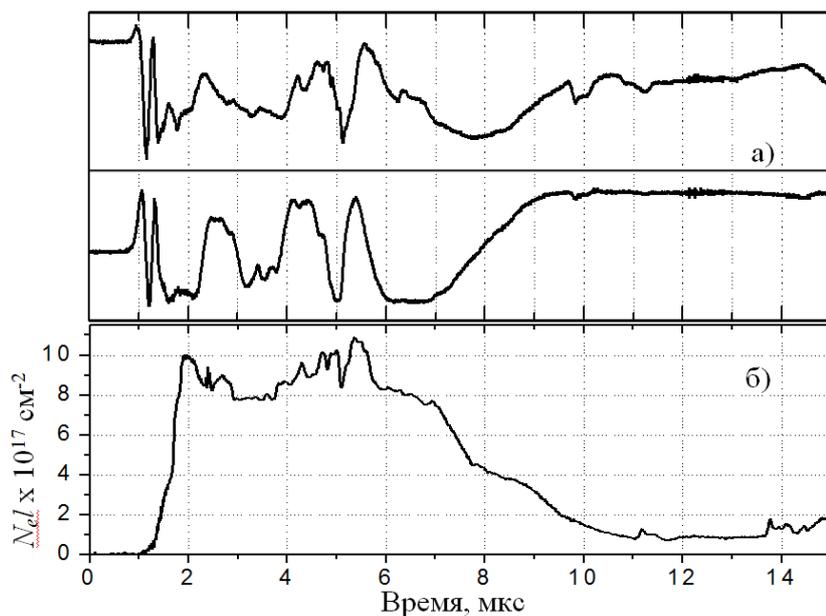


Рис. 3. Осциллограммы изменения интенсивности в квадратурных каналах интерферометра (а) и восстановленная зависимость интегральной по хорде зондирования электронной плотности плазмы  $N_e l$  от времени (б)

ферометра при зондировании плазмы вблизи анода на расстоянии 8 мм от оси разряда. Напряжение на емкостном накопителе  $U=10$  кВ. На рис. 3б представлена зависимость линейной электронной плотности плазмы  $N_e l$  (т.е. интегральной по хорде зондирования) от времени,

восстановленная из квадратурных сигналов. Проведение зондирования с прицельными пара-

метрами  $\rho$  от 5 до 10 мм относительно оси разряда в различных сечениях разрядного промежутка показало, что периферийные области НВИ заполнены плазмой с линейной плотностью  $(0,2 - 1,0) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ . На рис. 4 в координатах: прицельный параметр – время, представлены распределения линейной электронной плотности плазмы на срезе катода и в прианодной области (для  $U = 3,5$  кВ).

Для перехода от среднего к локальным значениям показателя преломления применено интегральное преобразование полученных в эксперименте поперечных распределений плотности плазмы. Аксиальная симметрия электродной системы НВИ, а также характер тенеграм и ФЭР-грамм области разряда позво-

ляют проводить обработку результатов измерений в предположении осевой симметрии плазмы. На рис. 5 приведены рассчитанные сечения локальной электронной плотности в координатах:  $y$  – значение радиуса  $r$ ,  $x$  – расстояние  $L$  вдоль оси разряда относительно поверхности катода. Моменту времени в начальной стадии развития разряда ( $t = 0.5$  мкс) соответствует рис. 5 а. На оси разряда в 2-х мм от среза анода ( $x=4$  мм) электронная концентрации достигает значения  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

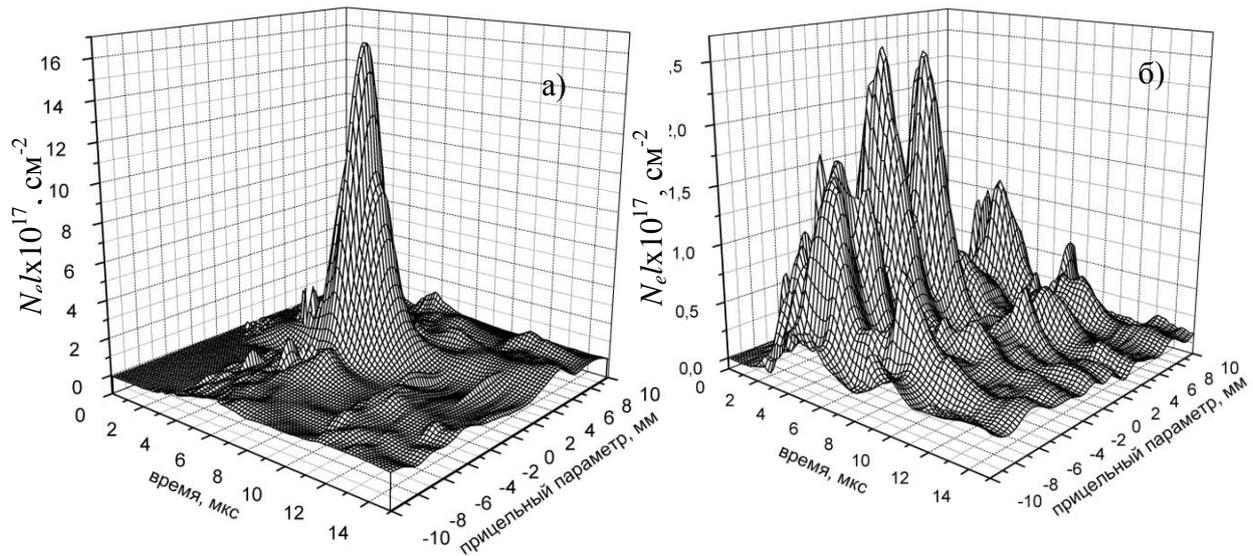


Рис. 4. Зависимость линейной электронной плотности плазмы от времени и прицельного параметра, при зондировании на срезе анода (а) и катода (б)

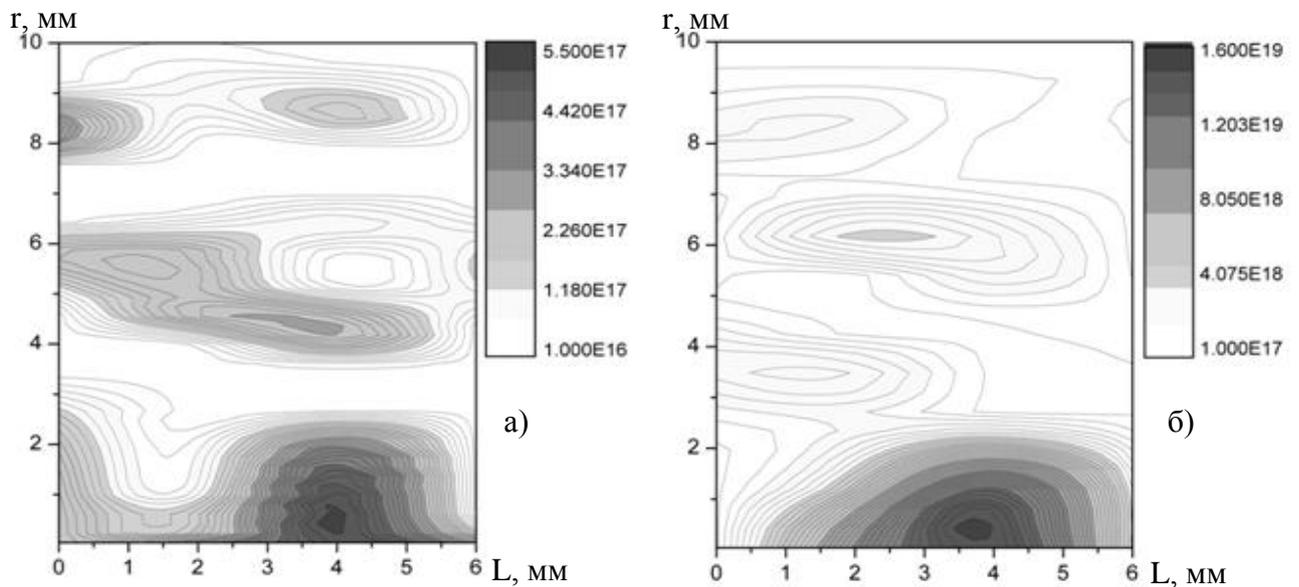


Рис. 5. Зависимость локальной электронной плотности от радиуса  $r$  и расстояния  $L$  вдоль оси разряда относительно поверхности катода для двух моментов времени: а) в начальной стадии развития разряда ( $t = 0.5$  мкс); б) в момент времени предшествующий «особенности» ( $t = 1.5$  мкс)

В момент времени предшествующий образованию микропинча ( $t = 1.5$  мкс), как можно видеть на рис. 5 б, максимальное значение электронной плотности увеличивается почти на два порядка при  $x=4$  мм,  $y=0$  мм. Для этого момента времени на периферии наблюдаются достаточно протяженные области с  $n_e > 10^{18}$  см<sup>-3</sup> при координатах  $y \approx 4$  мм,  $y \approx 6$  мм и  $y \approx 8$  мм.

На рис. 6 приведены рассчитанные радиальные распределения электронной плотности плазмы в прикатодной области микропинча для двух моментов времени соответствующих первому полупериоду основного разряда, когда наблюдается максимальное сжатие плазмы. Момент времени 4,2 мкс соответствует пинчеванию разряда.

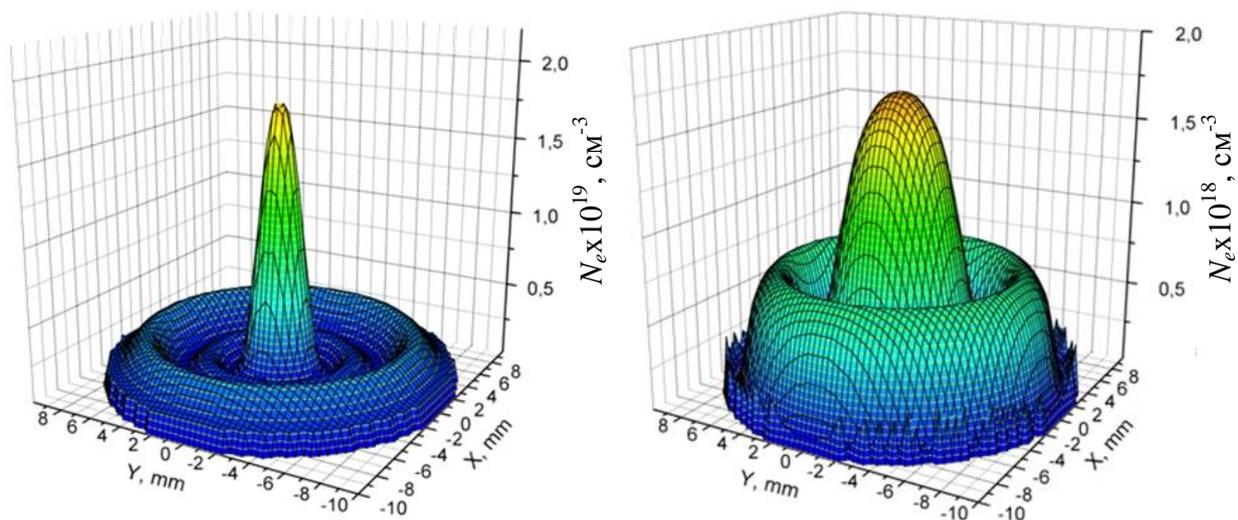


Рис. 6. Радиальное распределение электронной плотности плазмы микропинчевого разряда в прикатодной области для двух моментов времени: а) в момент пинчевания разряда ( $t=4,2$  мкс); б)  $t=7$  мкс

Проведенные 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.

Во второй части главы приводятся результаты интерферометрических измерений временной динамики линейной электронной плотности форплазмы 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. Измерения показали, что выбором

материала диэлектрика и геометрии иницирующей системы можно изменять максимальную электронную плотность форплазмы в четыре раза. Одним из критериев выбора оптимальной геометрии системы поджига и материала диэлектрика была максимальная электронная плотность в разряде предимпульса. Проведенные измерения позволили выбрать оптимальную геометрию иницирующей системы и материал диэлектрика, им стала керамика.

В третьей части главы приводится описание разработанной лазерной методики измерения газокINETического давления потоков плазмы внутри разрядной камеры. Методика основана на измерении смещения верхнего торца кварцевого стержня (длина  $L=250$  мм,  $\varnothing$  2 мм), нижний торец которого через вакуумное уплотнение погружен в разрядную камеру. После начала разряда потоки плазмы ударяются о нижний торец стержня, возбуждая продольную волну смещения в нем. Скорость смещения верхнего торца стержня  $u$  однозначно связана с давлением  $P$  на нижний торец стержня выражением:

$$u(L, t) = 2 \frac{1}{\rho c_0} \int_0^t P \left( t - \frac{L}{c_0} \right) dt, \quad (6)$$

где  $\rho$  - плотность материала стержня,  $c_0$  – скорость звука в стержне.

Если использовать поверхность диагностического стержня в качестве зеркала в одном из плеч интерферометра, то разность оптических путей в плечах интерферометра равна  $2u(t)$ , соответственно:

$$P \left( t - \frac{L}{c_0} \right) = \frac{\rho c_0 \lambda}{8\pi} \cdot \frac{d}{dt} (\delta(t)) \quad (7)$$

Здесь  $\delta$  – разность фаз интерферирующих лучей.

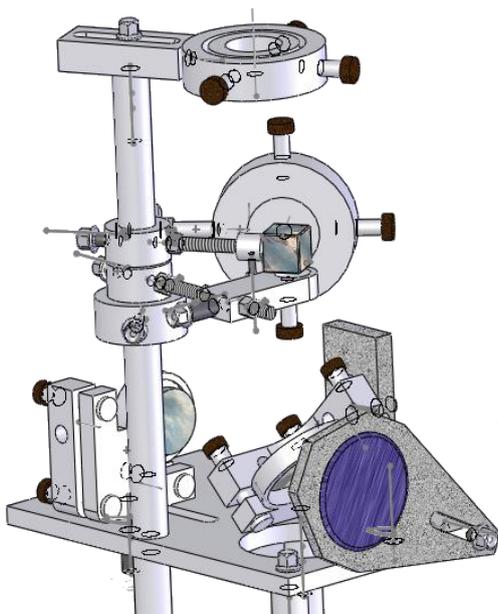


Рис. 7. Общий вид интерферометра

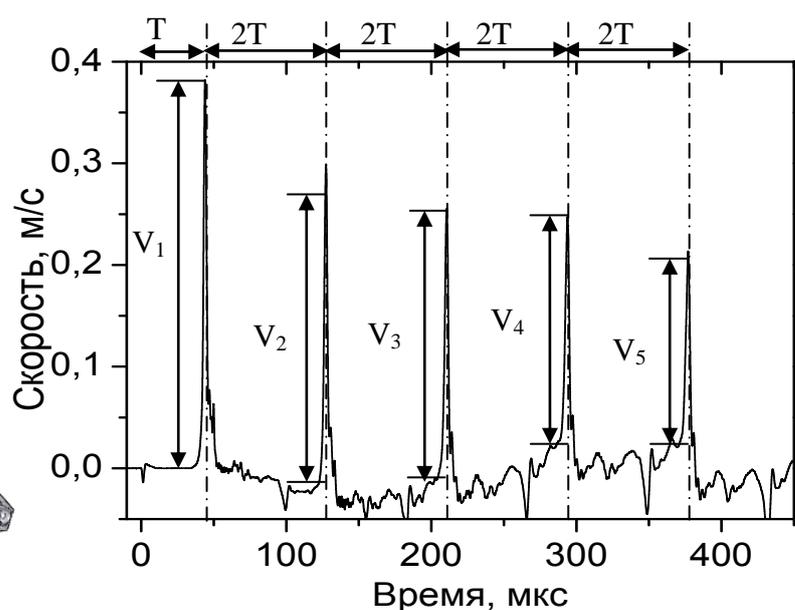


Рис. 8. Зависимость скорости смещения верхнего торца стержня от времени

На основе предложенной методики разработан квадратурный гомодинный лазерный интерферометр для измерения газодинамического давления внутри разрядной камеры микропинцевого разряда на установке «Зона-2» (рис. 7). С помощью интерферометра проведены исследования давления потоков плазмы на разных расстояниях от оси разрядного промежутка и для напряжений 5 - 15 кВ на разрядном промежутке. На рис. 8 показана временная зависимость скорости смещения верхнего торца стержня при измерении давления на расстоянии 22 мм от оси разряда (напряжение на разрядном промежутке 15 кВ).

Положительные значения скорости соответствуют движению торца от оси разряда. Интервал между максимумами скорости движения торца стержня  $2T$  соответствует удвоенному времени распространения волны в стержне. По расстоянию между пиками скорости была измерена скорость звука продольной волны в стержне.

Результаты измерений газокINETического давления потоков плазмы из области разряда, для различных значений напряжения на разрядном промежутке и расстояний от оси разряда представлены в таблице 1.

Таблица 1. Давление плазмы НВИ в зависимости от напряжения на разрядном промежутке и расстояния от оси разряда

Расстояние от оси разряда, мм	Давление, бар*		
	5kV	10kV	15kV
33	$0,29 \pm 0,02$	$2,9 \pm 0,3$	$6,9 \pm 0,3$
28	$0,47 \pm 0,05$	$4,8 \pm 0,2$	$12,4 \pm 0,8$
22	$1,9 \pm 0,3$	$7,6 \pm 0,1$	$20,8 \pm 0,4$
18	$2,2 \pm 0,3$	$11,8 \pm 0,5$	$22,2 \pm 0,9$
8	$8,9 \pm 0,7$	$38,4 \pm 0,5$	$67,7 \pm 0,7$

\*1 бар =  $1,01972 \text{ кгс/см}^2$  (технич. атмосфер)

**Глава 4** 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.

Для изучения процессов, происходящих при торможении ионов в ионизованном веществе, широко используются плазменные мишени, созданные внешними источниками энергии: разряд в газе, капиллярный разряд, лазерная плаз-

ма, плазма взрывного генератора и т.д., включенные в линию транспортировки пучка ионов от ускорителей [4].

В ГНЦ РФ ИТЭФ для экспериментов по торможению пучков тяжелых ионов в ионизованном веществе была разработана плазменная мишень на основе линейного электрического разряда в водороде. Водородная мишень в процессе электрического разряда переходит из состояния холодного нейтрального газа в состояние частично-ионизованной плазмы. Энергетические потери  $dE$  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 тяжелых 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

$$\alpha = \frac{N_e dl}{N_e dl + N_{be} dl} \quad (8)$$

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. Для измерения этих величин была разработана двухволновая квадратурная методика и создана соответствующая аппаратура.

На рис. 9 представлена принципиальная схема плазменной мишени, первоначально разработанной для экспериментов по торможению протонов [5], а затем использованной для экспериментов по торможению ионов меди ( $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Cu}^{3+}$ ) с энергией 100 кэВ/а.е.м. на линейном тяжелоионном ускорителе с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (установ-

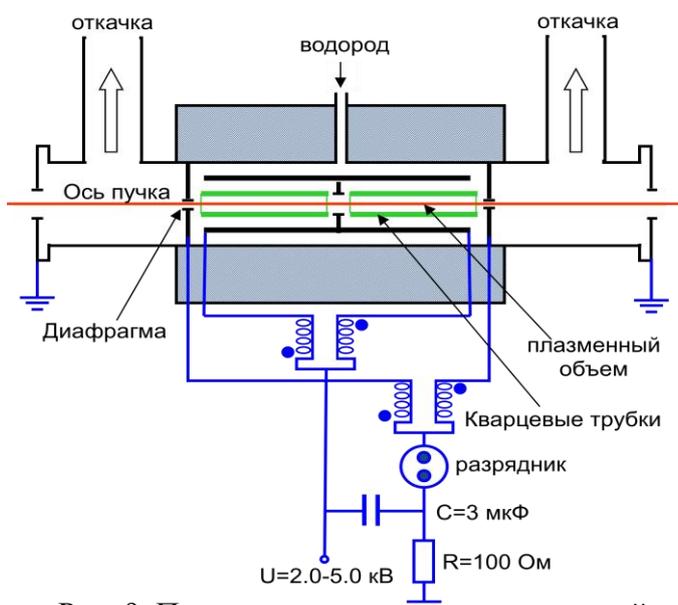


Рис. 9. Принципиальная схема водородной плазменной мишени

ка ТИПр, ИТЭФ). Плазма в мишени создается при электрическом разряде в двух коллинеарных кварцевых трубках с внутренним диаметром 6 мм и длиной 78 мм каждая. Конденсаторная батарея емкостью 3 мкФ, разряжаясь при напряжениях 2 - 5 кВ, инициирует ток до 400 А в каждом разрядном канале, при этом обеспечивается противоположное направление тока в каналах. Данная конструкция плазменной мишени позволяет снизить эффект фокусировки ионного пучка из-за магнитного поля тока разряда: фокусирующий эффект в первом разрядном канале компенсировался дефокусирующим эффектом во втором канале.

При интерферометрии импульсной плазмы с временем существования  $\tau$  много меньше характерных времен вибраций  $t > 1$  мс фазовый сдвиг из-за вибропомех в зондирующей волне за время измерений можно считать постоянным. В этом случае фазовый сдвиг в зондирующей волне 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:

$$\delta_{1,2} = -4.49 \cdot 10^{-14} 2\pi\lambda_{1,2} \int N_e dl + \frac{2\pi}{\lambda_{1,2}} C_k \int N_k dl, \quad (9)$$

По измеренным фазовым сдвигам одновременно на двух длинах волн можно получить значения линейной электронной плотности и плотности нейтральных частиц:

$$\int N_e dl = \frac{\delta_1 \lambda_1 - \delta_2 \lambda_2}{4.49 \cdot 10^{-14} (\lambda_1^2 - \lambda_2^2)} \quad (10)$$

$$\int N_a dl = \frac{1}{2\pi C_a} \frac{\delta_2 \lambda_1 - \delta_1 \lambda_2}{\lambda_1 / \lambda_2 - \lambda_2 / \lambda_1}$$

где  $C_a = 0,51 \cdot 10^{-23}$  см<sup>3</sup>. Так как для атомарного водорода  $N_a \equiv N_{be}$ , подстановкой значений полученных из (10) в (8) можно определить степень ионизации плазмы. Интерферометрические измерения динамики средней степени ионизации возможны только в случае водородной плазмы, т.к. атом водорода может находиться только в двух зарядовых состояниях – либо нейтральном, либо полностью ионизованном. Кроме того, предполагается отсутствие в плазме молекулярного водорода.

Принципиальная схема разработанного интерферометра изображена на рис. 10. Излучения газового He-Ne лазера (длина волны  $\lambda = 633$  нм, мощность

25 мВт) и непрерывного одночастотного твердотельного лазера на кристалле  $\text{YVO}_4:\text{Nd}^{3+}$  с внутрирезонаторной генерацией второй гармоники ( $\lambda=532$  нм, мощность 50 мВт) пространственно совмещаются с помощью полупрозрачного зеркала и направляются в интерферометр Маха-Цендера образованный зеркалами  $1 - 4$ . В одно из плеч интерферометра помещен исследуемый плазменный объект. В блоке фотоэлектрической регистрации зондирующие излучения дисперсионной призмой  $\Pi$  разделяются по длинам волн. 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.

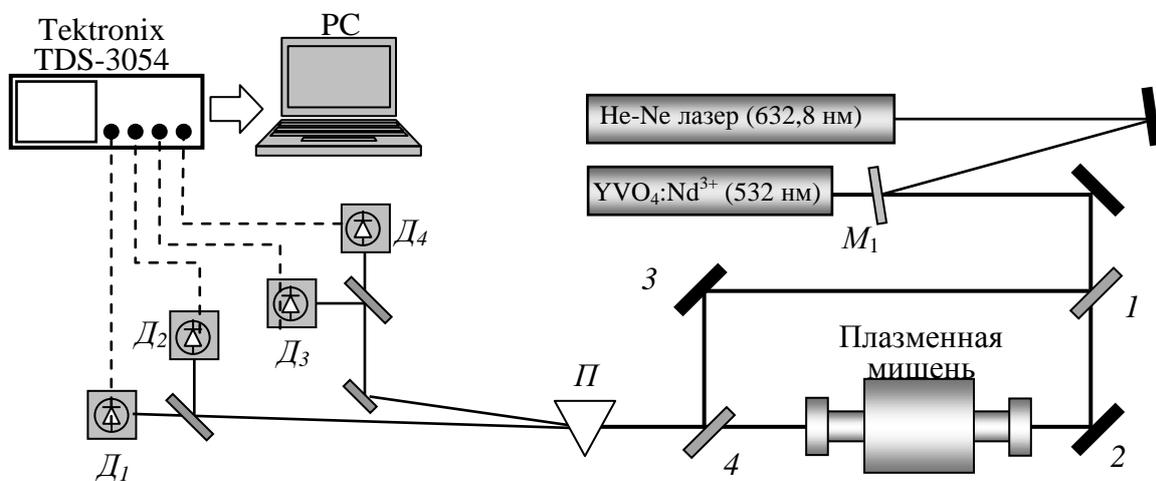


Рис.10. Принципиальная схема двухволнового квадратурного интерферометра.  $1-4$  – зеркала интерферометра Маха-Цендера,  $M_1$  – дихроичное зеркало,  $\Pi$  – дисперсионная призма,  $D_1-D_4$  – фотодетекторы

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.

На рис. 11 представлены зависимости линейной электронной плотности и степени ионизации плазмы водородной мишени, полученным в результате алгоритмической обработки записанных в ПК интерференционных сигналов на двух длинах волн с детекторов  $D_1 - D_4$ . Максимальное значение электронной плотности совпадает с максимумом тока и достигается через 5 мкс после начала разряда. С увеличением напряжения  $U$  и начального давления электронная плотность  $N_e \ell$  возрастает практически линейно (рис. 12а) и при напряжении в 5 кВ и давлении 8 мбар достигает своего максимального значения  $(1,31 \pm 0,01) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ . Максимальная степень ионизации водорода, как и следова-

ло ожидать, создается при наименьшем количестве рабочего газа (рис. 12б). 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 составила  $0,62 \pm 0,05$ .

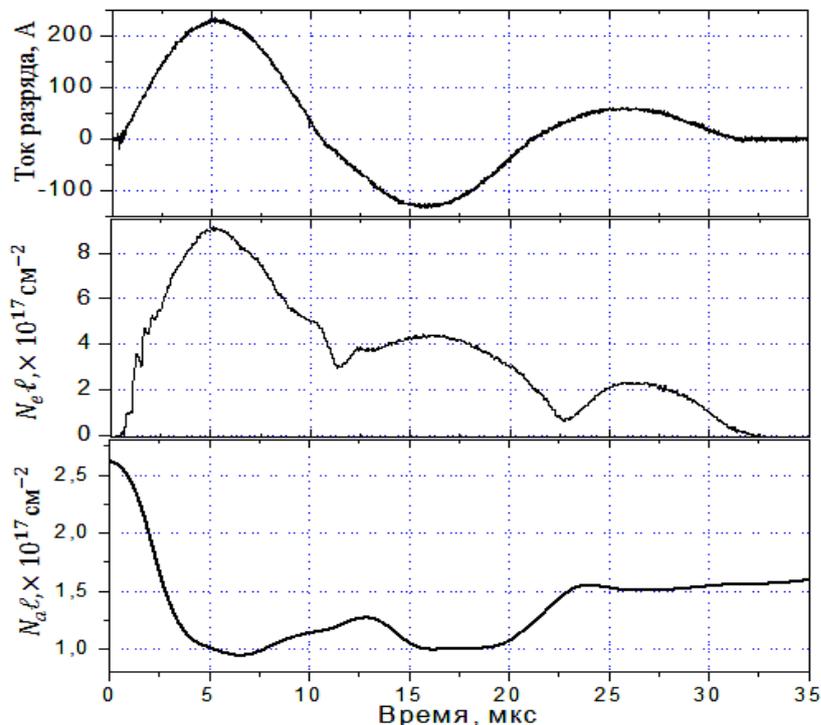


Рис.11. Зависимость тока разряда (вверху), линейной электронной плотности и плотности связанных электронов (внизу) от времени

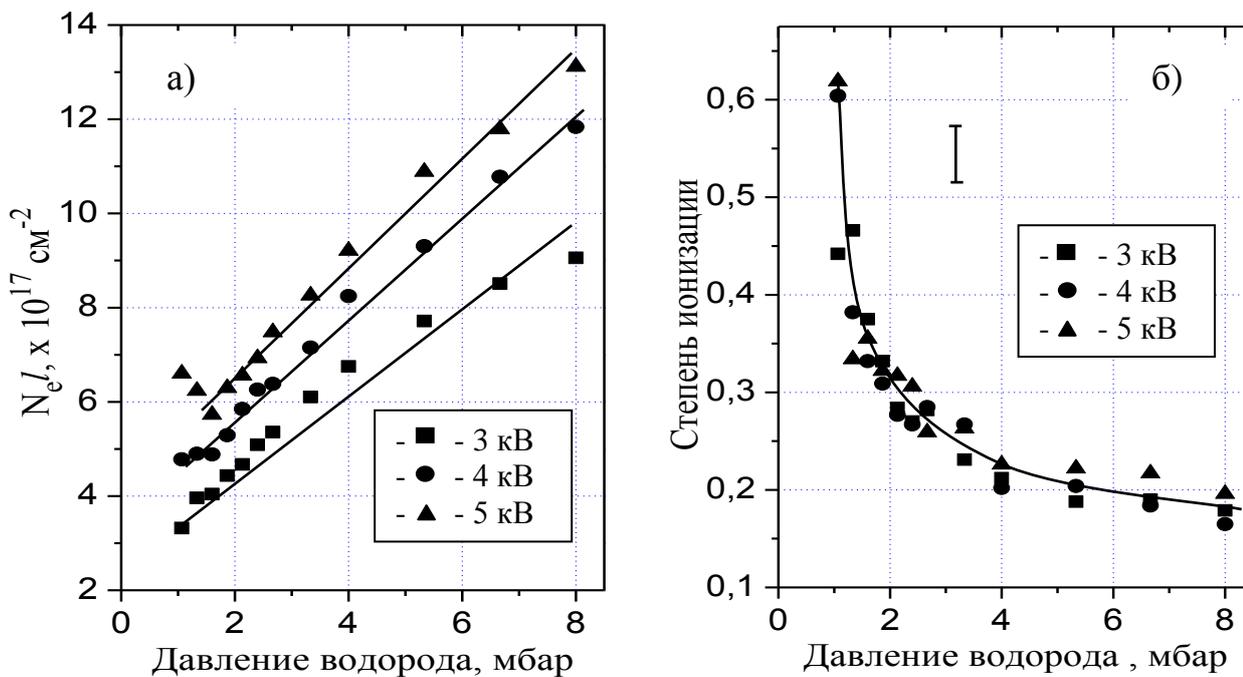


Рис. 12. Зависимость линейной электронной плотности (а) и степени ионизации (б) плазмы в максимуме тока разряда от начального давления водорода для разных значений напряжения на конденсаторной батарее

В заключении представлены **основные результаты работы:**

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. Разработана лазерная методика измерения газокинетического давления плазмы внутри разрядной камеры. Впервые проведены исследования газокинетического давления корпускулярных потоков из области разряда низкоиндуктивной вакуумной искры.
3. Интерференционные измерения электронной плотности форплазмы НВИ при заданных электрических параметрах основного разряда и геометрии основной системы электродов позволили обосновать выбор плазмообразующего диэлектрика системы инициирования разряда.
4. Обнаруженная с использованием разработанного интерферометра относительно высокая электронная плотность на расстояниях порядка нескольких миллиметров от оси микропинчового разряда указывает на возможность протекания шунтирующих токов в периферийных областях межэлектродного промежутка и их влияния на процесс пинчевания.
5. Разработан двухволновый квадратурный интерферометр, предназначенный для проведения измерений динамики линейной электронной плотности частично ионизованной импульсной плазмы
6. 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.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Двухволновая лазерная интерферометрия в диагностике плазмы [Текст] // А.П. Кузнецов, А.С. Савелов // Энциклопедия низкотемпературной плазмы под ред. В.Е. Фортова. Серия Б, том V-1, Москва, изд. ЯНУС-К, 2006 г., с. 586-613.
2. Сканирующий зондовый микроскоп-нанотвердомер, совмещенный с оптической системой линейных измерений [Текст] // К.В. Гоголинский, А.П. Кузнецов, В.Г. Лысенко и др. // Патент № 96429 от 27.07.2010.
3. Оценки электронной температуры плазмы микропинчового разряда по ослаблению потока рентгеновского излучения в фотоэмульсии [Текст] // М.С. Аверин, О.А. Башутин, А.С. Савёлов и др. // ПТЭ. 2006. №2. с. 265-269.
4. Ядерный синтез с инерционным удержанием. Современное состояние и перспективы для энергетики [Текст] // Под редакцией Б.Ю. Шаркова // Москва. ФИЗМАТЛИТ 2005
5. Интенсивные ионные пучки для генерации экстремальных состояний вещества // В. Е. Фортов, Д. Хоффманн, Б. Ю. Шарков. // Успехи физических наук. 2008. 178(2):113.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Интерферометрические исследования динамики электронной плотности плазмы в периферийной области микропинчового разряда [Текст] // О.А. Бялковский, А.П. Кузнецов, А.С. Савёлов и др. // Физика плазмы - 2008, том 34. - №3. - с. 219-225.
2. Измерение электронной плотности и степени ионизации плазмы водородной мишени в экспериментах по торможению пучков тяжелых ионов в ионизованном веществе [Текст] // А.П. Кузнецов, О.А. Бялковский, А.А. Голубев и др. // Ядерная физика и инжиниринг -2012, том 3. -№2. –с. 160-175.
3. Квадратурная интерферометрия в диагностике импульсных процессов в водородной и эрозионной плазме [Текст] // О.А. Бялковский, К.Е. Коротков, А.Д. Фертман и др. // кн. «Материалы 6-й Международной научной конференции «Экология человека и природа». – 2004. - с. 247-249.
4. Экспериментальные исследования динамики электронной плотности периферийной области микропинчовой плазмы [Текст] // О.А. Башутин, О.А. Бялковский, А.П. Кузнецов и др. // кн. «Тезисы докладов 5-го Российского семина-

ра «Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды». -2006. –с. 24-25.

5. Лазерный интерферометр для исследования динамики электронной плотности периферийной области микропинчевой плазмы [Текст] // О.А. Башутин, О.А. Бялковский, А.П. Кузнецов и др. // кн. «Сборник научных трудов научной сессии МИФИ-2007». -2007.- т.4.- с. 35-36.

6. Исследование динамики электронной плотности плазмы в периферийной области микропинчевого разряда [Текст] // О.А. Башутин, О.А. Бялковский, А.П. Кузнецов и др. // Сборник тезисов XXXIV Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС. -2007. –с. 161-162.

7. Интерферометрические исследования динамики электронной плотности плазмы в периферийной области микропинчевого разряда [Текст] // О.А. Башутин, О.А. Бялковский, А.П. Кузнецов и др. // Сборник тезисов докладов XII Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы». 2007. -с 55-57.

8. Исследование динамики электронной плотности плазмы в периферийной области микропинчевого разряда методом квадратурной лазерной интерферометрии [Текст] // О.А. Башутин, О.А. Бялковский, А.П. Кузнецов и др. // кн. «Годовой отчет по НИР кафедры физики плазмы за 2006 г.». -2007. -под. ред. В.А. Курнаева. -М.: МИФИ. -с. 23-26.

9. Интерферометрические исследования динамики электронной плотности плазмы в периферийной области микропинчевого разряда [Текст] // О.А. Башутин, О.А. Бялковский, А.П. Кузнецов и др. // Сборник научных трудов научной сессии МИФИ-2008. -2008. -т.2. –с. 99-100.

10. Интерферометрические исследования плотности плазмы в периферийной относительно оси микропинчевого разряда области [Текст] // О.А. Башутин, О.А. Бялковский, А.П. Кузнецов и др. // Кн. «Тезисы докладов 6-го Российского семинара «Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды». -2008. –с. 122-123.

11. Интерферометрические исследования процессов формирования триггерной плазмы микропинчевого разряда [Текст] // О.А. Бялковский, А.П. Кузнецов, Саранцев С.А.и др. // Сборник трудов научной сессии МИФИ-2009. -2009. -т.2. –с. 234.

12. Исследования плазмы микропинчевого разряда методами лазерной интерферометрии [Текст] // О.А. Башутин, О.А. Бялковский, А.П. Кузнецов и др. // Сборник научных трудов научной сессии МИФИ-2010. -2010, т.4. с. 192-196.

13. Применение лазерной интерферометрии для исследования электронной плотности и степени ионизации плазмы в экспериментах по торможению тяжелых ионов в ионизованном веществе [Текст] // Бялковский О.А., Голубев А.А., Кузнецов А.П. и др. // Сборник тезисов докладов VIII Курчатовской Молодежной Научной Школы. -2010. -с. 147.

14. Двухволновый квадратурный интерферометр для диагностики плазменной мишени в экспериментах по торможению тяжелых ионов в ионизованном веществе [Текст] // Голубев А.А., Кузнецов А.П. и др. // Кн. тезисы докладов "VII научной конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды». -2010. –с. 123-126.

15. Исследования динамики электронной плотности и степени ионизации плазмы водородной мишени в экспериментах по торможению тяжелых ионов [Текст] // Голубев А.А., Кузнецов А.П. и др. // Кн. тезисы докладов «5-й Всероссийской школы по лазерной физике». -2011 –с. 43-44.

16. Исследования динамики электронной плотности и степени ионизации плазмы водородной мишени в экспериментах по торможению тяжелых ионов [Текст] // Голубев А.А., Кузнецов А.П. и др. // В кн. тезисы докладов 14-й Всероссийской конференции (с участием зарубежных специалистов) "Диагностика высокотемпературной плазмы (ДВП-14)". -2011. – с. 73-74.

17. Применение лазерного доплеровского измерителя скорости в экспериментах по ударно-волновому нагружению вещества [Текст] // Бялковский О.А., Голубев А.А., Кузнецов А.П. и др. // Сборник тезисов докладов IX Курчатовской Молодежной Научной Школы. -2011. –с. 189.

18. Исследование плазмы микропинчевого разряда методами лазерной интерферометрии [Текст] // Бялковский О.А., Додулад Э.И., Кузнецов А.П. и др. // Сборник тезисов докладов IX Курчатовской Молодежной Научной Школы. -2011. –с.220.