

На правах рукописи



**КОЧЕТКОВ ЮРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ**

**ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ СПОНТАННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В  
ПЛАЗМЕ, ВОЗБУЖДАЕМОЙ ИЗЛУЧЕНИЕМ ТЕРА- И ПЕТАВАТНОГО  
УРОВНЯ МОЩНОСТИ, И ИХ ДИАГНОСТИКА МЕТОДАМИ  
КОМПЛЕКСНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ И ПРОТОННОЙ  
ДЕФЛЕКТОМЕТРИИ**

Специальность 1.3.19 – Лазерная физика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2024

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

**Научный  
руководитель:**

**Кузнецов Андрей Петрович**

доктор физико-математических наук, доцент, директор  
Института лазерных и плазменных технологий.  
Национальный исследовательский ядерный университет  
«МИФИ».

**Официальные  
оппоненты:**

**Андреев Николай Евгеньевич**

доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий лабораторией «Теория лазерно-плазменных  
ускорителей» ОИВТ РАН.

**Беляев Вадим Северианович**

доктор физико-математических наук, доцент, главный  
научный сотрудник АО "ЦНИИмаш".

**Стародубцев Михаил Викторович**

доктор физико-математических наук, заместитель  
директора по научной работе ФИЦ ИПФ РАН.

Защита состоится «9» октября 2024 г. в 17:00 часов на заседании диссертационного совета МИФИ.1.01 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <https://ds.mephi.ru> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 202\_\_ года

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат физ.-мат. наук

Степаненко А.А.

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность темы**

Исследования взаимодействия лазерного излучения с веществом, ведущиеся с момента создания первого лазера, выявили ряд специфических физических процессов и явлений. Одним из наиболее важных явлений является генерация спонтанного магнитного поля (СМП) – поля, создаваемого быстрыми электронами и токами непосредственно в результате лазерно-плазменного взаимодействия. Такое поле может значительно изменить транспортные свойства плазмы, тем самым изменив распределение ее плотности и температуры, коэффициент поглощения лазерного излучения и величину абляционного давления. Знание распределения магнитного поля, генерируемого в плазме, и его влияния на движение электронов, позволяет эффективно решать различные задачи лазерной плазмы. Оно имеет большое значение для развития новых технологий, таких как осуществление лазерного термоядерного синтеза (ЛТС), изучения транспортных свойств замагниченной плазмы и моделирования астрофизических процессов [10, 11]. Вместе с тем, данное явление открывает новые возможности для разработки генераторов мощного магнитного поля, которые могут быть использованы, в частности, для управления потоками быстрых частиц.

В космической и астрофизической плазме многие явления связаны с интенсивными выбросами энергии: магнитные бури, солнечные вспышки, направленные потоки плазмы (джеты), сформированные в компактных звездных объектах и пр. Изучение физических механизмов, ответственных за ускорение частиц до высоких энергий в этих явлениях, длится уже многие десятилетия и является одной из основных тем исследований в области астрофизической плазмы. Поэтому большой интерес представляет лабораторное моделирование замагниченных потоков лазерной плазмы, которые могут формироваться в том числе и с использованием спонтанных механизмов генерации магнитных полей. Большинство известных генераторов квазистационарных магнитных полей, реализованных как с использованием лазеров, так и без них, работают благодаря сильному разрядному току, протекающему через катушку и генерирующему магнитное поле в вакууме.

Уже здесь СМП могут найти свое применение - с помощью измерения спонтанных магнитных полей при облучении лазерных генераторов магнитного поля, например, конденсаторо-катушечного типа, можно определить значение разрядного тока, текущего в цепи, для последующей оптимизации системы. Но при использовании подобных классических вакуумных генераторов магнитных полей плазма не всегда оказывается замагниченной. В результате может оказаться [12], что слабозамагниченные потоки плазмы взаимодействуют с сильным магнитным полем в вакууме – что ограничивает возможности изучения свойств замагниченной плазмы. Более естественный и простой подход к решению данной задачи – получение изначально замагниченной плазмы с помощью лазерного импульса, создающего магнитное поле. Используя мишени особой геометрии, получившие название «Улитка», оказывается возможным реализовать генерацию плазмы с «вмороженными» спонтанными магнитными полями [13]. Такая система при определённых условиях может существовать в течение времени, в несколько раз большего длительности лазерного импульса и имеет широкий спектр применений. Так, одной из проблем при реализации метода быстрого зажигания в лазерном термоядерном синтезе является расходимость пучков быстрых электронов, разогревающих мишень ЛТС - по некоторым оценкам, до ядра доходит всего около 10% частиц [14]. Расчетные работы [15] показали, что приложение аксиального магнитного поля может существенно уменьшить потери частиц и уменьшить требования к их суммарной энергии. Исследования применений магнитного поля в задачах инерциального лазерного синтеза показали также возможность значительного увеличения плазменной температуры за счет подавления каналов потерь энергии, связанных с уходом электронов и продуктов реакции из зоны взаимодействия, а также за счет уменьшения величины рассеяния лазерного излучения.

Итак, понимание и контроль спонтанных магнитных полей является важной частью лазерно-плазменных исследований, связанных с термоядерным синтезом с инерционным удержанием горячей плазмы [10, 16], ускорением частиц [17], лабораторной астрофизикой [18] и многими другими приложениями. СМП имеют величину от единиц до  $10^3$  Тесла, и, в

зависимости от метода генерации и используемого лазерного излучения, могут существовать на характерных временах  $10^{-12}$  -  $10^{-9}$  секунд. Величина и время жизни измеряемых магнитных полей, рентгеновское и электромагнитное излучение из зоны взаимодействия лазерного излучения с веществом (мишенью), накладывают ограничения на методы их измерения. Одним из надёжных методов, способных измерять спонтанные магнитные поля с высоким временным разрешением, является оптическая диагностика и, в частности, одна из её реализаций: комплексная интерферометрия – развитие стандартных методов интерферометрии и поляриметрии. Метод комплексной интерферометрии был предложен довольно давно [19], однако его применение для диагностики спонтанного магнитного поля технически непросто, а средства обработки комплексных интерферограмм слабо развиты. Поэтому важной задачей является развитие данного метода и разработка средств обработки экспериментальных данных. Ещё одним важным методом диагностики магнитного поля в лазерной плазме является протонная дефлектометрия. Метод протонной дефлектометрии с успехом применялся как для диагностики поля в обычных катушках с током, в конденсаторо-катушечных мишенях [20], так и для диагностики явления пересоединения магнитных силовых линий при облучении плоской мишени одновременно двумя лазерами [21]. Однако алгоритмы обработки данных протонной дефлектометрии требуют улучшения и в настоящее время проводятся при введении ряда существенных приближений и ограничений. Требуется разработка новых подходов к обработке результатов данной диагностики.

**Целью** работы является экспериментальная реализация генерации сильных спонтанных магнитных полей в полостных мишенях типа «Улитка» и в массивных плоских мишенях с применением тера- и петаваттных импульсов лазерного излучения и выявление физических механизмов их формирования с применением комплексной интерферометрии и протонной дефлектометрии.

Для достижения цели работы были поставлены следующие **задачи**:

1. Проведение экспериментальных исследований генерации спонтанного магнитного поля в мишенях типа «Улитка» и массивных плоских мишенях на лазерных установках пета- и тераваттного уровня мощности.
2. Построение алгоритмических моделей для обработки данных комплексной интерферометрии и протонной дефлектометрии, их программная реализация, оценка точности и границ применимости.
3. Апробация разработанных алгоритмов обработки данных комплексной интерферометрии и протонной дефлектометрии на экспериментальных данных, расчет пространственно-временных параметров магнитного поля и тока быстрых электронов.
4. Выявление механизмов формирования магнитных полей и структуры токов в лазерно-возбуждаемой плазме в мишенях типа «Улитка» и плоских массивных мишенях.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Впервые в полостной мишени типа «Улитка» получена замагниченная плазма с напряженностью магнитного поля  $(1,2 \pm 0,2) \cdot 10^3$  Тл, и временем жизни, более чем на два порядка превышающем длительность лазерного импульса ( $1 \cdot 10^{-10}$  с).
2. Разработан метод обработки протонных радиографических изображений для восстановления пространственного распределения электромагнитных полей в лазерно-возбуждаемой плазме с использованием конволюционной нейронной сети, позволивший более чем в два раза увеличить точность по сравнению со стандартными методами геометрического подобия.
3. Впервые с высоким временным разрешением ( $< 1$  пс) измерено распределение электронных токов и количественно определен эффект удержания быстрых электронов в лазерно-возбужденной плазме. Доказана необходимость учета аномального сопротивления в лазерно-возбуждаемой плазме при объяснении процессов генерации спонтанных магнитных полей.

4. Предложен метод коррекции экспериментальных поляриметрических данных для квазицилиндрического разлёта лазерно-возбуждаемой плазмы, который позволил уменьшить погрешность измерения спонтанных магнитных полей в области оси симметрии на два порядка (от  $10^2$  до 1 Тл).

### **Научная и практическая значимость работы**

1. Разработанный подход к генерации сильно замагниченной плазмы может быть применен в задачах лазерного термоядерного синтеза и лабораторной астрофизики для реализации состояний вещества с экстремальной плотностью магнитной энергии.
2. Продемонстрированные соотношения между величинами разрядных токов и эффект удержания быстрых электронов в лазерно-возбужденной плазме могут быть использованы при создании и оптимизации лазерных генераторов сильных магнитных полей.
3. Разработанные в работе методики диагностики спонтанных магнитных полей в лазерной плазме востребованы в исследованиях широкого класса плазменных объектов в лабораторно-астрофизических экспериментах и в задачах лазерного термоядерного синтеза.
4. Разработанный метод обработки данных комплексной интерферометрии успешно применяется для интерпретации экспериментов по созданию и оптимизации мишеней типа конденсатор-катушка на мощных лазерных установках.

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

1. Метод генерации спонтанного магнитного поля в плазме, основанный на облучении мишеней типа «Улитка» лазерным импульсом петаваттного уровня мощности, позволяет создавать поля с напряженностью, превышающей  $10^3$  Тесла и временем жизни, превышающим  $1 \cdot 10^{-10}$  с.
2. Разработанный метод обработки протонных радиографических изображений, основанный на обученной конволюционной нейронной сети, обеспечивает восстановление пространственного распределения электромагнитных полей в лазерно-возбуждаемой плазме с погрешностью

менее 20%, что в два раза превосходит точность стандартного метода геометрического подобия.

3. Разработанный метод измерения пространственно-временного распределения электронных токов в лазерно-возбужденной плазме на основе данных комплексной интерферометрии дает возможность проведения количественной оценки эффекта удержания быстрых электронов.
4. Предложенный метод коррекции экспериментальных поляриметрических данных для квазицилиндрического разлёта лазерно-возбуждаемой плазмы позволяет увеличить точность измерения спонтанных магнитных полей комплексной интерферометрией, снижая погрешность в области вблизи оси симметрии с  $10^2$  до 1 Тл.

#### **Личный вклад автора**

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

**Достоверность** научных положений, выводов и результатов обеспечивается взаимной согласованностью экспериментальных данных, полученных на современных мощных лазерных установках в составе международных исследовательских групп с использованием общепринятых методов и признанных в научном мире подходов, и результатов компьютерного моделирования, проведенных с использованием мощностей высокопроизводительного вычислительного центра НИЯУ МИФИ. Результаты работы проходили многократное независимое рецензирование в ведущих научных журналах мира и представлялись на международных конференциях.



### **Апробация работы**

Результаты работы обсуждались на следующих всероссийских и международных конференциях:

1. IV Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии — ЛаПлаз 2018». г. Москва, НИЯУ МИФИ, 30.01.18-01.02.18.
2. Симпозиум Joint Meeting of High Energy Density Science at FAIR Collaboration and 10th International Workshop on Plasma Physics with Intense Laser and Heavy Ion Beams. г. Москва, Президиум Российской академии наук, 28-29 мая 2018.
3. VII международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий». г. Москва, НИЯУ МИФИ, 16-21 апреля 2018.
4. International Conference on Ultrafast Optical Science (UltrafastLight-2018) г. Москва, Физический институт имени П. Н. Лебедева, 1-5 октября 2018.
5. V Международная конференция Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз 2019. г. Москва, НИЯУ МИФИ, 12-15 февраля 2019.
6. SPIE Optics + Optoelectronics. Прага, Чехия, 01-04 апреля 2019

### **Публикации**

Основные результаты по теме диссертации изложены в 9 рецензируемых печатных изданиях, входящих в базы данных Scopus / Web of Science [1—9], в том числе 4 в журналах уровня Q1 [2; 6; 7; 8], 4 в журналах уровня Q2 [1; 3; 5; 9].

### **Объем и структура диссертационной работы**

Диссертационная работа состоит из Введения, четырех глав, Выводов и Списка цитированной литературы. Работа изложена на 139 страницах машинописного текста, содержит 69 рисунков, 3 таблицы. Библиографический список включает в себя 110 источников.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **ВВЕДЕНИИ** обоснованы актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна и практическая значимость работы, представлены основные положения, выдвигаемые на защиту.

**ПЕРВАЯ ГЛАВА** посвящена обзору и анализу литературных данных по теме диссертационного исследования. Описано явление генерации спонтанных магнитных полей (СМП) в плазменном факеле и его влияние на свойства плазмы. Приведено математическое описание эффекта скрещенных градиентов температуры и плотности, приводящего к генерации спонтанного магнитного поля при нормальном облучении плоских мишеней, в стационарном случае.

В главе изложены методы использования спонтанных магнитных полей в исследованиях в области лазерного термоядерного синтеза и лабораторной астрофизике. Показано, что уникальные свойства лазеров позволяют использовать их для исследования астрофизических процессов высоких энергий – например, для коллимации плазменных факелов при помощи генерируемых СМП. Обсуждены перспективы применения спонтанных магнитных полей при реализации лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) – их влияние на перенос теплового потока в области абляции может привести к улучшению условий протекания термоядерной реакции, увеличению энергетического выхода [например, 10].

Описаны классические методы генерации сильных магнитных полей – пропускание электрического тока из конденсатора через катушку, а также методы взрывного сжатия поля. Обсуждены преимущества лазерных методов генерации мощных магнитных полей перед другими методами, в частности возможность их применения в лабораторно-астрофизических и ЛТС исследованиях, крайне высокие достижимые значения напряженности магнитного поля. Приведено описание лазерных генераторов магнитного поля типа «конденсатор-катушка», а также генерации поля в перспективной мишени типа «Улитка», полученный с помощью расчётов методом "частица-

в-ячейке" (PIC) [23]. Согласно данным расчетам, магнитное поле в таких мишенях может достигать 3 кТл при облучении мишени диаметром  $\sim 100$  мкм лазерным импульсом с энергией 40 Дж длительностью 0,5 пс.

**ВТОРАЯ ГЛАВА** посвящена исследованию магнитных полей в плазме, возбуждаемой лазерным излучением петаваттной мощности в мишенях типа «Улитка», в которых теоретически было предсказано высокое значение магнитного поля, а также разработке и развитию метода протонной дефлектометрии для диагностики лазерной плазмы и магнитных полей в такой плазме. Приведено описание лазерного комплекса PHELIX (Petawatt High Energy Laser for Heavy Ion Experiments) [24] (Центр по изучению тяжёлых ионов имени Гельмгольца, Дармштадт, Германия), на котором были проведены экспериментальные исследования. Основные параметры излучения лазерного комплекса: длина волны – 1053 нм; энергия в импульсе – 100-200 Дж; длительность импульса – 0.5-50 пс; плотность мощности на мишени – до  $10^{20}$  Вт/см<sup>2</sup>. Благодаря возможности разделения пучка, на установке возможна реализация протонной дефлектометрии, требующей два импульса – для генерации замагниченной плазмы и для создания пучка диагностических протонов. Описаны принципы создания источника протонов с помощью механизма ускорения приповерхностным слоем нагретых электронов (target normal sheath acceleration – TNSA) [25], а также метода детектирования распределений частиц с помощью радиохромных пленок (рис. 1).

В главе приведена схема проведенного экспериментального исследования, геометрические параметры установки и исследованных мишеней. В качестве детектора использовались две стопки из 20 радиохромных пленок, для детектирования как прошедших через мишень – генератор поля протонов, так и распространяющихся в противоположном направлении. Чтобы уменьшить вклад от тяжелых частиц, стопки радиохромных пленок были обернуты алюминиевой фольгой толщиной 4 мкм.

Важным параметром мишеней являлось положение точки крепления – для классификации мишеней по этому признаку их обозначили как S6 и S9. Были использованы мишени двух размеров, диаметром 250 мкм и 425 мкм (рис 2).

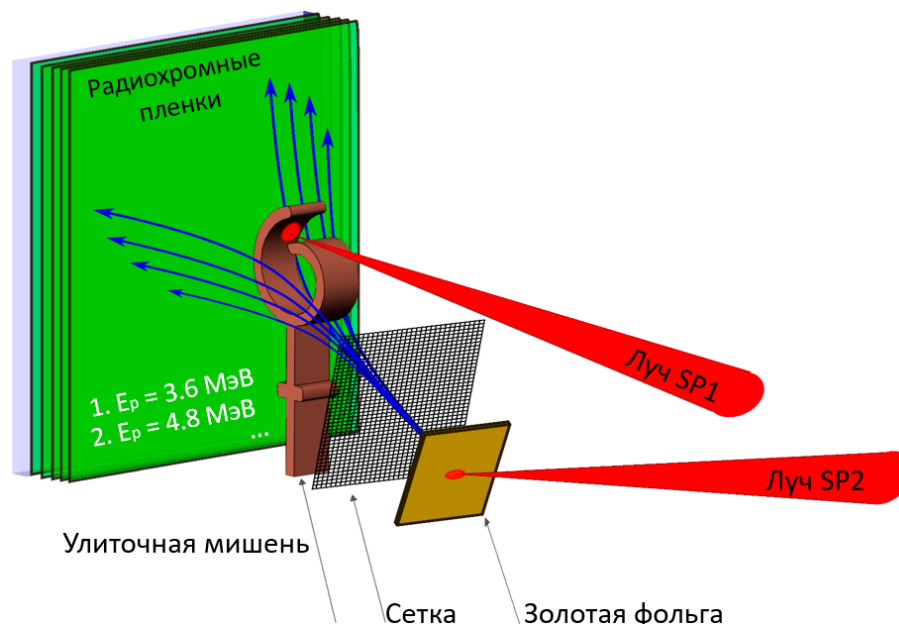


Рис. 1. Принципиальная схема протонной диагностики магнитного поля в мишени типа «Улитка»

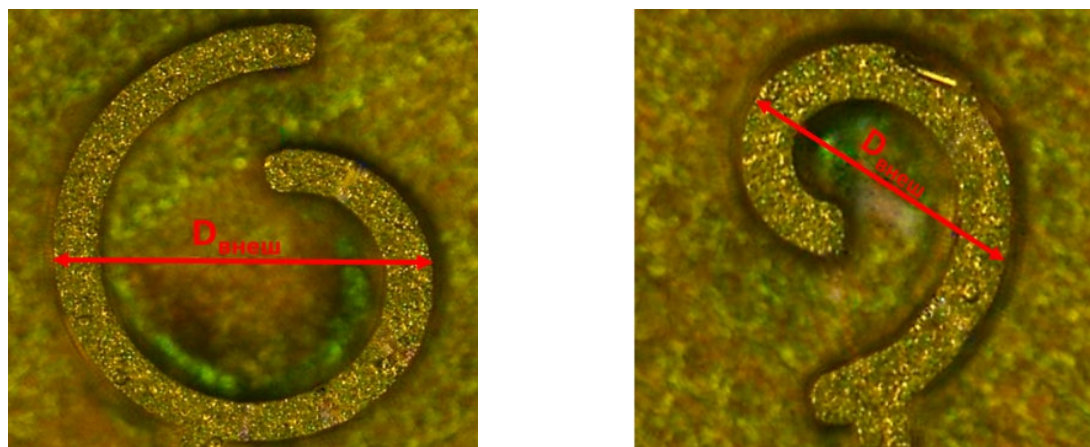


Рис. 2. Фотографии мишени типа S9,  $D_{\text{внеш}}=425$  мкм (слева); мишени типа S6,  $D_{\text{внеш}}=250$  мкм (справа)

Приведено описание разработанного метода обработки экспериментальных данных, основанного на создании цифрового двойника экспериментальной схемы. Для создания цифрового двойника был разработан баллистический код - расчет траекторий протонов через электромагнитное

поле с вычислением силы Лоренца, ускорений и скоростей с некоторым выбранным временным шагом. Для увеличения скорости расчета, предусмотрена возможность запуска на GPU при помощи технологии NVIDIA CUDA. Для расчета электростатического поля было использовано программное обеспечение COMSOL Multiphysics, а магнитостатического поля - программное обеспечение Radia Mathematica.

Описаны методы сравнения результатов численного моделирования и экспериментальных изображений. Метод ручной обработки данных предполагает измерение характерных параметров изображений (рис.3), и итерационный подбор полей в численном моделировании до совпадения экспериментальных и расчетных параметров.

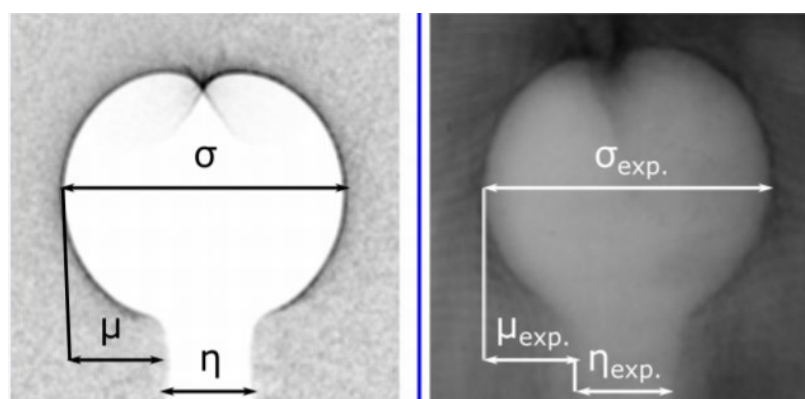


Рис. 3. Выбор параметров для сравнения расчетного (слева) и экспериментального (справа) изображений

Для увеличения точности восстановления электромагнитного поля и скорости обработки данных была разработана нейронная сеть, основанная на сверточной архитектуре и обученная на большом количестве (более 500 изображений) расчетных протонных дефлектограмм. Представлена оценка точности протонной дефлектометрии при измерении пространственно-временных параметров магнитных полей в лазерной плазме. Применение нейронной сети позволяет увеличить точность более чем в два раза по сравнению с ручной обработкой данных.

В главе представлены и проанализированы полученные экспериментальные данные. На радиохромных пленках во всех случаях наблюдается характерная особенность – каустика (рис.4), которая имеет разное положение для разных типов поворота мишеней – S6 и S9. Для

восстановления электромагнитного поля в области взаимодействия была проведена обработка экспериментальных данных согласно разработанной методологии. Для мишеней типа s6 максимальная измеренная величина магнитного поля составила  $1200 \pm 200$  Тл. Спустя 100 пс после облучения, что превышает длительность лазерного импульса более чем на два порядка, измеренное значение магнитного поля остается того же порядка ( $900 \pm 150$ ) Тл (рис. 5). Характерное время уменьшения величины поля соответствует времени разрушения мишени, при котором исчезает эффект удержания плазмы в ее внутреннем объеме. Обсуждено влияние геометрии и размера мишени на величину спонтанного магнитного поля.

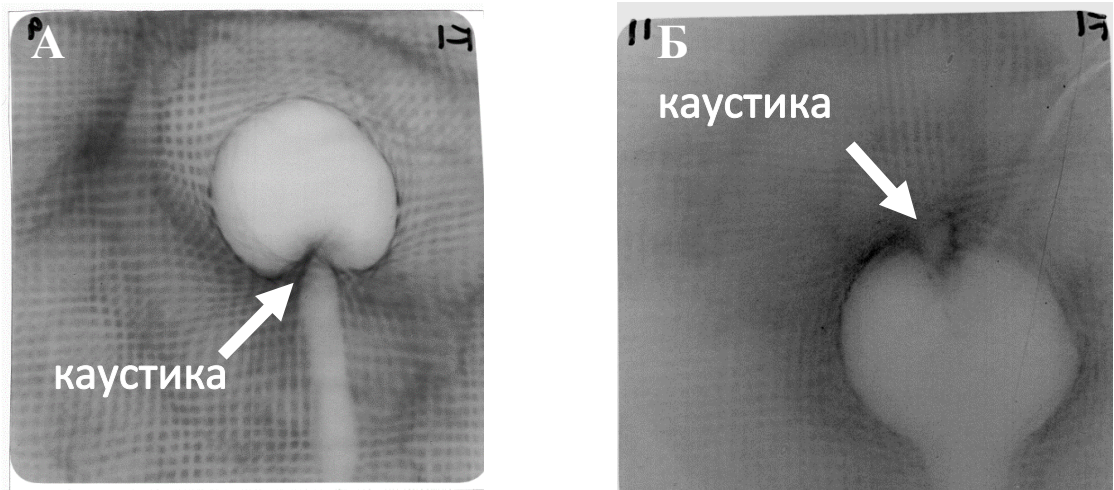


Рис. 4. Первый слой из стопки радиохромных плёнок для мишени типа s9 (А), мишени типа s6 (Б)

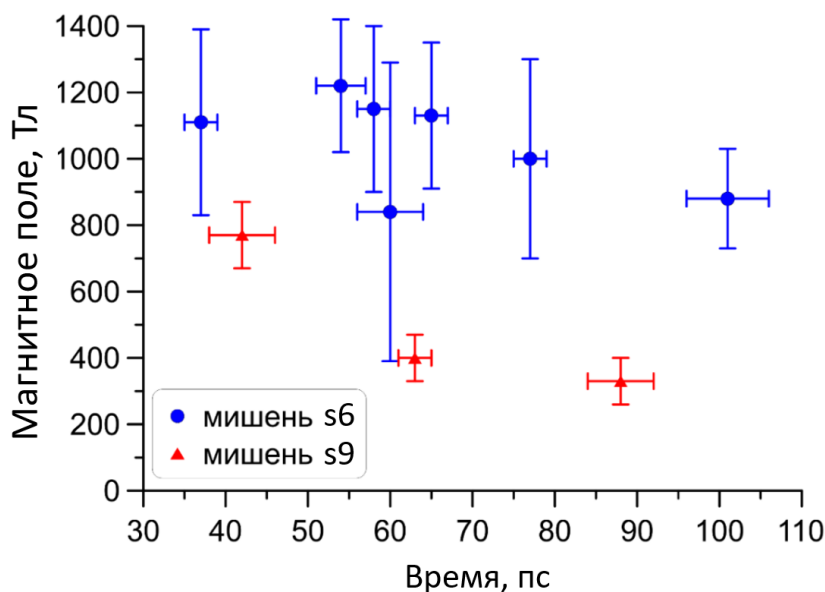


Рис. 5. Временная динамика магнитного поля для мишеней типа s6 и s9

**ТРЕТЬЯ ГЛАВА** посвящена разработке и развитию метода комплексной интерферометрии для диагностики лазерной плазмы, возбуждаемой лазерным излучением тераваттной мощности, и магнитных полей в такой плазме. Целями исследования являлось развитие теоретического описания лазерно-плазменного взаимодействия при облучении плоских массивных мишеней, определение механизма генерации магнитных полей и горячих электронов, ответственных за нелокальные тепло- и электропроводности в такой плазме. Приведено описание лазерного комплекса PALS (Prague Asterix Laser System) [26] (Институт физики плазмы, Прага, Чехия), на котором были проведены экспериментальные исследования. Основные параметры излучения лазерного комплекса: длина волны – 1315 нм; энергия в импульсе: до 1000 Дж; длительность импульса 200-350 пс; плотность мощности на мишени: до  $10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup>. Благодаря реализации на данной установке синхронизации высокоэнергетичного йодного лазера с фемтосекундным Ti:Sa лазером мощностью 25 ТВт, использование комплексной интерферометрии на данном лазере предпочтительно.

Глава содержит информацию об основах интерферометрического и поляриметрического методов диагностики магнитных полей в лазерной плазме. Величину магнитного поля в плазме возможно измерить путем комбинации данных методов. Описан метод комплексной интерферометрии, которая является комбинацией классической интерферометрии и поляриметрии. К основным преимуществам данного метода можно отнести отсутствие необходимости отдельной реализации двух разных оптических схем и последующего совмещения их данных, что приводит к повышению точности диагностики. Приведена оптическая схема используемой в эксперименте установки, которая состоит из двух практически скрещенных поляризаторов для реализации поляриметрической части и специально разработанного клина для интерферометрической части (рис. 6). Приведена схема эксперимента – первая в мире трехканальная система комплексной интерферометрии (рис. 7). Данная установка обеспечивала одновременно высокое временное ( $< 1$  пс) и пространственное ( $\sim 10$  мкм) разрешение измерений.

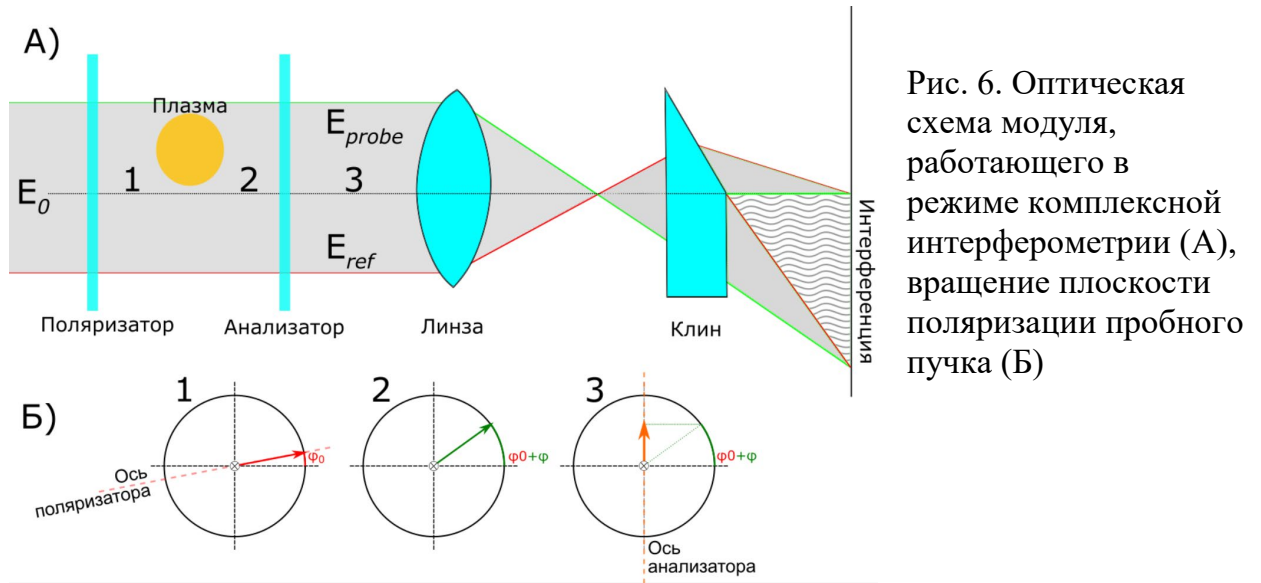


Рис. 6. Оптическая схема модуля, работающего в режиме комплексной интерферометрии (А), вращение плоскости поляризации пробного пучка (Б)

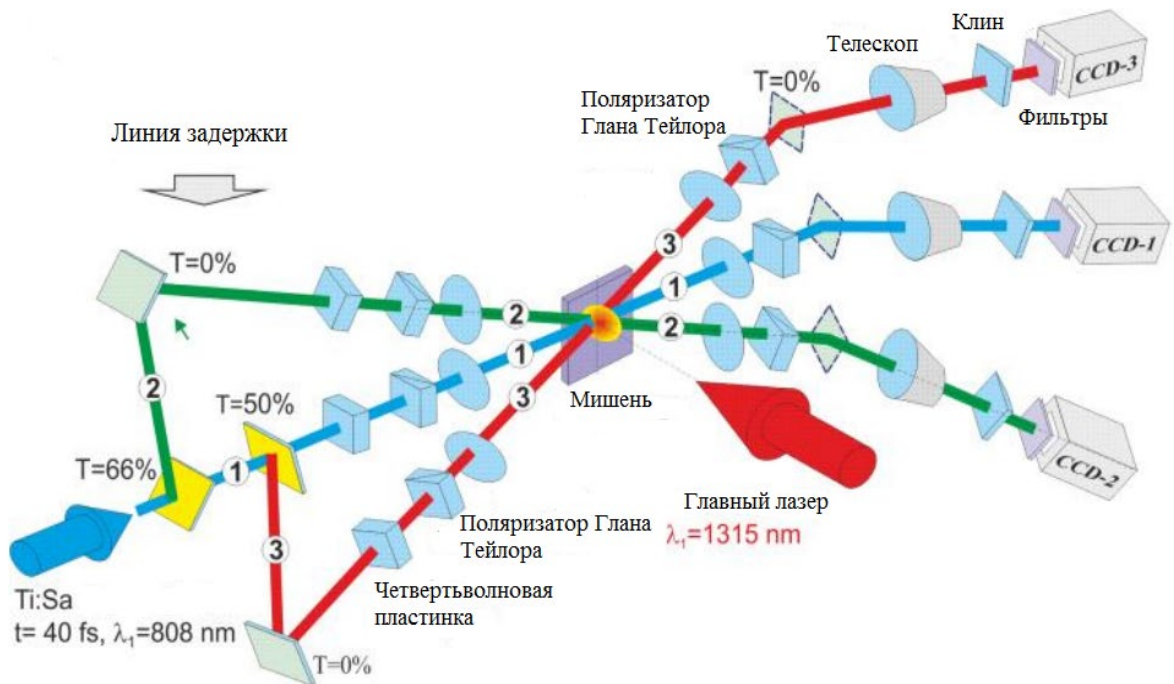


Рис.7. Общий вид трехканальной схемы комплексной интерферометрии.

Описан метод обработки экспериментальных данных – извлечение фазы и расчет плотности плазмы, извлечение угла поворота и фильтрация Фурье, а также выведены формулы для расчета магнитного поля в осесимметричной геометрии взаимодействия.



$$B(r) = \frac{1.7 \cdot 10^3}{\lambda} \times \frac{rf_\varphi(r)}{f_\delta(r)},$$

где  $\lambda$  – длина волны в см,  $r$  – расстояние от оси симметрии в см, а функции  $f_\varphi$  и  $f_\delta$  определены как результаты обратного абелева преобразования функций  $F_\varphi$  и  $F_\delta$  соответственно:

$$F_\varphi(y) = \frac{\varphi(y)}{y}; \quad F_\delta(y) = \delta(y);$$

$$f(r) = A^{-1}(F(y)) = -\frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{dF}{dy} \frac{dy}{\sqrt{y^2 - r^2}} + \frac{F(R)}{\pi\sqrt{R^2 - r^2}},$$

где  $\varphi$  – угол поворота плоскости поляризации, а  $\delta$  – фаза, связанная с плотностью плазмы.

На примере модельных данных проанализирован алгоритм обработки комплексных интерферограмм. Распределение плотности плазмы и магнитного поля, использованные для подготовки расчетных интерферограмм, определялось аналитически как комбинация гауссовых профилей. Рассмотрены источники возможных погрешностей, которые исходят как от интерферометрической, так и от поляриметрической частей диагностики. Погрешности возникают из-за самосвечения плазмы, ее поглощения, эффектов второго порядка магнитного поля, таких как эффект Коттона-Муттона, нестабильности распределении энергии зондирующего лазерного импульса между выстрелами и др. Показано, что даже при высокой точности извлечения данных величин в рассчитанном магнитном поле  $B(r)$  наблюдаются проблемные области (рис. 8).

В результате анализа показано, что ошибка извлечения величины поля вблизи оси симметрии многократно возрастает при учете в модельных данных указанных погрешностей, достигая, при использованном разрешении, максимальной действительной величины поля (рис. 9А). Проблема связана с несовпадением осей симметрии извлеченных распределений. Был предложен метод повышения точности определения магнитного поля вблизи оси симметрии путем корректировки угла поворота плоскости поляризации специальной сдвиговой функцией. На примере модельных данных показано,

что предложенный метод коррекции позволяет уменьшить ошибку измерения магнитного поля у оси симметрии на 2 порядка (рис. 9Б).

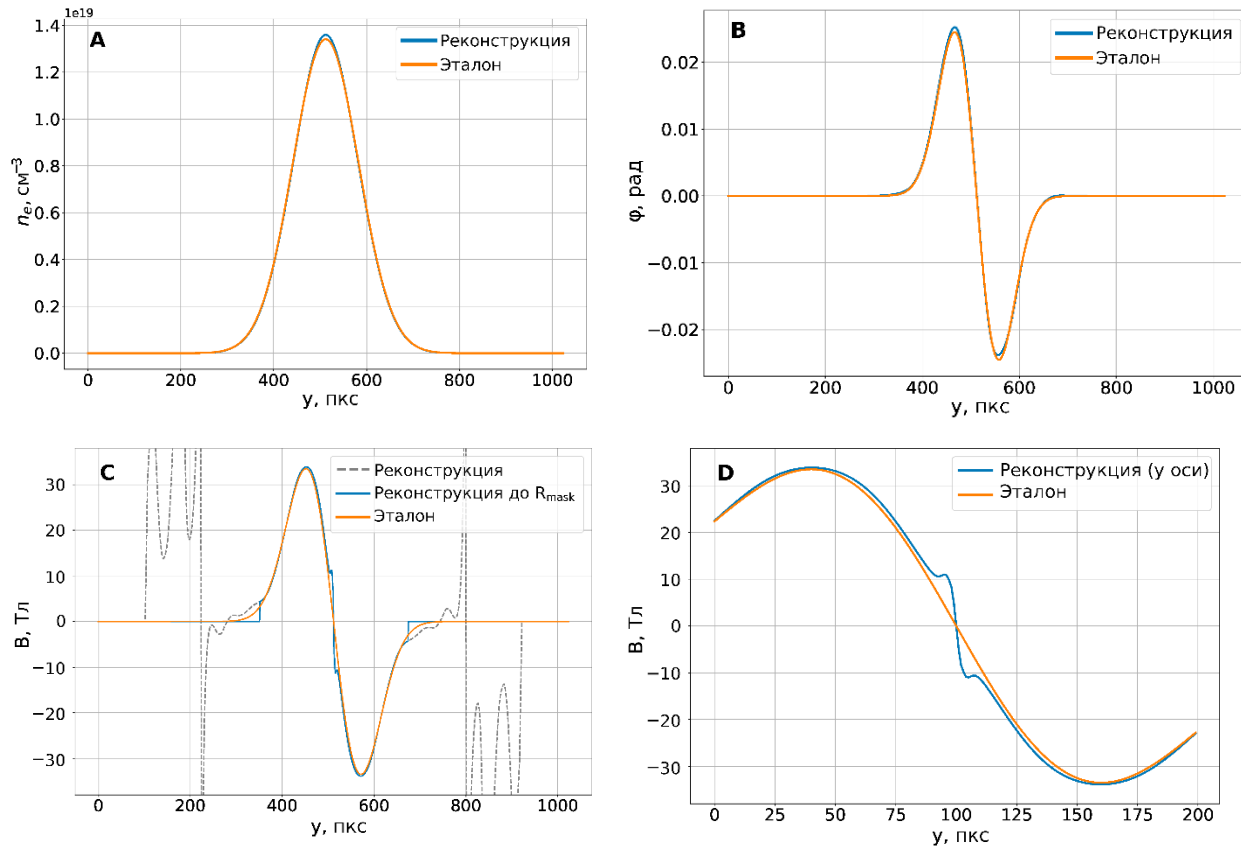


Рис 8. Сечения извлеченных из комплексной интерферограммы величин – плотности плазмы (А) и угла вращения плоскости поляризации (В), рассчитанного магнитного поля (С), и рассчитанного магнитного поля вблизи оси (D).

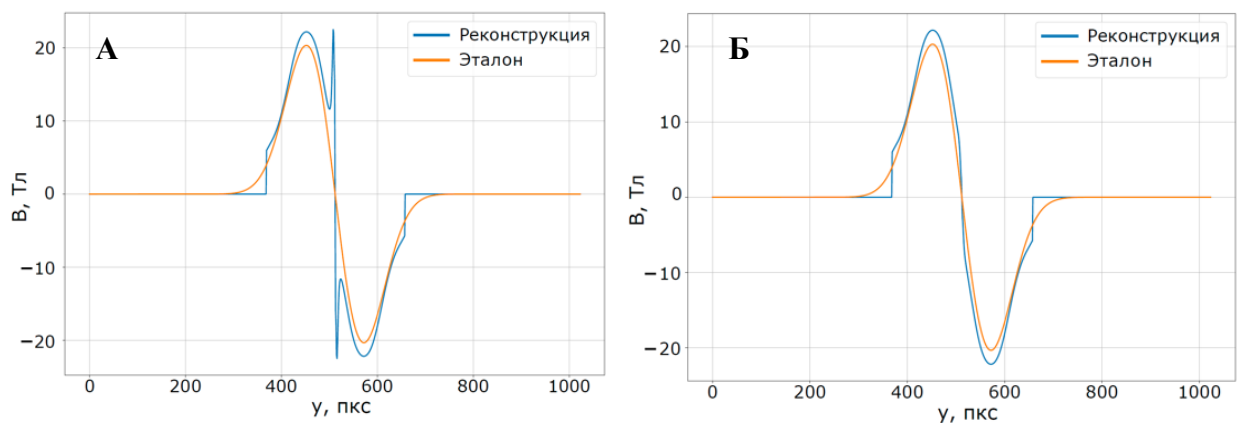


Рис. 9. Поле, рассчитанное в случае несовпадения осей без и с выполненной коррекции угла поворота (А и Б соответственно)

Разработанный алгоритм был применен к экспериментальным данным, были получены распределения спонтанного магнитного поля (рис. 10). Данные

комплексной интерферометрии охватывали диапазон от  $t = -200$  пс до  $t = 1000$  пс, где время измеряется от максимума лазерного импульса. Временная эволюция распределений электронной плотности демонстрирует квазисферический характер абляционного расширения на ранней фазе взаимодействия. Позже, для моментов времени 20 – 850 развивается неравнозначность направлений, что может быть вызвано различными механизмами, включая нестабильность плазмы, градиентом давления спонтанных магнитных полей и неидеальностью процесса облучения. Амплитуда достигает значения  $(900 \pm 200)$  Тл на ранней фазе разлета плазмы ( $t = -108$  пс), когда интенсивность лазерного излучения увеличивается; а затем уменьшается после прохождения своего максимума. Распределение поля в целом до конца импульса имеет неизменный характер. В конце импульса амплитуда поля уменьшается примерно до 200 Тл (для  $t = 449$  пс) из-за радиального расширения плазмы и ослабления механизмов генерации СМП.

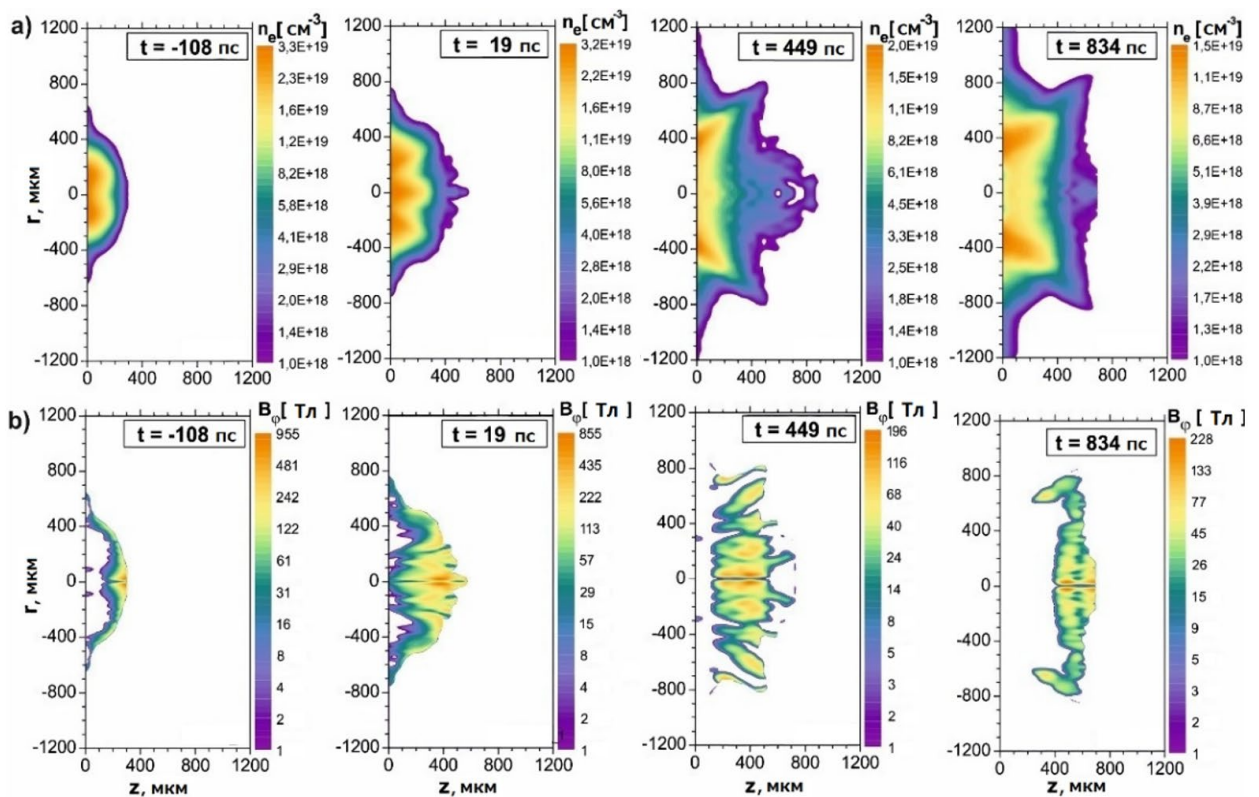


Рис.10. Экспериментально полученные распределения электронной плотности (а) и спонтанных магнитных полей (б)

**ЧЕТВЕРТАЯ ГЛАВА** посвящена исследованию пространственного распределения электронных токов в плазме, возбуждаемой лазерным излучением тераваттной мощности, в плоских массивных мишенях. Описан измерительный комплекс для исследования электронных токов, реализованный на установке PALS: 10-канальная система магнитной спектрометрии, позволяющая определить энергию и количество быстрых электронов, вышедших из области лазерно-плазменного взаимодействия,  $K\alpha$  – диагностика, позволяющая определять количество вернувшихся в мишень электронов путем измерения рентгеновского излучения, возникающего в результате рекомбинационных электронных переходов в атомах (рис.11 и 12).

Распределения электронного тока также могут быть получены путем применения закона Ампера [22] к ранее полученным данным комплексной интерферометрии:

$$\vec{j}(r, z) = j_z(r, z)\vec{e}_z + j_r(r, z)\vec{e}_r = \frac{1}{\mu_0} \left[ \frac{\partial B_\varphi(r, z)}{\partial r} + \frac{B_\varphi(r, z)}{r} \right] \vec{e}_z + \frac{1}{\mu_0} \left[ \frac{-\partial B_\varphi(r, z)}{\partial z} \right] \vec{e}_r.$$



Рис. 11. Устройство одного модуля системы электронной спектрометрии

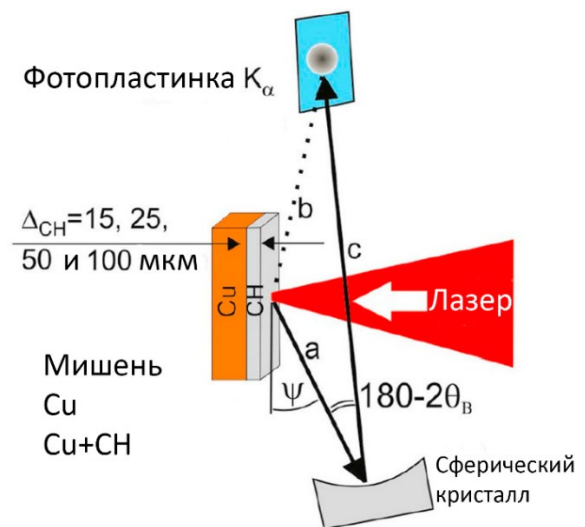


Рис. 12. Схема диагностики плазмы с помощью рентгеновского излучения  $K\alpha$

Распределения плотности прямого тока (электроны движутся в направлении «от» мишени) показывают, что его значительная часть сосредоточена на оси симметрии и может достигать значений более  $10^{14}$  А/м<sup>2</sup> (рис. 13). Полный ток достигает максимального значения порядка 800 кА на пике интенсивности лазера, а затем постепенно уменьшается и падает до

половины максимального значения примерно при 850 пс. Сравнение структуры токов и данных МГД моделирования показало, что подобная структура не может быть сформирована только за счет эффекта скрещенных градиентов плотности и температуры, но может быть объяснена наличием потока быстрых электронов. Кроме того, корректное описание процесса генерации магнитного поля возможно при учете в моделировании аномального сопротивления, связанного с ионно-звуковой неустойчивостью (рис. 14).

Выполнено сравнение данных различных диагностик и сделаны выводы о величине тока и о существовании эффекта его удержания в лазерной плазме. Данные К $\alpha$ -диагностики, которые связаны с числом возвращающихся в мишень электронов, численно совпадают с данными комплексной интерферометрии. В то же время, электронные спектрометры зафиксировали значительно меньшее, с разницей около 3 порядков, число быстрых электронов, вылетевших из мишени. Наблюдающееся несоответствие может быть объяснено с помощью анализа данных оптической диагностики. С использованием нормировки на максимальное значение плотности электронного тока по этим данным проведена численная оценка величины тока электронов, уходящих из области взаимодействия. Сделан вывод, что только порядка  $\sim (0,08 \pm 0,02)\%$  электронов уходит из плазмы, что подтверждает существенное удержание быстрых электронов в лазерном факеле.

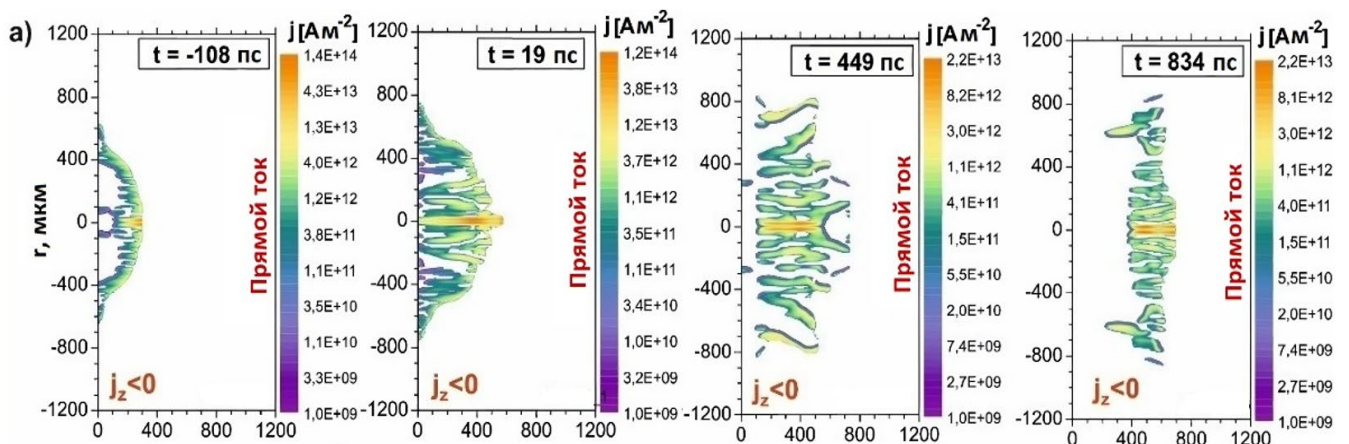


Рис. 13. Распределения плотности прямого тока в абляционной плазме для различных времен её расширения

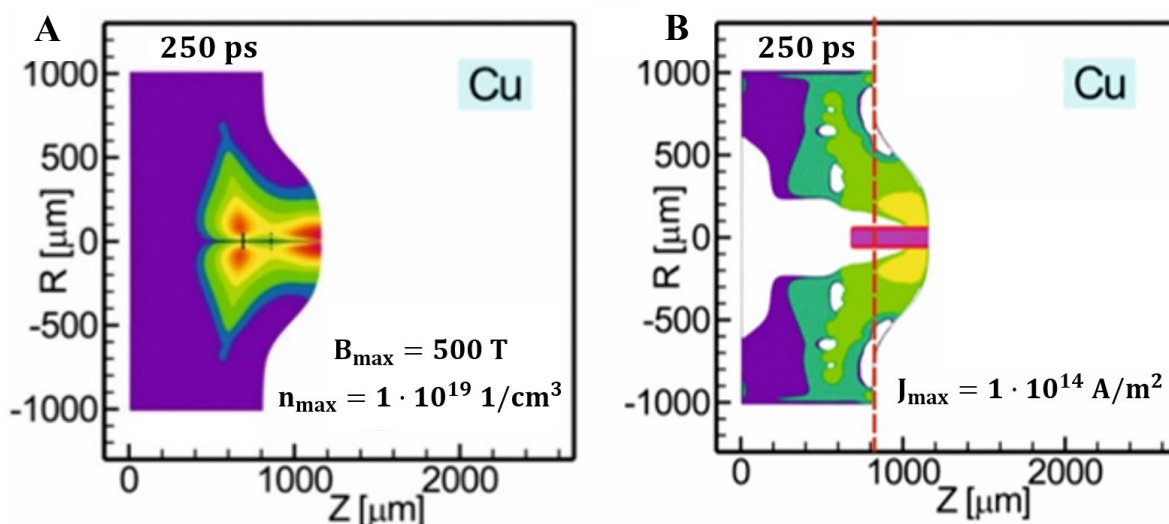


Рис. 14. Результаты МГД расчёта [6] расширения плазменного факела под действием греющего импульса при учете аномального сопротивления.

А. Распределение магнитных полей. В. Распределение плотности прямого тока

В **ЗАКЛЮЧЕНИИ** сформулированы основные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы:

1. Реализован эффект генерации магнитного поля величиной ( $1200 \pm 200$  Тл) в полостных мишенях типа "Улитка" при облучении их пикосекундным интенсивным лазерным импульсом. Определена временная динамика спонтанного магнитного поля, время существования которого составило более 100 пс, что более чем на два порядка превышает длительность лазерного импульса.
2. Разработан метод обработки протонных радиографических изображений, позволяющий решать обратную задачу по восстановлению пространственного распределения электромагнитных полей в лазерно-возбуждаемой плазме независимо от относительного положения источника протонов и мишени.
3. Для обработки экспериментальных данных протонной дефлектометрии разработана конволюционная нейронная сеть, которая позволила уменьшить погрешность измерений спонтанного магнитного поля в два раза по сравнению с классическими методами, до 20%.

4. Для диагностики аксиально-симметричной замагниченной лазерной плазмы применен метод комплексной интерферометрии, определены пределы его точности, предложен алгоритм обработки экспериментальных данных, позволяющий уменьшить ошибку восстановления спонтанного магнитного поля вблизи оси симметрии на два порядка до единиц Тл.
5. Установлено, что аномальное сопротивление, возникающее из-за ионно-звуковой неустойчивости в лазерной плазме, играет важную роль в формировании распределения тока быстрых электронов и генерации спонтанного магнитного поля. Количественно охарактеризован эффект существенного удержания быстрых электронов в плазме – из плазмы уходит только  $\sim (0,08 \pm 0,02)\%$  электронов.

### Публикации автора по теме диссертации

1. Elaboration of 3-frame complex interferometry for optimization studies of capacitor-coil optical magnetic field generators / Iu. Kochetkov et al // Journal of Instrumentation. - 2019. - Vol.14. - C11024-11024. - DOI 10.1088/1748-0221/14/11/C11024.
2. Hot electron retention in laser plasma created under terawatt sub-nanosecond irradiation of Cu targets / Iu. Kochetkov et al // Plasma Physics and Controlled Fusion. - 2020. - Vol.62. - P.115020. - DOI 10.1088/1361-6587/abb74b.
3. Implementation of amplitude–phase analysis of complex interferograms for measurement of spontaneous magnetic fields in laser generated plasma / Iu. Kochetkov et al // AIP Advances. - 2020. - Vol.10. - №11. - P.115201. - DOI 10.1063/5.0020511.
4. On the proton radiography of magnetic fields in targets irradiated by intense picosecond laser pulses / Iu. Kochetkov et al. // Journal of Physics: Conference Series. - 2020. - V.1686. - P.012004. - DOI 10.1088/1742-6596/1686/1/012004
5. Terahertz annular antenna driven with a short intense laser pulse / Iu. Kochetkov et al. // Applied Physics Letters. - 2022. - Vol. 120. - Iss. 1. - P. 014102. - DOI 10.1063/5.0076700.
6. 2D MHD simulations of the spontaneous magnetic field generated during interaction of the  $1\omega$  iodine laser beam at intensity  $10^{16}$  W/cm<sup>2</sup> with the Cu planar massive target / Iu. Kochetkov et al. // Physics of Plasmas. - 2021. - 28. - 092704. - DOI 10.1063/5.0054283.
7. Complex interferometry of magnetized plasma: Accuracy and limitations / Iu. Kochetkov et al. // Physics of Plasmas. - 2021. - Vol.28. - 102110. - DOI 10.1063/5.0063162.
8. Neural network analysis of quasistationary magnetic fields in microcoils driven by short laser pulses / Iu. Kochetkov et al // Scientific Reports. - 2022. - Vol.12. - Iss.13734. - DOI 10.1038/s41598-022-17202-2.
9. Kilot Tesla plasmoid formation by a trapped relativistic laser beam / Yu. Kochetkov et al. // Phys. Rev. E. - 2022. - Vol.106. - Iss.045211. - DOI 10.1103/PhysRevE.106.045211.



**Список литературных источников**

10. Imposed magnetic field and hot electron propagation in inertial fusion hohlraums / D. J. Strozzi, L. J. Perkins, M. M. Marinak et al. // *Journal of Plasma Physics*. – 2015. – Vol.81, №6. – P.475810603.
11. Zakharov Y. P. Laboratory simulation of plasma releases into space and astrophysical magnetized media / Y. P. Zakharov // *J. Techn. Phys.* – 2000. – Vol. 41. – P. 125-132.
12. Korneev Ph. Collisionless plasma interpenetration in a strong magnetic field for laboratory astrophysics experiments / Ph. Korneev, E. d'Humières, V. Tikhonchuk // *Physics of Plasmas*. – 2014. – №21. – P.022117.
13. Korneev Ph. Gigagauss-scale quasistatic magnetic field generation in a snail-shaped target / Ph. Korneev, E. d'Humieres, V. Tikhonchuk // *Physical Review E*. – 2015. – Vol.91, №4. – P.043107.
14. Fast electron energy transport in solid density and compressed plasma / P. Norreys, D. Batani, S. Baton et al. // *Nuclear Fusion*. – 2014. – Vol. 54. – Iss. 054004.
15. Fast-ignition transport studies: realistic electron source, integrated particle-in-cell and hydrodynamic modeling, imposed magnetic fields / D. J. Strozzi, M. Tabak, D. J. Larson et al. // *Physics of Plasmas*. – 2012. – Vol.19, №7. – P.072711.
16. Shock-ignition relevant experiments with planar targets on OMEGA / M. Hohenberger, W. Theobald, S. X. Hu et al. // *Physics of Plasmas*. – 2014. – Vol.21. – №2. – P. 022702.
17. Radiation reaction as an energy enhancement mechanism for laser-irradiated electrons in a strong plasma magnetic field / Z. Gong, F. Mackenroth, X. Q. Yan, A. V. Arefiev. // *Scientific Reports*. – 2019. – Vol.9. – № 17181.
18. Remington A.B. Experimental astrophysics with high power lasers and Z pinches / B. A. Remington, R. P. Drake, D. D. Ryutov // *Reviews of Modern Physics*. – 2006. – Vol.78, №3. – P.755.

19. Kalal M. Complex interferometry: its principles and applications to fully automated on-line diagnostics // *Czechoslovak Journal of Physics*. – 1991. – Vol.41, №8. – P.743.
20. Laser-driven platform for generation and characterization of strong quasi-static magnetic fields / J. J. Santos, M. Bailly-Grandvaux, L. Giuffrida et al. // *New Journal of Physics*. – 2015. – Vol.17, №8. – P.083051.
21. Proton deflectometry of a magnetic reconnection geometry / L. Willingale, P. M. Nilson, M. C. Kaluza et al. // *Physics of Plasmas*. – 2010. – Vol.17, №4. – P. 043104.
22. Kinetic magnetization by fast electrons in laser-produced plasmas at sub-relativistic intensities / T. Pisarczyk, S. Y. Gus'kov, T. Chodukowski et al. // *Physics of Plasmas*. – 2017. – 24(10). – 102711.
23. Birdsall C.K. *Plasma Physics via Computer Simulation* / C.K. Birdsall, A.B. Langdon // Taylor & Francis Group, *Plasma Physics and Fluid Dynamics*, 2005. – 504 p.
24. Commissioning and early experiments of the PHELIX facility / V. Bagnoud, B. Aurand, A. Blazevic et al // *Applied Physics B*. – 2010. – Vol.100. – P.137-150.
25. Wilks, S.C. Energetic proton generation in ultra-intense laser-solid interactions / S.C. Wilks, A.B. Langdon, T.E. Cowan et al. // *Physics of Plasmas*. – 2001. – V. 8. – P. 542549.
26. Layout and performance of the Asterix IV iodine laser at MPQ, Garching / H. Baumhacker, G. Brederlow, E. Fill et al. // *Applied Physics B*. – 1995. – Vol.61. – P.325-332.