

На правах рукописи



**Ушаков Александр Александрович**

**Частотно-угловые распределения  
терагерцевого излучения из плазмы  
при фокусировке фемтосекундного лазерного излучения в воздухе  
и получение терагерцевых изображений фазовых объектов**

01.04.21 – Лазерная физика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук и на кафедре общей физики и волновых процессов физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

**Научный руководитель:**

*Савельев-Трофимов Андрей Борисович*

*доктор физико-математических наук, профессор*

**Научный консультант:**

*Букин Владимир Валентинович*

*кандидат физико-математических наук*

**Официальные оппоненты:**

*Чекалин Сергей Васильевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией спектроскопии ультрабыстрых процессов института спектроскопии РАН.*

*Петров Николай Владимирович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Международного научного центра оптической и квантовой информатики, биофотоники факультета фотоники и оптоинформатики Университета ИТМО.*

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

Защита диссертации состоится «15» апреля 2019 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 002.063.03 при ИОФ РАН по адресу: 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, корп. №1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИОФ РАН.

Автореферат диссертации разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 года

Ученый секретарь диссертационного совета

канд. физ.-мат. наук

Тел.: +7(499) 503-81-47

Воляк Т.Б.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Под терагерцевым (ТГц) понимают электромагнитное излучение в диапазоне частот 0.1–10 ТГц (или в диапазоне длин волн от 3 мм до 30 мкм), которое располагается между СВЧ- и инфракрасным диапазонами спектра. В последнее время вопросы генерации и регистрации терагерцевого излучения привлекают все больший интерес в связи с развитием различного рода приложений. К настоящему времени существует большое число способов генерации терагерцевого излучения. Обычно выделяют несколько основных методов получения терагерцевого излучения: при помощи устройств радиоэлектроники, квантово-каскадных лазеров и оптических методов. Оптические методы получения терагерцевого излучения можно разделить на несколько типов: генерация ТГц-излучения как результат образования разностной частоты при распространении фемтосекундных импульсов в нелинейных средах, в фотопроводящих антеннах, при воздействии лазерного излучения на поверхность металлов (с образованием плазмонных волн) и полупроводников (вследствие эффекта Дембера, ускорения поверхностным полем с искривлением энергетических зон и др.), на жидкости (с генерацией суперконтинуума и формированием разностной частоты в результате нелинейного взаимодействия различных спектральных компонент), а также на газовые среды с формированием плазмы (генерация описывается с помощью отклика на нелинейности третьего порядка либо вследствие формирования нестационарных фототоков). Нестационарная лазерно-индуцированная плазма представляет интерес с точки зрения генерации не только терагерцевого излучения, но и другого вторичного излучения: широкополосного оптического вследствие генерации суперконтинуума, ультрафиолетового и рентгеновского вследствие генерации гармоник высоких порядков. Однако, с точки зрения генерации именно терагерцевого излучения, лазерно-плазменные источники вызывают интерес по трем основным причинам. Во-первых, газовые среды являются самовосстанавливающимися и для них применимо лазерное излучение высокой интенсивности. Во-вторых, из-за отсутствия фоновых линий поглощения в таких источниках может быть получено излучение с ультрашироким спектром в диапазоне от 0.1 до 200 ТГц. В-третьих, для задач удаленной диагностики возможно создание источника путем фокусировки лазерного излучения непосредственно перед исследуемым объектом во избежание поглощения терагерцевого излучения в водяных парах при распространении в воздухе. Интерес на данный момент представляет решение вопроса о возможности генерации интенсивного терагерцевого излучения с узкой диаграммой направленности и широким спектром в заданной точке пространства.

В настоящее время терагерцевые технологии активно применяются в различных областях науки и техники. Разрабатываются различные методы получения терагерцевых изображений, в том числе скрытых объектов, для систем безопасности. Существенный интерес при этом представляют изображения фазовых, непоглощающих объектов.

В связи с созданием большого разнообразия прозрачных материалов в терагерцевом диапазоне частот возникает необходимость их визуализации именно в этом диапазоне ввиду низкой энергии кванта и, следовательно, неразрушающего воздействия на материал, что не всегда доступно общепринятыми методами, основанными на измерении поглощения излучения в объектах.

Первая экспериментальная работа по генерации терагерцевого излучения из лазерно-индуцированной плазмы была опубликована в 1993 году, а начиная с 2006 года,

проводится активное исследование диаграммы направленности терагерцевого излучения из лазерной плазмы, формируемой при фокусировке двухчастотного лазерного излучения (под двухчастотным здесь и в дальнейшем мы будем подразумевать излучение, содержащее компоненты на основной длине волны генерации лазера и на его второй гармонике), с целью создания направленного источника широкополосного ТГц-излучения с унимодальным частотно-угловым спектром. Однако в настоящее время данный вопрос не является полностью решенным, а изменение частотно-угловых распределений от режима фокусировки в низкочастотной области ТГц-спектра (0,1–3 ТГц), используемой в большинстве задач по спектральному анализу, вообще практически не исследовано. Кроме того, хотя в ряде теоретических работ и сообщается о возможности существования части ТГц-эмиссии, излучаемой из плазмы в направлении, противоположном распространению двухчастотной накачки, экспериментально данный факт зарегистрирован не был, хотя он может предоставить информацию не только о свойствах плазмы, но и позволить неинвазивно контролировать параметры ТГц-излучения, распространяющегося в прямом направлении.

Первая работа по построению изображений в терагерцевом диапазоне частот была опубликована в 1995 году, однако до сих пор активно ведутся исследования различных способов построения изображений в ТГц-диапазоне частот. Большинство работ направлено на увеличение скорости визуализации и достижение высокого контраста получаемых изображений, в то время как сравнительно немного работ нацелено на исследование объектов со слабым поглощением и разработки методов визуализации таких объектов. Автор диссертации опубликовал первую экспериментальную работу по генерации ТГц-излучения в лазерной плазме в 2012 году и впоследствии работал в сотрудничестве с экспериментальными группами проф. С.В. Гарнова (ИОФ РАН), проф. М. Kuwata-Gonokami (University of Tokyo, Токио, Япония), проф. Т. Ozaki (INRS-EMT, Квебек, Канада), проф. А.П. Шкуринова (МГУ имени М.В. Ломоносова), д.ф.-м.н. М.Б. Аграната (ОИВТ РАН), а также с теоретической группой проф. О.Г. Косаревой (МГУ имени М.В. Ломоносова). Большая часть экспериментальной работы выполнена на передовом оборудовании в лаборатории лазерной спектроскопии ИОФ РАН и в лаборатории проф. М. Kuwata-Gonokami в Токийском университете. Таким образом, экспериментальные исследования автора диссертации являются актуальными и соответствуют новейшим мировым достижениям, предоставляя возможность использовать их для решения различных прикладных и фундаментальных задач по генерации и регистрации ТГц-излучения.

**Цель работы** состоит в экспериментальном исследовании диаграммы направленности терагерцевого излучения из индуцированной двухчастотными лазерными импульсами плазмы, а также в разработке новых методов построения изображений фазовых объектов в терагерцевом диапазоне частот. Для ее решения были поставлены и выполнены следующие задачи:

1. Исследование угловых и частотно-угловых распределений терагерцевого излучения из плазмы, создаваемой при различной фокусировке в воздух двухчастотных фемтосекундных лазерных импульсов.

2. Исследование энергетических и спектральных характеристик терагерцевого излучения, регистрируемого в обратном направлении относительно направления распространения излучения двухчастотной накачки.
3. Разработка новых методов построения изображений в терагерцевой области частот без пространственного сканирования с применением импульсных широкополосных источников и техники детектирования с временным разрешением и их применение к фазовым объектам.

### **Научная новизна**

1. Впервые экспериментально обнаружено смещение кольцевой структуры в области спектра 0.5–2 ТГц в частотно-угловом распределении терагерцевого излучения из плазмы, создаваемой при фокусировке двухчастотного лазерного излучения длительностью 35–150 фс в воздух при атмосферном давлении и изменении числовой апертуры от 0.2 до 0.02.
2. Впервые экспериментально зарегистрировано и исследовано терагерцевое излучение из плазмы, создаваемой при фокусировке с числовой апертурой 0.07–0.28 двухчастотного лазерного излучения длительностью 35–40 фс, энергией 1.2–2.8 мДж, распространяющееся в направлении, противоположном направлению распространения излучения двухчастотной накачки.
3. Впервые предложена и реализована схема по визуализации фазовых объектов в терагерцевой области частот в просвечивающей геометрии с применением широкоапертурного детектирующего кристалла.
4. Впервые предложена и реализована методика визуализации фазовых объектов в терагерцевой области частот по положению максимума кросс-корреляционной функции временных форм терагерцевого излучения, прошедшего через исследуемый объект и в его отсутствие.

### **Научно-практическая значимость**

Полученные в работе результаты могут быть использованы для:

1. управления диаграммой направленности терагерцевого излучения, создаваемого при фокусировке двухчастотного лазерного излучения в воздух при атмосферном давлении, для реализации наиболее оптимального частотно-углового спектра выходного терагерцевого излучения;
2. мониторинга в режиме реального времени параметров терагерцевого излучения, распространяющегося в прямом направлении из индуцированной двухчастотными фемтосекундными лазерными импульсами плазмы относительно направления распространения излучения накачки по параметрам обратного терагерцевого излучения;
3. применения в системах безопасности, контроля и спектроскопии для построения изображений различных объектов в терагерцевой области частот, в том числе прозрачных в указанном диапазоне.

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

1. Широкое унимодальное распределение, доминирующее в частотно-угловом спектре терагерцевого излучения при фокусировке двухчастотного фемтосекундного лазерного излучения длительностью 35–150 фс и энергией

~3 мДж в воздух при числовой апертуре 0.2, с уменьшением этой величины до 0.02 модифицируется в кольцевую структуру в области частот от 0.5 до 2 ТГц.

2. Диаграмма направленности терагерцового излучения из плазмы, создаваемой двухчастотным фемтосекундным лазерным излучением длительностью 35–40 фс при фокусировке в воздух параболическими зеркалами с числовыми апертурами 0.07–0.28 имеет компоненту, направленную противоположно распространению оптической накачки со спектром, смещенным в область частот 0.1–1.5 ТГц. Энергия этой компоненты в диапазоне углов  $160 - 144^\circ$  составляет не менее 5% от энергии ТГц-излучения, распространяющегося в диапазоне углов  $0 - 22^\circ$ , где  $0^\circ$  соответствует направлению оптической оси.
3. Кросс-корреляционный анализ временных форм широкополосных ТГц-импульсов, измеренных в отсутствие исследуемого объекта и при его наличии с применением техники электрооптического детектирования, позволяет получать изображения фазовых объектов без пространственного сканирования с пространственным разрешением порядка дифракционного предела ( $\approx 300$  мкм).

**Личный вклад автора.** Автор активно участвовал в постановке задач; определении способов их решения; проведении экспериментов; обработке, анализе и интерпретации полученных данных; написании работ и апробации материала. Все представленные в работе экспериментальные результаты получены соискателем лично либо в соавторстве при его непосредственном участии. Результаты численных расчетов, приводимые в диссертации, получены В.А. Андреевой, Д.Е. Шипило, Н.А. Пановым и О.Г. Косаревой.

**Степень достоверности данных.** Достоверность полученных данных обеспечивается высоким уровнем использованного экспериментального оборудования; применением современных теоретических представлений и методов обработки при анализе данных; сравнением полученных результатов с имеющимися литературными данными; воспроизводимостью результатов.

**Апробация результатов.** Результаты работы были доложены на следующих конференциях: XXII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2015» (Москва, Россия, 2015); IX Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям (Саров, Россия, 2015); конференция молодых ученых ИОФ РАН 2015 (Москва, Россия, 2015); XV Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» имени профессора А.П. Сухорукова («Волны-2015») (Москва, Красновидово, Россия, 2015); X Всероссийская школа по лазерной физике и лазерным технологиям для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов (Саров, Россия, 2016); 17я международная конференция «Оптика лазеров – 2016» (С.-Петербург, Россия, 2016); The International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO 2016) / The Lasers, Applications, and Technologies Conference (LAT 2016) (Минск, Беларусь, 2016); XIV Курчатовская междисциплинарная молодежная научная школа (Москва, Россия, 2016); XI всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям (Саров, Россия, 2017); 26th Laser Physics Workshop (Казань, Россия, 2017); 10th International Workshop "Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications" (Нижний Новгород - Москва, Россия, 2017); X Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика-2017» (Санкт-

Петербург, Россия, 2017); IS-PALD 2017: International Symposium on Physics and Applications of Laser Dynamics (Париж, Франция, 2017); IV Международная конференция Лазерные, плазменные исследования и технологии (ЛаПлаз 2018) (Москва, Россия, 2018); XVIII Научная школа «Нелинейные волны – 2018» (Нижний Новгород, Россия, 2018); The Third STEPS Symposium on Photon Science (Москва, Россия, 2018), 18 Международная конференция «Оптика Лазеров – 2018» (С.-Петербург, Россия, 2018), 34 Международная конференции по инфракрасным, миллиметровым и терагерцевым волнам «IRMMW-THz-2018» (Нагойя, Япония), 26 Международная конференция по передовым лазерным технологиям «ALT-2018» (Таррагона, Испания), Школа конференция молодых ученых «Прохоровские недели» (Москва, Россия), 3-я Международная конференция Терагерцевое и Микроволновое излучение: генерация, детектирование и применения «TERA-2018» (Н. Новгород, Россия), а также на семинарах Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН и кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета и МЛЦ МГУ имени М.В. Ломоносова.

**Публикации.** Основные результаты, изложенные в работе, опубликованы в 25 научных работах, из них 6 статей, включенные в перечень рецензируемых научных изданий ВАК.

**Объем и структура диссертации.** Работа изложена на 126 страницах и состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы, включающего 193 источника. Диссертационная работа иллюстрирована 3 таблицами и 45 рисунками.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Первая глава** содержит обзор литературы, посвященной описанию способов генерации терагерцевого излучения, в особенности в лазерно-плазменных источниках. Рассматривается текущее направление ключевых исследований в данном направлении, а также рассматриваются основные способы построения изображений в ТГц-области частот.

**Вторая глава** посвящена экспериментальному и численному исследованию диаграммы направленности ТГц-излучения из плазмы, формируемой при различной фокусировке двухчастотного лазерного излучения в воздух при атмосферном давлении [3,8,13,14,17-19].

В главе 2.1 приводится описание экспериментальных установок, использованных при исследовании пространственного распределения ТГц-излучения из лазерной плазмы. Всего было использовано три установки, общая схема которых приведена на Рис.1. Для генерации ТГц-излучения двухчастотное лазерное излучение (длительность 35 и 150 фс, энергия импульсов 2,7 и 2,5 мДж, диаметр пучков 12 мм по уровню  $e^{-1}$ , частота следования импульсов 1 кГц, поляризации гармоник линейные и сонаправленные, импульсы гармоник совмещены по времени) фокусировалось в воздух параболическими зеркалами с различными фокусными расстояниями от 1 до 8". Для измерения угловых распределений мощности ТГц-излучения использовался оптико-акустический приемник — детектор Голея, который помещался под различными углами к оптической оси. Для реализации техники синхронного детектирования в схему внедрялся либо дополнительный модулятор оптического пучка, либо модуляция проводилась с помощью электрооптического затвора в лазерной системе. Дальнейшая обработка проводилась с помощью синхронного детектора. Для измерений частотно-угловых распределений использовался либо набор узкополосных ТГц-фильтров в диапазоне от 0.6 до 1.9 ТГц, либо электрооптический детектор, общая схема которого приведена на Рис. 1. Для работы

такого детектора был необходим пробный оптический пучок, который отводился от исходного лазерного пучка с помощью светоделителя. Затем проводилась регистрация временных форм ТГц-импульсов. Спектры получались путем применения дискретного преобразования Фурье к указанным временным формам. Более детальное описание установок и цели их применения указаны в таблице 1.

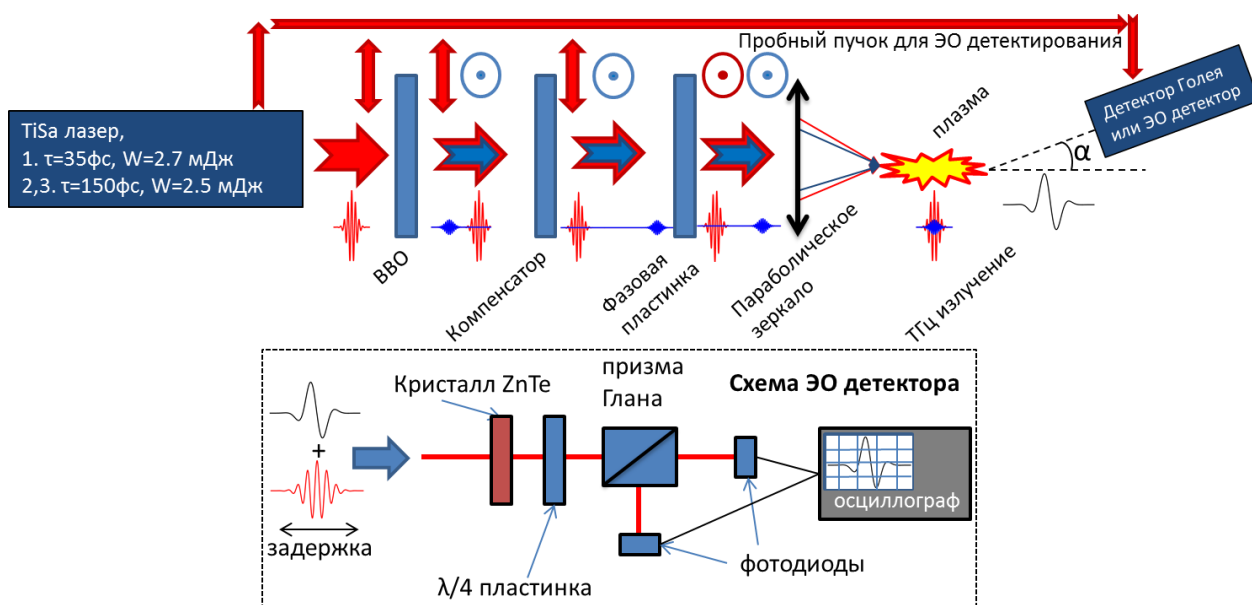


Рис. 1. Обобщенная схема экспериментальных установок для измерения угловых и частотно-угловых распределений ТГц-излучения

Таблица 1. Описание экспериментальных установок для измерения пространственного распределения ТГц-излучения из лазерной плазмы

| Номер установки | Способ детектирования                                      | $F$ , дюймы | Применение   |
|-----------------|--|-------------|--|
| 1               | Детектор Голея с/без узкополосными ТГц-фильтрами           | 2, 4, 7.5   | Измерение угловых и частотно-угловых распределений ТГц-излучения |
| 2               | Детектор Голея   | 1, 4, 8     | Измерение угловых распределений ТГц-излучения                    |
| 3               | Электро-оптическое детектирование с помощью кристалла ZnTe | 4, 8        | Измерение частотно-угловых распределений ТГц-излучения           |

В главе 2.2 приводится описание модели, основанной на решении уравнения однонаправленного распространения импульса (УОРИ), применяемой для объяснения получаемых экспериментальных результатов с помощью численных расчетов, выполненных в группе профессора Косаревой О.Г.

В главе 2.3 приводятся результаты экспериментально измеренных и полученных в результате численного моделирования угловых и частотно-угловых распределений ТГц-излучения из плазмы, формируемой при различной фокусировке двухчастотных лазерных импульсов в воздух при атмосферном давлении.

В результате измерений угловых диаграмм мощности ТГц-излучения наблюдалось уменьшение расходимости и увеличение мощности ТГц-излучения с увеличением фокусного расстояния для обеих установок. Особенностью результатов для наибольшего фокусного расстояния  $F = 7.5''$  (числовая апертура  $NA \approx 0.02$ ) в установке №1 является



большой пьедестал в угловом распределении, в то время как эти распределения равномерны для более короткой фокусировки.

Для более детального исследования особенностей диаграммы направленности ТГц-излучения проводились измерения частотно-угловых распределений. Для установки №1 (длительность импульса 35 фс – полная ширина на уровне половины максимума (FWHM)) результаты представлены на Рис. 3. В случае  $F = 2''$  ( $NA \approx 0.07$ ) частотно-угловые распределения являются унимодальными и кольца не видны, в то время как в случае  $F = 4$  и  $7.5''$  ( $NA \approx 0.035$  и  $0.02$ ) наблюдаются два пика примерно при  $\pm 7^\circ$  от оптической оси, что соответствует кольцевой структуре. В случае меньшего значения числовой апертуры кольцевая структура наблюдается более ясно. Это означает, что уменьшение числовой апертуры важно для наблюдения четкой кольцевой структуры. Отметим, что также наблюдается сильный осевой пик в экспериментальных данных для  $F = 4$  и  $7.5''$  ( $NA \approx 0.035$  и  $0.02$ ). Этот эффект не воспроизводится в моделировании, однако может быть связан с длительностью импульса, которая существенно короче, чем в численном моделировании.

В случае установок №2 и 3 (длительность импульса 150 фс по уровню FWHM) наблюдалась аналогичная зависимость распределения ТГц-поля от числовой апертуры. Угловые распределения мощности ТГц-излучения были унимодальными для более коротких фокусных расстояний  $F = 1$  и  $4''$  ( $NA \approx 0.05$ ). Эта унимодальная структура сохранялась и для частотно-углового распределения для  $F = 4''$ . Напротив, угловое распределение для самого большого фокусного расстояния  $F = 8''$  ( $NA \approx 0.025$ ) имело плоскую вершину, а в частотно-угловом распределении наблюдалась яркая кольцеобразная структура (см. Рис. 3(б)).

Для подтверждения результатов измерений было проведено численное моделирование в рамках УОРИ. Оно демонстрирует унимодальную структуру с максимумом на оси пучка в низкочастотной области ТГц-спектра. Появление двух пиков на одинаковых углах от оси в частотно-угловом распределении соответствует кольцевой структуре. Согласно численному моделированию для  $F = 4''$  ( $NA \approx 0.05$ ), кольцевая структура не появляется в области частот 0.1 - 3 ТГц, доступной для экспериментальных измерений. В отличие от этого, яркая кольцевая структура хорошо видна в области частот 0.5 - 2 ТГц при  $F = 8''$  ( $NA \approx 0.025$ ). Результаты численного моделирования показывают, что кольцевая структура в частотно-угловом распределении может наблюдаться только в случае малой величины NA: самый мягкий режим фокусировки ( $F = 8''$ ). Эти результаты хорошо согласуются с измеренными частотно-угловыми распределениями. Угол расхождения колец  $\pm 7^\circ$  в моделировании также хорошо согласуется с углом расходимости кольцевых структур в эксперименте.

Полученные в экспериментах и численном моделировании результаты можно объяснить качественно на основании существующих механизмов генерации ТГц-излучения в индуцированной двухчастотными импульсами плазме. Существуют два основных нелинейных механизма формирования кольцевой структуры в диаграмме направленности ТГц-излучения при пробое газов двухчастотным фемтосекундным лазерным импульсом: фазовое рассогласование между оптическими гармониками, приводящее к изменению полярности ТГц-импульсов, и рассеяние на плотной плазме как на препятствии для ТГц-излучения. Согласно обоим механизмам требуется более длинный плазменный канал для возникновения резко выраженной кольцевой структуры в

диаграмме направленности ТГц-излучения. Длина участка рассогласования между гармониками составляет около 2 см; в наших экспериментах длина плазменного канала составляла 7 мм для фокусных расстояний  $F = 7,5$  и 8" и около 1 мм для меньших. Следовательно, фазовый разбег между гармониками не играл существенной роли в наших экспериментах и моделировании, а возникновение кольцевой структуры в основном определялось за счет рассеяния ТГц-излучения на плазме как на препятствии.

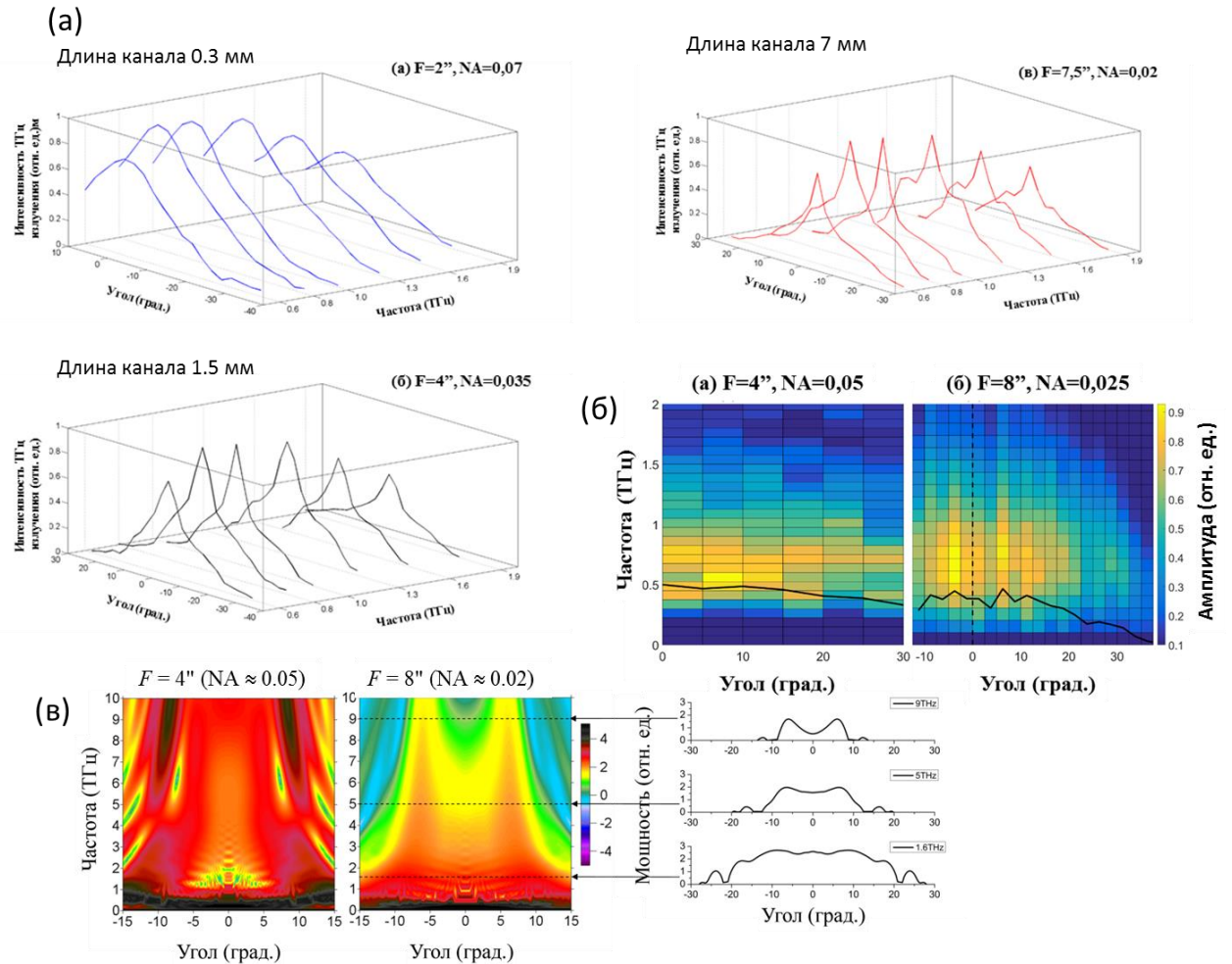


Рис. 4. Частотно-угловые распределения мощности ТГц-излучения, измеренные для различных фокусных расстояний параболических зеркал на установке №1 (а), установке №2 (б) и полученные в результате численного моделирования (в).

Диаметр плазменного канала составлял 100 мкм. Это препятствие является субволновым для ТГц-излучения с частотой  $\nu_{\text{ТГц}} \leq 3$  ТГц (длины волн  $\approx 100$  мкм). Низкочастотные ТГц-волны огибают такое препятствие без существенных изменений в дальней зоне дифракции даже в случае плазменной частоты, большей частоты ТГц-излучения. В результате низкочастотное ТГц-излучение является унимодальным без кольцевых структур. Напротив, ТГц-волны с частотой  $\nu_{\text{ТГц}} \geq 3$  ТГц (длина волны  $\approx 100$  мкм) менее эффективно дифрагируют на плазменном канале и, следовательно, распространяются через плазму. Это приводит к возникновению индуцированного плазмой фазового сдвига между гармониками, в результате чего в дальней зоне дифракции возникает кольцевое распределение мощности ТГц-излучения. Более длинный

плазменный канал усиливает этот эффект, и его можно наблюдать для ТГц-волн с меньшей частотой.

**Третья глава** посвящена исследованию терагерцевого излучения из плазмы, создаваемой при фокусировке двухчастотного лазерного излучения, в направлении, обратном распространению оптического излучения [4,7,10,15].

В главе 3.1 описывается первое экспериментальное обнаружение части ТГц-излучения, распространяющейся из плазмы в направлении, противоположном направлению распространения двухчастотного лазерного излучения накачки (в дальнейшем данное излучение будем называть обратным, а часть ТГц-излучения, распространяющегося в том же направлении, что и оптическая накачка, прямым). Для создания лазерной плазмы использовалась схема, аналогичная той, что применялась в главе 2.1, а в качестве накачки использовалась та же лазерная система, что и в установке №1 (также описана в главе 2.1). Для фокусировки оптического излучения использовалось параболическое зеркало с фокусным расстоянием и диаметром 2". Для отражения обратного коллимированного ТГц-излучения после параболического зеркала в пучок вставлялась пластинка ИО (оксид олова, допированный индием) под углом  $45^\circ$  к падающему пучку перед параболическим зеркалом для направления ТГц-излучения в детектор. Регистрация осуществлялась аналогично тому, как это проводилось в установке №1 (глава 2.1).

В ходе экспериментов наблюдался сигнал с синхронного детектора для ТГц-излучения в прямом направлении амплитудой  $150 \pm 5$  мкВ и в обратном направлении  $5 \pm 3$  мкВ. Данные величины соответствуют средней мощности  $\approx 1.2$  и  $\approx 0.04$  нВт соответственно. Следует отметить, что для измерений в прямом и обратном направлении телесные углы для ячейки Голя при детектировании были практически одинаковыми. С учетом вклада от поглощения на различных оптических элементах при распространении ТГц-излучения соотношение по мощности ТГц-излучения, распространяющегося в прямом и обратном направлениях, составило  $\sim 25/1$ . Данные значения находятся в разумном соответствии с результатами численного моделирования в рамках интерференционной модели, выполненного в группе проф. Косаревой О.Г.

В главе 3.2 проводится изучение характеристик обратного ТГц-излучения и сравнение их с параметрами прямого ТГц-излучения.

Экспериментальные установки для исследования обратного ТГц-излучения приведены на Рис. 5. Для создания лазерной плазмы использовалась схема, аналогичная описанной в главах 2.1, 3.1. Для фокусировки использовалось параболическое зеркало диаметром 1.5" с фокусным расстоянием 0.8" ( $NA = 0.28$ ).

Для измерений обратного ТГц-излучения в схему перед параболическим зеркалом вносилась металлическая пластина с 15-мм отверстием; угол между этой пластиной и направлением распространения оптической накачки составлял  $45^\circ$ . Лазерное излучение свободно проходило через отверстие в пластине и затем фокусировалось в воздух параболическим зеркалом для того, чтобы сформировать микроплазму. Обратное ТГц-излучение коллимировалось тем же параболическим зеркалом, а затем отражалось от металлической пластины в сторону детектора: это либо электрооптический (ЭО) детектор, либо ячейка Голя. Размер отверстия на пластине был в 1.5 раза больше, чем диаметр пучка накачки, что приводило к тому, что часть ТГц-излучения проходила через отверстие не отражаясь, однако большая часть обратного ТГц-излучения все же отражалась, так как

ТГц-пучок, идущий в обратном направлении от микроплазмы как от точечного источника коллимировался параболическим зеркалом, а размер его пучка при этом определяется в основном диаметром параболического зеркала. Кроме того, ТГц-пучок также расходится вследствие дифракции. Через то же отверстие в металлической пластине пробный пучок доставлялся к ЭО-детектору для регистрации временной формы обратного ТГц-импульса.



Рис. 5. Схема экспериментальных установок.

ТГц-излучения. Зондирующий пучок пропускаться через линию переменной задержки, диафрагму с открытым отверстием диаметром 1 мм (чтобы уменьшить размеры пучка и увеличить чувствительность ЭО-системы), отверстие в металлической пластине (диаметром 15 мм) и отверстие в линзе из политетрафторэтилена (ПТФЭ) (диаметр линзы 50 мм, фокусное расстояние  $f=50$  мм, диаметр отверстия 1 мм). Эта линза использовалась для того, чтобы сфокусировать коллимированное параболическим зеркалом обратное ТГц-излучение на кристалл ZnTe. Изменяя задержку между ТГц- и оптическими импульсами, проводилось измерение временной формы ТГц-излучения и, используя преобразование Фурье, восстанавливался его спектр.

Кроме того, проводилось независимое измерение временной формы импульсов ТГц-излучения, распространяющегося из плазмы в прямом направлении с последующим восстановлением его спектра для сравнения с обратным ТГц-спектром. Эти измерения проводились с применением той же ЭО-системы и линии задержки, как и для детектирования обратного ТГц-излучения. При этом условия фокусировки прямого и обратного ТГц-излучения на кристалл ZnTe незначительно отличались: прямое ТГц-излучение коллимировалось и фокусировалось двумя 50-мм ПТФЭ-линзами с фокусными расстояниями 6 и 10 см (не показано на Рис. 5).

Для измерения энергии обратного (и прямого) ТГц-излучения использовалась та же схема генерации ТГц-излучения (без светоделителя), что и при измерениях временных форм с помощью ЭО-системы, и те же оптические системы фокусировки обратного и прямого ТГц-излучения на детектор. Энергия ТГц-излучения измерялась с помощью ячейки Голея. Для изменения энергии накачки перед всеми оптическими элементами помещались полуволновая пластинка с поляризатором. Также проводилось измерение

Когерентное детектирование временных форм обратных ТГц-импульсов проводилось с помощью ЭО-системы на основе кристалла ZnTe, используя пробный пучок. Для этого устанавливался светоделитель на выходе из лазерной системы для создания двух пучков: один (с энергией 2,7 мДж) в качестве накачки для генерации ТГц-излучения и второй (с энергией 0,1 мДж) в качестве зондирующего для регистрации обратного

размеров плазменного канала при различных энергиях лазерного излучения с помощью микрообъектива с КМОП-камерой.

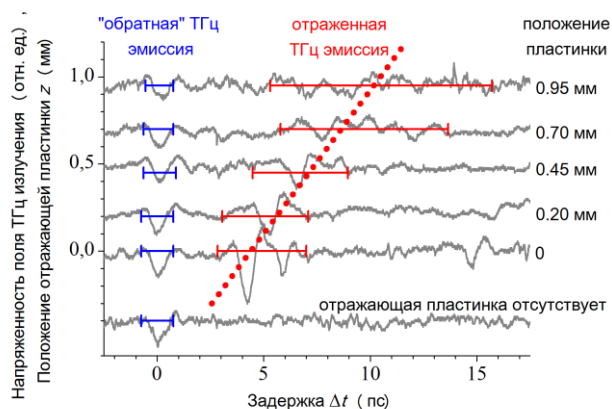


Рис. 6. Временные формы ТГц-импульсов, измеренные при различных положениях отражающей металлической пластинки или в ее отсутствие. Вертикальная ось воспроизводит временные формы как функцию различных положений  $z$  отражающей металлической пластинки. Голубые (синие) метки показывают положение по времени обратной или отраженной прямой эмиссии ТГц-импульсов, а точечная линия – линейная аппроксимация измеряемой зависимости  $z(\Delta t)$

скорость света (здесь мы пренебрегаем угловой расходимостью ТГц-излучения, его дисперсией в воздухе и т.д.). Данные экспериментальные результаты воспроизводят линейную зависимость  $z(\Delta t)$  с наклоном  $(1.4 \pm 0.2) \times 10^{10}$  см/с, что находится в разумном соответствии со значением  $c_0/2$ . Таким образом, измерение обратных и отраженных от пластинки прямых ТГц-импульсов в одной временной форме доказывает существование обратного ТГц-излучения из плазмы, создаваемой при фокусировке двухчастотного лазерного излучения в воздухе.

Временные формы импульсов ТГц-излучения, измеренные в прямом и обратном направлениях, показаны на Рис. 7(а), а соответствующие им спектры на Рис. 7(б). Видно, что спектр обратного ТГц-излучения смещен в низкочастотную область по сравнению со спектром прямого ТГц-излучения. Для объяснения данных результатов было выполнено численное моделирование в группе проф. Косаревой О.Г. на основе интерференционной модели, в которой вычислялся интеграл, определяющий электрическое поле ТГц-излучения  $E(\theta)$  в дальней зоне дифракции ( $\theta$  — полярный угол). В ходе расчетов предполагалось, что длина плазменного канала составляла 250 мкм; что примерно соответствует измеренной в эксперименте величине  $(256 \pm 6)$  мкм FWHM (см. вставку на Рис. 7(б)). Расчеты спектральных мощностей обратного  $P_{\text{bwd}}$  и прямого  $P_{\text{fwd}}$  ТГц-излучения с учетом углов сбора параболического зеркала и ПТФЭ-линз, а также пропускная способность металлической пластины с 15-мм отверстием проводились согласно формулам

Для прямого доказательства существования обратного ТГц-излучения в экспериментах проводилась регистрация временной формы его импульсов (Рис. 6, положение максимума этого импульса находится в положении нулевой задержки). Затем в пучок после плазменного канала в прямом направлении вставлялась металлическая пластинка на расстоянии  $z \sim 0,1-1$  мм. Данная пластинка отражала прямое ТГц-излучение, и во временных формах регистрируемого в обратном направлении ТГц-излучения наблюдалось два ТГц-импульса. Первый из них, соответствующий  $\Delta t = 0$ , был устойчивым и появлялся в одно и то же время, тогда как второй импульс смещался по временной шкале при изменении положения отражающей пластины  $z$ . Расстояние  $z$  зависело от задержки между импульсами  $\Delta t$  как  $z \approx c_0/2 \times \Delta t$ , где  $c_0$  —



$$P_{\text{bwd}} = 2\pi \int_{180^\circ-20^\circ}^{180^\circ-36^\circ} |E(\theta)|^2 \sin \theta d\theta, \quad P_{\text{fwd}} = 2\pi \int_0^{22^\circ} |E(\theta)|^2 \sin \theta d\theta. \quad (1)$$

Спектральные мощности  $P_{\text{bwd}}$  и  $P_{\text{fwd}}$  вычислялись для частот  $\nu_{\text{THz}}$  от 0.05 до 3 ТГц с шагом 0.05 ТГц. Соотношение  $\epsilon(\nu_{\text{THz}}) = P_{\text{bwd}}(\nu_{\text{THz}})/P_{\text{fwd}}(\nu_{\text{THz}})$  служило для оценки передаточной функции от прямого спектра  $S_{\text{fwd}}(\nu_{\text{THz}})$  к обратному спектру  $S_{\text{bwd}}(\nu_{\text{THz}})$ :

$$S_{\text{bwd}}(\nu_{\text{THz}}) = \epsilon(\nu_{\text{THz}})S_{\text{fwd}}(\nu_{\text{THz}}). \quad (2)$$

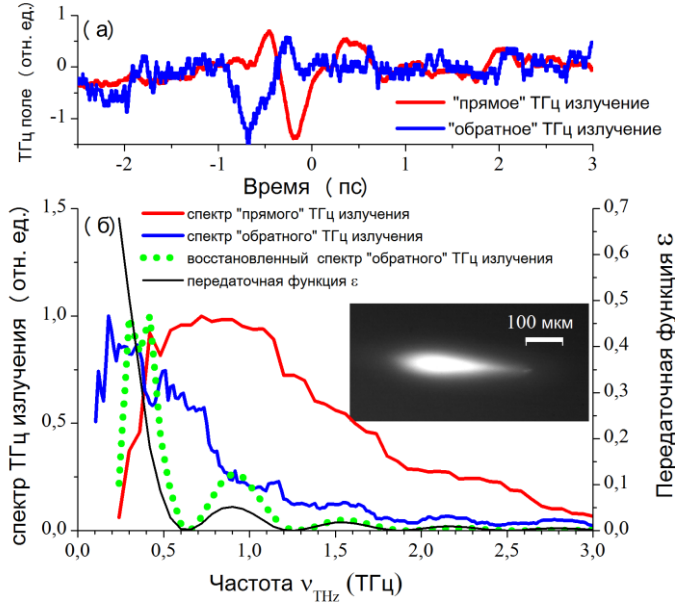


Рис. 7. (а) Измеренные временные формы импульсов обратной (синяя линия), и прямой (красная линия) ТГц-эмиссии. (б) Спектры, полученные из измеренных временных форм импульсов прямой (красная линия) и обратной (синяя линия) ТГц-эмиссии; рассчитанная передаточная функция  $\epsilon(\nu_{\text{THz}})$  от обратного к прямому ТГц-спектру (черная линия); обратный ТГц-спектр, восстановленный из прямого согласно формуле 2 (зеленая точечная линия). Вставка соответствует люминесценции плазмы, записанной на КМОП камеру

канала  $\sim 250$  мкм (т.е.  $\nu_{\text{THz}} \ll 1.2$  ТГц, что хорошо согласуется с предыдущей оценкой  $\nu_{\text{THz}} \leq 0.5$  ТГц), плазма может рассматриваться как почти точечный источник. Этот точечный источник излучает низкочастотное ТГц-излучение как в прямом, так и в обратном направлении.

В ходе эксперимента была измерена зависимость энергии обратного  $W_{\text{bwd}}$  и прямого  $W_{\text{fwd}}$  ТГц-излучения от энергии оптической накачки  $W_{\text{pmp}}$ . Энергия оптического излучения изменялась путем поворота полуволновой пластинки перед поляризатором и контролировалась измерителем энергии. Измерения энергии ТГц-излучения в обратном и прямом направлениях проводились независимо друг от друга с использованием одной и той же ячейки Голя, которая перемещалась в две разные части установки.

Соотношение  $\epsilon(\nu_{\text{THz}})$  имеет величину порядка единицы только для  $\nu_{\text{THz}} \leq 0.5$  ТГц (см. Рис. 7(б)), поэтому согласно эксперименту можно ожидать сдвиг спектра обратного ТГц-излучения в низкочастотную область. Спектр обратного ТГц-излучения в численном моделировании восстанавливался из экспериментально измеренного спектра прямого ТГц-излучения с помощью передаточной функции в формуле (2). Адекватное полуколичественное согласие измеренного и восстановленного спектров позволяет сделать вывод о низкочастотном смещении для спектра обратного ТГц-излучения. Качественное объяснение этого эффекта состоит в следующем: для спектральных компонент ТГц-излучения с длиной волны много большей длины плазменного

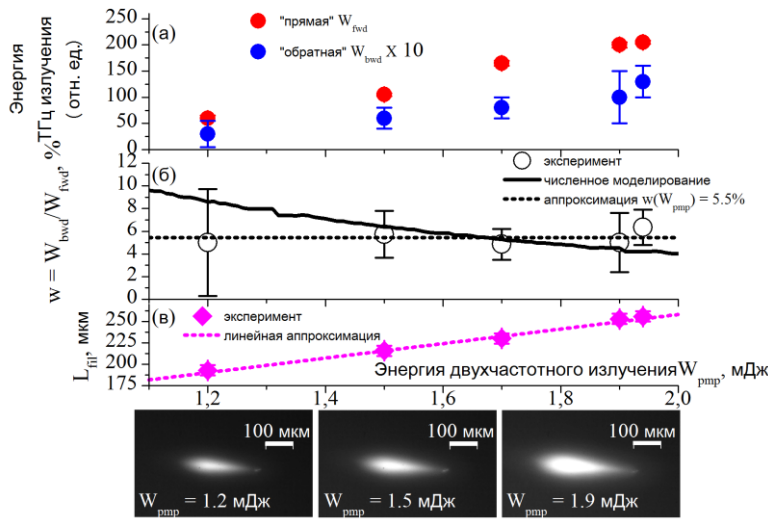


Рис. 8. (а) Энергия обратного и прямого ТГц-излучения в зависимости от энергии лазерного излучения; (б) соотношение обратной/прямой мощности ТГц-излучения в зависимости от энергии лазерного излучения, полученное в эксперименте (точки) и в результате численного моделирования (черная линия); (в) длина плазменного канала в зависимости от энергии лазерного излучения с изображениями люминесценции плазмы, измеренными на КМОП-камере.

регистрировалась КМОП-камерой для различных энергий накачки (см. Рис. 8(в)). Значения  $L_{fil}$  определялись как полная ширина по уровню полувысоты. Полученная зависимость была аппроксимирована линейной функцией. Также были рассчитаны функции  $\epsilon(\nu_{THz})$  для длин плазменных каналов  $L_{fil}$ , соответствующие энергиям от 1,1 до 2 мДж, с шагом 10 мкДж. Затем, используя измеренные зависимости  $S_{fwd}(\nu_{THz})$ , рассчитывались интегралы

$$W_{bwd}(W_{pmp}) = \int_0^{3 \text{ THz}} S_{fwd}(\nu_{THz}) \epsilon(\nu_{THz}) d\nu_{THz},$$

$$W_{fwd}(W_{pmp}) = \int_0^{3 \text{ THz}} S_{fwd}(\nu_{THz}) d\nu_{THz} \quad (4)$$

для оценки мощности обратного и прямого ТГц-излучения.

Рассчитанная зависимость  $\omega(W_{pmp})$  находится в количественном согласии с полученной экспериментально. Она медленно монотонно убывает с увеличением длины плазменного канала и энергии лазерных импульсов. Данный результат также совпадает с нашим предыдущим выводом о том, что более короткий плазменный канал является более близким к точечному источнику.

**Четвертая глава** посвящена разработке новых способов визуализации фазовых объектов в ТГц-области частот [1,2,5,6,9,11,12,16,20-25].

В главе 4.1 проводится сравнение двух методик для визуализации ТГц-поля с применением техники ЭО-детектирования. Показано, что методика, основанная на регистрации изменения яркости оптического пробного пучка вследствие изменения

Энергии импульсов накачки выбирались одинаковыми с точностью до 1 % в двух экспериментальных сериях.

Зависимости  $W_{bwd}(W_{pmp})$  и  $W_{fwd}(W_{pmp})$  показаны на Рис. 8(а). Они ожидаемо возрастают с ростом энергии оптического излучения, однако их отношение  $\omega = W_{bwd}/W_{fwd}$  остается близким к константе  $\sim 5.5\%$  (Рис. 8(б), пунктирная линия), что согласуется с величиной, полученной в предыдущем эксперименте, описанном в главе 3.1. Согласно интерференционной модели можно оценить влияние длины плазменного канала  $L_{fil}$  на коэффициент  $\omega = W_{bwd}/W_{fwd}$ . Люминесценция плазменного канала

состояния поляризации под действием ТГц-излучения, является более чувствительной по сравнению с методикой, основанной на измерении смещения интерференционных полос под действием ТГц-излучения, и предоставляет возможность измерения полей с минимальной величиной напряженности 100 В/см. Общая схема установки, которая будет использована для последующей визуализации фазовых объектов, представлена на Рис. 9.

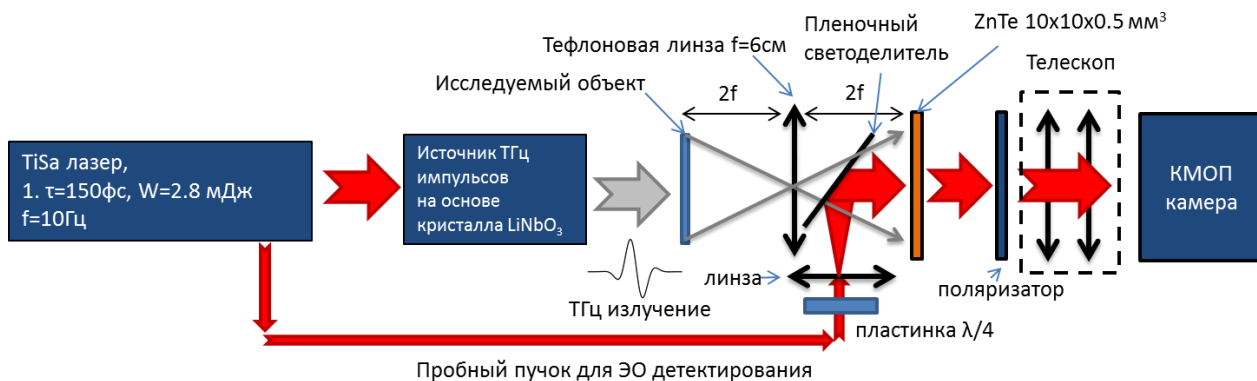


Рис. 9. Схема установки по визуализации фазовых объектов.

Поскольку для решения поставленной задачи возникала потребность в источнике с большей выходной пиковой мощностью ТГц излучения, а не в генерируемом ультрашироком спектре, то в качестве источника применялась схема на основе оптического выпрямления фемтосекундных импульсов с наклонным фронтом интенсивности в кристалле ниобата лития (LiNbO<sub>3</sub>). Принцип регистрации основан на линейном ЭО-эффекте. Изменение состояния поляризации оптического излучения отслеживалось на КМОП-камере с помощью внедренного в пучок поляризатора. Для построения изображений поверхность кристалла ZnTe отображалась на матрицу камеры с помощью телескопа. Поверхность исследуемых образцов отображалась с помощью линзы на поверхность детектирующего кристалла. Проводилось измерение изображений в плоскости кристалла как в присутствии ТГц-поля (сигнальные), так и в его отсутствие (опорные), чтобы учесть отклик, вносимый ТГц-полем. Затем проводился расчет величин ТГц-полей согласно формуле

$$E_{THz}(x, y, \tau) = 55 \frac{I_{sign}(x, y, \tau) - I_{ref}(x, y, \tau)}{I_{ref}(x, y, \tau)} \text{ [кВ/см]}, \quad (3)$$

где  $I_{sign}(x, y, \tau)$  и  $I_{ref}(x, y, \tau)$  — сигнальные и опорные интенсивности изображений в различных точках поверхности кристалла (координаты  $x, y$ ) и в различные моменты задержек  $\tau$  между оптическим и терагерцевым импульсами. В результате был получен трехмерный массив данных: набор из ~100 двумерных изображений (2048×2048 точек каждый) с временным шагом 125 фс.

В [главе 4.2](#) осуществлена визуализация фазовых объектов с помощью установки, схема которой представлена на Рис. 9. Проводились измерения двух наборов трехмерных массивов, описанных в главе 4.1, в присутствии исследуемого объекта и в его отсутствие. Далее обработка массивов данных и построение изображений проводилось тремя способами: по измерению задержки между положениями максимумов ТГц-импульсов (А); по измерению положения максимума кросс-корреляционной функции вышеупомянутых импульсов (Б); визуализацией с использованием дискретного преобразования Фурье и последующим извлечением разности фаз импульсов на каждой частотной составляющей



ТГц-спектра (В). В качестве исследуемого объекта выбиралась тефлоновая пластинка с резкой границей. Примеры визуализации тестового объекта представлены на Рис. 10.

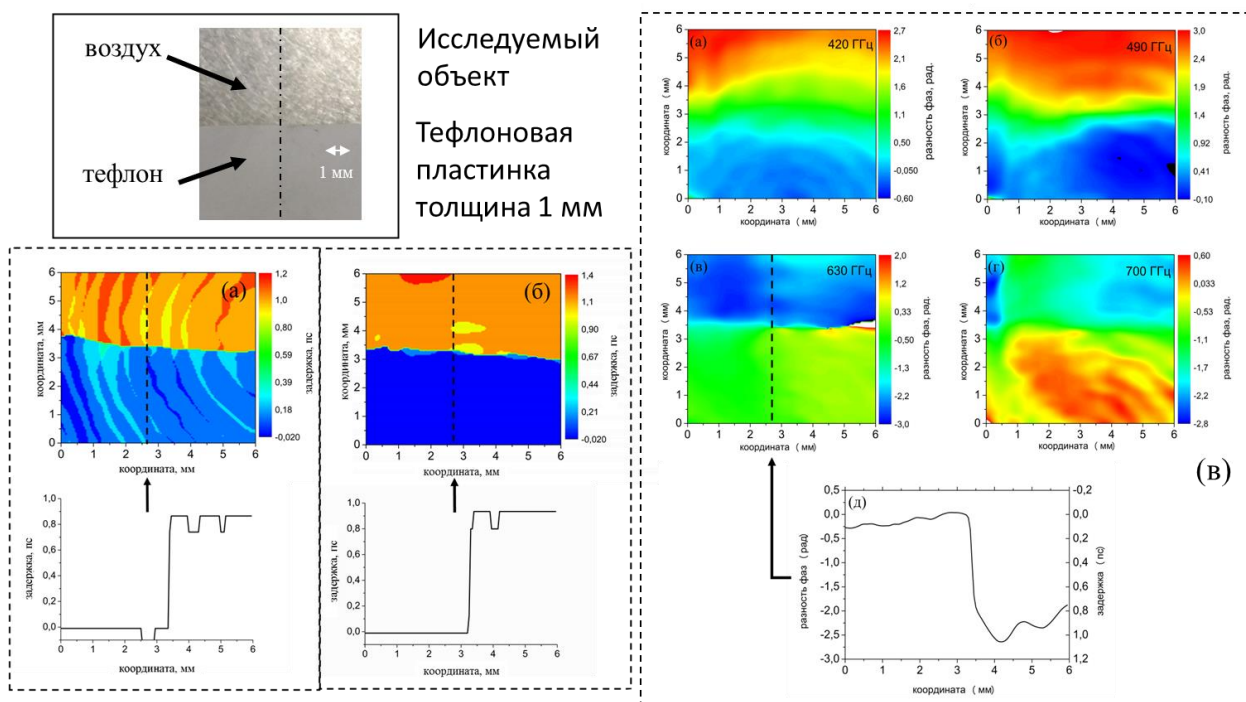


Рис. 10. Тефлоновая пластинка с острой границей, вносимая в пучок, и способы ее визуализации по измерению задержки между положениями максимумов ТГц-импульсов (а); по измерению положения максимума кросс-корреляционной функции (б); с использованием Фурье-анализа (в).

Далее проводился анализ представленных способов визуализации. Общие сведения о сравниваемых характеристиках приведены в Таблице 2.

Под уровнем шума для времяпролетной и кросс-корреляционной визуализаций в данной работе подразумевается среднеквадратичное отклонение задержки между ТГц-импульсами, измеряемыми при отсутствии исследуемого объекта и при его наличии в схеме, но в области кадра, где данный объект отсутствовал (т.е. шум — это ошибка в определении задержки). Для визуализации с помощью Фурье-анализа для сравнения с другими методами уровень шума определялся как среднеквадратичное отклонение разности фаз (т.е. ошибка в определении разности фаз) между прошедшим через свободное пространство и пропущенным через исследуемый объект импульсами для определенной частоты, которая пересчитывалась в единицы задержки в пикосекундах. Вообще говоря, этот уровень шума зависит от частоты, на которой проводится визуализация.

Таблица 2. Характеристики различных методик визуализации: времяпролетная визуализация на основе смещения положения максимума ТГц-импульсов (А), времяпролетная визуализация на основе анализа корреляционной функции (Б), визуализация с помощью Фурье-анализа (для частоты 650 ГГц) (В)

|                                  | А    | Б     | В     |
|----------------------------------|------|-------|-------|
| Уровень шума, пс                 | 0.06 | 0.015 | 0.075 |
| Контраст                         | 14   | 80    | 6     |
| Пространственное разрешение, мкм | 300  | 300   | 700   |

Флуктуации характеристик оптических и ТГц-импульсов (амплитуда, длительность, положение пучка и др.) приводили к относительно высокому уровню шума, препятствующему получению высококачественных изображений. Рассчитанные по экспериментальным данным значения шума приведены в таблице 2. Времяпролетная визуализация, основанная на измерениях корреляционной функции ТГц-импульсов, имеет значительно более низкий уровень шума. Это связано с квадратичным увеличением амплитуды сигнала и усреднением шума при построении кросс-корреляционной функции. Стандартная времяпролетная визуализация напротив имеет линейную зависимость от амплитуды сигнала, что повышает относительный уровень шума. Преимуществом метода визуализации с помощью Фурье-анализа является более низкий уровень шума за счет фильтрации Фурье, но неоднозначность в определении фазы с кратностью  $2\pi$  ухудшает качество изображений.

Таблица 2 также содержит оценки для величины контраста изображений, который определяется как отношение «яркости» в присутствии образца и в его отсутствие рядом с его границей. Численно данная величина может быть рассчитана по формуле

$$\text{контраст} = \frac{\langle \tau_t \rangle - \langle \tau_s \rangle}{\langle \tau_s \rangle} \quad (4),$$

где  $\langle \tau_t \rangle$  и  $\langle \tau_s \rangle$  — среднеквадратичные величины задержек для ТГц-импульсов, пропущенных через исследуемый объект (ПТФЭ-пластинка) и в его отсутствие соответственно. Стоит отметить, что величина контраста зависит от толщины объекта и отражает величину сигнал/шум для изображений. Наилучшая величина контраста также достигается при использовании корреляционной методики построения изображений.

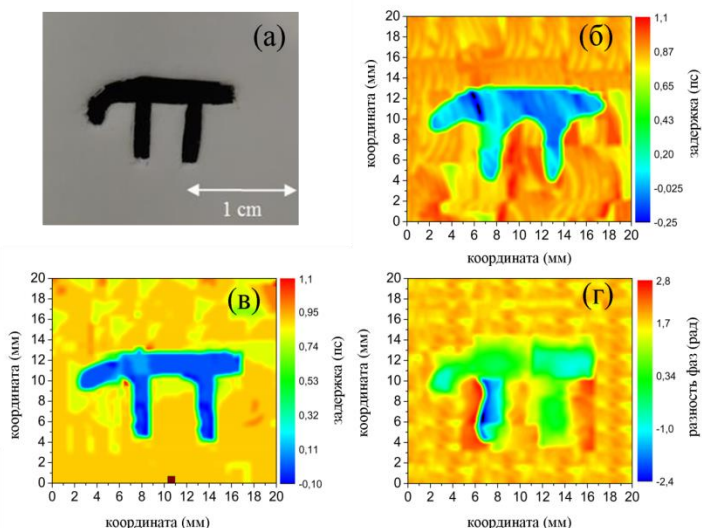


Рис. 11. (а) оптическое изображение ПТФЭ-пластинки толщиной 1 мм с вырезанным символом  $\pi$ , пример визуализации с применением времяпролетной (б), кросс-корреляционной (в) методик и с помощью Фурье-анализа (для частоты 650 ГГц) (г).

выбором частоты и применением более мелкого временного шага для ЭО-измерений.

Для демонстрации всех вышперечисленных особенностей была проведена визуализация  $\pi$ -символа, вырезанного в пластине из ПТФЭ толщиной 1 мм (см. Рис. 11).

Пространственное разрешение получаемых изображений также зависит от способа обработки данных. Сечения, нанесенные на Рис. 10, наглядно демонстрируют, что оба времяпролетных метода обладают преимуществом лучшего пространственного разрешения по сравнению с визуализацией с помощью Фурье-анализа. Следует обратить внимание, что для визуализации с помощью Фурье-анализа разрешение также зависит от частоты излучения, используемой для построения изображения, и может быть оптимизировано правильным

Пространственные размеры этого объекта составляли  $15 \times 8$  мм<sup>2</sup>. Изображения, очевидно, различаются по соотношению сигнал/шум, контрастности и пространственному разрешению. Некоторая размытость границ видна для всех методов из-за пространственной фильтрации и достаточно малого размера объекта, но наибольшее пространственное разрешение достигалось с помощью времяпролетных методов (измерение прямой временной задержки, Рис. 11(б), и измерение максимума корреляционной функции, Рис. 11(в)). Наилучшее соотношение сигнал/шум достигалось кросс-корреляционным методом.

## ВЫВОДЫ

1. Проведено комплексное исследование угловых и частотно-угловых распределений ТГц-излучения из плазмы, создаваемой при различной фокусировке двухчастотного фемтосекундного лазерного излучения в воздух при атмосферном давлении, позволяющее определить наиболее оптимальный режим фокусировки двухчастотного излучения накачки с точки зрения направленности выходящего ТГц-излучения и унимодальности частотно-углового распределения в области частот 0.1–3 ТГц. Сходство угловых диаграмм ТГц-излучения в случае использования импульсов различной длительности 35–150 фс показывает, что расходимость ТГц-излучения в низкочастотном диапазоне определяется в основном условиями фокусировки, а зависимость от длительности импульса проявляется значительно слабее.

2. В случае жесткого режима фокусировки ( $NA \approx 0.2, 0.07$ ) возникает широкое унимодальное угловое распределение мощности ТГц-излучения. Напротив, его распределение в случае более мягкой фокусировки ( $NA \approx 0.025–0.02$ ) являлось более узким с ярко выраженной кольцевой структурой. Оптимальным оказался режим фокусировки с числовыми апертурами ( $NA \approx 0.035–0.05$ ): угловое распределение ТГц-излучения становится относительно узким, кольцевая структура не наблюдается. Данные результаты находятся в разумном соответствии с данными численного моделирования.

3. При анализе диаграммы направленности жестко сфокусированного двухчастотного фемтосекундного лазерного излучения ( $NA \approx 0.07–0.28$ ) впервые экспериментально показано, что существует определенная часть терагерцевого излучения, которая распространяется из плазмы в направлении, противоположном излучению двухчастотной накачки. Сравнение спектров терагерцевого излучения, распространяющегося в прямом и обратном направлениях из плазменного канала, показывает смещение в низкочастотную область спектра у ТГц-излучения, распространяющегося в обратном направлении по сравнению с ТГц-излучением, распространяющимся в прямом направлении. В диапазоне энергий двухчастотного излучения накачки 1,2–2 мДж не замечено существенного изменения в соотношении по энергии (около 5,5%) между ТГц-излучениями, распространяющихся из плазмы в диапазоне углов  $160 - 144^\circ$  и в диапазоне углов  $0 - 22^\circ$ , где  $0^\circ$  соответствует направлению оптической оси.

4. Продемонстрированная схема для визуализации фазовых объектов в просвечивающей геометрии с применением широкоапертурного электрооптического кристалла и широкополосного ТГц-излучения позволяет на основе одного набора данных строить изображения фазовых объектов тремя взаимодополняющими методами: по измерению смещения положения максимума ТГц-импульса вследствие задержки,

возникающей при распространении через исследуемый объект; по положению максимума кросс-корреляционной функции временных форм ТГц-излучения, пропущенного через исследуемый объект и распространяющегося в его отсутствие, и по разности фаз между различными частотными компонентами спектра ТГц-излучения, пропущенного через исследуемый объект и распространяющегося в его отсутствие. В данной схеме величина минимально обнаружимого поля ТГц-излучения составляет величину порядка 100 В/см.

5. Проведено сравнительное исследование трех методик визуализации на основе единого набора данных и показано, что впервые предложенный метод визуализации фазовых объектов по положению максимума кросс-корреляционной функции дает преимущество по уровню шума и контрасту изображений по сравнению с другими использованными методами.

### **Список работ, опубликованных по теме диссертации**

Статьи, включенные в перечень рецензируемых научных изданий ВАК:

- [1] **Ushakov A.A.**, Chizhov P.A., Bukin V.V., Savel'ev A.B., Garnov S.V. Broadband in-line terahertz 2D imaging: comparative study with time-of-flight, cross-correlation and Fourier transform data processing // Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics – 2018. – Vol. 116, № 5. – P. 1159-1164.
- [2] **Ушаков А.А.**, Чижов П.А., Букин В.В., Гарнов С.В., Савельев А.Б. Сравнительный анализ методик двумерной пространственно-временной визуализации поля импульсного терагерцевого излучения с применением электрооптического кристалла // Квантовая электроника – 2018. – Т. 48, № 5. – С. 487-490.
- [3] **Ushakov A.A.**, Chizhov P.A., Andreeva V.A., Panov N.A., Shipilo D.E., Matoba M., Nemoto N., Kanda N., Konishi K., Bukin V.V., Kuwata-Gonokami M., Kosareva O.G., Garnov S.V., Savel'ev A.B. Ring and unimodal angular-frequency distribution of THz emission from two-color femtosecond plasma spark // Optics Express – 2018. – Vol. 26, № 14. – P. 8202-18213.
- [4] **Ushakov A.A.**, Matoba M., Nemoto N., Kanda N., Konishi K., Andreeva V.A., Panov N.A., Shipilo D.E., Chizhov P.A., Bukin V.V., Kuwata-Gonokami M., Yumoto J., Kosareva O.G., Garnov S.V., Savel'ev A.B. Backward terahertz radiation from the two-color femtosecond laser filament // JETP Letters – 2017. - Vol. 106, № 11. – P. 706-708.
- [5] **Ushakov A.A.**, Chizhov P.A., Bukin V.V., Savel'ev A.B., Garnov S.V. Broadband terahertz in-line phase contrast imaging // Journal of Applied Spectroscopy – 2016. - Vol. 83, № 6-16. – P. 729-730.
- [6] Чижов П.А., **Ушаков А.А.**, Букин В.В., Гарнов С.В. Измерение методом интерферометрии пространственно-временного распределения поля терагерцевых импульсов в электрооптическом кристалле // Квантовая электроника – 2015. - Т. 45, № 5. – С. 434-436.

### **В других изданиях:**

- [7] **Ushakov A.A.**, Chizhov P.A., Bukin V.V., Panov N.A., Shipilo D.E., Kosareva O.G., Savel'ev A.B., Garnov S.V. Backward terahertz emission from two-color laser induced plasma spark // EPJ Web of Conferences – 2018. – Vol. 195. – P. 03003.
- [8] Chizhov P.A., **Ushakov A.A.**, Andreeva V.A., Panov N.A., Shipilo D.E., Matoba M., Nemoto N., Kanda N., Konishi K., Bukin V.V., Kuwata-Gonokami M., Yumoto J., Kosareva O.G., Garnov S.V., Savel'ev A.B. Two-color plasma THz far-field angular distribution

conversion by focal length variation // IEEE 2018 International Conference Laser Optics (ICLO) – 2018. – P. 238.

[9] **Ushakov A.A.**, Matoba M., Nemoto N., Kanda N., Konishi K., Andreeva V.A., Panov N.A., Shipilo D.E., Chizhov P.A., Bukin V.V., Kuwata-Gonokami M., Yumoto J., Kosareva O.G., Garnov S.V., Savel'ev A.B. 3D terahertz beam profiling from two color laser induced plasma with different focusing // EPJ Web of Conferences – 2017. – Vol. 149. – P. 05011-1-05011-2.

[10] Chizhov P.A., **Ushakov A.A.**, Bukin V.V., Panov N.A., Shipilo D.E., Kosareva O.G., Savel'ev A.B., Garnov S.V. Two-color Femtosecond Plasma Backward Terahertz Emission // 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz) – 2018. – P. 1-2.

[11] **Ushakov A.A.**, Chizhov P.A., Bukin V.V., Savel'ev A.B., Garnov S.V. Broadband in-line 2D imaging with different data processing // 26th International conference on Advanced Laser Technologies (ALT-18) – 2018. – P. 163.

[12] **Ушаков А.А.**, Чижов П.А., Букин В.В., Шипило Д.Е., Савельев-Трофимов А.Б., Гарнов С.В. Визуализация объектов в терагерцевом диапазоне частот комплексом взаимодополняющих методик // XI Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям – 2018. – С. 176-178.

[13] Чижов П.А., Лапчик Д.Д., **Ушаков А.А.**, Букин В.В., Гарнов С.В., Савельев-Трофимов А.Б. Влияние режима фокусировки на угловое распределение энергии терагерцевого излучения из плазмы, создаваемой при оптическом пробое двухцветными фемтосекундными лазерными импульсами // XI Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям – 2018. – С. 199-202.

[14] Чижов П.А., **Ушаков А.А.**, Букин В.А., Андреева В.В., Шипило Д.Е., Панов Н.А., Косарева О.Г., Гарнов С.В., Савельев-Трофимов А.Б. Исследование особенностей углового и частотно-углового распределения терагерцевого излучения из плазмы, возникающей при фокусировке двухчастотных фемтосекундных лазерных импульсов // XI Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям – 2018. – С. 166-169.

[15] **Ушаков А.А.**, Матоба М., Немото Н., Канда Н., Кониши К., Чижов П.А., Панов Н.А., Шипило Д.Е., Букин В.В., Кувата-Гоноками М., Юмото Дж, Косарева О.Г., Гарнов С.В., Гарнов С.В., Савельев А.Б. Обратное терагерцевое излучение из двухчастотного лазерно-индуцированного филамента // XVII научная школа «Нелинейные волны – 2018» - 2018. – С. 193-194.

[16] **Ушаков А.А.**, Чижов П.А., Букин В.В. Широкополосная широкоапертурная двумерная визуализация объектов в терагерцевой области частот с применением различной обработки данных // Школа-конференция молодых ученых "Прохоровские недели – 2018. – С. 39-41.

[17] Chizhov P.A., **Ushakov A.A.**, Shipilo D.E., Andreeva V.A., Panov N.A., Lapchik D.D., Bukin V.V., Kosareva O.G., Garnov S.V., Savel'ev A.B. The Study of Focal Length Influence on Two-Color Plasma THz Source Far-Field Angular Distribution // 26th International Laser Physics Workshop - 2017.

- [18] Chizhov P.A., **Ushakov A.A.**, Shipilo D.E., Andreeva V.A., Panov N.A., Lapchik D.D., Bukin V.V., Kosareva O.G., Garnov S.V., Savel'ev A.B. The study of focal length influence on two-color plasma THz source far-field angular and frequency-angular distribution // 7th IS-PALD International Symposium Physics and Applications of Laser Dynamics – 2017. – P. 122-123.
- [19] **Ушаков А.А.**, Чижов П.А., Шипило Д.Е., Андреева В.А., Панов Н.А., Букин В.В., Косарева О.Г., Гарнов С.В., Савельев-Трофимов А.Б. Исследование углового и частотно-углового распределения терагерцевого излучения из плазмы, возникающей при различной фокусировке двухчастотных фемтосекундных лазерных импульсов // Международная конференция «Оптика – 2017» - 2017. – С. 173-175.
- [20] **Ushakov A.A.**, Chizhov P.A., Volkov R.V., Bukin V.V., Garnov S.V., Savel'ev A.B. Optimization of the laser plasma source of terahertz radiation and interferometric study of its spatio-temporal field distribution // 2016 International Conference Laser Optics, IEEE Xplore - 2016.
- [21] **Ушаков А.А.**, Чижов П.А., Букин В.В., Савельев-Трофимов А.Б., Гарнов С.В. Система построения фазово-контрастного изображения в терагерцевом диапазоне частот // X всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям - 2016.
- [22] **Ушаков А.А.**, Чижов П.А., Букин В.В., Савельев А.Б., Гарнов С.В. Широкоапертурная система построения фазово-контрастного изображения в терагерцевом диапазоне частот // 14-й Курчатовская междисциплинарная молодежная научная школа – 2016. – P. 207.
- [23] **Ушаков А.А.**, Чижов П.А., Букин В.В., Гарнов С.В., Савельев-Трофимов А.Б. Метод интерферометрии для диагностики терагерцевого излучения // IX всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям - 2015.
- [24] **Ушаков А.А.**, Чижов П.А., Букин В.В. Применение метода интерферометрии для диагностики терагерцевого излучения // Конференция «Ломоносов – 2015» - 2015.
- [25] **Ушаков А.А.**, Чижов П.А., Букин В.В., Гарнов С.В. Стенд для измерения пространственного распределения напряженности электрического поля терагерцевых импульсов методом интерферометрии // Школа-семинар «Волны-2015» - 2015. – С. 47-48.