

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ.П.Н. ЛЕБЕДЕВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Ризаев Георгий Эдуардович

**УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ,
ГЕНЕРИРУЕМОГО В ПЛАЗМЕ
ОДНОЦВЕТНОГО ФИЛАМЕНТА**

Специальность 1.3.19 —
Лазерная физика

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Научный руководитель: **Селезнев Леонид Владимирович**,
доктор физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Лосев Валерий Федорович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
Институт сильноточной электроники СО РАН,
главный научный сотрудник

Федотов Андрей Борисович,
кандидат физико-математических наук,
Кафедра общей физики и волновых процессов фи-
зического факультета МГУ,
доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учре-
ждение науки Федеральный исследовательский
центр «Институт общей физики им. А.М. Прохо-
рова Российской академии наук»

Защита состоится 07 апреля 2025 г. в 10:00 на заседании диссертационного
совета 24.1.262.01 на базе ФИАН по адресу: 119991, Москва, Ленинский пр.,
53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института
имени П.Н. Лебедева РАН и на сайте института www.lebedev.ru.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.262.01,
доктор физико-математических наук

А. С. Золотько

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Филаментацией (от лат. *filamentum* – "нить") называется явление пространственно-временной локализации энергии лазерных импульсов, происходящее в результате действия керровской самофокусировки излучения и дефокусировки на образующейся плазме. Самофокусировка была открыта в 1962 году [1] и с тех пор привлекала к себе высокий интерес. В 1995 году было экспериментально продемонстрировано в воздухе, что самофокусировка ультракоротких импульсов приводит к распространению излучения вдоль тонкого канала [2], за полученным феноменом закрепилось название "филаментация". Плазменные каналы, а также явления сопровождающие филаментацию, такие как коническая эмиссия и генерация суперконтинуума, привлекали широкое внимание и впоследствии на эту тему было написано множество статей и обзоров [3–8].

Одним из явлений, сопровождающих филаментацию, является генерация терагерцового излучения в плазменном канале. Образование излучения субмиллиметрового диапазона в лазерной плазме впервые было предсказано в 1960-х годах [9; 10], а экспериментально при фокусировке ультракоротких импульсов терагерцовое излучение было зарегистрировано в 1993 году [11]. В 2000 году были предложены экспериментальные схемы, позволяющие значительно усилить генерацию терагерцового излучения: это использование при филаментации одновременно импульсов первой и второй гармоник (двухцветная филаментация) [12] и филаментация во внешнем электростатическом поле [13]. В 2002 году было впервые зарегистрировано терагерцовое излучение от протяженного филамента в радиальном направлении [14]. Позднее было обнаружено более мощное по сравнению с радиальным терагерцовое излучение, распространяющееся вперед [15]. Данная конфигурация эксперимента, когда для генерации терагерцового излучения требуется лишь мощный лазерный импульс, является привлекательно простой схемой, и чтобы разграничить со случаем использования дополнительного импульса второй гармоники, ее стали называть *одноцветной* филаментацией.

Направленность и спектральные характеристики терагерцового излучения, генерируемого в плазме одноцветного филамента, стали предметом исследования ряда работ. Было установлено, что угол раствора терагерцового конуса обратно пропорционален квадратному корню из длины плазмен-

ного канала, однако экспериментально это было проверено лишь на частоте 0,1 ТГц [15–17]. В большинстве экспериментов по исследованию направленности терагерцового излучения измерения производились лишь в одной плоскости [15–19], однако в некоторых работах было исследовано двумерное распределение терагерцового излучения и показана отнюдь не конусообразная направленность, а наличие двух выделенных максимумов [20; 21], причем в совершенно другой плоскости. В других работах, где измерялась двумерная картина, было показано, что направленность терагерцового излучения может быть либо конусообразной, либо унимодальной с максимумом на оси [22; 23]. При этом в работах [15; 20; 22] экспериментальные условия (фокусировка, энергия и длительность лазерного импульса) отличались незначительно, а измеренная направленность имела вид осесимметричного конуса, двух максимумов или одного осевого максимума соответственно, то есть было неизвестно, какие параметры определяют структуру терагерцового распределения.

Стоит отметить, что направленность должна зависеть от частоты терагерцового излучения [15; 16; 19]. В то же время, экспериментальные данные по спектральному составу терагерцового излучения в различных условиях не соотносятся между собой [20; 24–28]. Хотя попытки экспериментального анализа влияния параметров лазерного импульса на спектр производились [29; 30], ограниченный угол сбора терагерцового излучения в них мог оказать определяющее влияние на результаты.

Для теоретического описания процесса генерации терагерцового излучения при одноцветной филаментации, были предложены разные модели [16; 19; 31–34], однако ни одна из них не описывает все имеющееся на настоящий момент экспериментальные результаты, особенно конусообразную направленность в одних работах и распространение в виде двух максимумов – в других.

Между тем, одноцветная филаментация могла бы найти практическое применение в ряде задач, связанных с созданием удаленного источника терагерцового излучения, так как легко масштабируется на тераваттные импульсы. Поэтому более полное понимание механизмов его генерации, а также подробная характеристика спектрально-угловой направленности в зависимости от экспериментальных параметров являются на настоящий момент актуальными.

Целью данной работы является экспериментальное определение влияния энергии лазерного импульса и числовой апертуры пучка на генерацию терагерцового излучения в процессе одноцветной филаментации в воздухе.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Исследовать влияние длины плазменного канала, образующегося при филаментации, на углы распространения терагерцового излучения.
2. Разработать схему для регистрации двумерной картины направленности терагерцового излучения из плазмы филамента.
3. Исследовать угловую направленность терагерцового излучения на разных частотах, включая двумерные диаграммы.
4. Изучить спектральные характеристики терагерцового излучения при разных числовых апертурах лазерного пучка.
5. Исследовать направленность терагерцового излучения на разных частотах в случае филаментации во внешнем электростатическом поле.

Научная новизна:

1. Впервые показано значительное различие направленности (полый конус и два максимума) терагерцового излучения, генерируемого при одноцветной филаментации, на разных частотах.
2. Впервые продемонстрировано значительное (на два порядка и более) возрастание доли высокочастотного терагерцового излучения из плазмы одноцветного филамента с увеличением числовой апертуры лазерного пучка.
3. Впервые показано, что переход направленности терагерцового излучения, генерируемого при одноцветной филаментации, от полого конуса к максимуму на оси на высоких частотах происходит при меньшей напряженности внешнего электрического поля, чем на низких частотах.

Научная и практическая значимость отражается в систематизации подхода к управлению спектрально-угловыми характеристиками терагерцового излучения из плазмы лазерного филамента. В то время как одноцветная филаментация является достаточно простым способом генерации тера-

герцового излучения, знание и понимание его пространственной структуры и спектрального состава может получить применение в задачах спектроскопии, а также при потенциальных приложениях генерируемого данным методом излучения в медицине, сфере безопасности и т.д.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Зависимость угла распространения терагерцового излучения θ от его частоты ν и длины плазменного канала L в виде $\theta \sim (L\nu)^{-1/2}$ наблюдается в эксперименте при одноцветной филаментации только в условиях нелинейного режима фокусировки.
2. Осесимметричное кольцевое распределение терагерцового излучения одноцветного филамента, наблюдаемое в дальней зоне, трансформируется в распределение с двумя максимумами вблизи частоты ~ 1 ТГц.
3. При увеличении числовой апертуры лазерного пучка, вследствие повышения плотности плазмы, амплитуда терагерцового сигнала из плазмы одноцветного филамента возрастает, при этом наиболее значительный рост наблюдается на высоких частотах (более 1 ТГц).
4. Регистрируемое терагерцовое излучение из плазмы одноцветного филамента в сильном внешнем электростатическом поле ($\gtrsim 15$ кВ/см) на высоких частотах ($\gtrsim 10$ ТГц) распространяется в дальней зоне в полый конус, в отличие от более низких частот, где характерен максимум на оси.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением современного экспериментального оборудования, подтверждается повторяемостью результатов с допустимой степенью точности, а также хорошей корреляцией экспериментальных данных с результатами численных расчетов. Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались автором лично на следующих международных конференциях:

1. XIV International Conference on pulsed lasers and laser applications «AMPL-2019» (15–20 сентября 2019 г., Томск, Россия)
2. IX Международная конференция по фотонике и информационной оптике (29–31 января 2020 г., Москва, Россия)

3. 19th International Conference Laser Optics «ICLO-2020» (2–6 ноября 2020 г., Санкт-Петербург, Россия)
4. Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2021» (12–23 апреля 2021 г., Москва, Россия)
5. XV International conference on pulsed lasers and laser applications «AMPL-2021» (12–17 сентября 2021 г., Томск, Россия)
6. V International Conference on Ultrafast Optical Science «UltrafastLight-2021» (4–8 октября 2021 г., Москва, Россия)
7. 20th International Conference Laser Optics «ICLO-2022» (20–24 июня 2022 г., Санкт-Петербург, Россия)
8. VI International Conference on Ultrafast Optical Science «UltrafastLight-2022» (3–7 октября 2022 г., Москва, Россия)
9. International Conference «Terahertz and microwave radiation: generation, detection and applications – TERA-2023» (27 февраля – 2 марта 2023 г., Москва, Россия)
10. XVI International conference on pulsed lasers and laser applications «AMPL-2023» (10–15 сентября 2023 г., Томск, Россия)
11. International Conference on Laser Filamentation «COFIL 2024» (25–29 августа 2024 г., Тяньцзинь, Китай)

Отдельные результаты, представленные в диссертационной работе и вошедшие в цикл работ Д. В. Мокроусовой, Д. В. Пушкарева, Г. Э. Ризаева под названием «Направленность терагерцового излучения, генерируемого в плазме фемтосекундного лазерного филамента» были удостоены Премии имени Н. Г. Басова по результатам конкурса, посвященного 100-летию со дня рождения; а вошедшие в цикл работ И. А. Николаевой, Д. В. Пушкарева, Г. Э. Ризаева, Д. Е. Шипило «Терагерцовое излучение фемтосекундного филамента в воздухе» были отмечены Премией им. Н. Г. Басова конкурса молодых научных работ ФИАН 2024 года.

Личный вклад. Все используемые в диссертации экспериментальные результаты были получены автором лично или при его непосредственном участии. Автор участвовал в постановке задач исследований, создании и разработке схем экспериментов. Автор производил обработку и анализ полученных экспериментальных данных, участвовал в обсуждении и интерпрета-

ции результатов, написании статей, выступал на конференциях с докладами. Результаты численных расчетов, приведенные в диссертации и опубликованные в статьях [А4;А5;А11;А13], получены О. Г. Косаревой, Н. А. Пановым, Д. Е. Шипило и И. А. Николаевой.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изданы в 14 публикациях в журналах, индексируемых в международной базе данных Web of Science, а также вошли в главу коллективной монографии. Список публикаций автора по теме диссертации приведен на стр. 17 – 19.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, и заключения. Полный объём диссертации составляет 116 страниц с 66 рисунками. Список литературы содержит 142 наименования.

Основное содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы защищаемые положения, научная новизна и практическая значимость представляемой работы, а также отмечен личный вклад автора.

Первая глава представляет собой обзор литературы по теме диссертации. Раздел 1.1 посвящен физике процесса филаментации лазерных импульсов, в нем описаны явления самофокусировки излучения и последующего образования плазмы, самосогласованное распространение импульсов, уделено внимание особенностям филаментации сфокусированных импульсов. Раздел 1.2 описывает явления, сопровождающие филаментацию лазерных импульсов, такие как образование суперконтинуума и конической эмиссии, генерация высоких гармоник. Также в данном разделе приводятся различные применения плазмы лазерных филаментов. В разделе 1.3 рассматривается генерация терагерцового излучения в филаментационной плазме. Представлены различные схемы, используемые для генерации терагерцового излучения, такие как филаментация во внешнем электростатическом поле и двухцветная филаментация. Особое внимание уделено генерации терагерцового излучения в процессе одноцветной филаментации, произведен обзор работ, в которых измерялись свойства такого излучения, а также предлагались теоретические

описания этого процесса. По итогам главы сделан вывод об актуальности темы исследования, а также об отсутствии единой картины, позволяющей обобщить имеющиеся в литературе результаты о свойствах терагерцового излучения, генерируемого в процессе одноцветной филаментации.

Во **второй главе** приведено описание экспериментальной установки. Представлено устройство лазерной системы, генерирующей импульсы с центральной длиной волны 744 нм, длительностью 90 фс и энергией до 8 мДж. Описаны принципы работы болометра, используемого для регистрации терагерцового излучения, а также приведены технические характеристики всех используемых приборов и оборудования.

Третья глава посвящена исследованию углов распространения терагерцового излучения. В данной главе экспериментально измерены зависимости углов распространения терагерцового излучения от длины плазменного канала (Раздел 3.1) и частоты терагерцового излучения (Раздел 3.2). Продемонстрировано, что при регистрации широкополосного терагерцового излучения, углы распространения практически не зависят от длины плазменного канала, которая заметно возрастает при увеличении энергии лазерного импульса (Рис. 1). Если регистрировать направленность терагерцового излучения на отдельных частотах, то в случае длинных филаментов угол распростране-

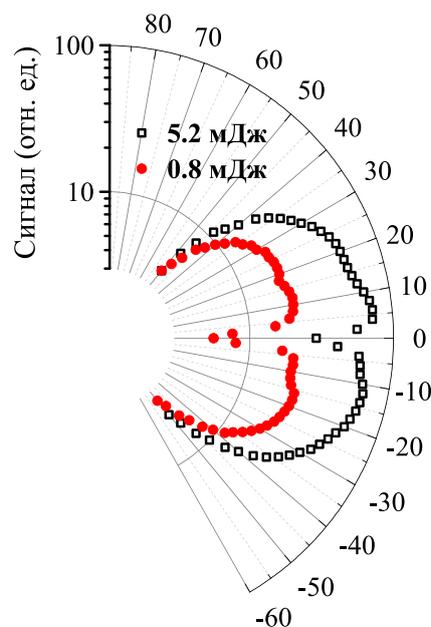


Рис. 1 — Угловое распределение терагерцового излучения, регистрируемое широкополосным приемником, для двух энергий лазерного импульса.

Числовая апертура лазерного пучка 0,01.

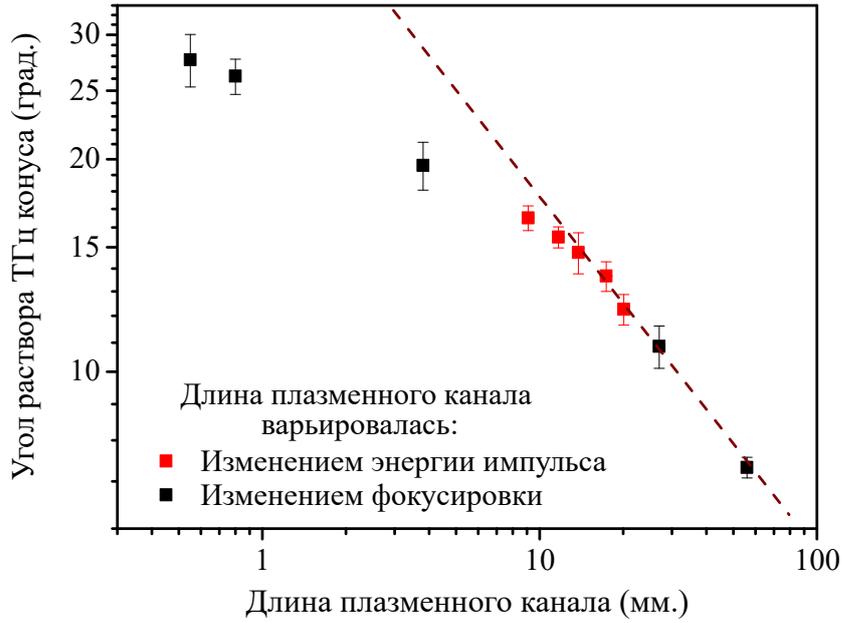


Рис. 2 — Зависимость угла раствора конуса направленности излучения с частотой 1 ТГц θ от протяженности плазменного канала L . Пунктирная линия соответствует зависимости $\theta \sim 1/\sqrt{L}$.

ния θ терагерцового излучения с частотой ν зависит от длины L плазменного канала как $\theta \sim 1/\sqrt{\nu L}$. Однако в случае коротких филаментов эта зависимость нарушается. На Рис. 2 показана зависимость углов распространения излучения с частотой 1 ТГц от длины плазменного канала, причем последняя в эксперименте варьировалась как путем изменения энергии импульса, так и путем изменения числовой апертуры лазерного пучка. Путем анализа спектра лазерного импульса после филаментации в диссертации сделан вывод о соответствии начала отклонения от зависимости $\theta \sim 1/\sqrt{\nu L}$ переходу от нелинейного к линейному режиму фокусировки [35]. Данный факт объясняется тем, что в случае линейного режима фокусировки на временах, характерных для процесса генерации терагерцового излучения, происходит резкая рекомбинация плазмы [36], и геометрические размеры филамента, в том числе его длина, являются нестационарными. Также в диссертации отмечен тот факт, что поскольку углы распространения для разных терагерцовых частот различаются, то и наблюдаемый спектр терагерцового излучения, измеряемый под разными углами к оси, будет разным. На Рис. 3, к примеру, даны наблюдаемые спектры терагерцового излучения под углами 4° , 16° и 28° к оси, максимум наблюдаемого спектра смещается от 1 до 0,1 ТГц.

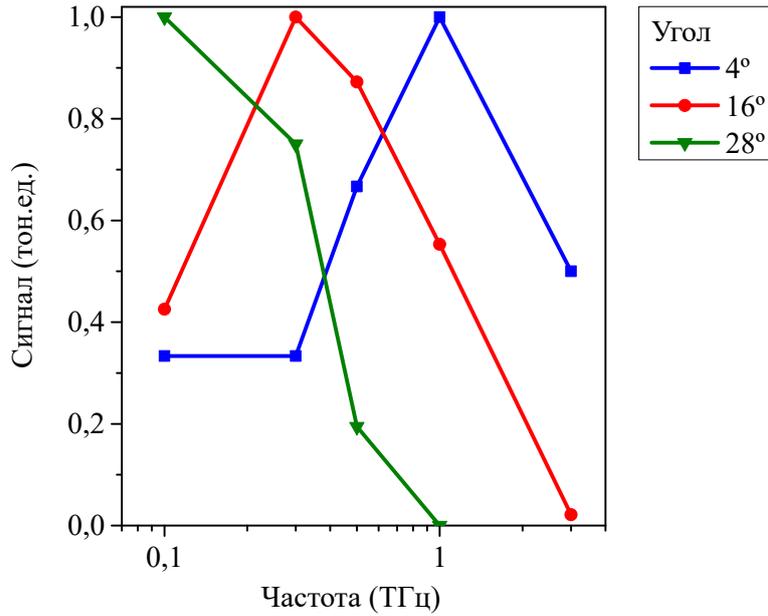


Рис. 3 — Наблюдаемые спектры терагерцового излучения под разными углами. Числовая апертура лазерного пучка 0,02; энергия лазерного импульса 1,5 мДж.

Четвертая глава посвящена исследованию двумерной картины направленности терагерцового излучения. В разделе 4.1 описана техника измерения двумерных угловых распределений с помощью болометра. В разделе 4.2 рассматривается нарушение осевой симметрии направленности терагерцового излучения в некотором диапазоне частот, зарегистрированное в эксперименте. На Рис. 4 представлены результаты измерений двумерного углового распределения терагерцового излучения на разных частотах в одних условиях эксперимента. На низких терагерцовых частотах (0,3 ТГц, Рис. 4а) направленность имеет кольцеобразную структуру. На частоте 0,5 ТГц (Рис. 4б) заметно нарушение осевой симметрии распределения, кольцо приобретает некоторую модуляцию. На частоте 1 ТГц (Рис. 4в) распределение имеет вид двух ярковыраженных максимумов, расположенных на оси, перпендикулярной плоскости поляризации лазерного импульса, являющейся горизонтальной. На частоте 3 ТГц подобные два максимума наблюдаются уже на фоне слабого кольца (Рис. 4г), а на более высоких частотах распределение снова может быть охарактеризовано кольцеобразной формой (Рис. 4д,е).

Отсутствие осевой симметрии в распределении излучения с частотой 1 ТГц не зависит от энергии лазерного импульса и условий его фокусировки

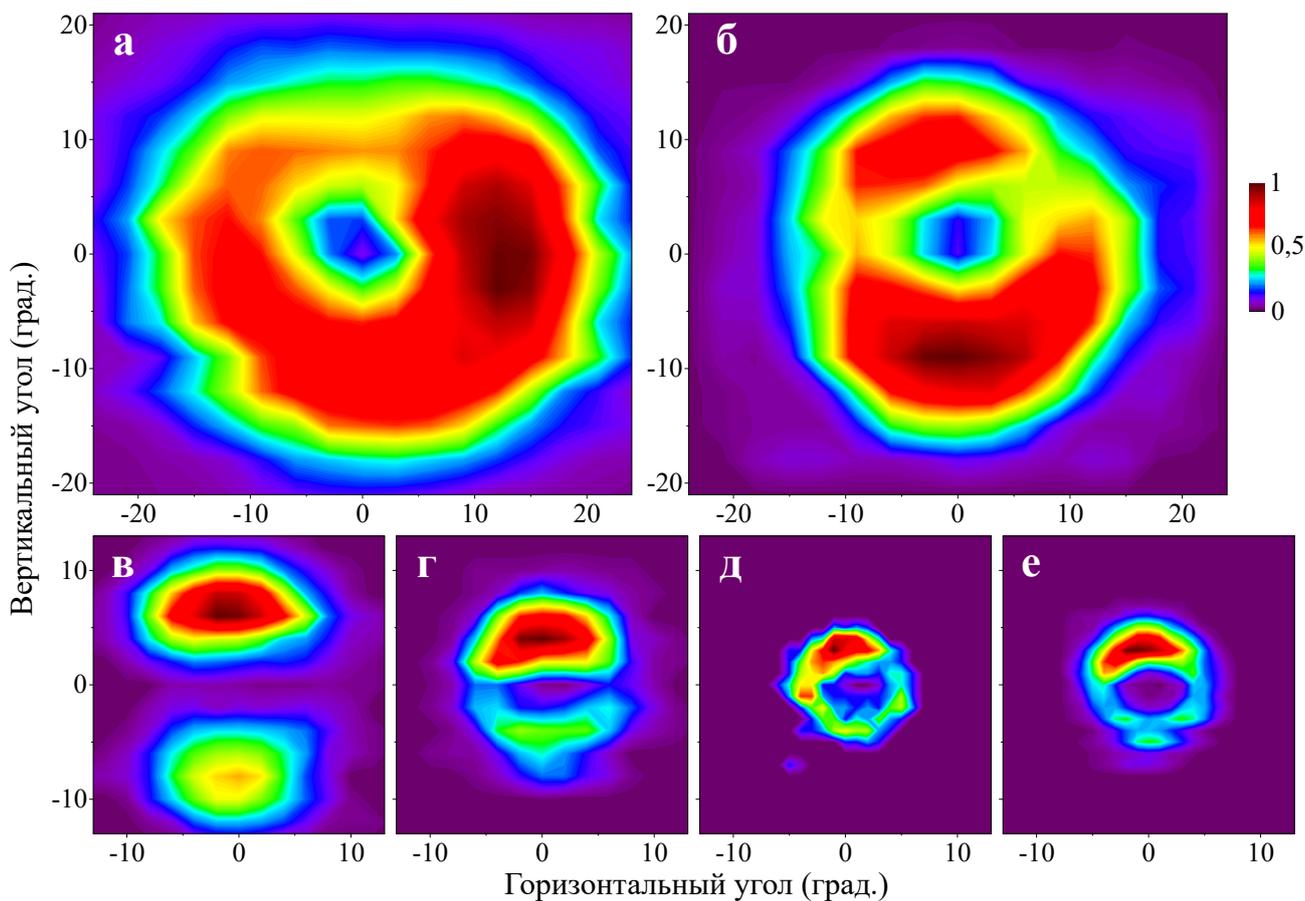


Рис. 4 — Двумерные угловые распределения терагерцового излучения на разных частотах: а) 0,3 ТГц; б) 0,5 ТГц; в) 1 ТГц; г) 3 ТГц; д) 10 ТГц; е) 5–12 ТГц. Числовая апертура лазерного пучка 0,012; энергия лазерного импульса 3 мДж.

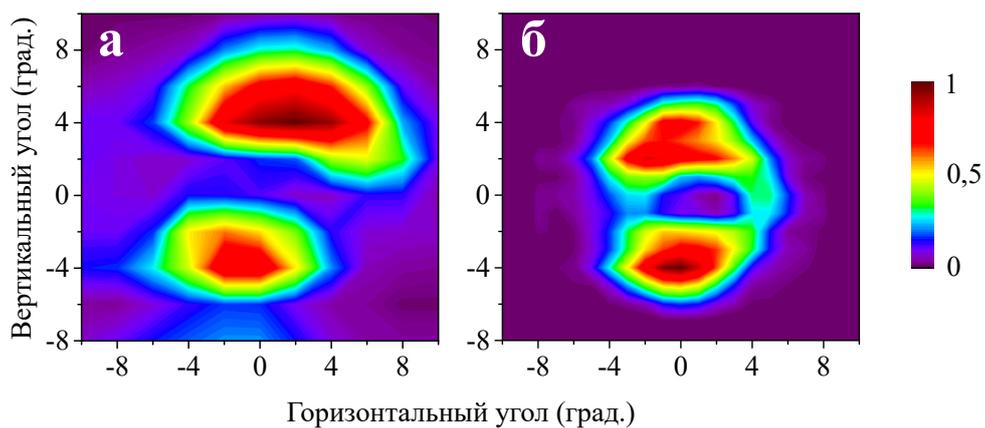


Рис. 5 — Двумерные угловые распределения терагерцового излучения с частотой 1 ТГц при энергии лазерного импульса: а) 1,5 мДж; б) 8 мДж. Числовая апертура лазерного пучка 0,004.

– на Рис. 5 приведена аналогичная структура углового распределения, измененная при другой фокусировке и различной энергии лазерного импульса.

Зависимость структуры направленности от частоты возможна, если в генерации терагерцового излучения в плазме филамента участвуют два механизма, один из которых связан со световым давлением и дает дипольное излучение, а другой – с пондеромоторной силой и дает квадрупольное излучение. И если световое давление не зависит от исходной лазерной поляризации, то квадрупольное излучение будет связано с движением электронов по направлению электрического поля световой волны. Итоговая картина распределения терагерцового излучения представляет из себя результат интерференции от имеющих дипольного и квадрупольного источников, и если фаза между ними близка к $\pi/2$, то существует диапазон частот, где генерируемое излучение имеет направленность в виде двух максимумов, наблюдаемых в эксперименте.

Раздел 4.3 посвящен исследованию спектра терагерцового излучения. Интегрируя терагерцовые сигналы по двумерному угловому распределению, можно измерить энергию терагерцового излучения, причем подобная методика позволит учесть терагерцовое излучение, распространяющееся под значительными углами к оси. Если измерить в одних условиях угловые распределения с разными узкополосными фильтрами и учесть спектральную ширину фильтров и чувствительность болометра, то можно воспроизвести спектр те-

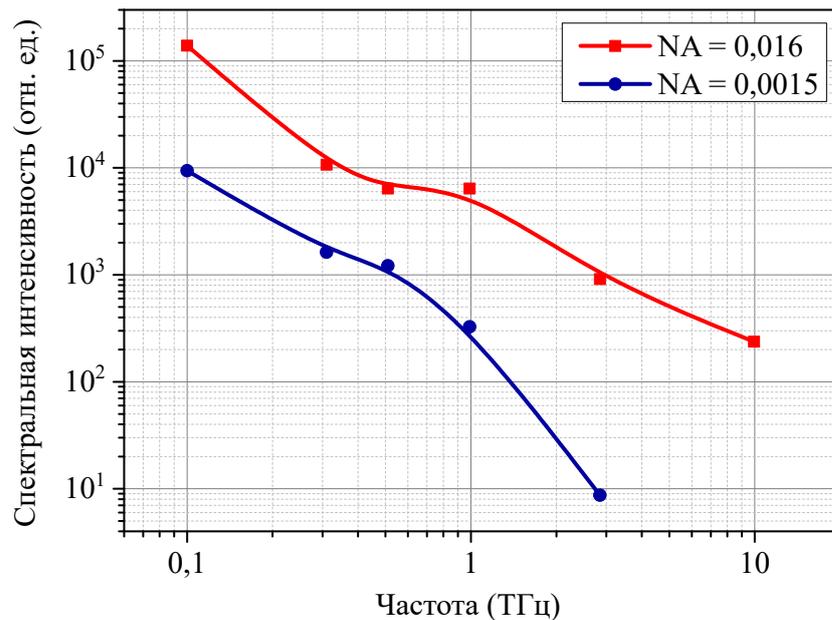


Рис. 6 — Спектр терагерцового излучения при двух различных числовых апертурах лазерного пучка. Энергия лазерного импульса 3 мДж.

рагерцового излучения. Спектры, измеренные при двух числовых апертурах лазерного пучка, представлены на Рис. 6. Для обеих фокусировок спектр имеет максимум в области низких частот, с ростом терагерцовой частоты спектральная интенсивность излучения монотонно падает. При использовании жесткой фокусировки ($NA = 0,016$) в области частот менее 1 ТГц спектральная интенсивность возрастает на порядок, по сравнению с менее жесткой фокусировкой ($NA = 0,0015$). На частоте 3 ТГц различие в амплитудах составляет более двух порядков, а на 10 ТГц при числовой апертуре пучка 0,002 терагерцовый сигнал в экспериментах не регистрировался.

В разделе 4.4 исследуются угловые распределения терагерцового излучения при одноцветной филаментации во внешнем электростатическом поле. В эксперименте электрическое поле в области филаментации создавалось с помощью двух плоских электродов, на которые подавалось высокое напряжение. Двумерные угловые распределения терагерцового излучения на разных частотах при напряженности внешнего поля 15 кВ/см приведены на Рис. 7,

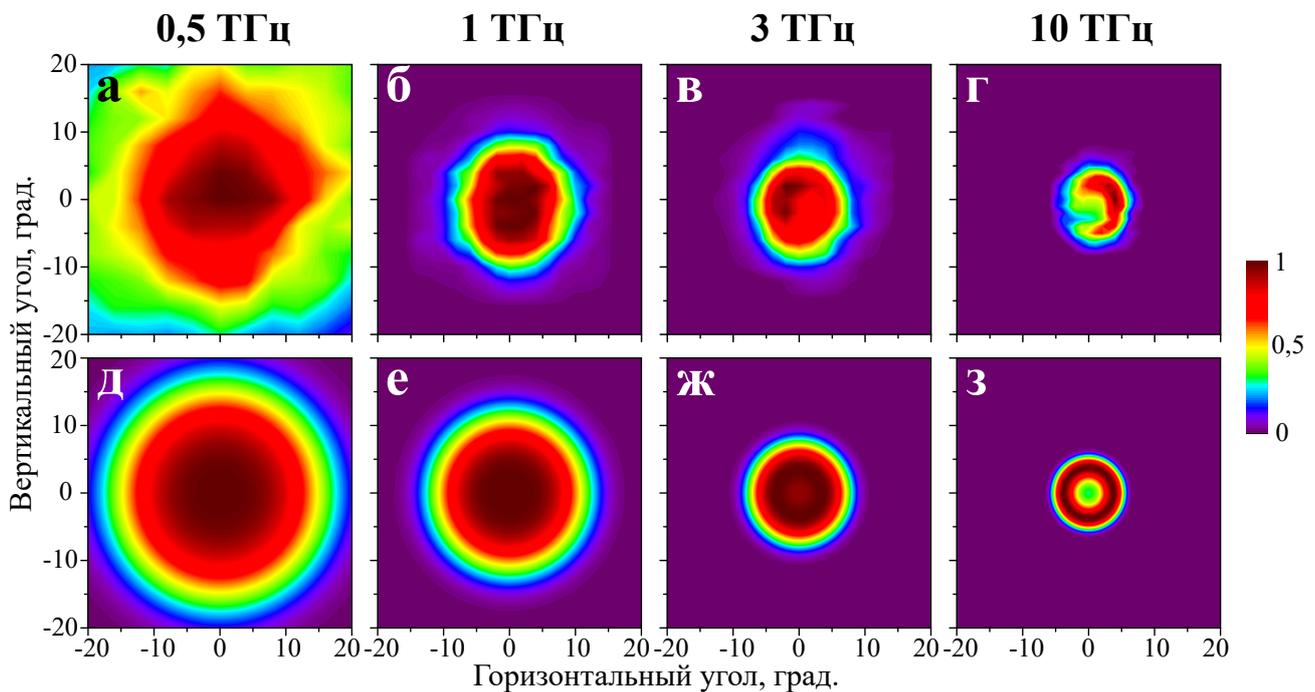


Рис. 7 — Двумерные угловые распределения терагерцового излучения, генерируемого при филаментации во внешнем электрическом поле на разных частотах: (а,д) — 0,5 ТГц; (б,е) — 1 ТГц; (в,ж) — 3 ТГц; (г,з) — 10 ТГц.

(а–г) — результаты численного моделирования, (д–з) — результаты эксперимента. Числовая апертура лазерного пучка 0,012; энергия лазерного импульса 1,8 мДж.

верхний ряд соответствует экспериментальным измерениям, нижний ряд – результатам численного моделирования, проведенного О. Косаревой, Н. Пановым, Д. Шипило, И. Николаевой. На частотах 0,5 и 1 ТГц (Рис. 7а,б,д,е) диаграмма направленности имеет максимум на оси, при этом на частоте 1 ТГц этот максимум имеет плоскую вершину. На частоте 3 ТГц (Рис. 7в,ж) плоская вершина начинает приобретать некоторую модуляцию, а на частоте 10 ТГц (Рис. 7г,з) распределение начинает приобретать кольцеобразную форму.

В эксперименте был дополнительно исследован вопрос о переходе диаграммы направленности от полого конуса к максимуму на оси по мере увеличения электрического поля на разных частотах. При низких напряженностях внешнего поля вклады двух механизмов (т.е. механизм генерации в отсут-

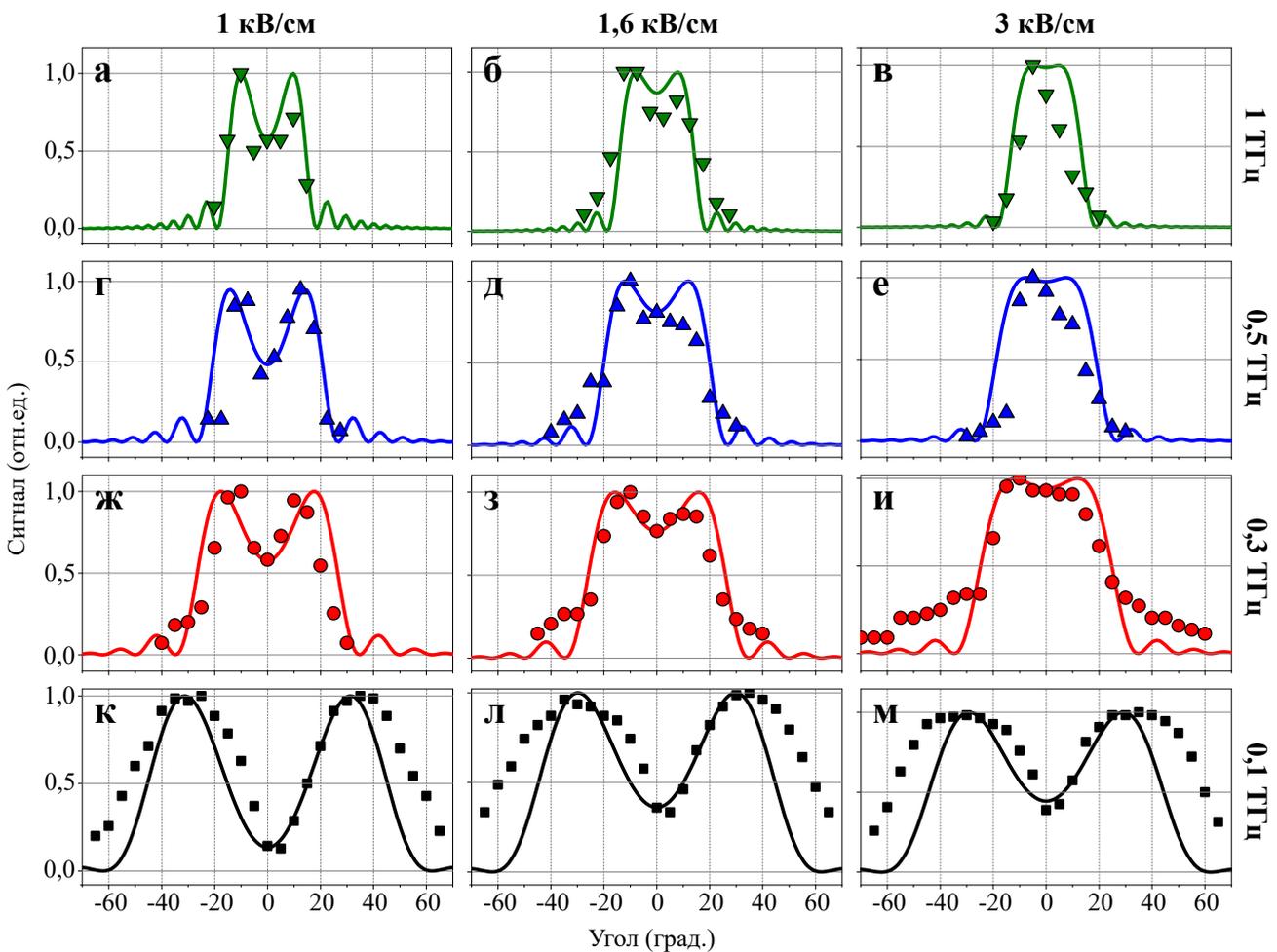


Рис. 8 — Угловое распределение терагерцового излучения при различной напряженности внешнего поля на частоте 1 ТГц (а-в), 0,5 ТГц (г-е), 0,3 ТГц (ж-и), 0,1 ТГц (к-м). Точки соответствуют экспериментальным данным, линии – численному моделированию. Числовая апертура лазерного пучка 0,008. Энергия лазерного импульса 1 мДж.

ствие поля и механизм во внешнем поле) в генерацию терагерцового излучения могут быть сопоставимы, что влияет на диаграмму его направленности. В эксперименте были получены угловые распределения терагерцового излучения при напряженности поля 1 кВ/см, 1,6 кВ/см и 3 кВ/см, при этом, в силу осесимметричности всех полученных выше распределений, измерения выполнялись только в горизонтальной плоскости (Рис. 8).

При напряженности поля 1 кВ/см (Рис. 8а,г,ж,к) на всех исследованных частотах еще наблюдается выраженная кольцеобразная направленность, хотя на частотах 0,3–1 ТГц глубина провала на оси составляет примерно половину от уровня максимума. При напряженности 1,6 кВ/см (Рис. 8б,д,з) глубина провала на этих частотах продолжает уменьшаться, а при поле 3 кВ/см практически исчезает вовсе (Рис. 8в,е,и), в то время как на частоте 0,1 ТГц при поле 3 кВ/см остаются два выраженных максимума. Как было показано в численном моделировании [37], вклад внешнего поля в генерацию терагерцового излучения практически не зависит от частоты. В то же время в предыдущем разделе диссертации было показано, что интенсивность терагерцового излучения, генерируемого в отсутствие внешнего поля, существенно растет с уменьшением его частоты (Рис. 6). Поэтому чтобы вклад механизма генерации во внешнем поле был сопоставим с вкладом от генерации в отсутствие поля, на низких терагерцовых частотах необходимы более высокие напряженности поля. Соответственно, на более высоких частотах переход от кольцеобразной структуры к максимуму на оси осуществляется при меньших напряженностях электрического поля.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Экспериментально показано, что обратная корневая зависимость угла распространения узкополосного терагерцового излучения от длины плазменного канала выполняется при филаментации в нелинейном режиме фокусировки, а в случае регистрации широкополосного терагерцового излучения из плазмы одноцветного филамента данная зависимость не наблюдается.
2. Экспериментально показано, что при одноцветной филаментации угловое распределение терагерцового излучения вблизи частоты 1 ТГц имеет вид двух максимумов, в то время как на частотах 0,3 и

10 ТГц излучение распространяется в относительно симметричный конус с минимумом на оси, что сохраняется при изменении числовой апертуры от 0,0015 до 0,02 и при изменении энергии лазерного импульса от 0,6 до 8 мДж.

3. При увеличении числовой апертуры от 0,0015 до 0,016 спектральная плотность мощности терагерцового излучения на частотах <1 ТГц возрастает на порядок, а на частотах $\gtrsim 3$ ТГц – более, чем на два порядка, при этом максимум наблюдаемого спектра терагерцового излучения из плазмы одноцветного филамента может смещаться от 0,1 до 1 ТГц при изменении угла регистрации от 28° до 4° относительно оптической оси.
4. При переходе от филаментации в отсутствие поля к филаментации во внешнем поле, на низких терагерцовых частотах (0,1 ТГц) для появления максимума на оси требуются более высокие напряженности поля (более 3 кВ/см), а при высокой напряженности внешнего электростатического поля (15 кВ/см) диаграмма направленности терагерцового излучения на высоких ($\gtrsim 10$ ТГц) частотах имеет кольцеобразную структуру, в то время как на низких ($\lesssim 1$ ТГц) частотах наблюдается максимум.

Публикации автора по теме диссертации

Список статей в рецензируемых журналах, индексируемых в международной базе данных Web of Science:

- A1. A. V. Koribut, G. E. Rizaev, D. V. Mokrousova, S. A. Savinov, A. A. Reutov, Y. A. Mityagin, L. V. Seleznev & A. A. Ionin «Similarity of angular distribution for THz radiation emitted by laser filament plasma channels of different lengths». *Optics Letters*, 45(14), 4009–4011 (2020).
- A2. Y. E. Geints, D. V. Mokrousova, D. V. Pushkarev, G. E. Rizaev, L. V. Seleznev, I. Y. Geints, A. A. Ionin & A. A. Zemlyanov «Energy limit for linear-to-nonlinear femtosecond laser pulse focusing in air». *Optics & Laser Technology*, 143, 107377 (2021).

- A3. Y. E. Geints, A. A. Ionin, D. V. Mokrousova, D. V. Pushkarev, G. E. Rizaev, L. V. Seleznev, A. A. Zemlyanov & I. Y. Geints «Spectral-angular patterns and energy threshold for linear-to-nonlinear femtosecond laser pulse focusing in air». *Laser Physics*, 31(7), 075402 (2021).
- A4. D. E. Shipilo, I. A. Nikolaeva, D. V. Pushkarev, G. E. Rizaev, D. V. Mokrousova, A. V. Koribut, Ya. V. Grudtsyn, N. A. Panov, L. V. Seleznev, W. Liu, A. A. Ionin, and O. G. Kosareva «Balance of emission from THz sources in DC-biased and unbiased filament in air», *Optics Express*, 29 (25), 40687–40698 (2021).
- A5. I. A. Nikolaeva, D. E. Shipilo, D. V. Pushkarev, G. E. Rizaev, D. V. Mokrousova, A. V. Koribut, Y. V. Grudtsyn, N. A. Panov, L. V. Seleznev, W. Liu, A. A. Ionin, and O. G. Kosareva «Flat-top THz directional diagram of DC-biased filament». *Optics Letters*, 46 (21) 5497–5500 (2021).
- A6. Leonid V. Seleznev, Georgy E. Rizaev, Dmitrii V. Pushkarev, Andrey V. Koribut, Yulia A. Gerasimova, Yakov V. Grudtsyn, Sergey A. Savinov, Yury A. Mityagin, Daria V. Mokrousova, and Andrey A. Ionin «Frequency-angular distribution for terahertz emission of single-color laser filament plasma under an electrostatic field». *JOSA B*, 38(7), 2168–2171 (2021).
- A7. G. E. Rizaev, D. V. Pushkarev, A. V. Koribut, Ya. V. Grudtsyn, D. V. Mokrousova, S. A. Savinov, Yu. A. Mityagin, L. V. Seleznev, O. G. Kosareva and A. A. Ionin «Transformation of the frequency-angular spectrum of THz emissions produced by a single-color laser filament under an external electrostatic field of various strength». *Laser Physics Letters*, 18, 115401 (2021).
- A8. G. Rizaev, D. Mokrousova, D. Pushkarev, D. Shipilo, I. Nikolaeva, N. Panov, L. Seleznev, O. Kosareva, A. Ionin «Breakup of Axial Symmetry of Terahertz Emission from Single-Color Filament Plasma». *JETP Letters*, 115(11), 699–702 (2022).
- A9. G. E. Rizaev, D. V. Mokrousova, D. V. Pushkarev, L. V. Seleznev, & A. A. Ionin «Terahertz Angular Distribution from Single-Color

- Filament Plasma at Various Laser Beam Numerical Apertures». *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 49(7), 191–194 (2022).
- A10. G. E. Rizaev, L. V. Seleznev, D. V. Mokrousova, D. V. Pushkarev, & A. A. Ionin «Terahertz emission pattern from a single-color filament plasma». *Optics Letters*, 47(22), 5917–5920 (2022).
- A11. Georgy Rizaev, Leonid Seleznev, Irina Nikolaeva, Daniil Shipilo, Nikolay Panov, Dmitrii Pushkarev, Daria Mokrousova, Andrey Ionin, Olga Kosareva «Observation of conical emission from DC-biased filament at 10 THz». *Optics Letters*, 48(12), 3147–3150 (2023).
- A12. Georgy Rizaev, Dmitrii Pushkarev and Leonid Seleznev «Spectrum of Terahertz Emission from Single-Color Filament Plasma under Different Laser Beam Focusing». *Photonics*, 10(10), 1161 (2023).
- A13. I. A. Nikolaeva, D. E. Shipilo, N. A. Panov, G. E. Rizaev, D. V. Pushkarev, D. V. Mokrousova, L. V. Seleznev, N. Zhang, W. Liu & O. G. Kosareva «Terahertz beam with radial or orthogonal to laser polarization from a single-color femtosecond filament». *Optics Express*, 31(25), 41406-41419 (2023).
- A14. Georgy Rizaev, Dmitrii Pushkarev, Maximilian Levus, Daria Mokrousova, Leonid Seleznev «Two-dimensional pattern and energy characteristics of terahertz emission during single-color laser filamentation». *Physics Letters A*, 517, 129664 (2024).

Глава в коллективной монографии:

- Б1. А. В. Балакин, Я. В. Грудцын, А. А. Ионин, О. Г. Косарева, Вейвей Лиу, Д. В. Мокроусова, И. А. Николаева, Н. А. Панов, Д. В. Пушкарёв, Г. Э. Ризаев, А. М. Салецкий, Л. В. Селезнев, Д. Е. Шипило, А. П. Шкуринов «Широкополосное терагерцовое излучение фемтосекундного филамента для удаленного зондирования», глава в коллективной монографии «Терагерцовая фотоника» под ред. В. Я. Панченко, А. П. Шкуринова. М.: РАН, с. 712 (2023). ISBN 978-5-907645-40-0; с. 30 – 109.

Список литературы

1. Г. А. Аскарьян. Воздействие градиента поля интенсивного электромагнитного луча на электроны и атомы. *Ж. эксперим. и теор. физ.*, 42(6):1567, 1962.
2. A. Braun, G. Korn, X. Liu, D. Du, J. Squier, and G. Mourou. Self-channeling of high-peak-power femtosecond laser pulses in air. *Optics letters*, 20(1):73–75, 1995.
3. S. L. Chin, S. A. Hosseini, W. Liu, Q. Luo, F. Théberge, N. Aközbek, A. Becker, V. P. Kandidov, O. G. Kosareva, and H. Schröder. The propagation of powerful femtosecond laser pulses in optical media: physics, applications, and new challenges. *Canadian journal of physics*, 83(9):863–905, 2005.
4. Arnaud Couairon and André Mysyrowicz. Femtosecond filamentation in transparent media. *Physics reports*, 441(2-4):47–189, 2007.
5. L. Bergé, S. Skupin, R. Nuter, J. Kasparian, and J.-P. Wolf. Ultrashort filaments of light in weakly ionized, optically transparent media. *Reports on progress in physics*, 70(10):1633, 2007.
6. В. П. Кандидов, С. А. Шленов, and О. Г. Косарева. Филаментация мощного фемтосекундного лазерного излучения. *Квантовая электроника*, 39(3):205–228, 2009.
7. S. L. Chin, T.-J. Wang, C. Marceau, J. Wu, J. S. Liu, O. Kosareva, N. Panov, Y. P. Chen, J.-F. Daigle, S. Yuan, A. Azarm, W. W. Liu, T. Seideman, H. P. Zeng, M. Richardson, R. Li, and Z. Z. Xu. Advances in intense femtosecond laser filamentation in air. *Laser Physics*, 22:1–53, 2012.
8. Aurélien Houard and André Mysyrowicz. Femtosecond laser filamentation and applications. *Light Filaments: Structures, challenges and applications*, pages 11–30, 2021.
9. Г. А. Аскарьян. Черенковское и переходное излучение от электромагнитных волн. *ЖЭТФ*, 42(5):1360, 1962.
10. Г. А. Аскарьян. Излучение радиоволн при модуляции интенсивного луча света в среде. *ЖЭТФ*, 45(2):643, 1964.
11. H. Hamster, A. Sullivan, S. Gordon, W. White, and R. W. Falcone. Subpicosecond, electromagnetic pulses from intense laser-plasma interaction. *Physical review letters*, 71(17):2725, 1993.

12. D. J. Cook and R. M. Hochstrasser. Intense terahertz pulses by four-wave rectification in air. *Optics letters*, 25(16):1210–1212, 2000.
13. T. Löffler, F. Jacob, and H. G. Roskos. Generation of terahertz pulses by photoionization of electrically biased air. *Applied Physics Letters*, 77(3):453–455, 2000.
14. S. Tzortzakis, G. Méchain, G. Patalano, Y.-B. André, B. Prade, M. Franco, A. Mysyrowicz, J.-M. Munier, M. Gheudin, G. Beaudin, and P. Encrenaz. Coherent subterahertz radiation from femtosecond infrared filaments in air. *Optics Letters*, 27(21):1944–1946, 2002.
15. C. D’Amico, A. Houard, M. Franco, B. Prade, A. Mysyrowicz, A. Couairon, and V. T. Tikhonchuk. Conical forward THz emission from femtosecond-laser-beam filamentation in air. *Physical review letters*, 98(23):235002, 2007.
16. C. D’Amico, A. Houard, S. Akturk, Y. Liu, J. Le Bloas, M. Franco, B. Prade, A. Couairon, V. T. Tikhonchuk, and A. Mysyrowicz. Forward THz radiation emission by femtosecond filamentation in gases: theory and experiment. *New Journal of Physics*, 10(1):013015, 2008.
17. Aurélien Houard. *Filamentation Laser Femtoseconde dans l’Air et Application au Guidage de Decharges Electriques et à la Generation de Rayonnement Terahertz*. PhD thesis, Ecole Polytechnique X, 2008.
18. Y. Liu, A. Houard, B. Prade, S. Akturk, A. Mysyrowicz, and V. T. Tikhonchuk. Terahertz radiation source in air based on bifilamentation of femtosecond laser pulses. *Physical Review Letters*, 99(13):135002, 2007.
19. A. P. Shkurinov, A. S. Sinko, P. M. Solyankin, A. V. Borodin, M. N. Esaulkov, V. V. Annenkov, I. A. Kotelnikov, I. V. Timofeev, and X.-C. Zhang. Impact of the dipole contribution on the terahertz emission of air-based plasma induced by tightly focused femtosecond laser pulses. *Physical Review E*, 95(4):043209, 2017.
20. R. A. Akhmedzhanov, I. E. Ilyakov, V. A. Mironov, E. V. Suvorov, D. A. Fadeev, and B. V. Shishkin. Plasma mechanisms of pulsed terahertz radiation generation. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 52(7):482–493, 2009.
21. E. Suvorov, R. Akhmedzhanov, D. Fadeev, I. Ilyakov, V. Mironov, and B. Shishkin. On the peculiarities of THz radiation generation in a laser induced plasmas. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 32:1243–1252, 2011.

22. G. E. Rizaev, D. V. Pushkarev, A. V. Koribut, M. V. Levus, Y. V. Grudtsyn, D. V. Mokrousova, and L. V. Seleznev. Unimodal distribution of terahertz emission from single-color filament plasma. *Laser Physics Letters*, 20(11):115401, 2023.
23. Л. В. Селезнев, Г. Э. Ризаев, Д. В. Пушкарев, М. В. Левусь, А. В. Корибут, and А. А. Ионин. Управление поляризацией терагерцового излучения, генерируемого при одноцветной филаментации, с помощью амплитудной модуляции лазерного пучка. *Оптика и спектроскопия*, 132(2):137–141, 2024.
24. Y. Zhang, Y. Chen, C. Marceau, W. Liu, Z.-D. Sun, S. Xu, F. Théberge, M. Châteauneuf, J. Dubois, and S. L. Chin. Non-radially polarized THz pulse emitted from femtosecond laser filament in air. *Optics Express*, 16(20):15483–15488, 2008.
25. F. Jahangiri, M. Hashida, S. Tokita, T. Nagashima, M. Hangyo, and S. Sakabe. Directional elliptically polarized terahertz emission from air plasma produced by circularly polarized intense femtosecond laser pulses. *Applied Physics Letters*, 99(16), 2011.
26. Y. Minami, T. Kurihara, K. Yamaguchi, M. Nakajima, and T. Suemoto. Longitudinal terahertz wave generation from an air plasma filament induced by a femtosecond laser. *Applied Physics Letters*, 102(15), 2013.
27. H.-W. Du, H. Hoshina, C. Otani, and K. Midorikawa. Terahertz waves radiated from two noncollinear femtosecond plasma filaments. *Applied Physics Letters*, 107(21), 2015.
28. Y. Zhang, W. Sun, and Y. Zhang. Spectra modulation of terahertz radiation from air plasma. In *Infrared, Millimeter-Wave, and Terahertz Technologies IV*, volume 10030, pages 335–340. SPIE, 2016.
29. G. E. Rizaev, Ya. V. Grudtsyn, A. A. Ionin, O. G. Kosareva, A. V. Koribut, Yu. A. Mityagin, D. V. Mokrousova, N. A. Panov, S. A. Savinov, L. V. Seleznev, and D. E. Shipilo. Comparison of terahertz radiation spectra emitted from single-color IR and UV filaments. In *XIV International Conference on Pulsed Lasers and Laser Applications*, volume 11322, pages 504–508. SPIE, 2019.
30. D. V. Mokrousova, S. A. Savinov, L. V. Seleznev, G. E. Rizaev, A. V. Koribut, Yu. A. Mityagin, A. A. Ionin, I. A. Nikolaeva, Shipilo D. E., N. A. Panov, A. A.

- Ushakov, A. B. Savel'ev, O. G. Kosareva, and A. P. Shkurinov. Tracing air-breakdown plasma characteristics from single-color filament terahertz spectra. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 41(9):1105–1113, 2020.
31. C.-C. Cheng, E. M. Wright, and J. V. Moloney. Generation of electromagnetic pulses from plasma channels induced by femtosecond light strings. *Physical Review Letters*, 87(21):213001, 2001.
 32. P. Sprangle, J. R. Penano, B. Hafizi, and C. A. Kapetanakos. Ultrashort laser pulses and electromagnetic pulse generation in air and on dielectric surfaces. *Physical Review E*, 69(6):066415, 2004.
 33. N. A. Zharova, V. A. Mironov, and D. A. Fadeev. Anisotropic effects of terahertz emission from laser sparks in air. *Physical Review E*, 82(5):056409, 2010.
 34. N. A. Panov, O. G. Kosareva, V. A. Andreeva, A. B. Savel'ev, D. S. Uryupina, R. V. Volkov, V. A. Makarov, and A. P. Shkurinov. Angular distribution of the terahertz radiation intensity from the plasma channel of a femtosecond filament. *JETP letters*, 93:638–641, 2011.
 35. K. Lim, M. Durand, M. Baudelet, and M. Richardson. Transition from linear- to nonlinear-focusing regime in filamentation. *Scientific reports*, 4(1):1–8, 2014.
 36. D. Reyes, M. Baudelet, M. Richardson, and S. Rostami Fairchild. Transition from linear- to nonlinear-focusing regime of laser filament plasma dynamics. *Journal of Applied Physics*, 124(5), 2018.
 37. D. E. Shipilo, I. A. Nikolaeva, D. V. Pushkarev, G. E. Rizaev, D. V. Mokrousova, A. V. Koribut, Ya. V. Grudtsyn, N. A. Panov, L. V. Seleznev, W. Liu, A. A. Ionin, and O. G. Kosareva. Balance of emission from THz sources in DC-biased and unbiased filaments in air. *Optics Express*, 29(25):40687–40698, 2021.