

На правах рукописи

Андреева Вера Александровна

**Генерация терагерцового излучения при филаментации  
фемтосекундного лазерного импульса в газах**

Специальность 01.04.21 – Лазерная физика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2017

Работа выполнена в *Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»*

**Научный руководитель:**

Доктор физико-математических наук, профессор **Косарева Ольга Григорьевна**

**Официальные оппоненты:**

Доктор физико-математических наук **Крайнов Владимир Павлович**, профессор кафедры теоретической физики Московского физико-технического института, г. Долгопрудный

Доктор физико-математических наук **Гореславский Сергей Павлович**, профессор кафедры теоретической ядерной физики Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Москва

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г. в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.31 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, расположенном по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ, д.1, стр. 62, корпус нелинейной оптики, аудитория им. С.А. Ахманова.

С текстом диссертации можно ознакомиться в Отделе диссертаций Научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский пр-т, д.27) и на сайте физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова:

---

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук

А.А. Коновко

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

Терагерцовым называют излучение частотного диапазона 0.1 – 10 ТГц (1 ТГц =  $10^{12}$  Гц), располагающееся между микроволновым и инфракрасным излучением на шкале частот. К терагерцовому также часто относят излучение дальнего ИК диапазона с частотой вплоть до 100 ТГц.

Терагерцовое излучение вызывает большой интерес, поскольку является удобным инструментом для различных приложений. Излучение терагерцового диапазона может проникать сквозь ткани и пластик, не повреждая при этом материал, в отличие от рентгеновского излучения, так как обладает низкой энергией фотона (1 ТГц соответствует приблизительно 4.1 мэВ). Кроме того, многие вещества имеют вращательные и колебательные спектры поглощения на терагерцовых частотах, своего рода спектральные «отпечатки пальцев». Это свойство используется для разрешенной во времени терагерцовой спектроскопии с целью идентификации химических веществ. Для приложений, связанных с безопасностью, разрабатываются системы обнаружения, позволяющие получать изображения и идентифицировать содержимое почтовых ящиков и конвертов, не вскрывая их. Кроме того, с помощью терагерцовой спектроскопии и исследования нелинейного взаимодействия высокоинтенсивного терагерцового излучения с веществами можно получить уникальную информацию о свойствах этих веществ, например, о диэлектрической проницаемости на недоступных ранее частотах. В последние годы генерация высокоинтенсивного терагерцового излучения представляет значительный интерес как для фундаментальных исследований, так и для прикладных целей. Поскольку терагерцовое излучение обладает более высокой частотой, чем микроволновое, оно может быть использовано для высокоскоростной передачи информации. На сегодняшний день терагерцовые технологии также активно применяются в медицинских исследованиях, информационных технологиях и других приложениях.

Терагерцовое излучение обладает слишком высокой частотой, чтобы генерировать его с помощью твердотельных приборов. С другой стороны — его частота слишком мала для эффективной генерации тепловыми устройствами. Из-за этого не так давно терагерцовый частотный диапазон окрестили «терагерцовым провалом». За последние десятилетия этот "провал" в значительной мере закрылся: прогресс в оптических технологиях позволил закрыть терагерцовую область с высокочастотной стороны, а развитие твердотельной электроники — с низкочастотной. Сейчас

терагерцовые технологии являются активно изучаемой и развивающейся областью знаний.

Можно выделить три основных метода генерации терагерцового излучения: с помощью устройств твердотельной электроники, квантово-каскадных лазеров, а также методами нелинейной оптики. В квантово-каскадных лазерах удалось получить терагерцовое излучение с узким спектральным пиком в диапазоне 0.84 – 5 ТГц с мощностью до 250 мВт. С помощью приборов твердотельной электроники можно генерировать терагерцовое излучение с частотой около 1 ТГц и мощностью до 10.9 мкВт. Оптические методы генерации терагерцового излучения можно разделить на две категории: генерация терагерцового излучения в нелинейных средах (оптическое выпрямление, генерация разностной частоты) и при ускорении электронов (фотопроводящие антенны, газовая плазма или плазменный канал филамента).

Определение механизмов генерации и управление пространственно-временными свойствами терагерцового сигнала при взаимодействии мощных лазерных импульсов с газами представляет большой интерес для фундаментальных и прикладных аспектов современной нелинейной оптики. В самом деле, в газовой среде отсутствует ограничение сверху на энергию импульса накачки, связанное с оптическим пробоем и разрушением материала. Следовательно, энергия выходного терагерцового сигнала определяется эффективностью нелинейного преобразования и может быть существенно увеличена путем ее оптимизации. Наибольший интерес представляет возможность формирования интенсивного терагерцового сигнала с широким спектром и узкой диаграммой направленности в заданной удаленной точке пространства. Нелинейные процессы взаимодействия мощного лазерного излучения со средой при фемтосекундной филаментации приводят к генерации терагерцового излучения, однако вопрос о вкладах различных нелинейных механизмов и их влиянии на свойства терагерцового сигнала филамента не был решен на момент начала работы над диссертацией.

Пионерские эксперименты по генерации терагерцового излучения из плазмы оптического пробоя были опубликованы в 1993–1994 годах в работах Hamster и Falcone, а с 2000 года в режиме филаментации в воздухе (Roskos, Cook, Mysyrowicz). Автор диссертации опубликовала первую теоретическую работу по исследованию механизмов генерации терагерцового излучения в филаменте в 2011 году и затем работала в сотрудничестве с экспериментальными группами проф. А.П. Шкуринова (МГУ имени М.В. Ломоносова) и S.L. Chin (Université Laval, Квебек, Канада). Таким образом, теоретические исследования автора актуальны, соответствуют новейшим

мировым достижениям, позволяют анализировать и планировать эксперименты по генерации терагерцового излучения в газах атмосферной плотности.

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

Цель исследования состоит в теоретическом анализе и численном моделировании генерации терагерцового излучения, его пространственно-временных характеристик, частотного спектра и поляризации при фемтосекундной филаментации в газах. Поставлены и решены следующие конкретные задачи:

1. Создание векторной модели для светового поля, позволяющей описывать коллинеарное распространение фемтосекундных импульсов в газах на нескольких центральных длинах волн, обогащение спектра входного излучения частотами от третьей гармоники до терагерцового диапазона вследствие керровской и плазменной нелинейностей, уширение углового спектра на десятки градусов, вращение эллипса поляризации оптического и терагерцового излучения.
2. Исследование механизмов формирования широкополосного терагерцового сигнала в двуцветном фемтосекундном филаменте в условиях вырожденного четырехволнового смешения, определение влияния керровской и плазменной нелинейностей на спектр терагерцового излучения филамента.
3. Исследование природы формирования углового распределения терагерцового излучения при филаментации мощного фемтосекундного лазерного импульса ближнего инфракрасного диапазона в газах и получение узконаправленного терагерцового сигнала.
4. Исследование процесса вращения поляризации терагерцового сигнала и его эллиптизации при изменении угла между начальными направлениями векторов поля линейно поляризованного излучения накачки и второй гармоники при двуцветной филаментации.

### **Научная новизна работы**

1. Впервые выполнено самосогласованное численное исследование генерации и распространения терагерцового излучения при фемтосекундной филаментации в газах.

2. Установлено, что вклад керровской нелинейности в генерацию терагерцового излучения при распространении двухчастотного лазерного импульса в газе доминирует до образования филамента, на стадии, когда плотность лазерной плазмы пренебрежимо мала. Вклад плазменной нелинейности на два порядка превышает вклад керровской нелинейности в развитом филаменте.
3. В численном эксперименте продемонстрировано, что слабый терагерцовый сигнал, обусловленный керровской нелинейностью, распространяется в том же направлении, что и лазерное излучение. Терагерцовое излучение, генерирующееся за счет плазменной нелинейности, распространяется в кольцо, угол раствора которого определяется частотой терагерцового излучения и геометрией распространения лазерного излучения.
4. Впервые численно получена и теоретически описана эллиптизация и динамика вращения поляризации терагерцового излучения филамента, генерирующегося при распространении в газах двуцветного линейно поляризованного лазерного излучения с заданной поляризацией его частотных компонент.
5. Новой является физическая интерпретация формирования углового распределения терагерцового излучения одночастотного филамента, согласно которой оно образуется в результате интерференции излучений квадрупольных локальных источников терагерцового сигнала.
6. Предложен новый метод генерации терагерцового излучения с узкой диаграммой направленности при филаментации в газах.
7. Впервые численно получен терагерцовый сигнал филамента, распространяющийся в направлении, противоположном направлению распространения лазерного излучения.

### **Практическая ценность работы**

Полученные результаты и установленные закономерности могут быть использованы для:

1. Управления параметрами терагерцового излучения, генерируемого при филаментации фемтосекундного лазерного излучения в газах для оптимизации частотно-углового состава терагерцового излучения, необходимого для спектроскопических исследований в терагерцовом диапазоне частот.
2. Удаленной генерации и управления широкополосным терагерцовым излучением для зондирования и экологического мониторинга окружающей среды.

3. Развития физических представлений о генерации и распространении терагерцового сигнала при нелинейной филаментации фемтосекундного излучения в газах, излагаемых в учебных курсах.

### **Апробация результатов работы**

Основные результаты работы опубликованы в **16 печатных работах**, из них **8 статей** в изданиях из списка ВАК России («Physical Review Letters», «Письма в ЖЭТФ», «Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves», «Optics Express», «Laser Physics Letters», «Optics Letters», «Proceedings of SPIE») и **8 тезисов докладов**.

Результаты докладывались автором на следующих конференциях: XVII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (Москва, Россия, 2010); Международная конференция IONS-8 (Москва, Россия, 2010); Международная конференция «Фундаментальные Проблемы Оптики» (Санкт-Петербург, Россия, 2010); Научно-практическая конференция "Фундаментальные и прикладные аспекты инновационных проектов и их защита в едином экономическом пространстве" (Москва, Россия, 2011); The 2nd International Conference "Terahertz and Microwave radiation: Generation, Detection and Applications" (TERA 2012) (Москва, Россия, 2012); SPIE Optics and Photonics (San Diego, USA, 2012); Международная конференция «Фундаментальные Проблемы Оптики» (Санкт-Петербург, Россия, 2012); Международная конференция "ICONO/LAT-2013" (Москва, Россия, 2013); 16th International Conference «Laser Optics 2014» (Санкт-Петербург, Россия, 2014); 23rd International Laser Physics Workshop (Sofia, Bulgaria, 2014); Международная конференция «Workshop on terahertz» (Санкт-Петербург, Россия, 2015); 24th International Laser Physics Workshop (Shanghai, China, 2015); Международная конференция "SPIE Security&Defence" (Toulouse, France, 2015); 9th International conference for young scientists «Optics-2015» (Saint-Petersburg, Russia, 2015); 6-ая Всероссийская конференция молодых ученых «Фундаментальные и инновационные проблемы современной физики» (Москва, Россия, 2015); International Conference "CLEO: Applications and Technology" (San Jose, USA, 2016); 25th International Laser Physics Workshop (Yerevan, Armenia, 2016); The 17th International Conference «Laser Optics 2016» (St. Petersburg, Russia, 2016); International Conference IONS Tucson 2016 (Tucson, USA, 2016); International Conference "Frontiers in Optics" (Rochester, USA, 2016); а также на семинарах кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета и МЛЦ МГУ им. М.В. Ломоносова и отдела колебаний Института Общей Физики АН (ИОФ РАН).

### **Личный вклад автора**

Автор диссертации разработала комплекс программ и алгоритмов и провела численное моделирование и анализ процесса генерации и распространения терагерцового излучения при филаментации мощного фемтосекундного излучения в газах. Используемые в диссертации результаты численного моделирования получены автором лично или при её определяющем участии.

Экспериментальные данные, с которыми проведено сравнение результатов численного моделирования, были получены под руководством профессора А.П. Шкуринова сотрудниками лаборатории терагерцовой оптоэлектроники и спектроскопии физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами.

### **Защищаемые положения**

1. Трехмерная векторная модель трансформации светового поля при распространении фемтосекундного излучения в газах атмосферной плотности в условиях керровской нелинейности и фототока самонаведенной лазерной плазмы воспроизводит обогащение спектра излучения компонентами от пятой гармоники до терагерцового диапазона (0.05 ТГц), уширение углового спектра на десятки градусов, вращение эллипса поляризации оптического и терагерцового излучения.
2. При генерации широкополосного терагерцового излучения в условиях формирования двуцветного филамента вклад керровской нелинейности определяет генерацию преимущественно высокочастотных спектральных компонент в диапазоне до 100 ТГц, имеющих в дальней зоне максимум на оси пучка.
3. В двуцветном филаменте кольцевая пространственная структура терагерцового излучения в дальней зоне и смещение максимума спектра ТГц излучения в низкочастотную область ( $\leq 1$  ТГц) обусловлены фототоком самонаведенной лазерной плазмы, вклад которого в спектральную интенсивность терагерцового излучения на два порядка превышает вклад керровской нелинейности.

4. Поляризация электрического поля терагерцового излучения двуцветного филамента определяется фототоком свободных электронов, линейна и параллельна вектору поляризации электрического поля накачки в диапазоне изменений угла между начальными направлениями векторов полей накачки и второй гармоники от  $0^\circ$  до  $80^\circ$ . При увеличении этого угла до  $85^\circ$  терагерцовое излучение становится эллиптическим, и эллипс поляризации вращается, следуя за поляризацией второй гармоники.
5. Угловая ширина диаграммы направленности терагерцового излучения уменьшается до  $5^\circ$  с увеличением до 16-ти числа параллельных плазменных каналов, образующих в поперечном сечении двумерный массив равноудаленных друг от друга квадрупольных источников терагерцового сигнала. При сантиметровой длине каналов оптимальное расстояние между каналами составляет величину, равную длине волны терагерцового излучения.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 5 оригинальных глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 98 страниц, включая 40 рисунков и список литературы с общим числом ссылок 162.

### **Содержание работы**

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В **Главе 1** “Состояние исследований явления генерации терагерцового излучения при филаментации в газах” дан краткий обзор состояния исследований по генерации терагерцового излучения при филаментации фемтосекундных лазерных импульсов в различных условиях. Приведены результаты экспериментальных и теоретических работ, которые дают представление о физических процессах, определяющих и сопровождающих явление генерации терагерцового излучения при филаментации фемтосекундных импульсов.

Параграф 1 посвящен генерации терагерцового излучения при филаментации излучения на основной частоте титан-сапфирового лазера. В разделе описаны эксперименты по удаленной генерации терагерцового излучения на таких установках, как «Терамобиль», определению когерентности терагерцового излучения пучка несфазированных стохастических филаментов и одного филамента в воздухе, угловой направленности терагерцового излучения. Также приведен обзор экспериментов по регистрации углового распределения терагерцового излучения плазменных каналов размера порядка 10 мкм, методов улучшения направленности терагерцового излучения с использованием двух филаментов и методов увеличения энергии терагерцового сигнала, анализа поляризационных свойств терагерцового излучения филамента.

В Параграфе 2 обсуждается влияние внешнего электростатического поля на энергию и направленность терагерцового излучения при филаментации лазерного излучения.

Параграф 3 посвящен характеристикам терагерцового излучения при двуцветной филаментации. Двуцветной филаментацией в данной работе называется режим коллинеарного распространения импульсов основной и второй гармоник титан-сапфирового лазера в филаменте. Обсуждается рост интенсивности терагерцового сигнала при использовании в эксперименте второй гармоники наряду с основной, кольцевой пространственный профиль терагерцового излучения, зависимость энергии терагерцового излучения от задержки и фазы между импульсами основной и второй гармоник, спектральное распределение и поляризация терагерцового сигнала.

В Параграфе 4 описаны экспериментальные результаты по генерации терагерцового излучения при смешении нескольких частот, а также при фокусировке оптических импульсов длительностью в один период колебаний поля.

Параграф 5 содержит обзор существующих теоретических подходов, используемых для описания терагерцового излучения фемтосекундного филамента в газах.

В **Главе 2** «Методика численного моделирования генерации и распространения терагерцового излучения при фемтосекундной филаментации в газах» описана математическая модель, используемая в данной работе для численного расчета процесса распространения мощных сверхкоротких лазерных импульсов в газах и генерации и распространения терагерцового излучения.

В Параграфе 1 представлена математическая модель распространения фемтосекундного лазерного излучения в газах. В отсутствие множественной филаментации применима аксиально-симметричная модель распространения лазерного излучения. Для аксиально-симметричной задачи распространения фемтосекундного излучения используется однонаправленное уравнение распространения для быстро осциллирующей спектральной компоненты электрического поля  $\hat{\mathbf{E}}(k_r, \omega, z) = \int_0^\infty J_0(k_r r) \int_{-\infty}^\infty \mathbf{E}(r, t, z) e^{-i\omega t} dt r dr$ :

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + ik_z\right) \hat{\mathbf{E}}(k_r, \omega, z) = -\frac{2\pi\omega}{c^2 k_z} \left(\hat{\mathbf{J}}_{eff}(k_r, \omega, z) + i\omega \hat{\mathbf{P}}(k_r, \omega, z)\right) \quad (1)$$

где  $k_z = \sqrt{\omega^2 n^2(\omega)/c^2 - k_r^2}$  и  $k_r$  — продольная и поперечная компоненты волнового вектора,

$J_0(k_r r)$  — функция Бесселя нулевого порядка,

$n(\omega)$  — показатель преломления газа,

$\mathbf{P}(r, t, z) = \chi_{1111}^{(3)} |\mathbf{E}(r, t, z)|^2 \mathbf{E}(r, t, z)$  — нелинейная поляризация третьего порядка,

$\chi^{(3)}$  — нелинейная восприимчивость вещества, соответствующая значению нелинейного показателя преломления воздуха,

$\mathbf{J}_{eff}(r, t, z)$  — нелинейный фототок, причем  $\mathbf{J}_{eff} = \mathbf{J}_e + \mathbf{J}_{abs}$ , где  $\mathbf{J}_e$  — ток свободных электронов:

$$\frac{\partial \mathbf{J}_e(r, t, z)}{\partial t} = \frac{e^2}{m} N_e(r, t, z) \mathbf{E}(r, t, z) - \nu_c \mathbf{J}_e(r, t, z),$$

$$\mathbf{J}_{abs}(r, t, z) = U_i \frac{\mathbf{E}(r, t, z)}{|\mathbf{E}(r, t, z)|^2} \frac{\partial N_e(r, t, z)}{\partial t} — ток поглощения,$$

$e$ ,  $m$  — заряд и масса электрона,  $\nu_c \approx 5 \text{ пс}^{-1}$  — частота столкновения электронов с нейтралами,  $U_i$  — потенциал ионизации частиц газа,  $N_e$  — плотность свободных электронов, определяемая выражением.

$$\frac{\partial N_e(r, t, z)}{\partial t} = W_i (|\mathbf{E}(r, t, z)|^2) (N_0 - N_e(r, t, z)).$$

Здесь  $N_0$  — концентрация нейтральных атомов,  $W_i$  — вероятность ионизации атома, рассчитываемая по теории Переломова-Попова-Терентьева.

Уравнение (1) учитывает дифракцию и дисперсию излучения при его распространении в газе, керровскую и плазменную нелинейности, потери на ионизацию среды в процессе филаментации.

В Параграфе 2 представлены методы численного решения задачи о генерации и распространении терагерцового излучения при филаментации,

параметры расчетной сетки; обсуждаются проблемы, возникающие при численном моделировании.

В Параграфе 3 показаны использованные методы обработки данных численного моделирования, необходимые для представления результатов расчета в формате данных, регистрируемых экспериментально.

В Параграфе 4 описана модель суперпозиции локальных плазменных источников терагерцового излучения, созданного двумерным кластером плазменных каналов филаментов, использованная в данной работе для интерпретации формирования углового распределения терагерцового сигнала филамента и регулярного кластера филаментов. Модель позволяет получить угловое распределение терагерцового излучения и зависимость угла раствора конуса терагерцового сигнала от длины волны излучения и длины плазменного канала.

**Глава 3** «Угловое распределение терагерцового излучения при филаментации излучения на основной частоте титан-сапфирового лазера» посвящена численному исследованию диаграммы направленности терагерцового излучения одного филамента и кластера регулярных филаментов. Регулярный кластер сформирован двумерным массивом плазменных каналов филаментов. Получены диаграммы направленности ТГц сигнала плазменных каналов различных длин, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными. Показано, что короткие филаменты могут служить источником терагерцового излучения, распространяющегося в направлении, противоположном направлению распространения лазерного излучения, а использование сфазированного кластера филаментов в качестве источника терагерцового сигнала позволяет увеличить долю энергии терагерцового излучения, распространяющегося под небольшим углом к оси распространения. Определены оптимальные параметры кластера филаментов для генерации слабо расходящегося терагерцового излучения.

В Параграфе 1 представлены полученные в численном моделировании угловые распределения терагерцового излучения одиночного филамента в отсутствие внешнего поля и при его наличии.

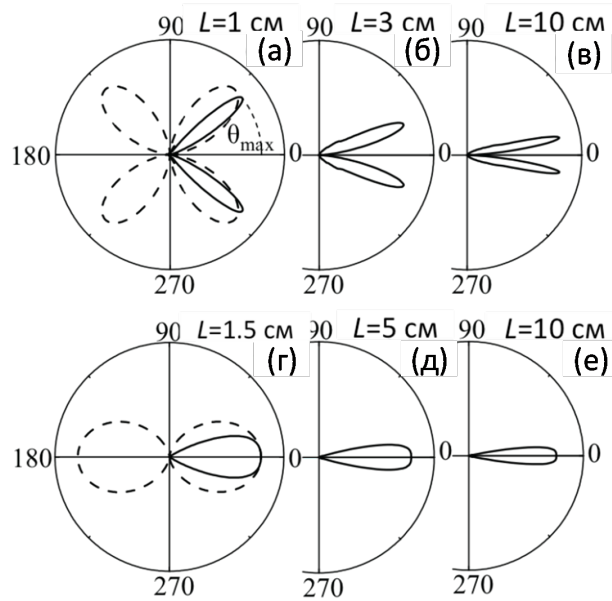


Рис. 1. Диаграмма направленности ТГц излучения филамента (сплошная кривая) длины  $L = 1, 3, 10$  см в отсутствие электростатического поля (а – в). Штриховой линией на (а) показано излучение малого участка филамента; (г – е) Диаграмма направленности терагерцового излучения филамента (сплошная линия) длины  $L = 1.5, 5, 10$  см при наличии внешнего поля. Штриховой линией на (г) показано излучение малого участка филамента.

Показано, что в отсутствии внешнего электростатического поля на оси филамента имеется минимум поля, а максимум достигается под углом  $\sim 10^\circ$  (Рис. 1(а–в)). Увеличение длины филамента приводит к уменьшению угла раствора конуса.

При наличии внешнего электростатического поля терагерцовое излучение распространяется преимущественно вперед, его расходимость уменьшается с ростом длины филамента (Рис. 1(г–е)). Наблюдаемый в экспериментах рост энергии терагерцового сигнала во внешнем поле объясняется появлением дипольных локальных плазменных источников.

В Параграфе 2 предлагается метод управления диаграммой направленности терагерцового излучения при использовании сфазированного массива филаментов в качестве источника. Получены двумерные (Рис. 2) и трехмерные (Рис. 3) диаграммы направленности терагерцового излучения одного филамента, а также кластеров филаментов.

При увеличении количества филаментов в кластере на диаграмме направленности появляются дополнительные боковые лепестки, то есть доля излучения, распространяющегося под малым углом, уменьшается. Кроме

того, на вид углового распределения существенно влияет расстояние между филаментами в кластере.

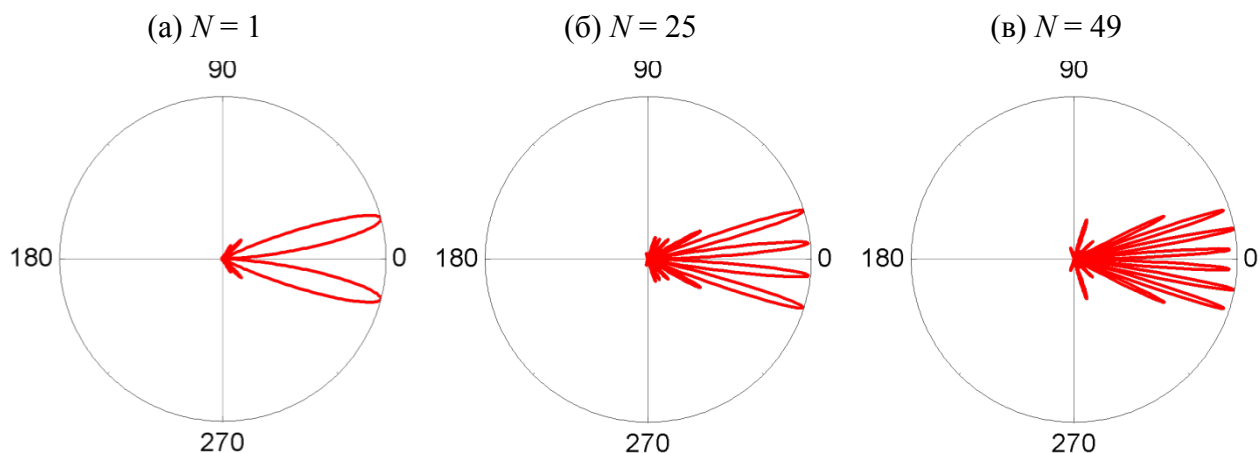


Рис. 2. Двумерные диаграммы направленности ТГц излучения фемтосекундного филамента (а), а также кластеров (б, в) филаментов с расстоянием между филаментами, равным длине волны ТГц излучения.

Определены оптимальные значения количества филаментов в кластере и расстояния между ними. Оптимальный кластер обладает наименьшей расходимостью центрального конуса при условии, что этот конус содержит основную часть энергии терагерцового излучения. Установлено, что наибольшему значению энергии излучения конуса при наименьшей его расходимости соответствует расстояние между филаментами в кластере, равное одной длине волны терагерцового излучения.

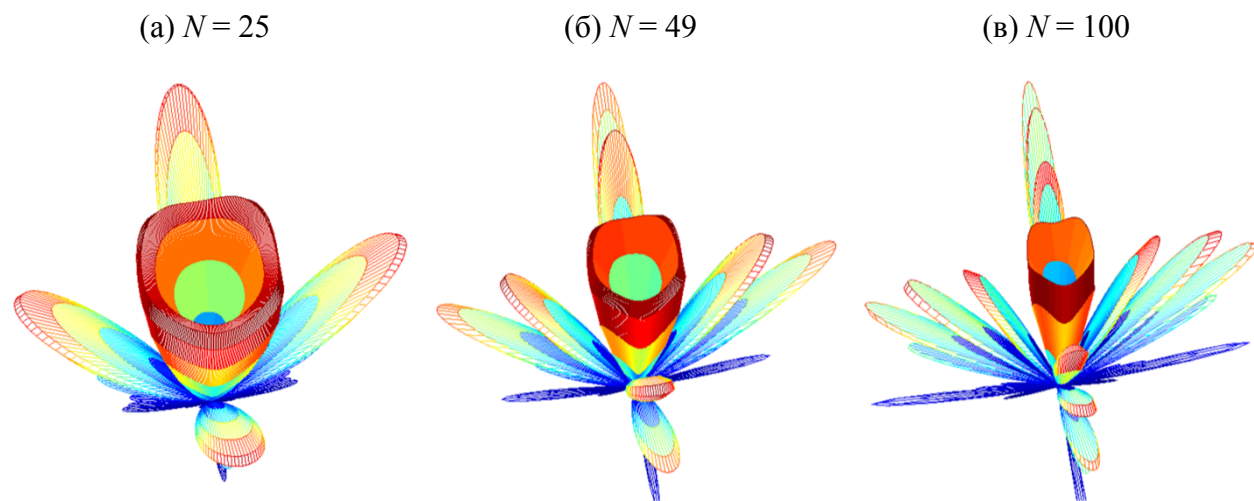


Рис. 3. Трехмерные диаграммы направленности терагерцового излучения кластеров, состоящих из 25 (а), 49 (б) и 100 (в) филаментов. Расстоянием между филаментами в кластере равно длине волны ТГц излучения.

Численный расчет кластеров различных размеров показал, что оптимальным является количество филаментов в кластере  $N = 16$ . Угол расходимости центрального конуса в этом случае составляет примерно  $5^\circ$ , и содержит около 95% энергии. При дальнейшем увеличении количества филаментов существенного уменьшения угла раствора конуса не происходит, но его доля энергии уменьшается в связи с появлением дополнительных лепестков с большим углом раствора на диаграмме направленности.

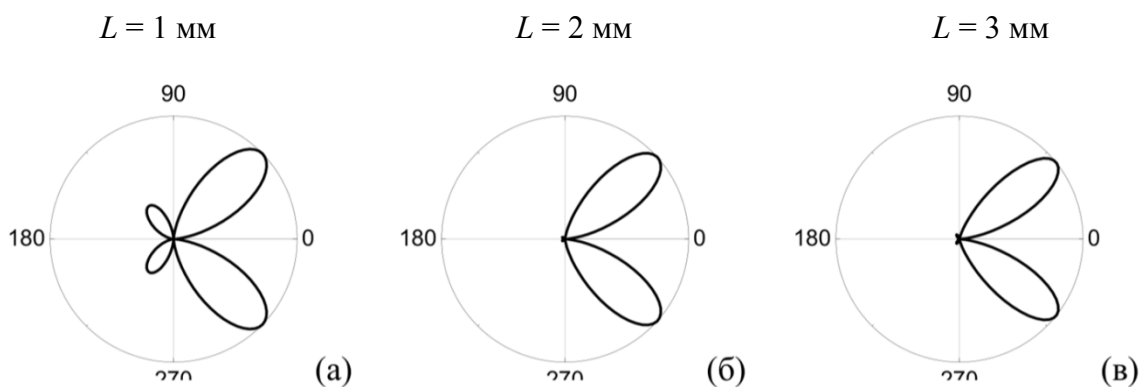


Рис. 4 Диаграммы направленности излучения с частотой 0.1 ТГц филамента длиной  $L = 1$  мм (а), 2 мм (б) и 3 мм (в).

В Параграфе 3 представлены численно полученные диаграммы направленности терагерцового излучения при плотной фокусировке оптического импульса.

Исследована возможность генерации терагерцового излучения, распространяющегося в направлении, противоположном направлению распространения лазерного излучения. Установлено, что на диаграмме направленности терагерцового излучения филаментов длиной 1 – 3 мм наблюдается компонента, распространяющаяся под углом  $\sim 140^\circ$  к оси филамента (Рис. 4). Интенсивность компоненты, распространяющейся под углом в диапазоне  $90^\circ - 270^\circ$  растет с уменьшением длины филамента.

В Главе 4 «Пространственные и спектральные свойства терагерцового излучения при коллинеарном распространении импульсов основной и второй гармоник титан-сапфирового лазера в филаменте» представлено исследование влияния механизмов генерации терагерцового излучения в двуцветном филаменте на спектральные и пространственные свойства терагерцового сигнала. Показано, что можно разделить вклады отклика нейтралов и свободных электронов в спектре и в пространственном распределении терагерцового излучения. Вклад нейтралов в спектральное распределение терагерцового излучения является слабым и более

высокочастотным по сравнению с вкладом свободных электронов лазерной плазмы. Терагерцовое излучение, обусловленное откликом нейтральных молекул, распространяется в направлении распространения лазерного излучения. Терагерцовый отклик плазмы имеет кольцевое пространственное распределение с ярко выраженным минимумом на оси филамента. Такой кольцевой пространственный профиль терагерцового излучения наблюдается как при филаментации сфокусированного лазерного излучения, так и коллимированного.

В Параграфе 1 представлены результаты численного исследования формирования спектрального распределения терагерцового излучения при коллинеарном распространении импульсов основной и второй гармоник титан-сапфирового лазера в филаменте.

Установлено, что на начальной стадии самофокусировки, определяемой керровской нелинейностью среды, когда плотность лазерной плазмы близка к нулю, отклик нейтральных молекул среды вносит основной вклад в генерацию терагерцового сигнала. Максимум спектра терагерцовой эмиссии на этом этапе расположен на частоте порядка обратной длительности лазерного импульса в соответствии с моделью четырехволнового смешения. Далее из-за резкого роста концентрации свободных электронов в генерации терагерцового сигнала начинает доминировать вклад плазменной нелинейности. С образованием плазмы максимум спектра терагерцового излучения испытывает резкий переход в низкочастотную область около плазменной частоты (Рис. 5). Интенсивность низкочастотного спектрального максимума на два порядка превышает интенсивность максимума терагерцовой эмиссии, обусловленной воздействием керровского эффекта.

В Параграфе 2 изложены результаты численного исследования формирования кольцевого пространственного распределения терагерцового излучения при коллинеарном распространении импульсов основной и второй гармоник титан-сапфирового лазера в филаменте.

В начале распространения, пока интенсивность лазерного излучения не достаточна для ионизации среды, на частотно-угловом распределении имеется яркий терагерцовый максимум около  $0^\circ$ , что соответствует распространяющемуся вдоль оси филамента терагерцовому сигналу нейтралов. Максимум терагерцового излучения, обусловленного откликом нейтральных атомов или молекул, растет при распространении лазерного излучения и увеличения его интенсивности под действием керровской фокусировки в газе.

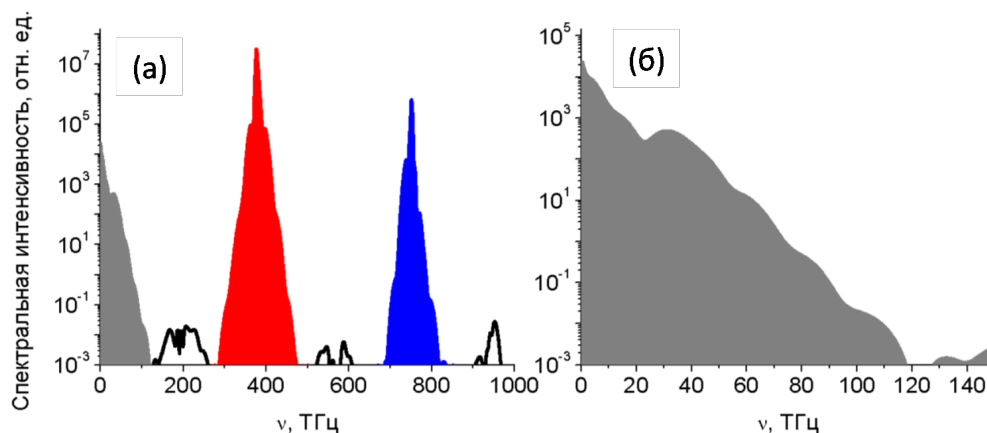


Рис. 5. Спектры излучения в диапазоне 0.05 – 1000 ТГц (а) и его терагерцовая часть (б), полученные в численном моделировании.

При достижении лазерным излучением интенсивности, достаточной для ионизации молекул воздуха, в частотно-угловом спектре излучения появляется структура с двумя «крыльями», что соответствует кольцевому пространственному профилю терагерцового сигнала свободных электронов лазерной плазмы. При дальнейшем распространении лазерного излучения кольцевая структура усиливается, появляется ярко выраженный минимум терагерцового сигнала на оси филамента (Рис. 6).

В Параграфе 3 изложены результаты численного исследования механизмов генерации терагерцового излучения и их влияние на спектральные и пространственные свойства терагерцового сигнала.

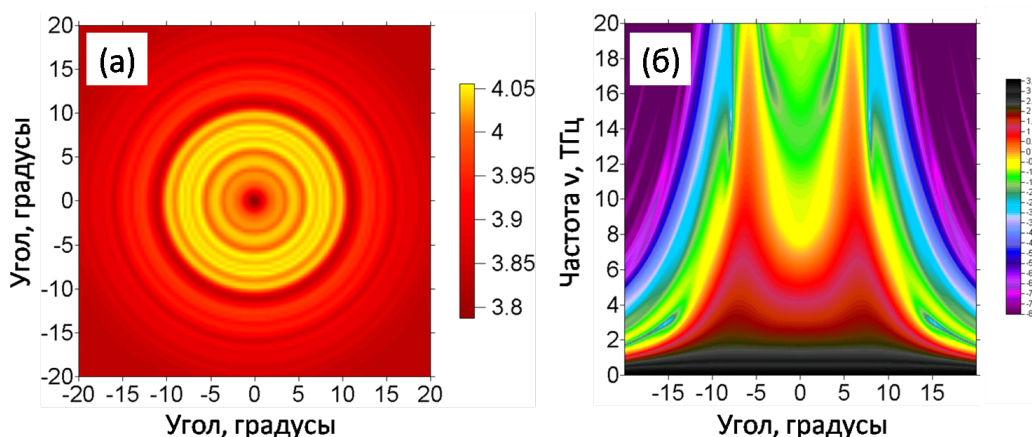


Рис. 6 Пространственное (а) и частотно-угловое (б) распределения терагерцового излучения филамента.

В численном моделировании были последовательно «выключены» вклады физических механизмов, участвующих в фемтосекундной филаментации. Вначале был исследован случай чисто керровской среды,

когда лазерное излучение фокусируется за счет совместного действия линзы и керровской нелинейности нейтральных молекул воздуха в условиях дифракции, но без учета дисперсии показателя преломления воздуха и образования плазмы. В такой среде терагерцовый отклик распространяется вперед по направлению распространения лазерного излучения. Значит, в начале распространения лазерного излучения формируется источник осевого терагерцового излучения.

В случае, соответствующем реальному эксперименту, когда учтены плазменная и керровская нелинейности, а также дисперсия и дифракция среды, на частотно-угловом распределении по мере распространения лазерного излучения и увеличения плотности свободных электронов образуется яркое кольцо. Спектральная интенсивность излучения, распространяющегося в кольцо, на два порядка больше, чем интенсивность излучения, распространяющегося вдоль оси филамента.

В третьем численном эксперименте керровский отклик среды не учитывался, и фокусировка лазерного излучения происходила только за счет внешнего воздействия линзы. В этом случае частотно-угловые спектры и структура пространственного распределения терагерцового сигнала во многом похожи на ранее рассмотренный случай. Таким образом, терагерцовое излучение, обусловленное наличием нелинейного фототока, является доминирующим и вторым по очередности в ходе распространения. Плазменный канал действует как препятствие на пути распространения терагерцового излучения, что приводит к формированию характерного кольцевого пространственного профиля терагерцового сигнала.

Влияние керровской нелинейности на частотно-угловой спектр проявляется в виде четко выраженного локального максимума на оси распространения.

Для демонстрации универсальности пространственного распределения терагерцового излучения проведено моделирование филаментации коллимированного двуцветного лазерного импульса с параметрами, аналогичными предыдущему случаю. Показано, что излучение с более высокой частотой распространяется в кольцо с меньшим диаметром.

В **Главе 5** «Поляризация терагерцового излучения при коллинеарном распространении в филаменте импульсов основной и второй гармоник (800 + 400 нм) с независимо ориентированной линейной поляризацией» представлено численное и аналитическое исследование поляризации терагерцового излучения, генерирующееся при коллинеарном распространении в филаменте импульсов основной и второй гармоник

(800 + 400 нм) с независимо ориентированной линейной поляризацией. Показано, что поляризация терагерцового излучения линейна и сонаправлена с поляризацией основной гармоники, если угол между поляризациями основной и второй гармоник меньше  $80^\circ$ ; дальнейшее увеличение угла до  $90^\circ$  приводит к значительной эллиптизации терагерцового излучения и вращению его поляризации к вектору поляризации второй гармоники. Самоиндуцированная лазерная плазма определяет угол поляризации терагерцового излучения. Эллиптизация терагерцового сигнала вызвана чирпированием и эллиптизацией второй гармоники в присутствии сильного поля основной гармоники.

В главе представлены результаты численного моделирования филаментации и генерации терагерцового сигнала для различных начальных значений угла между поляризациями основной и второй гармоник от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  с шагом  $0.5^\circ - 5^\circ$ . Показано, что поляризация терагерцового излучения ориентирована по направлению поляризации основной гармоники при значении угла  $0^\circ \leq \psi_0 \leq 80^\circ$ , где  $\psi_0$  – начальное значение угла между поляризациями основной и второй гармоник. Значение угла  $\beta$  между направлениями поляризаций ТГц излучения и основной гармоники быстро возрастает до  $90^\circ$  при  $80^\circ \leq \psi_0 \leq 90^\circ$  (Рис. 7).

Эллиптичность терагерцового излучения, определяемая как отношение полуосей эллипса поляризации, возрастает с увеличением угла  $\psi_0$  при  $\psi_0 < 80^\circ$ , достигает максимума при  $\psi_0 \approx 85^\circ$  и далее уменьшается до нуля при увеличении  $\psi_0$  до  $90^\circ$ . При этом с увеличением угла  $\psi_0$  происходит уменьшение терагерцового сигнала на порядок.

Исследовано изменение поляризации терагерцового сигнала при распространении лазерного излучения. Пока концентрация свободных электронов пренебрежимо мала, угол поляризации терагерцового излучения согласуется с полученным с помощью модели четырехволнового смешения. Однако после образования плазмы угол терагерцового поляризации резко уменьшается. Эллиптичность терагерцового сигнала резко возрастает в развитом филаменте. После прохождения лазерным излучением геометрического фокуса рост энергии терагерцового сигнала останавливается, и трансформация его поляризации также прекращается.

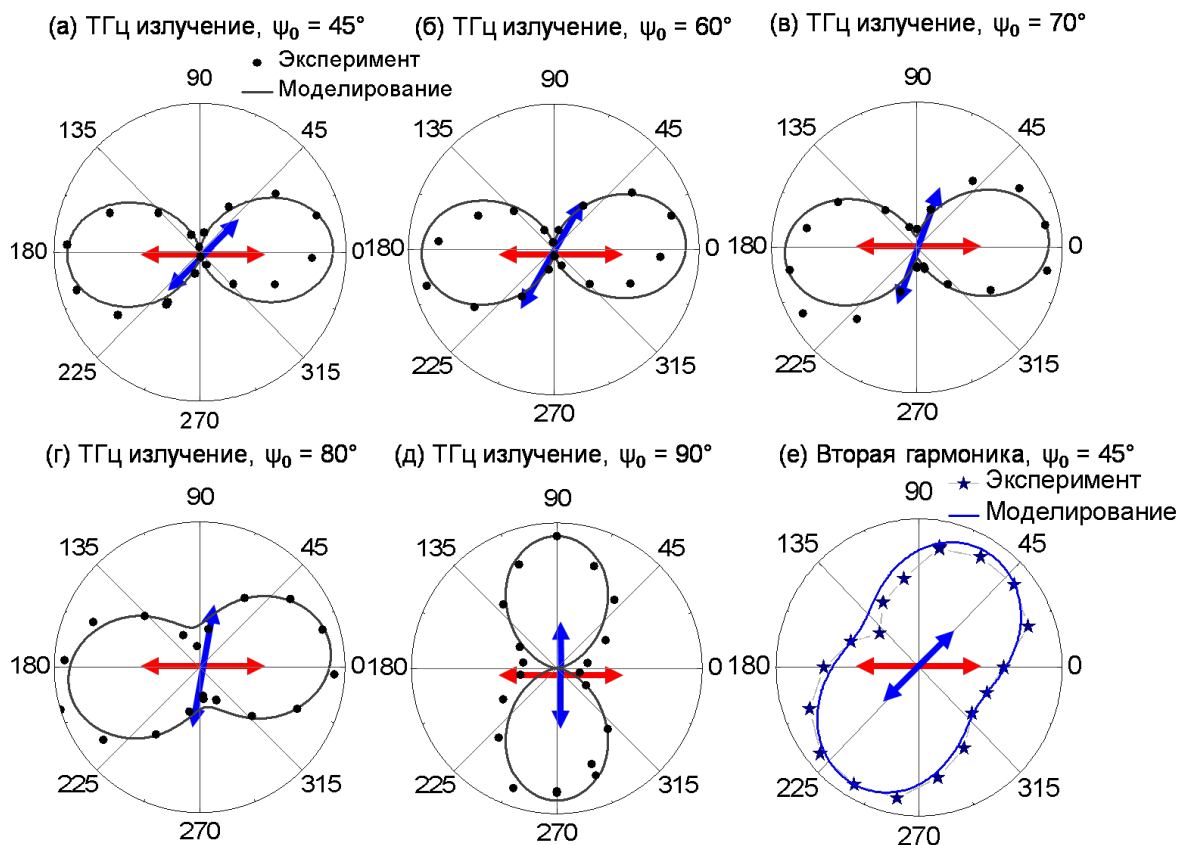


Рис. 7 Состояние поляризации ТГц излучения (а-д) и второй гармоники (е) при различных значениях угла между поляризациями основной и второй гармоник. Для сопоставления приведены экспериментальные результаты, полученные сотрудниками лаборатории терагерцовой оптоэлектроники и спектроскопии физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова (М.Н. Есаулковым, П.М. Солянкиным, А.П. Шкуриновым).

## Основные результаты

В результате данной работы впервые выполнено комплексное численное исследование генерации терагерцового излучения при филаментации фемтосекундного лазерного импульса. Разработана математическая модель и численная схема для исследования распространения мощного лазерного излучения в газах с учетом быстроосциллирующей несущей электромагнитного поля без параксиального приближения, позволяющая исследовать генерацию и распространение сильно расходящегося терагерцового сигнала филамента. На основе этой модели в работе изучены общие закономерности формирования частотно-углового спектра и поляризации терагерцового излучения при филаментации, определены вклады различных нелинейных механизмов в генерацию

терагерцового сигнала филамента, показана возможность управления пространственным распределением терагерцового излучения.

В результате анализа свойств терагерцового излучения установлены механизмы генерации терагерцового сигнала двуцветного филамента в воздухе. Показано, что и нелинейный фототок свободных электронов плазмы, и керровский отклик нейтральных молекул среды дают вклад в генерацию терагерцового излучения. В начале филаментации связанные электроны в нейтралах формируют осевой источник терагерцового излучения. Терагерцовое излучение нейтралов является слабым и более высокочастотным по сравнению с терагерцовым откликом свободных электронов. Терагерцовое излучение, обусловленное вкладом керровского механизма, распространяется вдоль оси филамента, а терагерцовое излучение плазмы — в конус.

С ростом концентрации свободных электронов происходит резкий переход положения максимума терагерцового спектра в низкочастотную область к частоте порядка плазменной и рост спектральной интенсивности терагерцового сигнала на два порядка. Пространственное распределение терагерцового излучения является кольцевым как в сфокусированной, так и в коллимированной геометрии распространения лазерного излучения.

Проведено комплексное исследование поляризации терагерцового излучения, генерирующегося при двуцветной филаментации линейно поляризованных лазерных импульсов в газах. В отличном согласии с экспериментальными данными продемонстрировано, что поляризация терагерцовой эмиссии линейна и направлена вдоль поляризации основной гармоники в широком диапазоне значений начального угла между поляризациями основной и второй гармоник (вплоть до  $80^\circ$ ); вращение поляризации терагерцового сигнала к направлению поляризации второй гармоники и эллиптизация терагерцового излучения происходит при значениях этого угла, близких к  $90^\circ$ . Из анализа численных результатов следует, что величина угла поляризации терагерцового излучения определяется воздействием самоиндуцированной лазерной плазмы. Эллиптизация терагерцового сигнала при значениях начального угла между основной и второй гармониками, близких к  $90^\circ$ , вызвана чирпированием и эллиптизацией второй гармоники, наведенными сильным полем основной гармоники.

Разработанная модель генерации терагерцового излучения плазменного канала филамента на основе суперпозиции локальных плазменных источников терагерцового излучения удовлетворительно описывает

экспериментальные результаты по генерации терагерцового излучения, распространяющегося в направлении распространения лазерного излучения. Диаграммы направленности, полученные в результате численного моделирования, а также рассчитанная зависимость расходимости терагерцового излучения соответствуют экспериментам.

Продemonстрировано, что короткий филамент является источником терагерцового излучения, распространяющегося назад, в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными. Этого в принципе не допускает модель, основанная на черенковском излучении, что говорит о более широкой области применения предложенной теории.

Для управления расходимостью терагерцового излучения предложено использовать регулярный кластер филаментов в качестве источника. Найдена зависимость угла раствора центрального конуса на диаграмме направленности терагерцового излучения кластера филаментов от его размера. Определены оптимальные с точки зрения генерации слабо расходящегося терагерцового излучения параметры кластера.

### **Публикации по теме диссертации**

*В журналах:*

1. V.A. Andreeva, O.G. Kosareva, N.A. Panov, D.E. Shipilo, P.M. Solyankin, M.N. Esaulkov, P. González de Alaiza Martínez, A.P. Shkurinov, V.A. Makarov, L. Bergé, and S.L. Chin “Ultrabroad terahertz spectrum generation from an air-based filament plasma”, *Physical Review Letters* 116, 063902 (2016).
2. A. Couairon, O. G. Kosareva, N. A. Panov, D. E. Shipilo, V. A. Andreeva, V. Jukna, and F. Nesa “Propagation equation for tight-focusing by a parabolic mirror” *Opt. Express* 23, 31240–31252 (2015)
3. N. Panov, V. Andreeva, O. Kosareva, A. Shkurinov, V.A. Makarov, L. Berge and S. L. Chin «Directionality of terahertz radiation emitted from an array of femtosecond filaments in gases», *Laser Physics Letters* 11, 125401 (2014)
4. V. Borodin, N. A. Panov, O. G. Kosareva, V. A. Andreeva, M. N. Esaulkov, V. A. Makarov, A. P. Shkurinov, S. L. Chin, and X.-C. Zhang, "Transformation of terahertz spectra emitted from dual-frequency femtosecond pulse interaction in gases," *Opt. Lett.* 38, 1906-1908 (2013)
5. Kosareva O.G., Panov N.A., Volkov R.V., Andreeva V.A., Borodin A.V., Esaulkov M.N., Chen Y., Marceau C., Makarov V.A., Shkurinov A.P., Savel'ev A.B., Chin S.L. “Analysis of Dual Frequency Interaction in the Filament

with the Purpose of Efficiency Control of THz Pulse Generation”, Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves 32, 1557-1567 (2011)

6. Панов Н.А., Косарева О.Г., Андреева В.А., Савельев А.Б., Урюпина Д.С., Волков Р.В., Макаров В.А., Шкуринов А.П. «Угловое распределение ТГц излучения плазменного канала фемтосекундного филамента», Письма в ЖЭТФ 93, 715-718 (2011)

*В сборниках:*

7. V. A. Andreeva, T. Wang, N. A. Panov, D. E. Shipilo, M. N. Esaulkov, A. P. Shkurinov, V. A. Makarov, R. Li, O. G. Kosareva, and S. L. Chin, "Enhancement in Energy of THz Emission From Gas Plasma Induced By Two-Color Chirped Laser Pulses," in Frontiers in Optics 2016, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2016), paper JTh2A.96.

8. V. A. Andreeva, M. Esaulkov, N. Panov, P. Solyankin, V. Makarov, D. Shipilo, A. Shkurinov, O. Kosareva, and S. L. Chin, "Polarization Of THz Emission From Gas Plasma Induced By Two-Color Arbitrarily Polarized Laser Pulses," in Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2016), paper JW2A.47.

9. V.A. Andreeva et al., "Polarization Of THz radiation generated during two-color filamentation of arbitrarily polarized laser pulses," 2016 International Conference Laser Optics (LO), St. Petersburg, 2016, paper R8-17-R8-17.

10. V. A. Andreeva et al., "Filamentation of four beams under focusing in air," 2016 International Conference Laser Optics (LO), St. Petersburg, 2016, paper R5-13-R5-13.

11. Vera A. Andreeva, Nikolay A. Panov, Mikhail N. Esaulkov, Olga G. Kosareva, Petr M. Solyankin, Daniil E. Shipilo, Alexander V. Borodin, Vladimir A. Makarov, Alexander P. Shkurinov, "Spatio-spectral characteristics of THz radiation from two-color femtosecond filament" Proc. SPIE 9651, Millimetre Wave and Terahertz Sensors and Technology VIII, 96510K (October 21, 2015); doi:10.1117/12.2196801.

12. V. A. Andreeva et al., "Spectrum and polarization of THz radiation from two-color femtosecond laser breakdown: Theory and experiment," 2015 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), Hong Kong, 2015, pp. 1-2.

13. O. G. Kosareva, V. A. Andreeva, N. A. Panov, D. E. Shipilo, A. B. Savel'ev, A. P. Shkurinov, V. A. Makarov, L. Bergé, and S. L. Chin, "Long-

Wavelength Radiation from Femtosecond Filaments in Gases," in 2015 European Conference on Lasers and Electro-Optics - European Quantum Electronics Conference, (Optical Society of America, 2015), paper EI\_2\_6.

14. V.A. Andreeva, N.A. Panov, O.G. Kosareva, S.L. Chin, "Single-cycle pulse generation in the course of four-wave mixing in the filament" Proc. SPIE 8512, Infrared Sensors, Devices, and Applications II, 85120Z (October 15, 2012); doi:10.1117/12.929277.

15. V.A. Andreeva et al., "Transformation of THz spectra emitted from dual-frequency femtosecond pulse interaction in gases," Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2012 37th International Conference on, Wollongong, NSW, 2012, pp. 1-2.

16. V.A. Andreeva and N. A. Panov, "Angular distribution of terahertz radiation from a plasma channel of femtosecond filament," in IONS 8, (Optical Society of America, 2010), paper ILNO1.