

## ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н., профессора Фёдорова Михаила Владимировича  
о диссертационной работе Николаевой Ирины Алексеевны  
«Частотно-угловое распределение терагерцового излучения при филаментации  
фемтосекундного лазерного импульса в газах»,  
представленной на соискание учёной степени кандидата  
физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика

Диссертационная работа И.А. Николаевой посвящена теоретическому исследованию характеристик терагерцового излучения, генерируемого в воздушной плазме при филаментации фемтосекундного излучения лазера на сапфире с титаном в трех основных схемах: филаментация без затравки, филаментация во внешнем электростатическом поле, двухцветная филаментация. В силу сложного частотно-углового состава излучения таких терагерцовых источников при их использовании неизбежны компромиссы между полной энергией излучения и экспериментальной возможностью его доставки на образец. Так, наиболее эффективное преобразование энергии в ТГц диапазон достигается при двухцветной филаментации, однако диаграмма направленности в этом случае имеет форму конуса с большим углом раствора, то есть требует сбора с использованием зеркал с достаточно большой апертурой. Комплексная характеристика зависимости частотно-углового спектра и энергии терагерцового излучения филамента от параметров эксперимента является, таким образом, необходимой для оптимизации данного источника и получения заданных характеристик по энергии или направленности излучения, что обуславливает **актуальность** проведенных исследований.

Разработанные и примененные в диссертации подходы позволяют воспроизводить и предсказывать результаты лабораторных экспериментов по генерации терагерцового излучения при фемтосекундной филаментации, что указывает на высокую **теоретическую и практическую значимость** проведенного исследования.

Диссертация состоит из введения, пяти глав текста, заключения. Работа содержит 138 страниц, включает 34 рисунка, 1 таблицу и 146 библиографических ссылок.

Во **введении** приведены общие сведения о диссертационной работе, такие как актуальность выбранной темы исследования, цели и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, формулируются выносимые на защиту положения, а также приведена информация о публикациях соискателя и данные об апробации результатов работы.

**Первая глава** диссертации представляет собой обзор литературы по генерации ТГц излучения при филаментации.

Во **второй главе** описан основной теоретический аппарат, использованный в работе. Описано однонаправленное уравнение распространения, позволяющее самосогласованно описывать распространение лазерного излучения и генерируемого в воздушной плазме терагерцового излучения. Приведен вывод нелинейного фототока свободных электронов вплоть до членов второго порядка малости по полю лазерного импульса. Поскольку основной вклад в генерацию терагерцового излучения вносит именно фототок свободных электронов, обсуждается приложение системы уравнений для фототока (2.9)–(2.11) для трех

схем генерации терагерцового излучения в эксперименте (филамент без затравки, филамент во внешнем поле, двухцветный филамент).

**Третья глава** посвящена терагерцовому излучению филамента без затравки. В главе приведены результаты экспериментов, проведенных в ФИАН, демонстрирующие нарушение осевой симметрии частотно-угловых распределений терагерцового излучения филамента без затравки на выделенной частоте около 1 ТГц. Показано, что только фототок, ассоциированный со световым давлением, обеспечивает осесимметричное радиально-поляризованное ТГц излучение, в то время как фототок, ассоциированный с пондеромоторной силой, является источником двухмодового ТГц пучка, поляризованного параллельно поляризации лазерного импульса. Подавление компоненты ТГц излучения на 1 ТГц, поляризованной параллельно лазерному излучению, возможно при деструктивной интерференции полей, наведённых этими механизмами второго порядка малости. Последний параграф главы посвящен терагерцовому излучению филамента в слабом внешнем электростатическом поле. Установлено, что переход между режимами «филамента без затравки» и «филамента во внешнем электростатическом поле» осуществляется при напряженности внешнего поля около 3 кВ/см. Тем самым обоснована возможность пренебречь токами второго порядка малости при описании ТГц излучения филамента в электростатическом поле с напряженностью 10 кВ/см, которое рассмотрено далее.

**Четвертая глава** посвящена моделированию филаментации во внешнем электростатическом поле. В численном моделировании воспроизведен частотно-угловой спектр терагерцового излучения такого источника и продемонстрирован переход диаграммы направленности от распределения с плоской вершиной к кольцевому по мере роста наблюдаемой частоты терагерцового излучения. С помощью интерференционной модели ТГц излучения в дальней зоне показано, что ключевым параметром, определяющим характерные частоты указанного перехода, а также угол раствора конуса диаграммы направленности на высоких ТГц частотах, является скорость фронта ионизации в филаменте, не совпадающая с групповой скоростью импульса в линейной среде.

**Пятая глава** посвящена моделированию двухцветной филаментации. В первом параграфе главы рассмотрено использование различных комбинаций частот импульсов, образующих двухцветный филамент, и продемонстрировано, что на энергию генерируемого ТГц излучения оказывает влияние как мощность локального источника, наибольшая при использовании затравки на частотах, вдвое большей или меньшей частоты основного лазерного импульса, так и эффекты распространения, уменьшающие эффективность преобразования при использовании низкочастотной затравки. Сделан вывод, что в контексте генерации терагерцового излучения при двухцветной филаментации использование импульсов среднего инфракрасного диапазона целесообразно при сохранении «классической» схемы со слабой второй гармоникой, но не в случае, если длинноволновый импульс является затравочным.

В последующих параграфах главы анализируется влияние относительной фазы между импульсами, формирующими двухцветный филамент, на диаграмму направленности ТГц излучения. Основное внимание уделено случаю относительно длинного филамента по сравнению с длиной фазового разбегания гармоник в воздухе. В согласии с экспериментом, проведенным в ФИАН, показано, что кольцевая часть диаграммы направленности относительно нечувствительна к

указанной фазе и несет большую часть энергии в ТГц диапазоне.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В целом диссертация очень хорошо написана. Важной особенностью как самой диссертации, так и общего характера научной работы соискателя является тесное сотрудничество с работой групп в ФИАНе и в МГУ, где осуществлялись экспериментальные исследования по тематике данной работы. Причем во многих случаях это сотрудничество принимало форму совместных публикаций, в которых соискателем осуществлялось теоретическое осмысление постановки задач и интерпретации полученных результатов и их математическое моделирование. В некотором смысле это и есть наиболее ценный характер теоретико-экспериментальной научной работы.

Ввиду сказанного считаю, что диссертационная работа И.А. Николаевой выполнена на высоком научном уровне, в достаточной степени апробирована публикациями в соответствующих научных журналах и докладами на конференциях различного уровня.

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

В качестве мелких замечаний по тексту работы отмечу, например, что в подписи к Рисунку 4.10 на стр. 90 говорится о результатах измерений, отмеченных красными и синими кругами. Но на рисунке нет синих кругов, но зато есть черные треугольники. Это то, что следовало указать?

Далее, на стр. 89 перед рисунком 4.9 есть фраза “при использовании 2-м электродов ...”, где что-то явно неверно.

Ну и наконец, в п. 3 Заключения говорится о “деструктивной интерференции терагерцовых волн, излучаемых фронтом ионизации, распространяющимся со сверхсветовой скоростью”. Хорошо было бы в тексте объяснить, как реализуется сверхсветовая скорость фронта ионизации, насколько эта скорость превышает скорость света, и как это приводит к деструктивной интерференции.

Разумеется, указанные замечания не влияют на общую положительную оценку и значимость диссертационного исследования.

Считаю, что диссертация «Частотно-угловое распределение терагерцового излучения при филаментации фемтосекундного лазерного импульса в газах» соответствует специальности 1.3.19. Лазерная физика (по физико-математическим наукам), а именно направлению исследований «3. Нелинейная оптика; генерация гармоник и суперконтинума; вынужденные рассеяния; нелинейно-оптические материалы; фотонные кристаллы и устройства», а также критериям, определённым пп. 2.1–2.5 «Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», предъявляемым к кандидатским диссертациям, и оформлена согласно приложениям № 8 и 9 «Положения о совете по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова», а её автор — Николаева Ирина Алексеевна — заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19, Лазерная физика.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,  
главный научный сотрудник отдела ТИАМ ЦЕНИ  
Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук

Фёдоров Михаил Владимирович

«07» 02 2025 г.

Контактные данные:

тел.: +7 (499) 503-87-77 (доб. 2-57)

E-mail: fedorov@ran.gpi.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена докторская диссертация:

01.04.21 — лазерная физика

Адрес места работы:

119991, г. Москва, ГСП-1, ул. Вавилова, д. 38

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный  
исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова  
Российской академии наук» (ИОФ РАН)

Телефон: +7 (499) 503-87-34; e-mail: office@gpi.ru

«Подпись Фёдорова Михаила Владимировича ЗАВЕРЯЮ»:

Заместитель директора ИОФ РАН

д.ф.-м.н., доцент

Глушков В.В.

07.02.2025