

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н., профессора РАН Карташова Ярослава Вячеславовича
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 генерации терагерцового (ТГц) излучения при филаментации высокоинтенсивных фемтосекундных лазерных импульсов в газах. В работе рассмотрены несколько схем генерации ТГц излучения, включая излучение из плазменного канала, формирующегося в «одноцветном» филамента, излучение из «двухцветного» филамента, формирующегося при использовании двух импульсов накачки с различающимися центральными частотами, а также возможности для существенного усиления ТГц излучения при наличии в области филаментации внешнего электростатического поля. Интерес к подобным методам генерации терагерцового излучения в газах, в первую очередь, связан с широкополосностью данного излучения (в таких средах спектр терагерцового излучения филамента может простираться от десятых долей до нескольких десятков терагерц) и достаточно высокой эффективности преобразования оптического излучения в терагерцовое. Излучение в этом спектральном диапазоне может использоваться для прикладных задач высокочастотной ТГц спектроскопии химических соединений и различных материалов, их неразрушающего контроля, сканирования, причем именно в газах удастся достичь большей ширины спектра ТГц излучения, по сравнению, с шириной спектра этого излучения, возникающего при филаментации в некоторых кристаллах. Одной из основных особенностей ТГц излучения, возникающего при филаментации высокоинтенсивных импульсов в газах, является существенное различие диаграмм направленности излучения на различных частотах. Более того, частотно-угловой спектр и поляризация ТГц излучения из филамента могут существенно изменяться во внешнем электростатическом поле или при взаимодействии фемтосекундных импульсов на двух различных частотах. Поэтому для решения практических задач, связанных с оптимальным использованием ТГц излучения из фемтосекундных филаментов, необходимо детальное изучение соответствующих частотно-угловых спектров, особенностей физики их формирования, влияния на них структуры и спектрального состава фемтосекундного излучения, а также внешних полей. При этом несмотря на наличие большого количества исследований в данной области, ряд вопросов в настоящий момент остаётся нерешённым и является предметом дискуссии в литературе. Тем самым задачи диссертационного исследования являются **актуальными** и **практически значимыми**.

Диссертация состоит из введения, пяти основных глав и 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 посвящена описанию текущего состояния исследований по генерации ТГц излучения плазменным каналом фемтосекундного филамента в газах. Обсуждены три различные схемы генерации, использующие в качестве источника одноцветный филамент, одноцветный филамент во внешнем электростатическом поле и двухцветный филамент, которые в дальнейшем исследуются в работе. Основное внимание уделено измеренным пространственным и спектральным характеристикам терагерцового излучения, а также развитым к настоящему времени моделям для его теоретического описания.

Во второй главе представлены модели, используемые в диссертационной работе для теоретического описания генерации ТГц излучения при фокусировке мощных фемтосекундных лазерных импульсов в газах, в том числе однонаправленное уравнение распространения и модель нелинейного отклика среды. Отдельно отмечены особенности нелинейного отклика среды для различных схем генерации ТГц излучения, учитываемые при моделировании. Кроме того, описан алгоритм оптимизации вычислительных ресурсов, позволяющий проводить моделирование генерации ТГц излучения с высоким спектральным разрешением.

В третьей главе на основе вычисления векторного дифракционного интеграла с локальным источником, являющимся суперпозицией продольного и поперечного токов плазменного канала филамента, анализируются угловые распределения излучения одноцветного филамента в воздухе с частотой от 0.3 до 10 ТГц. Показано, что азимутальная модуляция кольцевого распределения ТГц излучения в дальней зоне, наблюдаемая в экспериментах, связана с интерференцией волн, излучаемых дипольным и квадрупольным источниками.

В четвёртой главе путём самосогласованного моделирования генерации терагерцового излучения при филаментации во внешнем электростатическом поле на основе однонаправленного уравнения распространения проведён анализ его частотно-углового состава. В согласии с результатами экспериментов показано, что излучение с частотой меньше нескольких терагерц имеет унимодальное угловое распределение с максимумом на оси, в то время как излучение с частотой ~ 10 ТГц и более — кольцевое с минимумом на оси. «Глубина» кольцевого распределения тем больше, чем выше частота. Установлено, что причиной формирования кольцевого распределения является интерференция терагерцовых волн, излучаемых фронтом ионизации, скорость распространения которого превышает групповую скорость импульса.

В пятой главе исследуется генерация терагерцового излучения при филаментации в воздухе двухцветных импульсов, образованных высокоинтенсивным импульсом на основной частоте и слабоинтенсивным импульсом затравки с частотой, большей или меньшей основной. Показано, что при фиксированной энергии импульсов накачки и затравки наибольшая эффективность преобразования оптического излучения в терагерцовое достигается в случае смещения импульсов основной и второй гармоник лазерного излучения. Для случая двухцветного филамента, сформированного импульсами основной и

второй гармоник, проведён подробный анализ влияния начальной относительной фазы между гармониками на угловые распределения терагерцового излучения с различной частотой. Показано, что, если длина филамента превышает длину дефазировки основной и второй гармоник, то изменение относительной фазы оказывает основное влияние на приосевую часть угловых распределение излучения с частотой меньшей нескольких терагерц. При этом энергия терагерцового излучения, распространяющегося в конус, практически не изменяется.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Рецензент отмечает, что диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне. Представленные диссертантом выводы и заключения обоснованы и убедительны. Основные результаты диссертации и положения, выносимые на защиту, опубликованы в 8 печатных работах в ведущих реферируемых оптических журналах (в том числе, в высокорейтинговых), они в достаточной степени апробированы докладами на российских и международных научных конференциях. Автореферат диссертации полностью соответствует диссертации и в достаточной степени отражает ее краткое содержание и основные полученные результаты. Среди наиболее важных новых результатов диссертационной работы необходимо отметить объяснение нарушения азимутальной симметрии интенсивности ТГц излучения из одноцветного филамента в дальней зоне, объяснение и детальное моделирование повышенной эффективности генерации ТГц излучения в филаменте при наличии внешнего статического электрического поля, а также объяснение независимости от относительной фазы между импульсами первой и второй гармоник интенсивности кольцевой части ТГц излучения.

В то же время к диссертационной работе имеется ряд замечаний:

1. Диссертационная работа содержит очень добротный и подробный анализ предшествующей литературы по генерации ТГц излучения, в том числе из фемтосекундных филаментов. Однако, в нем очень мало источников, датированных 2022-2024 годами. Стоило бы упомянуть самые свежие работы из данной области, чтобы дать представление читателю о самых последних тенденциях в исследованиях. Обзор литературы заканчивается констатацией факта, что в области генерации ТГц излучения из фемтосекундного филамента в газах есть много нерешенных задач. Это, безусловно, справедливо – но стоило бы здесь привести некое обобщенное описание круга нерешенных и наиболее актуальных задач, часть из которых рассматривается в диссертационной работе.
2. При выводе однонаправленного уравнения с разрешением несущей светового поля предполагается параболической закон дисперсии в окне прозрачности для воздуха, но в то же время керровская нелинейность предполагается не зависящей от частоты. Следовало бы указать, в каком спектральном диапазоне справедливо это предположение. В уравнениях (2.5)-(2.7), позволяющих вычислить фототок

свободных электронов, у электрического и магнитного полей использован индекс "L", что, вероятно означает локальное поле. Это обозначение необходимо объяснить, так как этот индекс отсутствует в однонаправленном уравнении распространения. Результирующие уравнения (2.9)-(2.11) для фототока получены отбрасыванием уже кубичных по полю членов. Возникает вопрос о том, насколько критичен учет этих и высших членов по полю, и может ли он привести к заметным искажениям вычисленных спектров ТГц излучения?

3. Численный подход с использованием разных сеток для оптического и терагерцового полей, описанный в конце второй главы, весьма элегантен и позволяет существенно ускорить расчеты, однако он предполагает использование существенно разных сеток для гармоники тока. При этом уравнения (2.9)-(2.11) обладают своими характерными временными и пространственными масштабами (определяемыми соответствующими производными). Не происходит ли при этом потери точности из-за слишком грубой сетки для терагерцового пучка? Стоило упомянуть, проводилось ли сравнение результатов ускоренного метода с результатами расчетов с одинаковой сеткой для оптического и терагерцового полей.
4. Сильной стороной диссертационной работы является то, что в ней численное моделирование сравнивается с результатами экспериментов, выполненных в Физическом институте им. П.Н. Лебедева. Поскольку в эксперименте регистрируются угловые распределения плотности энергии ТГц излучения, как функции двух углов α_x и α_y , то и в численном моделировании представлены аналогичные угловые распределения. Однако, в диссертационной работе не приводятся иллюстрации эволюции пространственно-временной структуры поля, такие как изоповерхности для пространственно-временных распределений интенсивности, которые бы наглядно продемонстрировали трансформацию филамента для различных состояний поляризации исходного импульса и его энергии.
5. Во всех вычислениях и в соответствующих экспериментальных результатах эффективная генерация ТГц излучения происходит в области максимальной пространственной локализации пучка, т.е. вблизи фокуса. В работе стоило бы более подробно обсудить как выбор фокусирующей линзы влияет на полученный спектр ТГц излучения и параметры филамента. Какой выбирался критерий для выбора расстояния, на котором при численном моделировании начинает учитываться нелинейный отклик газовой среды?

При этом указанные замечания не влияют на общую положительную оценку и значимость диссертации.

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 также критериям, определенным 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 учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Официальный оппонент:
доктор физико-математических наук,
профессор РАН,
главный научный сотрудник
теоретического отдела
Института спектроскопии РАН

Карташов Ярослав Вячеславович
«10» февраля 2025 г.

Контактные данные:

тел.:

E-mail: kartashov@isan.troitsk.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена докторская диссертация:

01.04.05 — оптика

Адрес места работы:

108840, г. Москва, г. Троицк ул. Физическая, д. 5

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт спектроскопии Российской академии наук» (ИСАН)

Телефон: +7 (495) 851-05-79; e-mail: isan@isan.troitsk.ru

«Подпись Карташова Ярослава Вячеславовича ЗАВЕРЯЮ»:

Учёный секретарь

Института спектроскопии РАН

кандидат физико-математических наук

Кильдиярова Р.Р.