

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИОФ РАН,

доктор физико-математических наук,
профессор, член-корреспондент РАН,

Гарнов Сергей Владимирович

« 05 » 03 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Ризаева Георгия Эдуардовича «Угловое распределение терагерцового излучения, генерируемого в плазме одноцветного филамента»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика

Актуальность темы исследования

В последние десятилетия терагерцовые (ТГц) технологии находят все больше применений в решении фундаментальных проблем астрофизики, физики конденсированного состояния и наук о материалах, а также прикладных проблем медицинской диагностики и терапии социально значимых заболеваний, неразрушающей дефектоскопии, обеспечения безопасности, проводной и беспроводной связи нового поколения (6G). Столь широкий круг применений обусловлен особенностями взаимодействия ТГц волн с объектом исследования / воздействия. ТГц излучение является неионизирующим, поэтому ТГц пучки малой мощности принято считать безвредными для живых систем. ТГц излучение проникает сквозь многие диэлектрики. Частотная зависимость ТГц комплексной диэлектрической проницаемости вещества несет уникальную (характерную для ТГц диапазона) информацию о его низкочастотных молекулярных колебаниях и структурных свойствах. Отклик магнитных материалов имеет резонансные особенности на суб-ТГц частотах. ТГц излучение сильно поглощается водой, поэтому ТГц волны чувствительны к содержанию и состоянию воды в различных системах. Несмотря на отмеченный интерес, трансляция ТГц технологий в перечисленные прикладные сферы затруднена отсутствием эффективной элементной базы ТГц диапазона, источников, детекторов, устройств управления пучками и измерения их параметров.

Диссертация Ризаева Георгия Эдуардовича посвящена развитию одного из перспективных методов генерации широкополосного импульсного ТГц излучения, а именно: генерации в плазме фемтосекундного лазерного филамента. В диссертации

проводятся систематические исследования частотно-угловых характеристик ТГц излучения, генерируемого в газоразрядном филаменте, возбуждаемом одночастотным лазерным излучением. В работе изучается возможность управления частотно-угловым спектром ТГц генерации в подобном источнике. Ввиду отмеченного интереса к ТГц технологиям и развивающимся приложениям ТГц техники выбранное направление исследований представляется весьма актуальным.

Структура диссертации

Диссертация Г.Э. Ризаева состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы (142 наименования). Объем диссертации составляет 116 страниц. Работа включает 66 рисунков. **Во введении** обосновывается актуальность выбранного направления исследований, сформулированы цель и задачи диссертации, защищаемые положения и научная новизна. Даны все необходимые сведения по диссертации. **В первой главе** проведен критический обзор литературы в рассматриваемой области, еще раз подтверждающий актуальность и новизну диссертации. **Во второй главе** описаны экспериментальные установки, использованные в диссертации. **В третьей главе** изучена зависимость частотно-углового спектра ТГц излучения от параметров лазерного пучка и длины лазерного филамента. **В четвертой главе** изучаются двумерные распределения ТГц излучения в дальней зоне при различных частотах. Рассматривается филаментация во внешнем электростатическом поле. **В заключении** приводятся основные результаты диссертации.

Научная новизна исследования

Результаты диссертации Г.Э. Ризаева обладают научной новизной. Она связана как с новизной методов исследования (в диссертации получили развитие методы исследования частотно-угловых спектров подобных сложных источников ТГц излучения), так и с новизной результатов (получены новые знания о характеристиках ТГц излучения, генерируемого лазерным филаментом при различных параметрах лазерного возбуждения).

Обоснование и достоверность результатов

Результаты диссертации Г.Э. Ризаева обоснованы и достоверны, что определяется использованием общепринятых методик эксперимента, воспроизводимостью результатов, согласованностью результатов с теоретическими (численными) предсказаниями, а также ранее опубликованными данными независимых отечественных и зарубежных научных групп.

Научная и практическая значимость

Научная значимость диссертации Г.Э. Ризаева связана с тем, что в ней обобщен и систематизирован значительный объем экспериментальных данных, описывающих свойства вторичного электромагнитного излучения ТГц диапазона из плазмы одноцветного лазерного филамента. Результаты диссертации могут быть использованы в научно-исследовательской деятельности для планирования экспериментов по генерации ТГц излучения в газоразрядной лазерной плазме – обеспечения оптимальных параметров генерируемого излучения для ТГц измерений и воздействий в области физики конденсированного состояния, наук о материалах и биомедицинских исследованиях.

Результаты представляют практический интерес, так как они способствуют развитию отечественных источников широкополосного ТГц излучения на базе газоразрядной лазерной плазмы для различных применений.

Результаты диссертации могут быть рекомендованы для использования в организациях, работающих в области лазерной физики высоких энергий: ИОФ РАН, ИПФ РАН, НИЯУ МИФИ, РФЯЦ-ВНИИЭФ, РФЯЦ-ВНИИТФ, МГУ им. М.В. Ломоносова, ИЛФ СО РАН, ИСАН, ООО «Авеста-Проект» и др.

Общая оценка работы

На основании рассмотрения материала диссертации, автореферата и представления работы на ученом совете Центра лазерной физики и фотоники ИОФ РАН, ведущая организация считает, что диссертация Г.Э. Ризаева «Угловое распределение терагерцового излучения, генерируемого в плазме одноцветного филамента» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне.

Тема и содержание диссертации полностью соответствуют специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Автореферат в полной мере отражает содержание работы, ее результаты и выводы.

Тема диссертации является актуальной, а полученные в работе результаты являются новыми и оригинальными.

Результаты диссертации Г.Э. Ризаева прошли апробацию на 11 международных конференциях, и изложены в 14 статьях в рецензируемых научных журналах, индексируемых в наукометрических базах данных Web of Science и Scopus. Стоит особенно отметить высокий уровень опубликования результатов – большинство работ вышли в профильных высокорейтинговых зарубежных (*Optics Letters*, Impact Factor (IF):

3,1; *Optics Express*, IF: 3,2; *Journal of the Optical Society of America B*, IF: 1,8) и отечественных (*Письма в ЖЭТФ /JETP Letters*, IF: 1,4) научных журналах. Определяющий вклад автора в эти работы косвенно подтверждается тем, что в 7 из 14 научных статей по диссертации он выступает первым автором.

Замечания

При рассмотрении диссертации возникли следующие замечания или вопросы:

1. В диссертации рассмотрен весьма ограниченный диапазон частот ТГц генерации в газоразрядной плазме, что может быть связано с большой длительностью возбуждающего филамента лазерного импульса, спадом мощности генерируемого излучения или чувствительности детектора в области высоких частот. В то же время газоразрядная лазерная плазма рассматривается как источник гораздо более широкополосного ТГц–ИК излучения – до 200 ТГц [Е. Matsubara et al., *Applied Physics Letters* **101**, 011105 (2012)], а также рентгеновского излучения для мультимодальных приложений [Х. С. Zhang et al., *Nature Photonics* **11**, 16–18 (2017)]. Могут ли разработанные соискателем методики применяться для изучения подобных широкополосных источников? Могут ли полученные результаты быть экстраполированы для их описания?
2. В диссертации не оценивается поляризация генерируемого ТГц излучения. Она также может эволюционировать с параметрами лазерной накачки, длиной филамента и частотой генерируемого излучения. Проводились ли такие измерения? Каковы ожидаемые поляризационные эффекты?
3. В качестве альтернативы рассмотренным в диссертации источникам широкополосного ТГц излучения внимание привлекают широкополосные фотопроводящие антенны на базе Ge с максимальной частотой генерации до 70 ТГц [А. Singh et al., *Light: Science & Applications* **9**, 30 (2020)]. Они работают при возбуждении значительно менее энергетическими импульсами портативных лазерных систем. В сочетании с принципами плазмоники [D.S. Ponomarev et al., *Optics Letters* **48**, 1220 (2023)] они могут обеспечить эффективность оптико-ТГц преобразования ~1%, по мощности. В чем может заключаться преимущество рассмотренного в диссертации принципа по сравнению с антеннами на Ge?
4. В диссертации поставленные задачи частично дублируют друг друга, например «Исследовать влияние длины плазменного канала, образующегося при филаментации, на углы распространения терагерцового излучения» и «Исследовать

угловую направленность терагерцового излучения на разных частотах, включая двумерные диаграммы».

5. В защищаемом положении 2 «...трансформируется в распределение с двумя максимумами вблизи частоты ~ 1 ТГц» остается неясным, из какой пространственной структуры и при каких условиях происходит трансформация.
6. По тексту имеются ряд грамматических ошибок (стр. 7, 41), опечаток (стр. 28, 52, 53, 66, 74, 81), жаргонных выражений (стр. 39, 78) и неточностей в оформлении графиков:
 - на Рис. 4.2 и 4.8 диссертации приведены двумерные угловые распределения ТГц излучения на разных частотах. Однако для Рис. 4.2 не указана числовая апертура, что не позволяет сопоставить результаты двух рисунков.
 - На Рис. 4.3 приведены двумерные угловые распределения на разных частотах, которые уже показаны в том же виде на Рис. 4.2. Не совсем понятна целесообразность подобного дублирования.
7. На стр. 47-48 приведена методика для определения линейной плотности плазмы по изменяемой ёмкости цилиндрического конденсатора, однако подробности выбора размеров конденсатора и диапазон измеряемых электронных плотностей не сообщается, также при описании электрической цепи в тексте не указано значение сопротивления R_1 .

Отмеченные замечания и вопросы несколько не снижают высокий уровень и общую положительную оценку диссертации.

Заключение

Диссертация Ризаева Георгия Эдуардовича «Угловое распределение терагерцового излучения, генерируемого в плазме одноцветного филамента» является законченной научно-квалификационной работой, удовлетворяющей всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. Автор диссертации – Ризаев Георгий Эдуардович – заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Доклад Ризаева Георгия Эдуардовича заслушан и обсужден, а отзыв одобрен на Ученом совете Центра лазерной физики и фотоники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей

физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН) 04.03.2025 г.
(протокол № 4).

Отзыв подготовили:

Доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник
Отдела субмиллиметровой спектроскопии Центра лазерной физики и фотоники,
ВРИО руководителя Центра лазерной физики и фотоники ИОФ РАН,
+7 903 244 41 26,
E-mail: kirzay@ran.gpi.ru

Дата: 05.03.2025 г.

Зайцев Кирилл Игоревич

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
Отдела колебаний Центра лазерной физики и фотоники ИОФ РАН,
+7 916 462 10 74,
E-mail: ushakov@kapella.gpi.ru

Дата: 05.03.2025 г.

Ушаков Александр Александрович

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»
(ИОФ РАН),
119991 ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38
Тел.: +7 (499) 503-8734
Факс: +7 (499) 503-8723
E-mail: office@gpi.ru

Основные публикации сотрудников организации по тематике диссертации соискателя в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Пономарёв Д.С., Ячменев А.Э., Лаврухин Д.В., Хабибуллин Р.А., Черномырдин Н.В., Спектор И.Е., Курлов В.Н., Кведер В.В., Зайцев К.И. Оптико-терагерцевые преобразователи: современное состояние и новые возможности для мультиспектральной визуализации // Успехи физических наук. – 2024. – Vol. 194. – P. 2–22. DOI: 10.3367/UFNr.2023.07.039503. Перевод: Ponomarev D.S., Yachmenev A.E., Lavrukhin D.V., Khabibullin R.A., Chernomyrdin N.V., Spektor I.E., Kurlov V.N., Kveder V.V., Zaytsev K.I. Optical-to-terahertz switches: state of the art and new opportunities for multispectral imaging // Physics-Uspekhi. –2024. – Vol. 67. – P. 3–21. DOI: 10.3367/UFNr.2023.07.039503.
2. Zenchenko N.V., Lavrukhin D.V., Galiev R.R., Yachmenev A.E., Khabibullin R.A., Goncharov Yu.G., Dolganova I.N., Kurlov V.N., Otsuji T., Zaytsev K.I., Ponomarev D.S. Enhanced terahertz emission in a large-area photoconductive antenna through an array of tightly packed sapphire fibers // Applied Physics Letters. – 2024. – Vol. 124, N 12. – P. 121107. DOI: 10.1063/5.0194236A.
3. Ushakov A., Chizhov P., Bukin V., Dolmatov T., Garnov S. Narrow intensity range optical anisotropy in air induced by a femtosecond laser breakdown // Applied Optics. – 2023. – Vol. 62, N 30. – P. 8000–8006. DOI: 10.1364/AO.501842.
4. Gorodetsky A., Lavrukhin D.V., Ponomarev D.S., Smirnov S.V., Yadav A., Khabibullin R.A. Enhanced THz generation from interdigitated quantum dot based photoconductive antenna operating in a quasi-ballistic regime // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2023. – Vol. 29, N 5. – P. 8500505. DOI: 10.1109/JSTQE.2023.3271830.
5. Ponomarev D.S., Lavrukhin D.V., Glinskiy I.A., Yachmenev A.E., Zenchenko N.V., Khabibullin R.A., Goncharov Yu.G., Otsuji T., Zaytsev K.I. Enhanced THz radiation through a thick plasmonic electrode grating photoconductive antenna with tight photocarrier confinement // Optics Letters. – 2023. – Vol. 48, N 5. – P. 1220–1223. DOI: 10.1364/OL.486431.
6. Ponomarev D.S., Lavrukhin D.V., Zenchenko N.V., Frolov T.V., Glinskiy I.A., Khabibullin R.A., Katyba G.M., Kurlov V.N., Otsuji T., Zaytsev K.I. Boosting photoconductive large-area THz emitter via optical light confinement behind a highly refractive sapphire-fiber lens // Optics Letters. – 2022. – Vol. 47, N 7. – P. 1899–1902. DOI: 10.1364/OL.452192.

7. Kuznetsov K.A., Tarasenko S.A., Kovaleva P.M., Kuznetsov P.I., Lavrukhin D.V., Goncharov Yu.G., Ezhov A.A., Ezhov A.A., Ponomarev D.S., Kitaeva G.Kh. Topological insulator films for terahertz photonics // *Nanomaterials*. – 2022. – Vol. 12, N 21. – P. 3779. DOI: 10.3390/nano12213779.
8. Katyba G.M., Chizhov P.A., Kurlov V.N., Dolganova I.N., Garnov S.V., Zaytsev K.I., Bukin V.V. THz generation by two-color laser air plasma coupled to antiresonance hollow-core sapphire waveguides: THz-wave delivery and angular distribution management // *Optics Express*. – 2022. – Vol. 30, N 3. – P. 4215–4230. DOI: 10.1364/OE.447060.
9. Mitina E., Uryupina D., Nikolaeva I., Shipilo D., Panov N., Ushakov A., Volkov R., Kosareva O., Savel'ev A. Enhanced forward THz yield from the long DC-biased femtosecond filament // *Optics & Laser Technology*. – 2022. – Vol. 159. – P. 108949. DOI: 10.1016/j.optlastec.2022.108949.
10. Ushakov A., Chizhov P., Nikolaeva I., Shipilo D., Panov N., Bukin V., Mamaeva K., Kosareva O., Garnov S. Superposition of 2ω and electrostatic field induced terahertz waveforms in DC-biased two-color filament // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11, N 24. – P. 11888. DOI: 10.3390/app112411888.
11. Ushakov A., Chizhov P., Bukin V., Shipilo D., Shipilo D., Panov N., Kosareva O., Garnov S. Multiple filamentation effects on THz radiation pattern from laser plasma in air // *Photonics*. – 2021. – Vol. 8, N 1. – P. 4. DOI: 10.3390/photonics8010004.
12. Shipilo D.E., Panov N.A., Nikolaeva I.A., Ushakov A.A., Chizhov P.A., Mamaeva K.A., Bukin V.V., Garnov S.V., Kosareva O.G. Low-frequency content of THz emission from two-color femtosecond filament // *Photonics*. – 2021. – Vol. 9, N 1. – P. 17. DOI: 10.3390/photonics9010017.
13. Cherkasova O.P., Serdyukov D.S., Nemova E.F., Ratushnyak A.S., Kucheryavenko A.S., Dolganova I.N., Xu G., Skorobogatiy M., Reshetov I.V., Timashev P.S., Spektor I.E., Zaytsev K.I., Tuchin V.V. Cellular effects of terahertz waves // *Journal of Biomedical Optics*. – 2021. – Vol. 26, N 9. – P. 090902. DOI: 10.1117/1.JBO.26.9.090902.
14. Chizhov P.A., Komlenok M.S., Kononenko V.V., Bukin V.V., Ushakov A.A., Bulgakova V.V., Khomich A.A., Bolshakov A.P., Konov V.I., Garnov S.V. Photoconductive terahertz generation in nitrogen-doped single-crystal diamond // *Optics Letters*. – 2022. – Vol. 47, N 1. – P. 86–89. DOI: 10.1364/OL.44675.