

ОТЗЫВ

официального оппонента

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

Диссертационная работа Г.Э.Ризаева представляет экспериментальные результаты спектрального преобразования фемтосекундных лазерных импульсов в режиме филаментации в атмосферном воздухе. Прежде всего работа сконцентрирована на исследования пространственных и спектральных особенностей генерации импульсов в терагерцовом диапазоне частот (0.1 – 10 ТГц). Формирование терагерцовых импульсов является актуальной задачей для современных оптических технологий, в частности для целей спектральной диагностики низкочастотных молекулярных колебаний различных веществ или дистанционного зондирования, поэтому безусловно тематика является актуальной, и ее выбор является обоснованным, как с точки зрения фундаментальных исследований механизмов нелинейно-оптического преобразования, так и практического применения использования терагерцовых импульсов.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списков публикаций автора и цитированной литературы. Во введении изложена актуальность тематики, связанной с использованием явления филаментации сверхкоротких лазерных импульсов для получения излучения в терагерцовом диапазоне частот, что определило цели и задачи исследования. Во введении также представлены научная новизна, практическая значимость и защищаемые положения диссертационной работы.

Первая глава является обзорной, содержащей представление физических основ явления филаментации сверхкоротких импульсов в газовой среде, а также сопровождающих филаментацию базовых нелинейно-оптических процессов, в частности, уширение спектра, генерацию оптических гармоник и длинноволнового излучения. Здесь же описаны возможные области практического применения явления филаментации фемтосекундных лазерных импульсов, в основном связанные с задачами дистанционной передачи энергии и зондирования. Основное внимание в этой главе посвящено обзору возможности генерации излучения в терагерцовом спектральном диапазоне в плазме фемтосекундного филамента. Описаны основные механизмы приводящее к генерации терагерцовых импульсов, показаны отличия механизмов при одноцветной и двухцветной фемтосекундной накачке.

Во второй главе представлены особенности экспериментальной техники на основе фемтосекундной Ti:Sapphire лазерной системы с регенеративным и многопроходным усилителями, позволяющей получать импульсы с длительностью порядка 90 фс и энергией до 8 мДж. Большое внимание в главе уделено описанию методики регистрации спектра в терагерцовом диапазоне, что достигается с помощью охлаждаемого высокочувствительного болометра. Автором подробно описаны характеристики этого прибора и его возможности. Детектирующая система помещалась на перемещаемое механическое устройство для измерения пространственного распределения генерируемых терагерцовых импульсов, и это составляло одну из основных методик проведенных измерений. Поскольку важной составляющей экспериментальных исследований являлось измерение спектра генерируемых импульсов, то подробно описаны возможности регистрации спектра с помощью поляризационных и спектральных фильтров.

Третья и четвертая глава содержат основные оригинальные результаты диссертационной работы. В третьей главе рассмотрены исследования угловых и спектральных распределений терагерцового излучения при варьировании различных параметров генерируемого одноцветного филамента, прежде всего его длины. Длина филамента изменялась как за счет изменения геометрических условий фокусировки излучения накачки, так и за счет варьирования энергии возбуждающих импульсов. В диссертации подробно представлены техника и условия измерений угла конуса генерируемого терагерцового излучения. Было показано, что характеристики конуса сильно зависят от длины волны терагерцового импульса, поэтому применялись соответствующие фильтры для выделения определенного спектрального диапазона измеряемого сигнала. Экспериментально подтверждена обратная пропорциональность угла формирования конуса квадратному корню из частоты терагерцового излучения и длины плазменного канала. К особенностям и достижениям диссертационной работы можно отнести подробное и многопараметрическое варьирование условий экспериментов, на основании которых был сделан вывод о расширении применимости данной зависимости на режим нелинейной фокусировки.

В четвертой главе исследованы спектрально зависимые двумерные картины распределения терагерцового излучения, несимметричные относительно оси «идеального» конуса, генерируемого в плазме одноцветного филамента. Наличие двудольной картины связывается с поляризацией лазерных импульсов накачки. При анализе двумерных картин распределения терагерцового излучения и их спектрального состава сделан вывод, что низкочастотные компоненты распространяются под значительными углами к оси относительно высокочастотных. Установлено, что за счет увеличения жесткости фокусировки

происходит усиление генерации терагерцовых компонент преимущественно в более коротковолновом диапазоне.

В заключительной части работы Г.Э.Ризаев приводит результаты, связанные с исследованием генерации терагерцовых импульсов в одноцветном филаменте при нарушении симметрии задачи за счет применения внешнего электростатического поля. Определены особенности диаграммы направленности терагерцового излучения в зависимости от величины приложенного напряжения внешнего электростатического поля. Найдены режимы, при которых изменяется характер диаграммы направленности излучения для различных спектральных компонент терагерцовых импульсов.

Представленные Г.Э.Ризаевым экспериментальные результаты отличаются четкостью изложения и структурированностью. Подробное изложение условий эксперимента и процедуры измерений подтверждает их достоверность. Особенно хотелось бы отметить оригинальность и значимость результатов, связанных с определением границы применимости обратной корневой зависимости угла конуса генерируемого терагерцового излучения от длины одноцветного филамента. Найденные зависимости от условий фокусировки позволяют управлять в широких пределах эффективностью и пространственным распределением терагерцового излучения. Также представляются очень значимыми результаты, связанные с регистрацией изменения характера зависимости углового распределения при использовании внешнего электростатического поля, в частности наличия конусообразного распределения для высоких частот терагерцового излучения (≥ 10 ТГц) и высоких значений напряженности внешнего электростатического поля (≥ 15 кВ/см).

Наряду с высокой оценкой представленного материала хотелось бы отметить несколько замечаний.

- В работе (параграф 2.3) представлено очень краткое описание электронной схемы для оценки плотности плазмы на основе измерения проводимости межэлектродного пространства кольцевого датчика. Однако, не приведены оценки каких-либо величин точности измеряемых характеристик, пространственного разрешения и связи с концентрацией плазмы. На основе использования этой техники на рисунке 3.4б представлены экспериментальные данные о характеристиках плазменного канала (в частности, электронной концентрации) в зависимости от мощности накачки, которые приведены лишь в относительных единицах. По существу, в дальнейшем оценки длины плазменного канала проводились за счет свечения плазменного канала, при этом также практически не описаны приближения и точность этой методики.

- В основном все приведенные экспериментальные результаты измерений терагерцовых импульсов нормированы на максимальные значения измеряемого

сигнала. Однако, оценки величины абсолютной эффективности преобразования также были бы очень полезны, что особенно важно для практического применения результатов исследований.

- В четвертой главе автор рассматривает схему для измерения двумерного пространственного распределения терагерцового излучения, предполагая, что условия измерений в горизонтальном и вертикальном направлении эквивалентны. Однако, условия фокусировки и сбора сигнала могут немного изменяться в зависимости от жесткости фокусировки и углов падения излучения на фокусирующие зеркала. К сожалению, в работе не представлено прямых оценок погрешности или тестовых измерений, показывающих эквивалентность сканированию излучения накачки в обоих направлениях.

- Основным методологическим замечанием к работе является недостаточное внимание, уделенное привязке полученных данных к физическим моделям. В работе присутствуют неоднократные упоминания об усилиях «группы теоретиков» (которые являются соавторами соискателя), однако ясное описание используемых моделей (например, на основе численного решения однонаправленного уравнения) практически отсутствует, что сильно затрудняет понимание и оценку наблюдаемых экспериментальных результатов. Например, остаются неясными причины наблюдаемых качественных изменений величины терагерцового сигнала в области 1 ТГц, представленных в защищаемых положениях 2 и 3. Также для объяснения наличия отклонения двумерного распределения терагерцового излучения от симметричного конуса автор апеллирует к простой аналогии дипольного и квадрупольного излучения (параграф 4.2). Однако в этих терминах физическая картина без дополнительных деталей остается достаточно неясной, в частности, почему величины «дипольного» и «квадрупольного» вклада сравнимы и могут интерферировать с высокой видностью. Хотелось бы отметить, что более емким является язык описания формирования терагерцового излучения на основе модели генерируемых продольных и поперечных токов в распространяющейся плазме филамента, который используется как в приведенных автором ссылках [15, 16, 32], так и в работах [I. Babushkin et al, New Journal of Physics 13, 123029 (2011). A. M. Zheltikov. Phys. Rev. A 104, 043509 (2021)].

Однако, эти замечания не влияют на высокий уровень работы. Результаты опубликованы в 14 статьях в высокорейтинговых журналах, коллективной монографии и докладывались на различных международных и отечественных конференциях, что подтверждает их достоверность и новизну. Автореферат адекватно отражает представленные в диссертационной работе материалы.

В целом можно заключить, что диссертационная работа Г.Э. Ризаева “Угловое распределение терагерцового излучения, генерируемого в плазме одноцветного филамента” является значимым научным исследованием,

удовлетворяющим всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а соискатель Ризаев Георгий Эдуардович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. «Лазерная физика».

Официальный оппонент

Федотов Андрей Борисович

Кандидат физико-математических наук

Доцент. Физический факультет Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова, кафедра общей физики и волновых процессов

1199991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр.2.

(Телефон: 916-4760204, E-mail: a.b.fedotov@physics.msu.ru)

(13 марта 2025 г.)

Список основных работ официального оппонента кандидата физико-математических наук Федотова Андрея Борисовича по тематике диссертации Ризаева Георгия Эдуардовича «Угловое распределение терагерцового излучения, генерируемого в плазме одноцветного филамента» в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет

1. A. V. Mitrofanov, D. A. Sidorov-Biryukov, P. B. Glek, M. V. Rozhko, E. A. Stepanov, A. D. Shutov, S. V. Ryabchuk, A. A. Voronin, A. B. Fedotov, and A. M. Zheltikov. Chirp-controlled high-harmonic and attosecond-pulse generation via coherent-wake plasma emission driven by mid-infrared laser pulses //Optics Letters. – 2020. – Т. 45. – №. 3. – С. 750-753.
2. A. V. Mitrofanov, A.A. Voronin, M.V. Rozhko, D. A. Sidorov-Biryukov, M.M. Nazarov, A. B. Fedotov, and A. M. Zheltikov. Polarization and spatial mode structure of mid-infrared-driven terahertz-to-microwave radiation //ACS Photonics. – 2021. – Т. 8. – №. 7. – С. 1988-1996.
3. A A Lanin, A S Chebotarev, I V Kelmanson, M S Pochechuev, E S Fetisova, D S Bilan, E K Shevchenko, A A Ivanov, A B Fedotov, V V Belousov and A M Zheltikov. Single-beam multimodal nonlinear-optical imaging of structurally complex events in cell-cycle dynamics //Journal of Physics: Photonics. – 2021. – Т. 3. – №. 4. – С. 044001.
4. A. V. Mitrofanov, D. A. Sidorov-Biryukov, M. M. Nazarov, A. A. Voronin, M. V. Rozhko, A. B. Fedotov, and A. M. Zheltikov Coherently enhanced microwave pulses from midinfrared-driven laser plasmas //Optics Letters. – 2021. – Т. 46. – №. 5. – С. 1081-1084.
5. A. V. Mitrofanov, D. A. Sidorov-Biryukov, A. A. Voronin, M. V. Rozhko, P. B. Glek, E. E. Serebryannikov, A. B. Fedotov & A. M. Zheltikov, Enhancement of plasma nonlinearities and generation of a microwave–terahertz supercontinuum in the field of subterawatt mid-infrared pulses //JETP Letters. – 2021. – Т. 113. – №. 5. – С. 301-307.
6. A. V. Mitrofanov, M.V. Rozhko, D. A. Sidorov-Biryukov, A.A. Voronin, A. B. Fedotov, and A. M. Zheltikov. Near-infrared-to-vacuum-ultraviolet high-harmonic Raman and plasma emission spectroscopy with ultrashort mid-infrared laser pulses //Journal of Raman Spectroscopy. – 2021. – Т. 52. – №. 12. – С. 2089-2099.
7. M. S. Pochechuev, A. A. Lanin, I. V. Kelmanson, A. S. Chebotarev, E. S. Fetisova, D. S. Bilan, E. K. Shevchenko, A. A. Ivanov, A. B. Fedotov, V. V. Belousov, and A. M. Zheltikov, Multimodal nonlinear-optical imaging of nucleoli //Optics Letters. – 2021. – Т. 46. – №. 15. – С. 3608-3611.
8. I.V. Savitsky, E.A. Stepanov, A.A.Lanin, A.B.Fedotov, A. M. Zheltikov. Single-cycle, multigigawatt carrier–envelope-phase-tailored near-to-mid-infrared driver for strong-field nonlinear optics //ACS Photonics. – 2022. – Т. 9. – №. 5. – С. 1679-1690.
9. I.V. Savitsky, E.A. Stepanov, A.A.Lanin, A.B.Fedotov. Mode Structure of Supercontinuum Generated by Ultrashort Pulses in Antiresonant Hollow-Core Fibers //JETP Letters. – 2023. – Т. 117. – №. 4. – С. 286-291.

10. I. V. Savitsky, P. B. Glek, R. M. Aliev, E. A. Stepanov, A. A. Voronin, A. A. Lanin & A. B. Fedotov. Phase-Sensitive Plasma Nonlinearity Controlled by Ultrashort Pulses // JETP Letters. – 2024. – T. 120. – №. 1. – C. 8-13.
11. A. V. Mitrofanov, M. V. Rozhko, N. N. Nazarov, N. V. Yakushkin, A. A. Voronin, A. B. Fedotov & D. A. Sidorov-Biryukov Generation of Terahertz Radiation by Relativistic Laser Pulses on the Surface of Thick Solid Targets and Thin Foils // JETP Letters. – 2024. – T. 119. – №. 3. – C. 166-172.
12. A. S. Chebotarev, R. I. Raevsky, G. N. Linovsky, A. I. Kostyuk, V. V. Belousov, A. B. Fedotov, A. A. Lanin. Ultrafast supercontinuum sculpting for two-photon spectroscopy and microscopy of ratiometric fluorescent indicators // Applied Physics Letters. – 2024. – T. 124. – C. 243704.