

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИОФ РАН

академик РАН, д-р физ.-мат. наук

Гарнов Сергей Владимирович

 2025 г.

Отзыв ведущей организации
на диссертационную работу Данилова Егора Алексеевича «Нелинейные явления при
взаимодействии импульсов лазерного излучения с проводниками», представленную на
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности
1.3.19 – Лазерная физика

Актуальность темы исследования

Диссертационная работа Данилова Егора Алексеевича посвящена изучению генерации терагерцовых электромагнитных поверхностных волн и звука, возникающих при воздействии на металл фемтосекундного импульса лазерного излучения. Изучение генерации терагерцовых электромагнитных полей представляет значительный интерес как для фундаментальных исследований, например, в спектроскопии и неразрушающем контроле, так и для прикладных задач, таких как неинвазивная медицинская диагностика и системы безопасности. За последние десятилетия значительное количество исследований было сосредоточено на изучении генерации объёмных терагерцовых волн, возникающих при облучении металлов фемтосекундными лазерными импульсами. Вместе с тем, в подобных процессах возможно возбуждение и поверхностных терагерцовых волн. Такие волны обладают рядом преимуществ по сравнению с волнами оптического диапазона, включая существенно большую длину распространения и меньшую чувствительность к дефектам поверхности. Несмотря на эти преимущества, детальное описание механизмов генерации поверхностных терагерцовых волн при воздействии на металл фемтосекундного лазерного импульса до сих пор остаётся недостаточно изученным. В связи с этим описание механизмов генерации терагерцовых поверхностных волн и выявление наиболее оптимальных условий их возбуждения, проведенные в диссертационной работе, являются актуальными и представляют интерес как с фундаментальной, так и с практической точек зрения.

Изучение лазерной генерации звука в металлах также представляет значительный интерес как для фундаментальных исследований, так и для практических приложений. Такой звук используется для изучения структуры и различных свойств образцов, поиска трещин и дефектов, в наномасштабной

диагностике, спектроскопии и томографии, а также в медицинских приложениях. Несмотря на большое количество экспериментальных работ, посвященных возбуждаемому в тонких пленках металлов звуку, его детальное теоретическое описание, учитывающее конечную толщину пленок, до сих пор оставалось недостаточно разработанным. Для интерпретации результатов экспериментов обычно используют либо численные методы, либо простые модели, основанные на предположениях о полубесконечной среде. В связи с этим подробное теоретическое описание генерации и детектирования звука в тонких пленках металлов с учетом их конечной толщины, представленное в диссертационной работе Данилова Е.А., является актуальным. Кроме того, в тонких пленках частоты генерируемого звука могут достигать терагерцового диапазона. Такой звук является предметом исследования множества работ, опубликованных в последние несколько лет, так как механизм генерации звука в этом диапазоне частот не до конца изучен. Одним из них является пондеромоторное воздействие на электроны. В диссертации Данилова Е.А. описана генерация звука за счет такого механизма, и проведено сравнение с традиционными механизмами, связанными с нагревом решетки и электронов. Это также представляет интерес как для фундаментальной науки, так и для практических приложений.

Структура и содержание диссертации

Диссертация Данилова Е.А. состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и списка иллюстраций. Диссертация изложена на 119 страницах и содержит 27 рисунков. Список литературы содержит 120 наименований. Во введении обосновывается актуальность тематики, приведен обзор литературы по исследованию генерации терагерцовых электромагнитных полей и звука, возникающих при воздействии на металл фемтосекундного импульса лазерного излучения. Во введении представлено обоснование научной новизны, теоретической и практической значимости выполненной работы. Четко сформулированы цели и задачи исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту. Приведены данные об апробации результатов работы и список публикаций автора по теме диссертации.

В первой главе обсуждается теория генерации терагерцовых объемных и поверхностных волн, возникающих при воздействии на металл фемтосекундного импульса лазерного излучения, сфокусированного в полосу. Сначала описано поле лазерного излучения внутри металла. Далее записаны уравнения для терагерцового электромагнитного поля, возникающего из-за неоднородного нагрева электронов и пондеромоторного воздействия на них. Проведено решение этих уравнений и получены выражения, описывающие терагерцовые поверхностные и объемные волны в различных областях пространства.

Вторая глава посвящена анализу выражений, полученных в предыдущей главе. Подробно описана структура полей терагерцовых поверхностной и объемной волн. Определена область, в которой поверхностная волна доминирует над объемной, и условия существования такой области. Также определены наиболее оптимальные условия для возбуждения поверхностной волны.

Третья глава посвящена теории генерации звука в пленке металла на подложке из диэлектрика. Записаны и решены уравнения для смещения атомов решетки, возникающего при воздействии на металл несфокусированного лазерного импульса. При этом учитывались как механизмы, описанные в литературе и связанные с нагревом решетки и электронов, так и новый, связанный с пондеромоторным воздействием на электроны. Проведен сравнительный анализ трех механизмов генерации звука при различных условиях возбуждения и при различных частотах звука.

В четвертой главе детально описано изменение коэффициента отражения пленки металла, связанное с возбуждением в ней звука. Получены аналитические выражения, описывающие это изменение. С их помощью дано детальное описание изменения коэффициента отражения при различных толщинах пленки, характеристиках металла и диэлектрика, а также параметрах излучения накачки и зондирования. Описано влияние структуры лазерного поля внутри металла и градиентов температур на генерацию звука и изменение коэффициента отражения.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Научная новизна исследования

Диссертация Данилова Е.А. представляет собой подробное исследование лазерной генерации терагерцовых электромагнитных полей и звука. Впервые дано описание пространственной структуры терагерцовых электромагнитных полей, возникающих при воздействии на металл фемтосекундного импульса сфокусированного лазерного излучения, и определены условия, в которых возможно наблюдение терагерцовой поверхностной волны. Также впервые проведено полное теоретическое описание лазерной генерации и детектирования звука в пленках металла с учетом конечной толщины пленки. Кроме того, в работе предложен новый механизм лазерной генерации звука – пондеромоторное воздействие на электроны и продемонстрирована необходимость его учета для описания терагерцового звука.

Обоснование и достоверность результатов

Результаты, приведенные в диссертации Данилова Е.А., являются хорошо обоснованными. Аналитические результаты получены с помощью решения общепринятых уравнений (уравнений Максвелла, двухтемпературной модели и упругости). Используемые в диссертации приближения и допущения являются физически обоснованными. Также достоверность результатов подтверждается сравнением с данными различных экспериментов.

Научная и практическая значимость

Исследование, представленное в диссертации Данилова Е.А., представляет собой существенное дополнение к теории генерации терагерцовых электромагнитных полей и звука в металлах. Результаты работы представляют интерес для специалистов в области взаимодействия лазерного излучения с металлами, терагерцовой оптики и плазмоники, а также лазерной оптоакустики и могут быть использованы как при планировании экспериментов, так и при интерпретации полученных данных.

Результаты диссертации могут быть рекомендованы для использования в организациях, работающих в области лазерной физики, таких как Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Объединенный институт высоких температур РАН, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Институт лазерной физики СО РАН, Институт спектроскопии РАН.

Общая оценка работы

На основании рассмотрения материалов диссертации, автореферата и представления работы на совместном заседании Ученых советов Центра лазерной физики и фотоники и Центра плазменных и микроволновых технологий, ведущая организация считает, что диссертация Данилова Е.А. «Нелинейные явления при взаимодействии импульсов лазерного излучения с проводниками» представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне. Тема и содержание диссертации полностью соответствуют специальности 1.3.19 – Лазерная физика. Автореферат полно и правильно отражает содержание работы, ее результаты и выводы. Тема диссертации является актуальной, а полученные в работе результаты являются новыми и оригинальными. Результаты работы Данилова Е.А. прошли апробацию на семинарах и международных конференциях, опубликованы в 9 научных статьях в рецензируемых научных журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, в том числе 5 статей в журналах уровня Q1.

Замечания

При рассмотрении диссертации возникли следующие замечания и вопросы:

1. В диссертации при описании лазерного поля внутри металла используется одна частота столкновений электронов ν , а при описании низкочастотного поля и нагрева металла другая частота ν_s . Из текста диссертации неясно, почему стоит различать частоты ν и ν_s , и почему нельзя использовать единое значение для частоты столкновений.
2. Для описания поведения электронов в работе используются уравнения для плотности тока и температуры электронов. Вместе с тем, в рамках гидродинамического подхода обычно вводится и уравнение для плотности. Однако в работе оно не использовалось, и плотность электронов считалась постоянной. Такое приближение требует обоснования.
3. В диссертации описано возбуждение продольных акустических волн. Однако на границе металл-вакуум могут возникать и поверхностные акустические волны (волны Рэлея). Было бы полезно уточнить, почему не рассмотрено возбуждение таких волн, и когда это оправдано.

4. В работе описана генерация звука за счет нагрева и пондеромоторного воздействия. Однако возможно возбуждение и усиление звука за счет вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна. Почему такой механизм генерации не был рассмотрен?
5. Текст диссертации не свободен от орфографических и стилистических ошибок, а также опечаток, которых следовало бы избегать. Например, в подписи к рис. 4.9 написано «штрихованная кривые», а на стр. 96 два предложения подряд начинаются с «при этом».

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

Заключение

Диссертационная работа «Нелинейные явления при взаимодействии импульсов лазерного излучения с проводниками» подтверждает научную квалификацию Данилова Е.А. и полностью удовлетворяет всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Данилов Егор Алексеевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Доклад Данилова Егора Алексеевича по материалам диссертации был заслушан и обсужден на научном семинаре им А.А. Рухадзе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН) 03 сентября 2025 г. № 1980. Отзыв подготовлен ВРИО руководителя Центра лазерной физики и фотоники (ЦЛФФ) ИОФ РАН, д.ф.-м.н. Зайцевым Кириллом Игоревичем. Отзыв обсужден и утвержден на совместном заседании Ученых советов Центра лазерной физики и фотоники и Центра плазменных и микроволновых технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» 10 сентября 2025 г. (протокол № 10/1).

ВРИО руководителя ЦЛФФ ИОФ РАН, д.ф.-м.н.,

К.И. Зайцев

Тел.: +7 (499) 503-87-77, доб. 6-71

E-mail: kirzay@gmail.com

Почтовый адрес: 119991 ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38. ИОФ РАН

Дата: «10» сентября 2025 г.

Учёный секретарь учёного совета ЦЛФФ ИОФ РАН, к.ф.-м.н.

А.В. Богач

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) 503-83-74

Факс: +7 (499) 503-87-23

E-mail: office@gpi.ru

Список публикаций сотрудников организации по тематике диссертации соискателя в рецензируемых научных журналах за последние 5 лет:

1. Gavdush A.A., Zhelnov V. A., Dolganov K.B., Bogutskii A.A., Garnov S.V., Burdanova M.G., Ponomarev D.S., Shi Q., Zaytsev K.I., Komandin G.A., Insulator-metal transition in VO₂ film on sapphire studied by broadband dielectric spectroscopy // *Scientific Reports*. — 2025. — V. 15, no. 1. — P. 3500. DOI: 10.1038/s41598-025-87573-9
2. Ушаков А.А., Чижов П.А., Букин В.В., Гарнов С.В., Генерация терагерцевого излучения в плазме оптического пробоя газов. // *Успехи физических наук*. — 2024. — Т. 194, № 2. — С. 169-183. DOI: 10.3367/UFNr.2023.10.039579
3. Пономарев 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. — Т. 194, № 1. — С. 2-22. DOI: 10.3367/UFNr.2023.07.039503
4. Пономарев Д.С., Лаврухин Д.В., Ячменев А.Э., Галиев Р.Р., Хабибуллин Р.А., Гончаров Ю.Г., Зайцев К.И., Эффективная генерация тгц излучения фотопроводящим источником с локализацией носителей заряда в высокоаспектных плазмонных электродах// *Оптика и спектроскопия*. — 2024. — Т. 132, № 1. — С. 105-110. DOI: 10.61011/OS.2024.01.57558.1-24
5. Gladyshev A., Komissarov D., Nefedov S., Kosolapov A., Velmiskin V., Mineev A., Bufetov I., Towards Mid-Infrared Gas-Discharge Fiber Lasers// *Photonics*. — 2024. — Vol. 11, no. 3. — P. 242. DOI: 10.3390/photonics11030242
6. Kucheryavenko A.S., Zhelnov V. A., Melikyants D.G., Chernomyrdin N.V., Lebedev S.P., Bukin V.V., Garnov S.V., Kurlov V.N., Zaytsev K.I., Katyba G.M., Super-resolution THz endoscope based on a hollow-core sapphire waveguide and a solid immersion lens // *Optics Express*. — 2023 — V. 31, no. 8. — P. 13366-13373. DOI: 10.1364/OE.484650
7. Anisimov M., Voronov V., Gavrilkin S., Tsvetkov A., Mitsen K., Shitsevalova N., Levchenko G., Filipov V., Demishev S. and Glushkov V, Phonon, defect and magnetic contributions to heat capacity of EuxYb_{1-x}B₆ solid solutions // *Solid State Sciences*. — 2023. — V. 142. — P. 107. DOI: 10.1016/j.solidstatesciences.2023.107233

8. Aiyzyzhy K.O., Barmina E.V., Voronov V.V., Shafeev G.A., Novikov G.G., Uvarov O.V., Laser ablation and fragmentation of Boron in liquids // Optics and Laser Technology. — 2022. — V. 155. — P. 108393. DOI: 10.1016/j.optlastec.2022.108393
9. 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. — V. 30, no. 3. — P. 4215-4230. DOI: 10.1364/OE.447060
10. 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. — V. 47, no. 1. — P. 86-89. DOI: 10.1364/OL.446750
11. 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. — 2022. — V. 9, no. 1. — P. 17. DOI: 10.3390/PHOTONICS9010017.
12. Kononenko V.V., Komlenok M.S., Chizhov P.A., Bukin V.V., Bulgakova V.V., Khomich A.A., Bolshakov A.P., Konov V.I., Garnov S.V., Efficiency of Photoconductive Terahertz Generation in Nitrogen-Doped Diamond // Photonics — 2022. — V. 9, no. 1. — P. 18. DOI: 10.3390/PHOTONICS9010018
13. Ushakov A., Chizhov P., Nikolaeva I., Shipilo D., Panov N., Bukin V., Mamaeva K., Kosareva O., Garnov S., Superposition of 2 omega and Electrostatic Field Induced Terahertz Waveforms in DC-Biased Two-Color Filament // Applied Sciences (Switzerland). — 2021. — V. 11, no. 24. — P. 11888. DOI: 10.3390/APP112411888
14. Ushakov A., Chizhov P., Bukin V., Shipilo D., Panov N., Kosareva O., Garnov S., Multiple filamentation effects on thz radiation pattern from laser plasma in air // Photonics. — 2021. — V. 8, no. 1. — P. 4. DOI: 10.3390/PHOTONICS8010004