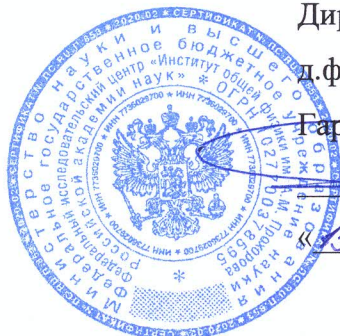


УТВЕРЖДАЮ

Директор ИОФ РАН

д.ф.-м.н., член-корр. РАН, профессор

Гарнов Сергей Владимирович



15» декабря 2023 г.

Отзыв ведущей организации

на диссертационную работу Куратова Андрея Сергеевича «Механизмы генерации сверхсильных терагерцовых полей при взаимодействии релятивистски интенсивных лазерных импульсов с твердотельными мишенями», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

Актуальность темы исследования

Электромагнитное излучение терагерцового (ТГц) спектрального диапазона, обладает, по сравнению с другими областями частот, рядом преимуществ, среди которых можно отметить неразрушающее проникание в исследуемые диэлектрические объекты, а также возможность возбуждения большого числа молекулярных переходов. По этим причинам ТГц излучение применяется в различных областях науки и техники. В медицине – это неинвазивное исследование и диагностика заболеваний. В сфере безопасности – поиск опасных веществ и предметов, в фундаментальных науках – исследование динамики сложных молекул. Использование мощных источников ТГц излучения позволяет улучшать полезные характеристики излучения, такие как отношение сигнала к шуму, область проникновения в исследуемые объекты, так же это позволяет изучать и использовать нелинейные эффекты в ТГц диапазоне. В последнее время использование имеющихся и создание новых мощных лазерных установок расширило возможности их использования для генерации вторичного излучения в том числе в терагерцовой области частот. Диссертационная работа посвящена теоретическому и численному описанию процессов генерации вторичного ТГц излучения и возникновению поверхностных токов и высоких приповерхностных полей при воздействии лазерных импульсов с длительностями от десятков до тысяч фемтосекунд и с интенсивностями свыше 10^{18} Вт/см² с металлическими мишенями. В работе определяются преобладающие механизмы генерации ТГц излучения, поверхностных электромагнитных волн и поверхностные эффекты, являющиеся причиной возбуждения сильных электромагнитных полей, что является актуальной тематикой и представляет большой интерес для исследований, направленных на использование рекордных по мощности ТГц импульсов.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключения и списка литературы. Работа изложена на 145 страницах и содержит 38 рисунков. Список литературы содержит 119 наименования.

Во Введении дается актуальность темы исследования, приведен обзор литературы по тематике генерации мощных электромагнитных импульсов терагерцового диапазона частот. Обоснована научная новизна и практическая значимость работы. Сформулированы цель и задачи исследования, а так же положения выносимые на защиту. Представлен список публикаций по теме работы и описана апробация результатов.

В первой главе описываются основные математические приемы, которые используются в последующих главах диссертации. К ним относятся подходы к аналитическому решению уравнений Максвелла в неоднородной среде. Сначала описывается решение задачи определения электромагнитного излучения в дальней зоне, генерируемого заданными токами на границе металл-вакуум. Для этого используется стандартная процедура перехода в Фурье-пространство по координатам и времени. Затем для системы вакуум — идеальный проводник описывается решение уравнений Максвелла с заданными токами на основе вычисления запаздывающих потенциалов, позволяющее определить возникающие электромагнитных поля излучения в ближней зоне. В главе также представлены численные методы, применяемые в работе. К ним относятся метод конечных разностей во временной области и метод частиц в ячейках.

Во второй главе описывается процесс генерации сильного электромагнитного излучения ТГц диапазона частот вследствие воздействия мощного лазерного импульса (с релятивистской интенсивностью) на металлическую мишень. Дается аналитическое сравнение двух механизмов, которые отвечают за генерацию ТГц излучения. Одним механизмом является генерация электромагнитного излучения при разлете лазерной плазмы в вакуум, другим — переходное излучения релятивистских (так называемых, «быстрых») электронов, нагретых лазерным импульсом и преодолевающих запирающий барьер, возникающий в лазерной плазме вследствие поля разделения заряда. Аналитически решаются уравнения Максвелла в дальней зоне, в результате чего получаются выражения для спектральной плотности излучения, возникающего согласно каждому из механизмов. Производится сравнение полных энергий излучения и эффективности излучения в рассматриваемых механизмах. В результате делается вывод, что генерация «быстрыми» электронами является преобладающим механизмом генерации ТГц излучения. В главе приводится выражение для коэффициента конверсии (отношение энергии лазерного излучения к энергии вторичного ТГц излучения) для механизма генерации «быстрыми» электронами. Во второй части главы рассматриваются поля в ближней зоне области

взаимодействия лазерного излучения с твердым телом. Для их определения решаются уравнения Максвелла в приближении идеального проводника с током, отвечающим вылету «быстрых» электронов из проводника в вакуум. В главе получены аналитические выражения для полей, демонстрирующие их уникальную униполярную форму. Совместно с аналитическим решением в главе проводилось численное решение уравнений Максвелла с полуограниченной средой, соответствовавшей металлу с реальной конечной проводимостью, и различным скоростям вылетающих из нее электронов. Численные и аналитические результаты хорошо согласуются между собой.

Третья глава посвящена сравнению трех механизмов генерации поверхностных электромагнитных волн, возникающих в процессе воздействия мощного лазерного излучения на твердотельную мишень. К этим механизмам относятся два механизма, рассмотренные во второй главе: разлет плазмы в вакуум и движение «быстрых» электронов, а так новый механизм – термо-ЭДС. Последний связан с излучением электромагнитных волн, когда для горячих электронов в лазерной плазме градиент плотности не коллинеарен градиенту температуры. В главе аналитически решаются уравнения Максвелла в дальней зоне, что позволяет получить энергетические характеристики поверхностных волн, образованных вследствие указанных выше механизмов. В конце главы показано, что преобладающим механизмом является генерация поверхностных волн переходным излучением «быстрых» электронов.

В четвертой главе рассматривается причина возникновения больших приповерхностных электромагнитных полей и поверхностных токов, наблюдаемых при воздействии лазерных импульсов на металлические или плазменные мишени. Такие поля имеют амплитуды существенно выше амплитуд полей поверхностных электромагнитных волн, однако при распространении от области генерации затухают несколько быстрее классических ПЭВ. В первой части главы рассматривается образование и эволюция электромагнитных волн (в работе они называются «поляризационными»), причиной которых является вылет «быстрых» электронов, приводящий к возникновению в проводящей мишени некомпенсированного положительного заряда. Аналитические выражения, полученные путем решения уравнений Максвелла, сравниваются с результатами численных расчетов, которые проводились двумя методами (метод конечных разностей во временной области и метод частиц в ячейках), дающими схожий результат. Показано хорошее согласие численных и аналитических результатов. Исследована также эволюция полей и токов. Во второй части главы рассмотрено возникновение электромагнитных полей на границе раздела вакуум-мишень при быстром появлении (включении) поля разделения заряда, связанного с нагревом лазерным импульсом большого числа электронов, выходящих из мишени на расстояние порядка дебаевского радиуса. Как и в предыдущей части главы, в работе приводится аналитическое описание процесса образования электромагнитных полей для разных

характеристик лазерной плазмы. Далее проводится моделирование методом конечных разностей во временной области для рассматриваемого процесса. В завершении показано, что численное и аналитическое решения практически совпадают.

В пятой главе приводятся результаты численных экспериментов по облучению проволочных металлических объектов высокоинтенсивными лазерными импульсами. Рассматривается распространение электромагнитных импульсов вдоль цилиндрических проволок с изгибами, демонстрируются диссипативные характеристики подобного распространения, связанные с затуханием и преодолением изгибов. Для нахождения подобных характеристик используется численное моделирование методом конечных разностей во временной области. Во второй части главы рассматриваются движение заряженных частиц (электронов), обладающих высокой энергией, сравнимой с массами покоя частиц, вдоль проволок. Для изучения этого процесса используется метод частиц в ячейках. Показано, что происходит формирование электромагнитных импульсов и пучков электронов движущихся совместно с импульсом вдоль поверхности проволоки.

В Заключение сформулированы основные выводы и результаты диссертации. В конце дается список используемой литературы.

Научная новизна исследования

В рамках диссертационной работы Куратова А.С. было проведено комплексное исследование генерации тергерцового вторичного излучения и электромагнитных полей, возникающих на поверхности плазмы, созданной мощным лазерным импульсом. Теоретически показано, что переходное когерентное излучение высокоэнергетичных электронов является преобладающим механизмом генерации электромагнитных волн ТГц частотного диапазона, в процессе воздействия лазерного излучения высокой интенсивности на твердотельные проводящие объекты. Впервые получены аналитические формулы для электрического и магнитного полей когерентного переходного излучения ТГц диапазона частот сгустка заряда, вылетающего из мишени с идеальной проводимостью. Впервые рассмотрен и описан процесс генерации поверхностных электромагнитных волн в ТГц диапазоне частот за счет неколлинеарности градиентов плотности и температуры горячих электронов лазерной плазмы (названный термо-ЭДС). Так же впервые описана эволюция поверхностных зарядов и приповерхностных полей, возникающих после вылета из проводящей мишени пучка ускоренных лазерным импульсом высокоэнергетичных электронов.

Обоснование и достоверность результатов

Результаты, полученные в ходе исследований, выполненных в рамках диссертационной работы, являются хорошо обоснованными. Аналитические расчеты основаны на стандартных

методах решения уравнений Максвелла. Обоснованность используемых упрощений и приближений подтверждается хорошим согласием аналитических расчетов с результатами численного моделирования, выполненного надежно верифицированными кодами. Полученные оценки для коэффициентов конверсии лазерного излучения во вторичное ТГц излучение согласуются с данными экспериментов, проводимых в передовых мировых лабораториях (Институт Гельмгольца в Йене, Институт физики китайской академии наук).

Научная и практическая значимость

Результаты, полученные в диссертационной работе Куратова А.С., представляют собой теоретическую основу для описания процесса генерации вторичного электромагнитного излучения терагерцового частотного диапазона, а также процесса возникновения и эволюции поверхностных электромагнитных полей и токов. Результаты диссертационной работы могут быть использованы для планирования экспериментов по генерации сильных терагерцовых полей в лазерной плазме, что позволит увеличивать эффективность генерации, а также использовать лазерные установки и мишени для достижения необходимых воздействий вторичного излучения на объекты, которыми могут служить как биологические ткани, в задачах биологии и медицины, так и диэлектрические объекты в фундаментальных задачах физики конденсированного состояния вещества. Таким образом, полученные в работе результаты представляют несомненный научный и практический интерес и могут быть рекомендованы для использования в организациях, работающих в области лазерной физики высоких энергий, таких как Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Объединенный институт высоких температур РАН, Институт лазерной физики РФЯЦ–ВНИИЭФ, РФЯЦ–ВНИИТФ, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Институт лазерной физики СО РАН.

Общая оценка работы

На основании рассмотрения материала диссертации, автореферата и представления работы на семинаре, ведущая организация считает, что диссертационная работа Куратова Андрея Сергеевича представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне. Тема и содержание диссертации 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. Особо стоит отметить новые результаты, связанные с распространением от области взаимодействия некомпенсированного положительного заряда, возникающего при вылете из проводящей мишени пучка лазерно-ускоренных электронов.

Полученные результаты прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях и семинарах, и в полной мере изложены в 8 статьях, опубликованных в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus.

Замечания по работе

При изучении диссертационной работы возник ряд замечаний:

1. Во второй главе диссертационной работы автором предсказывается генерация униполярных электромагнитных импульсов, связанных с переходным излучением быстрых электронов. Было бы полезно обсудить приближения, приводящие к возникновению таких импульсов, и возможные причины, почему подобные импульсы пока не наблюдаются в экспериментах по генерации терагерцового излучения.

2. В диссертационной работе в главе 3 рассматривается влияние термо-ЭДС на генерацию поверхностных электромагнитных волн, однако отсутствует рассмотрение влияния этого процесса на генерацию объемного излучения.

3. В тексте автореферата и диссертации имеются опечатки и неудачно сформулированные предложения, синтаксис которых иногда затрудняет понимание смысла. Например, при описании степени достоверности полученных результатов (стр.7 автореферата) находим такое предложение: «Механизм генерации ТГц излучения при лазер плазменном взаимодействии, описанный в диссертационной работе как основной, ответственный за генерацию основной энергии ТГц излучения, совпадает с механизмом полученным в экспериментальной работе [18], в которой исследовались механизмы генерации ТГц излучения». Подобные формулировки, страдающие от обилия повторений и при этом не слишком информативные, встречаются в тексте достаточно часто.

Сделанные замечания не затрагивают защищаемых положений и не оказывают влияния на общую положительную оценку работы.

Заключение

Диссертационная работа «Механизмы генерации сверхсильных терагерцовых полей при взаимодействии релятивистски интенсивных лазерных импульсов с твердотельными мишенями» подтверждает научную квалификацию Куратова А.С. и полностью удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации (№ 842 от 24 сентября 2013 г.), а ее автор, Куратов Андрей

Сергеевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

Доклад Куратова А.С. по материалам диссертации был заслушан и обсужден на семинаре теоретического отдела Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» 13 декабря 2023г. (протокол семинара № 1631). Отзыв подготовлен д.ф.-м.н., профессором Игнатовым Александром Михайловичем. Отзыв обсужден и утвержден на заседании Ученого совета теоретического отдела 13.12.2023 (протокол № 17).

Зам. Председателя Ученого совета
теоретического отдела ИОФ РАН,
д-р физ.-мат. наук, проф.


Игнатов А.М.

«13» декабря 2023 г.

Ученый секретарь Ученого совета
теоретического отдела ИОФ РАН
канд. физ.-мат. наук


Н.Н. Богачев

«13» 12 2023 г.

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
Email: office@gpi.ru
т. +7 (499) 503-8734

Список основных работ сотрудников ведущей организации ИОФ РАН по тематике диссертации А.С. Куратова "Механизмы генерации сверхсильных терагерцовых полей при взаимодействии релятивистски интенсивных лазерных импульсов с твердотельными мишенями" в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. D. E. Shipilo, N. A. Panov, I. A. Nikolaeva, A. A. Ushakov, P. A. Chizhov, K. A. Mamaeva, V. V. Bukin, S. V. Garnov and O. G. Kosareva, «Low-Frequency Content of THz Emission from Two-Color Femtosecond Filament», *Photonics* 9(1) 17 (2022), DOI: 10.3390/photonics9010017
2. С. Е. Андреев, И. Л. Богданкевич, Н. Г. Гусейн-заде, Д. К. Ульянов, «Влияние концентрации плазмы на эффективность генерации и изменение спектра плазменного релятивистского СВЧ-Генератора», *Физика плазмы*, 49, 2 165-174 (2023), DOI: 10.31857/S0367292122600789
3. A. A. Ushakov, M. Matoba, N. Nemoto, N. Kanda, K. Konishi, N.A. Panov, D.E. Shipilo, P.A. Chizhov, V.V. Bukin, M. Kuwata-Gonokami, J. Yumoto, O.G. Kosareva, S.V. Garnov and A.B. Savel'ev «Spectrally selective modulation of terahertz radiation beams», *Quantum Electron.* 50 1029 (2020), DOI: 10.1070/QEL17453
4. S. G. Garanin, S. V. Garnov, A. M. Sergeev & E. A. Khazanov, «Powerful Lasers for High Energy Density Physics», *Herald of the Russian Academy of Sciences* volume 91, pages250–260 (2021)
5. O. B. Shiryaev, M. Y. Romanovsky, V. V. Bukin «Vacuum post-acceleration of relativistic electrons by combinations of THz electromagnetic pulses and constant magnetic fields», *Optical Engineering*, 60, 8, 082011 (2021), DOI: 10.1117/1.OE.60.8.082011
6. B. Knyazev, N. Osintseva, M. Komlenok, V. Pavelyev, V. Gerasimov, O. Kameshkov, Y. Choporova and K. Tukmakov «Terahertz Bessel Beams Formed by Binary and Holographic Axicons», *Photonics* 10 (6), 700, (2023), DOI: 10.3390/photonics10060700
7. P. A. Obratsov, V. V. Bulgakova, P. A. Chizhov, A. A. Ushakov, D. S. Gets, S. V. Makarov, and V. V. Bukin «Hybrid Perovskite Terahertz Photoconductive Antenna», *Nanomaterials* 11, 313, (2021), DOI: 10.3390/nano11020313
8. A. M. Ignatov «Influence of a High-Frequency Field on the Interaction of Charged Particles», *Physics of Wave Phenomena* 31, 277–280 (2023), DOI: 10.3103/S1541308X23040040