

ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата физико-математических наук Кулагина Виктора Владимировича 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»

В диссертационной работе А. С. Куратова аналитически и численно исследуется взаимодействие лазерного излучения с длительностью импульсов от десятков фемтосекунд до единиц пикосекунд и релятивистской интенсивностью ($>10^{18}$ Вт/см²) с металлическими мишенями. При взаимодействии образуется лазерная плазма, и возникают токи заряженных частиц, что приводит к появлению сильных полей и излучению электромагнитных волн. Основным направлением диссертационной работы является изучение механизмов генерации сверхсильных полей на поверхности мишени, их эволюции и формирования мощного излучения терагерцового диапазона частот. Быстрое развитие лазерных систем с высокой интенсивностью и наличие многочисленных областей применения мощного терагерцового излучения делают тему диссертационной работы **актуальной и практически значимой**.

Диссертация состоит из Введения, 5 глав и Заключения, включает 145 страниц, 38 рисунков, список литературы содержит 119 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность исследования, сделан обзор литературы, указана цель работы и поставлены задачи, описана новизна и практическая значимость полученных результатов. Кроме того, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведена информация о личном вкладе автора, показана степень достоверности работы, перечислены всероссийские и международные конференции, на которых проводилась апробация работы, а также представлен список публикаций по материалам диссертации.

Глава 1 посвящена описанию математических и численных методов, применяемых в диссертации. Представлены аналитические подходы, позволяющие найти решения уравнений Максвелла в дальней и ближней зоне для заданных токов. Также описаны численные подходы к решению уравнений Максвелла (метод частиц в ячейках и метод конечных разностей во временной области).

Во **второй главе** проводится сравнительное исследование двух механизмов генерации терагерцового излучения при воздействии короткого мощного лазерного импульса на твердотельную мишень высокой проводимости. Первым механизмом является формирование терагерцовых импульсов при разлете в вакуум образующейся плазмы, вторым - когерентное переходное излучение релятивистских электронов, покидающих мишень вследствие нагрева лазерным импульсом. Приведены оценки коэффициентов конверсии для различных механизмов, показано, что наибольшую мощность терагерцового излучения обеспечивает второй механизм. Для него получены аналитические выражения для полей терагерцового излучения в ближней зоне.

В **главе 3** анализируются три механизма, приводящие к генерации поверхностных электромагнитных волн терагерцового диапазона на границе раздела сред. Этими механизмами являются термо-ЭДС, возникающая из-за неколлинеарности градиентов температуры и плотности горячих электронов, разлет плазмы в вакуум и движение быстрых электронов, покидающих мишень. Для всех механизмов аналитически получены коэффициенты конверсии лазерного

излучения в поверхностную электромагнитную волну в дальней зоне. Показано, что наибольшую эффективность генерации имеют поверхностные волны, образующиеся вследствие вылета высокоэнергетичных электронов.

В **четвертой главе** рассматриваются аномально сильные приповерхностные электромагнитные поля в ближней зоне области взаимодействия лазерного излучения с твердотельной мишенью. Показано, что эти поля связаны с поверхностными токами нескомпенсированного положительного заряда, который создается лазерным импульсом. Рассмотрены возможные механизмы образования таких полей, в частности, вылет высокоэнергетичных электронов из образованной лазером плазмы и быстрое возникновение поля разделения заряда на границе мишень-вакуум. Для каждого из перечисленных процессов проводится сравнение полученных аналитических выражений для полей с результатами численных расчетов, продемонстрировано их хорошее совпадение.

В **главе 5** численно исследуется процесс воздействия лазерного излучения высокой интенсивности на цилиндрические металлические и плазменные проводники с диаметром от десятков до сотен микрон и генерации поверхностных электромагнитных импульсов терагерцового диапазона частот. Подробно рассматривается движение приповерхностных электромагнитных полей и заряженных частиц с высокой энергией вдоль таких проводников на значительные расстояния от места воздействия лазерного импульса.

В **Заключении** приведены выводы и основные результаты работы.

Научная **новизна** работы не вызывает сомнений и определяется тем, что в ней для взаимодействия мощного лазерного излучения с твердотельными мишенями высокой проводимости впервые: а) получены аналитические выражения для электромагнитного поля когерентного переходного излучения сгустка заряда, вылетающего из мишени; б) исследована эволюция поверхностного заряда и поверхностных полей в ближней зоне области взаимодействия; в) описан механизм генерации поверхностных волн терагерцового диапазона за счет термо-ЭДС; д) теоретически определен механизм, являющийся наиболее эффективным для генерации мощных терагерцовых импульсов для мишеней с размерами, существенно превышающими длину волны лазера.

Достоверность представленных результатов подтверждается использованием стандартных методов нахождения аналитических и численных решений уравнений Максвелла, использованием проверенных численных кодов, хорошим согласованием аналитических и численных результатов, полученных в работе, как между собой, так и с опубликованными экспериментальными данными.

Научные положения, выносимые на защиту, а также выводы и заключения, сформулированные в диссертации, полностью **обоснованы**. Результаты работы прошли апробацию на многочисленных всероссийских и международных конференциях и семинарах. По результатам диссертационной работы опубликовано 8 статей в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, что подтверждает высокую оценку научным сообществом полученных результатов. Содержание автореферата соответствует диссертации.

По содержанию диссертации могут быть сделаны следующие **замечания**:

1. Следовало бы более конкретно указать пределы применимости предлагаемых моделей и полученных результатов. В частности, вывод главы 1 о преобладающем механизме генерации терагерцового излучения может быть некорректным для наноразмерных мишеней, не рассматриваемых в диссертации.

2. В главах 2 и 3 не используется численное моделирование с применением PIC кодов, которое позволяет адекватно учитывать различные нелинейные эффекты, возникающие при взаимодействии мощных лазерных импульсов с мишенями.

3. Сравнение различных механизмов генерации мощного терагерцового излучения было бы интересно провести для более широкого диапазона изменения параметров задачи (мощность лазера, размеры и геометрия мишеней и др.).

3. К числу мелких недостатков можно отнести наличие в автореферате и в диссертации большого количества опечаток, в том числе, в формулах (например, в тексте перед уравнением (1.1), в уравнениях (1.4), (2.1) и др.). Кроме того, в нескольких случаях вводятся различные обозначения для одной и той же переменной в разных главах и даже внутри одной главы (например, D и L для размера лазерного пятна в параграфах 4.1.1 и 4.1.2 главы 4), не везде объясняются введенные обозначения и указывается геометрия задачи (оси координат, направление распространения лазерного импульса, положение мишени и др.).

В целом диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, а отмеченные замечания не снижают качество и значимость проведенных исследований и полученных результатов. Диссертационная работа Куратова А.С. «Механизмы генерации сверхсильных терагерцовых полей при взаимодействии релятивистски интенсивных лазерных импульсов с твердотельными мишенями» представляет собой законченную научно-квалификационную работу и **полностью удовлетворяет всем требованиям** к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным 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.

Официальный оппонент:

Старший научный сотрудник ГАИШ МГУ,
кандидат физико-математических наук

Кулагин Виктор Владимирович
« 21 » декабря 2023 г.

Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова
Почтовый адрес: 119234, Россия, г. Москва, Университетский проспект, д.13,
Телефон: (8-495)-939-53-27
E-mail: victorvkulagin@yandex.ru

Подпись с.н.с. ГАИШ МГУ, кандидата физ.-мат. наук В.В. Кулагина удостоверяю

Директор ГАИШ МГУ
член-корреспондент РАН, профессор

Постнов Константин Александрович

Список основных работ официального оппонента Кулагина Виктора Владимировича по тематике диссертации А.С. Куратова "Механизмы генерации сверхсильных терагерцевых полей при взаимодействии релятивистски интенсивных лазерных импульсов с твердотельными мишенями" в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. В. В. Кулагин, В. Н. Корниенко, В. А. Черепенин, Д. Н. Гупта, Х. Сак, «Характеристики квазиоднополярных электромагнитных импульсов, формируемых при взаимодействии мощных лазерных пучков с наноразмерными мишенями» Квантовая электроника 49(8), 788 (2019)
2. M. C. Gurjar, K. Gopal, D. N. Gupta, V. V. Kulagin and H. Suk, "High-Field Coherent Terahertz Radiation Generation From Chirped Laser Pulse Interaction With Plasmas" IEEE Transactions on Plasma Science 48(10), 3727 (2020), DOI: 10.1109/TPS.2020.3022903.
3. В. В. Кулагин, В. Н. Корниенко, В. А. Черепенин, Д. Н. Гупта, Х. Сак, «Генерация интенсивного когерентного электромагнитного излучения при взаимодействии мультитераваттного лазерного импульса с нанопроволочной мишенью» Квантовая электроника 51(4), 323 (2021)
4. M. C. Gurjar, K. Gopal, D. N. Gupta and V. V. Kulagin «Terahertz radiation generation from short-pulse laser interaction with electron-hole plasmas» Europhysics letters 133, 14001 (2021), DOI: 10.1209/0295-5075/133/14001
5. D.N. Gupta, A. Jain, V.V. Kulagin, M.S. Hur, and H. Suk «Coherent terahertz radiation generation by a flattened Gaussian laser beam at a plasma–vacuum interface» Appl. Phys. B, 128, 50 (2022), DOI: 10.1007/s00340-022-07777-z