

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук, Тимофеева Игоря Валериевича на диссертацию 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»

Диссертация А.С. Куратова посвящена взаимодействию импульсного лазерного излучения релятивистской интенсивности ($> 10^{18}$ Вт/см²) с металлическими мишенями. В результате взаимодействия образуется плазма и возникают токи заряженных частиц, движение которых приводит к появлению сильных электромагнитных полей, а также вторичного излучения. Важной темой, затронутой в диссертационной работе, является теоретическое описание механизмов генерации мощного излучения терагерцового (ТГц) диапазона частот. Развитие в последнее время мощных лазерных установок делает тему применения вторичного излучения **актуальной**, а широкий спектр применений мощного терагерцового излучения подчеркивает **практическую значимость** работы.

Диссертация состоит из Введения, 5 глав и Заключения. Полный объем диссертации составляет 145 страниц, где содержится 38 рисунков, список литературы содержит 119 наименований.

Во **введении** сформулированы актуальность исследований, представлен обзор литературы, указана цель работы и решенные задачи; обозначена новизна и практическая значимость полученных результатов. Приводятся положения, выносимые на защиту, а также информация о личном вкладе автора, обозначена степень достоверности работы, перечислены всероссийские и международные конференции, на которых проводилась апробация работы, а также представлен список публикация по материалам диссертации.

В **главе 1** описаны подходы к аналитическому решению уравнений Максвелла, к которым относятся использование преобразований Фурье, позволяющих перейти к более простым уравнениям и получить аналитические выражения для полей в Фурье-представлении, а также использование приближения идеального полу-бесконечного проводника, позволяющего свести решение уравнения к вычислению интеграла для запаздывающего потенциала. В главе также описаны численные подходы к решению уравнения Максвелла, используемые в диссертационной работе. Кратко описывается метод конечных разностей во временной области и метод частиц в ячейках.

Во **второй главе** описываются и сравниваются механизмы генерации электромагнитного излучения ТГц диапазона при воздействии короткого мощного лазерного импульса на твердотельные мишени. Первым механизмом является генерация ТГц импульсов при разлете образовавшейся плазмы, вторым - переходное излучение быстрых нагретых лазерным импульсом электронов, преодолевающих запирающий барьер, образованный плазмой. Во второй части главы аналитически рассматриваются поля, возникающие в ближней к области воздействия лазерного импульса на мишень зоне, и представлены аналитические выражения для возникающих полей электромагнитного излучения в приближении идеально-проводящей мишени.

В **главе 3** рассматриваются поверхностные электромагнитные волны (ПЭВ), также возникающие при воздействии лазерных импульсов на металлические или плазменные мишени. Сравнивается эффективность генерации ПЭВ для трех различных механизмов (разлет плазмы в вакуум, движение быстрых электронов, покидающих мишень, и возникающая термо-ЭДС), для которых получены аналитические выражения для полей ПЭВ в дальней зоне. В главе приведено попарное сравнение механизмов, а также демонстрируется коэффициент конверсии лазерного излучения в поверхностные волны. Показано, что наиболее эффективный механизм генерации ПЭВ связан с вылетом из мишени высокоэнергетичных электронов.

В **четвертой главе** рассматривается образование сильных приповерхностных полей и соответствующих поверхностных токов вблизи области взаимодействия лазерного импульса и твердотельной мишени. Показано, что эволюция этих полей отличается от эволюции ПЭВ. Рассматриваются два процесса, приводящие к большим поверхностным полям и токам, - вылет высокоэнергетичных электронов и формирование поля разделение заряда. В главе приведены аналитические выражения, описывающие поведения таких полей, а также показано, что, обладая существенно большей амплитудой, они затухают несколько быстрее, чем классические ПЭВ.

В **главе 5** проведено численное исследование воздействия лазерных импульсов на проволочные металлические объекты, которые используются как в качестве мишени для генерации ТГц излучения, так и своеобразного волновода, позволяющего распространять приповерхностные электромагнитные волны на большие расстояние от области воздействия лазерного импульса. Также уделяется внимание распространению заряженных частиц (электронов) вдоль проволочных мишеней.

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

В диссертационной работе впервые получены аналитические выражения для электромагнитного поля когерентного переходного излучения сгустка электронов, нагретых лазерным импульсом, также впервые продемонстрирована эволюция возникающего некомпенсированного поверхностного заряда и соответствующего поверхностного поля в ближней

зоне относительно области взаимодействия. Рассмотрен механизм термо-ЭДС, приводящий к генерации сравнительно сильных поверхностных электромагнитных волн ТГц диапазона. Найден наиболее эффективный механизм генерации ТГц излучения. Таким образом, основные результаты исследований имеют высокую степень **новизны**.

Достоверность результатов подтверждается использованием стандартных подходов к нахождению аналитических и численных решений уравнений Максвелла, использованием проверенных численных кодов и хорошим соответствием аналитических и численных результатов.

Положения, выносимые на защиту и выводы, сформулированные в диссертации, обладают **высокой степенью обоснованности**. 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.

По диссертационной работе можно сделать следующие **замечания**:

1. В работе имеется множество грамматических и пунктуационных ошибок, что существенно осложняет её чтение. Некоторые части особенно изобилуют рассогласованием падежных окончаний, характерных для компьютерных переводчиков с английского.
2. Несмотря на то что в работе имеется раздел 2.3 с названием “Экспериментальная проверка теории”, в нём не приводятся количественных сравнений каких-либо характеристик ТГц излучения, предсказанных в теории и измеренных в эксперименте. Делается лишь качественный вывод о доминировании механизма переходного излучения при определённом наборе параметров облучающего лазера. Между тем, было бы интересно наложить на экспериментальный график спектрального распределения интенсивности излучения, приведённый на рис. 2.13, свою теоретическую кривую. Кроме того, имело бы смысл провести анализ и других аналогичных экспериментов с целью подтверждения способности своей теории предсказывать зависимости мощности излучения от ключевых параметров задачи.
3. В главе 5 диссертации делается вывод о возможности распространения вдоль проволочных мишеней ТГц импульсов с полем до 10^3 - 10^4 ГВ/м на “большие” расстояния. При этом для моделирования столь интенсивной поверхностной волны (в которой электроны должны осциллировать с релятивистскими скоростями) используется линейный отклик среды (модель Друде). Кажется очевидным, что такая упрощённая модель не сможет правильно ответить на вопрос о диссипации энергии поверхностной волны в проволоке, и оценить длину её распространения.

Сделанные замечания не являются принципиальными и не снижают научной значимости результатов, представленных в диссертации, и общей положительной оценки работы.

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 ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

Официальный оппонент:

Главный научный сотрудник

лаборатории 9-1

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН),

доктор физико-математических наук

Тимофеев Тимофеев Игорь Валериевич

«15» декабря 2023 г.

Почтовый адрес: 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д.11, к. 302 здание 20Д

Телефон: +7 9134750178

E-mail: I.V.Timofeev@inp.nsk.su

Подпись И.В. Тимофеева удостоверяю:

ученый секретарь ИЯФ СО РАН,

кандидат физико-математических наук



Резниченко

Резниченко Алексей Викторович

Список основных работ официального оппонента Тимофеева Игоря Валериевича 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. Е. П. Волчок, В. В. Анненков, Е. А. Берендеев, И. В. Тимофеев, "Генерация узкополосного ТГц излучения за счёт столкновения в плазме лазерных кильватерных волн с мелкомасштабной поперечной структурой", Квантовая электроника, 53:3 272 (2023)

2. Denis A. Samtsov, Andrey V. Arzhannikov, Stanislav L. Sinitsky, Sergei S. Popov, Evgeny S. Sandalov, Andrey F. Rovenskikh, Alexandr A. Kasatov, Vasiliy D. Stepanov, Ivan A. Ivanov, Igor V. Timofeev, Vladimir V. Annenkov, Vladimir V. Glinskiy, "Generation of a Directed Flux of Megawatt THz Radiation as a Result of Strong REB-Plasma Interaction in a Plasma Column," in IEEE Transactions on Plasma Science 49 11 3371 (2021), DOI: 10.1109/TPS.2021.3108880

3. E. A. Berendeev, I. V. Timofeev, E. P. Volchok and V. V. Annenkov, "PIC simulations of high-power THz radiation produced by the collision of profiled plasma wakefields" J. Phys.: Conf. Ser. 2028 012008 (2021), DOI: 10.1088/1742-6596/2028/1/012008

4. Andrey V. Arzhannikov, Petr V. Kalinin, Sergey A. Kuznetsov, Konstantin N. Kuklin, Maksim A. Makarov, Sergey S. Popov, Andrey F. Rovenskikh, Denis A. Samtsov, Evgeny S. Sandalov, Stanislav L. Sinitsky, Vasily D. Stepanov, Vladimir V. Glinsky, Igor V. Timofeev, "Beam-Plasma Interaction System Providing Ten Megawatt Power of THz Radiation Flux in Microsecond Pulse," 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz) pp. 1-2, (2021) DOI: 10.1109/IRMMW-THz50926.2021.9567120

5. E. P. Volchok, I. V. Timofeev and V. V. Annenkov, "Coherent terahertz emission from a plasma layer due to linear conversion of laser wakefields on pre-modulated ion density" Plasma Phys. Control. Fusion 61 125006 (2019), DOI: 10.1088/1361-6587/ab4cfa