

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физический институт им П.Н. Лебедева  
Российской академии наук

На правах рукописи

Куратов Андрей Сергеевич

**Механизмы генерации сверхсильных  
терагерцовых полей при взаимодействии  
релятивистски интенсивных лазерных  
импульсов с твердотельными мишенями**

Специальность 1.3.19 – Лазерная физика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2023 г.

Работа выполнена в ФГБУН Физическом институте им П.Н. Лебедева  
Российской академии наук (ФИАН), г. Москва.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
**Брантов Андрей Владимирович**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Тимофеев Игорь Валериевич,  
главный научный сотрудник  
Института ядерной физики  
имени Г.И. Будкера СО РАН

кандидат физико-математических наук  
Кулагин Виктор Владимирович,  
старший научный сотрудник  
Московского государственного университета  
имени М. В. Ломоносова

Ведущая организация: Федеральный исследовательский центр  
«Институт общей физики  
им. А. М. Прохорова  
Российской академии наук»

Защита диссертации состоится 22 января 2024 г. в 10 часов 00 минут на  
заседании диссертационного совета 24.1.262.01 на базе Федерального госу-  
дарственного бюджетного учреждения науки Физического института им  
П.Н. Лебедева Российской академии наук по адресу: 119991 г. Москва, ул.  
Ленинский проспект д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН и на сайте инсти-  
тута [www.lebedev.ru](http://www.lebedev.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.1.262.01

доктор физико-математических наук

А. С. Золотько

# Общая характеристика работы

## Актуальность темы

Терагерцовое (ТГц) излучение является распространенным инструментом, широко используемым в различных областях науки и технологиях, начиная от использования в фундаментальных исследованиях и заканчивая применениями в коммуникациях [1] и в сфере безопасности [2]. Терагерцовые технологии имеют большую и развитую элементную базу и используются в большом числе готовых приборов [2]. При этом в последние годы все отчетливее прослеживается тенденция в получении все более мощных широкополосных ТГц импульсов, прорывной прогресс в котором связывается с использованием мощных короткоимпульсных лазеров.

Успехи в разработке источников мощного ТГц излучения и их оптимизации для получения еще больших значений полей дают импульс развитию и усовершенствованию методик применения ТГц излучения в различных областях [3], таких как биомедицина [4], физика конденсированного состояния вещества [5, 6], безопасность [7], и ТГц связь [8]. Мощные источники позволяют исследовать нелинейные явления в физике твердого тела, увеличивая область применения ТГц спектроскопии; применяются для исследований в области резонансного и нерезонансного контроля материалов, например, для изучения полевой эмиссии электронов под действием ТГц волн [9–11], исследования Блоховских осцилляций [12], ионизации Ридберговских состояний [13], управления состояниями сверхпроводников [14–16].

Отметим, что разработка мощных источников ТГц излучения позволяет не только диагностировать и изучать свойства материалов, но и управлять ими. Таким образом, к настоящему времени компактные и доступные источники мощного терагерцового излучения являются востребованным для широкого круга практических задач. Именно актуальной проблеме разработки теоретических основ терагерцового излучения на основе воздействия релятивистских лазерных импульсов на мишени с высокой проводимостью и посвящена данная работа.

## Цель и задачи диссертационного исследования

Целью работы является теоретическое исследование процесса генерации терагерцового излучения при взаимодействии релятивистски интенсивных лазерных импульсов с твердотельными мишенями, включая проведение сравнения механизмов генерации и оценку параметров результирующего излучения. В соответствии с поставленной целью в диссертационной работе ставились следующие задачи:

1. Рассмотреть процессы, возникающие при взаимодействии релятивистски интенсивных лазерных импульсов с твердотельными мишенями, способные приводить к генерации низкочастотного излучения в терагерцовом диапазоне частот. Оценить их максимальные эффективности и выделить наиболее вероятные источники низкочастотного излучения.
2. В приближении мишени с идеальной проводимостью получить аналитические решения для генерируемых электромагнитных волн ТГц диапазона частот переходного излучения в вакууме в ближней зоне, найти их форму, спектральные и энергетические характеристики.
3. Получить аналитические решения для генерируемых электромагнитных поверхностных ТГц волн, найти их спектральные и энергетические характеристики. Изучить особенности распространения заряда в скинновом слое мишени с высокой проводимостью.
4. Провести численные расчеты, соответствующие взаимодействию лазерных импульсов с мишенями, и показывающие генерацию излучения при вылете пучка электронов (в том числе с разбросом по энергии и углу) из мишеней с конечной диэлектрической проницаемостью для проверки корректности приближений, сделанных в аналитических моделях.
5. Исследовать возможность концентрации энергии ТГц излучения за счет геометрии мишени (использования проволочных мишеней).

## **Научная новизна диссертационного исследования**

Диссертация содержит описание законченного исследования, научная новизна которого заключается в следующем:

1. Впервые получены аналитические выражения для электромагнитного поля когерентного переходного излучения ТГц диапазона частот сгустка заряда, вылетающего из мишени с идеальной проводимостью.
2. Описан процесс генерации поверхностных электромагнитных волн в ТГц диапазоне частот за счет термо-ЭДС.
3. Теоретически выделен механизм (переходное излучение высокоэнергетичных электронов), наиболее эффективный для генерации ТГц излучения при воздействии релятивистских лазерных импульсов на твердые мишени.
4. Впервые описаны процессы эволюции поверхностных зарядов, возникающих при вылете из мишени с высокой проводимостью пучка высокоэнергетичных электронов, ускоренных коротким мощным лазерным импульсом.

## **Практическая значимость работы**

Практическая значимость разработанных в диссертации теоретических моделей генерации терагерцового излучения состоит в объяснение результатов экспериментов по генерации ТГц излучения при взаимодействии лазерного излучения с высокопроводящими мишенями, а также возможности будущего планирования экспериментов на мощных установках, позволяя оценивать коэффициент конверсии энергии лазерного импульса в энергию генерируемого терагерцового импульса, вычислять направленность излучения и его спектр, оценивать ожидаемые максимальные поля на разном расстоянии от источника.

## Положения, выносимые на защиту

1. При взаимодействии лазерного импульса длительности от десятков фемтосекунд до пикосекунд с релятивистской интенсивностью ( $I > 10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup>) с твердотельными мишенями преобладающим механизмом генерации терагерцового излучения является переходное излучение нагретых лазером высокоэнергетичных электронов.
2. Переходное излучение нагретых электронов при лазер-плазменном взаимодействии проявляется в форме униполярных электромагнитных импульсов, улетающих от мишени.
3. Термоэлектрические токи, возникающие вследствие неколлинеарных градиентов плотности и температуры, генерируют поверхностные волны в терагерцовом диапазоне частот с заметным коэффициентом конверсии энергии лазера в энергию терагерцовых поверхностных волн вплоть до  $10^{-5}$ .
4. Зарядка мишени, возникающая при воздействии релятивистского лазерного импульса фемтосекундной - пикосекундной длительности на металлические мишени, приводит к сильным поляризационным токам, распространяющимся от области взаимодействия в виде импульсов терагерцового диапазона частот с сильными приповерхностными полями, превосходящими в ближней зоне поля поверхностных волн.
5. Проволочные мишени позволяют за счет геометрического фактора усиливать у своей поверхности поля ТГц импульса переходного излучения и распространять ТГц электромагнитные волны на расстояния много большие размеров области взаимодействия и длины волны излучения.

## Степень достоверности

Достоверность полученных результатов обуславливается использованием стандартных подходов к нахождению аналитических решений уравнения Максвелла, использованием проверенных численных кодов и хорошим согласием результатов моделирования с аналитическими оценками.

Полученные в диссертации результаты согласуются с рядом экспериментальных работ, проводимых в научно исследовательских институтах (Германия [17], Китай [18], Япония [19]), а коэффициенты конверсии и спектрально-энергетические характеристики излучения очень близки или соответствуют полученным в экспериментах результатам. 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.

## **Апробация результатов**

Результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались автором лично на отечественных, международных конференциях и на семинарах – ”Международной звенигородской конференции по физике плазмы и УТС” (2017 Звенигород, Россия), ”Всероссийской школе для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям ” (2017 Саров, Россия), ”Харитоновских тематических научных чтениях” (2016, 2018 Саров, Россия), ”Plasma Physics by Laser and Applications” (PPLA) (2017 Мессина, Италия), ”International Conference on Ultrafast Optical Science UltrafastLight” (2017, 2019 Москва), ”International Conference on Laser Optics” (ICLO) (2018, 2022 Санкт-Петербург, Россия), ”EPS Conference on Plasma Physics” (2016, Лиссабон, Португалия), ”International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves” (IRMMW-THz) (2016 Копенгаген, Дания, 2019 Париж, Франция), ”Asia-Pacific Conference on Plasma Physics” (AAPPS-DPP) (2018 Канадзава, Япония), ”European conference of laser interaction with matter” (ECLIM) (2016 Москва, Россия), ”Annual international laser physics workshop” (LPHYS) (2017, Казань, Россия), Семинаре ”Новые методы ускорения частиц и экстремальные состояния материи” (2022, 2023, Новосибирск-Нижний Новгород-Москва), ”Семинаре им. А.А. Рухадзе Теоретического отдела ИОФ РАН” (2022, Москва), ”Семинаре отделения Квантовой радиофизики им. Н.Г. Басова” (2022, Москва, ФИАН).

## Публикации

Материалы диссертации изложены в 8 статьях в рецензируемых научных журналах рецензируемых в Web of Science, Scopus и РИНЦ в 6 материалах конференций индексируемых в Web of Science и Scopus. Список публикаций приводится на 19-21 страницах автореферата.

## Личный вклад автора

Все результаты работы получены автором лично или при его непосредственном участии. Постановка задач исследований и интерпретация результатов выполнены совместно с соавторами опубликованных работ. Автор участвовал в получении аналитических решений описываемых уравнений и проверки их достоверности. Автор лично проводил численные эксперименты и численные оценки результирующих параметров. Так же автором лично модифицировались и дополнялись численные коды для решения задач представленных в главах диссертации.

## Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем работы составляет 145 страниц, где содержится 38 рисунков. Список литературы содержит 119 наименований.

## Основное содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, приводится обзор литературы по тематике генерации мощных ТГц импульсов, а так же подробно описывается способ генерации, заключающийся во взаимодействии релятивистски интенсивных лазерных импульсов с высокопроводящими мишенями. Обсуждается научная новизна и практическая значимость исследования. Сформулированы цель и задачи диссертационной работы. Так же представлены положения, выносимые на защиту, список публикаций автора по теме работы, представлена апробация результатов.

В **главе 1** описаны два стандартных подхода к аналитическому решению уравнения Максвелла в неоднородной среде (состоящей из вакуума и мишени с высокой проводимостью), используемые в диссертационной работе и применяемые численные методы. В разделе **1.1** описывается метод решения уравнений Максвелла в дальней зоне с заданным током, с использованием Фурье преобразований. В разделе **1.2** используется уравнение для векторного потенциала, чтобы получить выражения для полей в ближней зоне для случая заданных токов и идеально проводящей мишени. Подобное приближение позволяет просто выполнить граничные условия, используя метод отображения. Разделы **1.3** и **1.4** посвящены краткому описанию используемых численных методов – методу конечных разностей во временной области (FDTD) и методу частиц-в-ячейках (PIC).

Во **второй главе** описывается генерация электромагнитного излучения терагерцового диапазона при воздействии короткого мощного лазерного импульса на твердотельные мишени. Сравниваются два механизма генерации, свойственные лазер-плазменному взаимодействию при релятивистских интенсивностях. Первым механизмом является генерация ТГц импульсов при разлете плазмы в вакуум, вторым – переходное излучение быстрых нагретых лазерным импульсом электронов, преодолевающих запирающий барьер, образованный полем разделения заряда. В разделе **2.1** на основании метода, описанного в разделе 1.1, для двух механизмов аналитически решаются уравнения Максвелла. В результате решения получены спектральные плотности излучения в дальней зоне. Уравнение (1) описывает полную энергию излучаемую в интервале частот  $(0, \omega)$ , для быстрых электронов при условии, что энергия вылетаемых частиц превосходит энергию покоя электронов ( $\varepsilon_0 \gg mc^2$ ).

$$W^w(\omega) = \frac{2q_f^2}{\pi L} \int_0^{\frac{\omega L}{2c}} dy \frac{\sin^2(y)}{y^2} \times \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\varepsilon_0^4 \sin^3(x) dx}{(\varepsilon_0^2 \sin^2(x) + m^2 c^4 \cos^2(x))^2} \exp\left(-\frac{2R^2 y^2 \sin^2 x}{L^2}\right), \quad (1)$$

Полная энергия излучения в приближении  $\varepsilon_0 \times L/R \gg mc^2$  может быть сведена к виду:

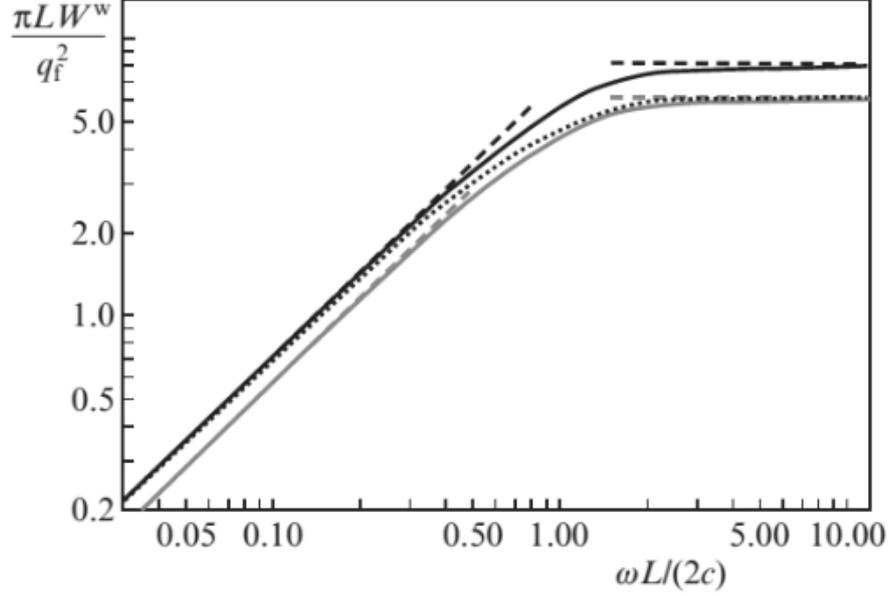


Рис. 1: Энергия объемного излучения, генерируемого сгустком электронов в зависимости от частоты для  $\varepsilon_0 = 30mc^2$ ,  $R/L = 1$  (сплошная черная кривая),  $\varepsilon_0 = 15mc^2$ ,  $R/L = 1$  (сплошная серая кривая) и  $\varepsilon_0 = 30mc^2$ ,  $R/L = 2$  (пунктирная кривая). Штриховые линии отвечают предельным случаям  $\omega \ll 2c/L$  и  $\omega \gg 2c/L$ . ( $R/L$  - отношение поперечного к продольному размерам для вылетающего сгустка быстрых электронов,  $c$  - скорость света,  $\omega$  - частота излучения,  $m$  - масса электрона,  $\varepsilon_0$  - энергия электронов в сгустке,  $q_f$  - полный заряд сгустка)

$$W^w = \frac{q_f^2}{\pi L} \left\{ 3 \ln \left( \frac{\varepsilon_0 L}{\sqrt{2} m c^2 R} \right) - 1 \right\} \quad (2)$$

Для разлетающейся плазмы спектральная плотность излучаемой энергии принимает вид:

$$W^W(\omega) = \frac{q^2 c_s^2 \tau_0^2}{\pi R^3} \int_0^{\omega \tau_0} dx \frac{1 + e^{-2\alpha} - 2e^{-\alpha} \cos(x)}{x(\alpha^2 + x^2)^2} \left[ \sqrt{2\pi} \left( 1 + \frac{x^2 R^2}{c^2 \tau_0^2} \right) \times \right. \\ \left. \times e^{-\frac{x^2 R^2}{2c^2 \tau_0^2}} \operatorname{Erf} \left( \frac{xR}{c\tau_0 \sqrt{2}} \right) - \frac{2xR}{c\tau_0} \right] \quad (3)$$

Рисунок 1 показывает нормированную полную энергию излучения генерируемую вылетающими энергетичными электронами, а рисунок 2 – нормированную полную энергию излучения, источником которого является разлетающаяся плазма.

В заключительном пункте раздела происходит сравнение излучательной эффективности рассматриваемых механизмов, в результате которого дела-

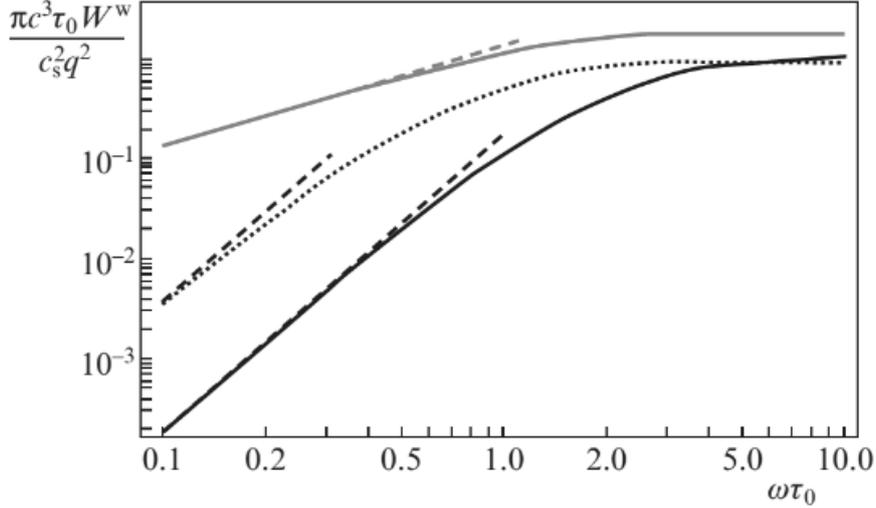


Рис. 2: Энергия объемного излучения, генерируемого при разлете плазмы в вакуум, в зависимости от частоты для  $\alpha = 1$ ,  $R/(c\tau_0) = 0.1$  (сплошная черная кривая),  $\alpha = 0$ ,  $R/(c\tau_0) = 1$  (сплошная серая кривая) и  $\alpha = 0.3$ ,  $R/(c\tau_0) = 1$  (пунктирная кривая). Штриховые линии отвечают предельному случаю  $\omega\tau_0 \ll 1$ . ( $c_s$  - ионная звуковая скорость,  $q$  - полный заряд разлетающейся плазмы,  $\alpha$ ,  $\tau_0$  - параметр характеризующих разлет плазмы,  $e$  - заряд электрона).

ется вывод, что генерация быстрыми электронами является преобладающим механизмом генерации ТГц излучения. Коэффициент конверсии для генерации ТГц излучения быстрыми электронами для типичных характеристик коротких лазерных импульсов с интенсивностью соответствующей безразмерной амплитуде поля  $a_0$ , для отношения длины волны несущей частоты лазера к радиусу фокусировки лазера на мишени  $\lambda/R$ , для длительности лазерного импульса  $\tau_L$  и для частот  $\omega_m$  имеет вид:

$$W^w/W^L \approx 1.4 \times 10^{-4} \left( \frac{\omega_m}{10^{12} \text{с}^{-1}} \right) \left( \frac{\tau_L}{30 \text{фс}} \right) \left( \frac{\lambda}{R} \right)^2 (1 + \ln a_0) \quad (4)$$

В разделе **2.2** в ближней зоне для идеально проводящей мишени выводятся аналитические выражения для излучаемых быстрыми электронами ТГц полей. Собственные поля и поля излучения представлены на рисунке 3 для скорости вылета сгустка горячих электронов близкой к скорости света.

В рассмотренной постановке задачи с идеально проводящей мишенью и вылетающим с постоянной скоростью пучком быстрых электронов излучаемое ТГц поле имеет форму униполярного импульса (см. Рис. 3). Численные моделирования, проведенные для различных скоростей вылетающих электронов и мишени с характеристиками металла, с одной стороны иллюстри-

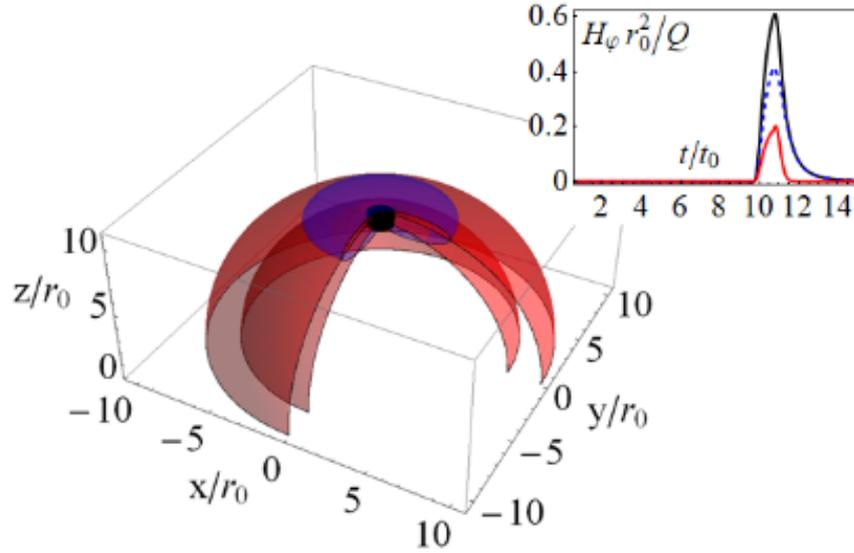


Рис. 3: Магнитная составляющая  $H_\phi$  генерируемого электромагнитного поля, распространяющегося в вакууме при скорости вылета электронов  $v = 0.95 c$ . Сгусток электронов размером  $ct_0 = r_0$  показан черным цветом. Синим цветом показано собственное поле на уровне  $0.1 Q/r_0^2$ , а красным цветом показано излучаемое поле на уровне  $0.04 Q/r_0^2$ .  $Q$  - заряд сгустка электронов. На вставке показана временная форма магнитного импульса (черная кривая – полное поле, синяя штриховая кривая – собственное поле и красная кривая – поле излучения) на расстоянии  $10r_0$  вдоль направления максимального излучаемого поля.

руют сходство с аналитическим решением, а с другой расширяют основные результаты полученные в данном разделе (спектральные и энергетические характеристики излучения) на неидеальные ситуации. На рисунке 4 представлено сравнение теоретических результатов с численным моделированием.

В главе 3 сравниваются три механизма, приводящие к генерации поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ) ТГц диапазона частот. К этим механизмам относятся: термо-ЭДС, возникающая из-за неколлинеарности градиентов плотности и температуры плазмы горячих электронов, разлет плазмы в вакуум и движение быстрых электронов, ускоренных лазерным импульсом.

В разделах 3.1 и 3.2 находятся выражение для энергий и полей поверхностных электромагнитных волн, возникающих в процессах вылета быстрых электронов и разлета плазмы в вакуум; производится сравнение коэффициентов конверсии энергии лазерного излучения в поверхностные волны для

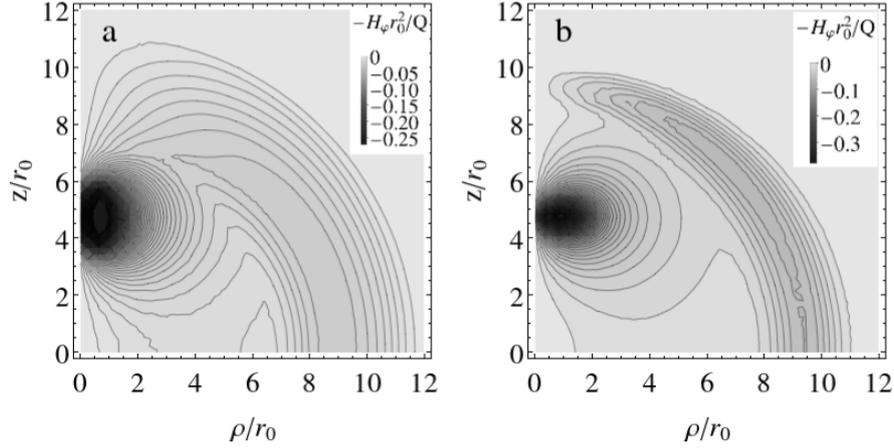


Рис. 4: Распределение магнитного поля  $H_\phi$  (в плоскости, проходящей через ось  $Z$ ) из моделирования методом конечных разностей во временной области (а) в сравнении с теоретическим результатом (б) при  $v = 0.5c$  в момент времени,  $t = 10t_0$ .

этих механизмов. Спектральная плотность волны ТГц диапазона образованной, вследствие вылета быстрых электронов задается выражением (5), где диэлектрическая проницаемость определена как  $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$ .

$$\frac{dW^{(s0)}}{d\omega} = \frac{2q_f^2 V_f^2}{c^3 |\epsilon|^{1/2} \cos[\arctan(\epsilon'/\epsilon'')/2]} \quad (5)$$

На рисунке 5 представлены полные энергии поверхностных волн в зависимости от частоты, определяемой начальными параметрами вылетающего пучка электронов в случае быстрых электронов или параметрами разлетающейся плазмы для второго механизма.

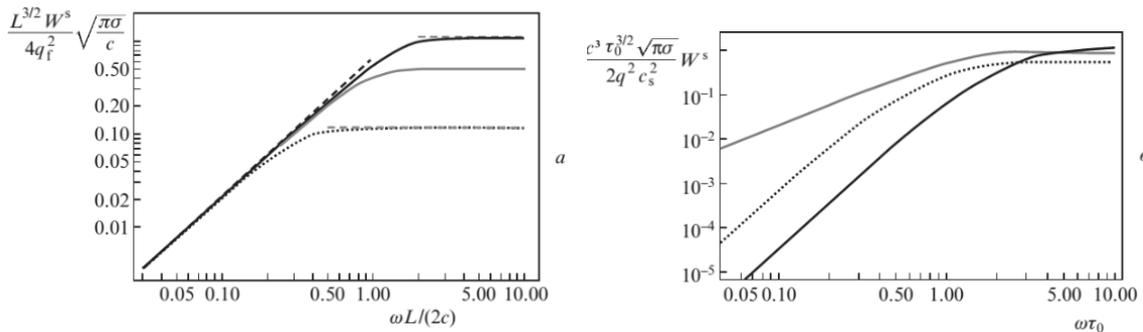


Рис. 5: Зависимости от частоты энергии поверхностных волн, генерируемых сгустком электронов (а) и при разлете плазмы в вакуум (в) зависимости от частоты энергии поверхностных волн для  $R/L = 0.3$  (сплошная черная кривая), 1 (сплошная серая кривая) и 3 (пунктирная кривая). Штриховые линии на (а) соответствуют предельным случаям  $\omega \ll 2c/L$  и  $\omega \gg 2c/L$ . ( $\sigma$  - проводимость мишени).

В разделах **3.3 - 3.5**, описывается получение энергетических характеристик для ПЭВ, возбуждаемой термо-ЭДС, а так же происходит сравнение коэффициентов конверсии энергии лазера в энергию ПЭВ для описанного механизма и для поверхностных волн, образованных вследствие переходного излучения быстрых электронов. Рисунок 6 показывает полные нормированные энергии ПЭВ для двух механизмов в зависимости от безразмерного параметра, характеризующего отношение нагретой лазером области на мишени к длительности лазерного импульса. Рисунок свидетельствует, что термо-ЭДС немного слабее генерирует ПЭВ для параметров характерных взаимодействию лазерных импульсов с релятивистской интенсивностью с металлическими мишенями ( $R/c\tau > 1$ ).

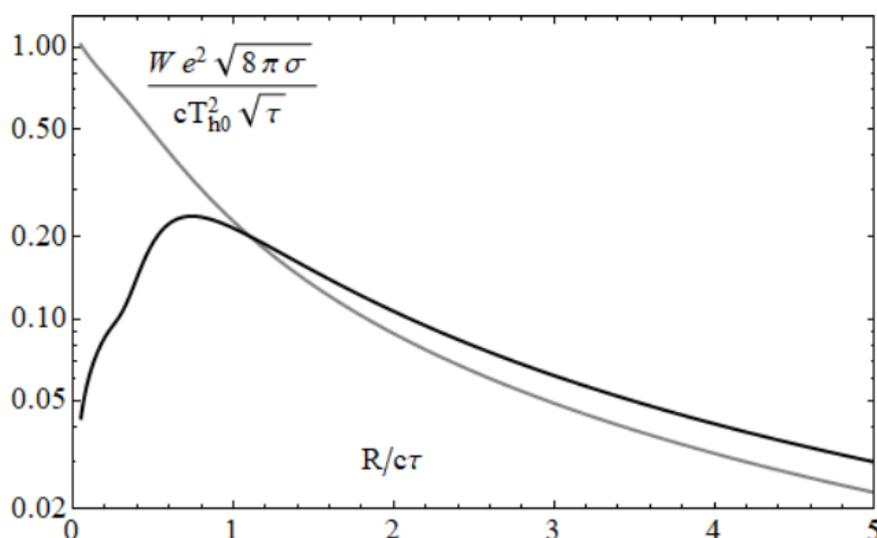


Рис. 6: Зависимость полной нормированной энергии ПЭВ, генерируемой улетающими электронами (серая кривая) и термоэлектрическими токами горячих электронов (черные кривые) от безразмерного масштаба нагретой области  $R/c\tau$ . ( $T_{h0}$ -температура горячих электронов,  $\tau$ -длительность лазерного импульса).

В **четвертой главе** рассматриваются процессы, приводящие к образованию вблизи области взаимодействия лазерного излучения с мишенями больших приповерхностных электромагнитных полей с амплитудами намного превосходящими амплитуды классических ПЭВ.

В разделе **4.1** рассматривается процесс образования поляризационных волн на границе высокопроводящая мишень-вакуум вследствие вылета быстрых электронов. Аналитически описывается эволюция электрического и магнитного полей поляризационной волны, совпадающие с численными мо-

делированием представленным на левой панели рисунка 7.

Численные моделирования выполненные методом конечных разностей во временной области (описывается решение уравнений Максвелла при вылете из металлической/плазменной мишени пучка электронов), результаты которого представлены на левой панели рисунка, и методом частиц в ячейках (полностью описывает воздействие на плазменную мишень лазерного импульса), показанном на правой панели, хорошо согласуются.

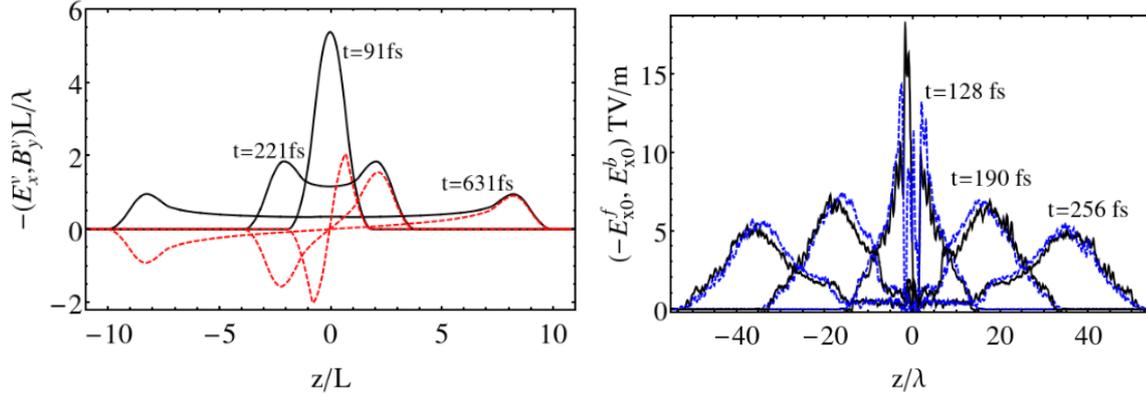


Рис. 7: Эволюция поверхностного электрического поля  $E_{x0}^v(t, z)$  (черные кривые) и соответствующего магнитного поля  $B_{y0}^v(t, z)$  (красные кривые) на границе мишень-вакуум из результатов FDTD расчетов (левая панель). Эволюция поверхностного электрического поля, из PIC моделирования, на облучаемой/тыльной стороне мишени изображена черными/синими кривыми (правая панель).

В разделе показано, что тангентацальное электрическое поле соответствует сильному плазменному току, связанному с волной поляризации, и соответствующему уравнению:

$$j_z^p = \frac{i\hat{\lambda}\omega_p}{2c\tau} \int \frac{dk}{\pi k} [J_0(ck(t-\tau)) - J_0(ckt)] e^{-\frac{k^2 L^2}{4}} e^{ikz + \frac{cx}{\omega_p}}, \quad (6)$$

где  $\omega_p$  - плазменная частота,  $\hat{\lambda}$  - погонный заряд убегающих электронов,  $J_0(\nu)$  - функция Бесселя. Рисунок 8 иллюстрирует эволюцию плазменного тока в приповерхностном слое.

Раздел 4.2 посвящен рассмотрению процесса генерации поверхностных полей на границе раздела вакуум-мишень при появлении (быстром включении) поля разделения заряда. Первая часть раздела посвящена аналитическому описанию теории процесса и получению полей.

Во второй части раздела численно моделируется рассматриваемый про-

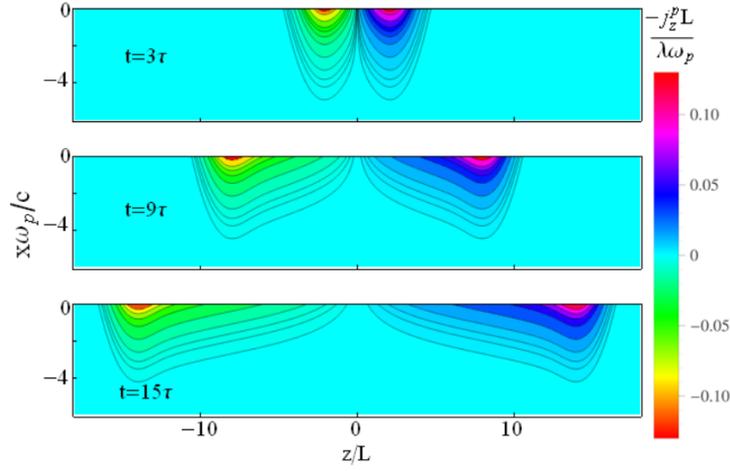


Рис. 8: Распределение плотности электрического тока  $j_z^p L / (\hat{\lambda} \omega_p)$  для  $L = c\tau$ .

цесс и происходит сравнение с аналитическим решением, что представлено на рисунке 9. На данном рисунке представлено сравнение нормированных электрических полей для разных характеристик поля разделения зарядов с аналитическими выражениями, которые определяются (7), где введена функция  $\Psi(\eta) = J_1(\eta)H_0(\eta) + J_0(\eta)[2/\pi - H_1(\eta)]$ , записанная в терминах цилиндрические функции Бесселя и Струве  $J_n(\eta)$  и  $H_n(\eta)$

$$e_p = -\pi \frac{ct\lambda_{De}}{4R_0^2} \int_0^\infty d\kappa \kappa^3 J_0\left(\frac{\kappa r_\perp}{R_0}\right) e^{-\kappa^2/4} \Psi\left(\frac{c\kappa t}{R_0}\right) \quad (7)$$

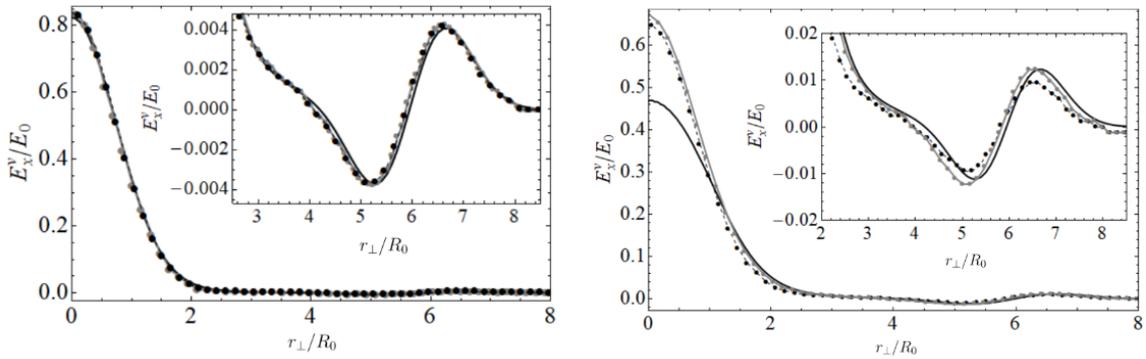


Рис. 9: Распределение поверхностного электрического поля  $E_x$  в сравнении с теоретической моделью (черные кривые) для  $\lambda_{De}/R_0 = 0.1$  (левая панель) и  $\lambda_{De}/R_0 = 0.3$  (правая панель).

В **главе 5** численно исследуются различные характеристики приповерхностных электромагнитных импульсов терагерцового диапазона частот, возникающих на проволочных мишенях с диаметрами порядка десятков и сотен микрон. В разделе **5.1** рассматриваются характерные масштабы затух-

хание электромагнитных импульсов и способность импульсов преодолевать неоднородности и изгибы мишени. Рисунок 10 показывает геометрию моделирования и эволюцию формы и амплитуды электромагнитных импульсов, распространяющихся вдоль изогнутой микропровлочной мишени.

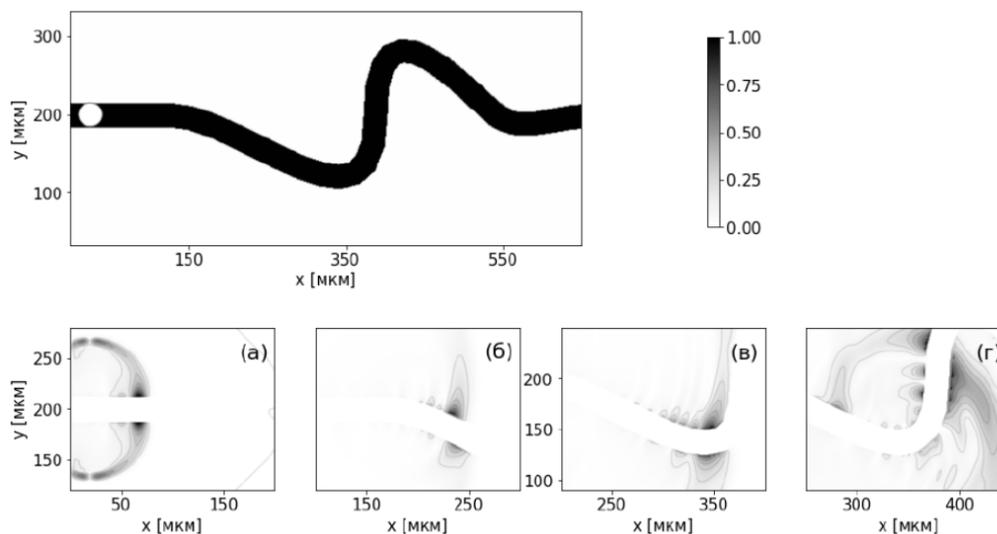


Рис. 10: Эволюция электромагнитной волны вдоль изогнутой проволоки, представленной на верхней панели. Рисунки (а)-(г) на средней панели показывают распределение амплитуды электрического поля у поверхности проволоки в различные моменты времени, которые отмечены на нижней панели пунктирными линиями.

Раздел **5.2** посвящен описанию процесса образования приповерхностных полей при взаимодействии высокоинтенсивных коротких лазерных импульсов с цилиндрическими плазменными мишенями. В нем представлены результаты моделирования методом частиц-в-ячейках, демонстрирующие формирование таких импульсов, а также генерации пучков электронов, движущихся вместе с импульсом вблизи поверхности проволоки.

В **заклучении** подведены итоги работы и кратко сформулированы основные результаты.

## Основные результаты работы

1. Проведено сравнение различных механизмов генерации низкочастотного терагерцового электромагнитного излучения при взаимодействии высокоинтенсивного лазерного излучения с высокопроводящими мишенями. Показано, что, если длительность лазерного импульса не превышает нескольких пикосекунд, преобладающим механизмом генерации

является переходное излучение высокоэнергетичных электронов с коэффициентом конверсии энергии лазерного импульса в энергию низкочастотных импульсов в терагерцовой области частот на уровне от долей процентов до процентов в зависимости от остроты фокусировки лазерного импульса на мишень. Этот же механизм (переходное излучение улетающих электронов) является наиболее эффективным и для генерации поверхностных электромагнитных волн, а коэффициент конверсии энергии лазерного импульса в энергию импульсов поверхностных волн достигает  $\sim 10^{-5}$ .

2. В приближении бесконечной проводимости мишени получены аналитические выражения для электромагнитных полей ТГц импульсов в вакууме (в том числе в ближней зоне), возникающих вследствие переходного излучения лазерно-ускоренных электронов. Показана униполярная форма импульсов излучения улетающих от мишени в ближней зоне, отвечающая полупериодному электрическому (магнитному) полю одного знака.
3. Получена оценка эффективности генерации поверхностных волн в ТГц области частот термоэлектрическими токами (токами обусловленными неколлинеарностью градиентов плотности и температуры) и показано, что эта эффективность лишь незначительно уступает эффективности генерации поверхностных волн переходным излучением высокоэнергетичных электронов.
4. Исследована эволюция растекания некомпенсированного положительного заряда, образованного вследствие вылета из мишени с высокой проводимостью нагретых лазером высокоэнергетичных электронов. Получены аналитические выражения, описывающие возникающие поверхностные токи и поля приповерхностных электромагнитных импульсов ТГц диапазона. Обнаружено, что при вылете из высокопроводящей мишени пучка релятивистских электронов оставшийся положительный заряд распространяется вдоль поверхности мишени в виде импульса со скоростью света. Проведена оценка увеличения горячей плазменной области на облучаемой и тыльной сторонах мишени из-за поверхностных токов, генерируемых вследствие быстрого появления поля разделения

заряда.

5. Проведенное численное моделирование генерации терагерцового излучения при облучении лазерным импульсом цилиндрических высокопроводящих мишеней (проволок) и вылетом из них наиболее энергетичных электронов демонстрирует возможность заметного усиления и концентрации излучения вблизи поверхности мишени. Полученные оценки затухания полей вблизи мишени позволяют говорить о возможности распространения ТГц импульса вдоль проволоки на значительные расстояния от области взаимодействия, намного превышающие как начальное пятно фокусировки лазерного импульса, так и длину волны генерируемого импульса. Показаны возможности управления направлением распространения излучения, меняя изгиб проволоки, а также захват и увлечение части электронов полем генерируемых приповерхностных импульсов.

## Список публикаций автора по теме диссертации

### Статьи в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science/Scopus/РИНЦ:

- A1 А.С. Куратов, А.В. Брантов, Ю.М. Алиев и В.Ю. Быченков «Терагерцовое излучение при лазерно-инициируемом разделении зарядов в облучаемой плазменной мишени», *Квантовая Электроника*, **46**, 11, (2016), 1023-1030
- A2 A.S. Kuratov, A.V. Brantov, Yu.M. Aliev and V.Yu. Bychenkov «Laser-induced thermoelectric current as a source of generation of THz surface electromagnetic waves», *Квантовая Электроника*, **48**, 7, (2018), 653–657
- A3 А.С. Куратов, А.В. Брантов and В.Ю. Быченков «Моделирование лазерной генерации и распространения сгустка электронов вдоль облучаемой тонкой проволоки», *Краткие сообщения по физике*, **45**, 11, (2018), 28–33

- A4 A.V. Brantov, A.S. Kuratov and V.Yu. Bychenkov «Laser-triggered fast charge-separation field generates a strong surface current and wave», *Plasma Physics and Controlled Fusion*, **62**, 9, (2020), 094003
- A5 A.V. Brantov, A.S. Kuratov, Yu.M. Aliev and V.Yu. Bychenkov «Ultrafast target charging due to polarization triggered by laser-accelerated electrons», *Physical Review E*, **102**, 2, (2020), 021202
- A6 A.S. Kuratov, A.V. Brantov, V.F. Kovalev and V.Yu. Bychenkov «Powerful laser-produced quasi-half-cycle THz pulses», *Physical Review E*, **106**, 3, (2022), 035201
- A7 А.С. Куратов, А.В. Брантов, В.Ю. Быченков «Концентрация и распространение сверхсильных лазерно-генерируемых ТГц полей на микропроволочной мишени», *Квантовая Электроника*, **53**:3, (2023), 278-284 [ A.S. Kuratov, A.V. Brantov and V.Yu. Bychenkov «Concentration and Propagation of Superstrong Laser-Induced THz Fields on A Microwire Target», *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2023, Vol. 50, Suppl. 7, pp. S854–S862 (2023), DOI: 10.3103/S1068335623190107 ]
- A8 А. С. Куратов, А.В. Брантов, В.Ф. Ковалев, В.Ю. Быченков «Лазерный источник сверхмощного терагерцового излучения», *Квантовая Электроника*, **53**:3, (2023), 253-258 [ A.S. Kuratov, A.V. Brantov, V.F. Kovalev and V.Yu. Bychenkov «Laser Source of Super-Power THz Radiation» *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, Vol. 50, Suppl. 7, pp. S821–S828 (2023), DOI: 10.3103/S1068335623190090 ]

**Материалы конференций, индексируемых в Web of Science/Scopus:**

---

- B1 A.S. Kuratov, A.V. Brantov, Yu.M Aliev and V.Yu Bychenkov «Terahertz electromagnetic wave generation by high-intensity laser pulse along metal surfaces», *International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, Copenhagen, Denmark, (2016), 7758837

- B2 A.S. Kuratov A.V. Brantov, Yu.M Aliev and V.Yu Bychenkov «Generation of terahertz electromagnetic wave by high-intensity laser pulse interaction with solid targets», *International Conference Laser Optics 2018 (ICLO 2018)*, St.Petersburg, Russia, (2018), 256
- B3 A.V. Brantov, A.S. Kuratov, M.G.Lobok, Yu.M Aliev, A. Maksimchuk and V.Yu Bychenkov «Laser triggered radiation sources (from terahertz radiation to gamma-rays)», *International Conference Laser Optics 2018 (ICLO 2018)*, St.Petersburg, Russia, (2018), 235
- B4 A.S. Kuratov, A.V. Brantov, A. Maksimchuk, Yu.M Aliev and V.Yu Bychenkov «Laser induced THz Sommerfeld waves along metal wire», *EPJ Web of Conferences*, **195**, (2018), 03002
- B5 A.S. Kuratov, A.V. Brantov, Yu.M Aliev and V.Yu Bychenkov «Strong terahertz electromagnetic wave generation due to intense laser-plasma interaction mechanisms», *International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, Paris, France, (2019), 8874115
- B6 A.V. Brantov, V.F. Kovalev A.S. Kuratov and V.Yu Bychenkov «Intence source of laser-produced unipolar terahertz pulses», *International Conference Laser Optics 2022 (ICLO 2022)*, St.Petersburg, Russia, (2022), 21955445

## Список литературы

- [1] Joint Channel Estimation and Data Rate Maximization for Intelligent Reflecting Surface Assisted Terahertz MIMO Communication Systems / X. Ma, Z. Chen, W. Chen et al. // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 99565–99581.
- [2] Terasense Group I. URL: <https://terasense.com/products/body-scanner/>.
- [3] Aliev Y. M., Frolov A. A. Excitation of high-intensity terahertz surface modes of plasma slab under action p-polarized two-frequency laser radiation // Physical Review E. 2022. . Vol. 105, no. 4.
- [4] Terahertz Biomedical Science and Technology / Ed. by J.-H. Son. London, England: CRC Press, 2020. .
- [5] Tanaka K., Hirori H., Nagai M. THz Nonlinear Spectroscopy of Solids // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2011. . Vol. 1, no. 1. P. 301–312.
- [6] Terahertz Spectroscopy / Ed. by S. L. Dexheimer. CRC Press, 2017. .
- [7] Zhang X.-C., Xu J. Introduction to THz Wave Photonics. Springer US, 2010.
- [8] Wireless sub-THz communication system with high data rate / S. Koenig, D. Lopez-Diaz, J. Antes et al. // Nature Photonics. 2013. . Vol. 7, no. 12. P. 977–981.
- [9] Terahertz control of nanotip photoemission / L. Wimmer, G. Herink, D. R. Solli et al. // Nature Physics. 2014. . Vol. 10, no. 6. P. 432–436.
- [10] Herink G., Wimmer L., Ropers C. Field emission at terahertz frequencies: AC-tunneling and ultrafast carrier dynamics // New Journal of Physics. 2014. . Vol. 16, no. 12. P. 123005.
- [11] Nitrogen plasma formation through terahertz-induced ultrafast electron field emission / K. Iwaszczuk, M. Zalkovskij, A. C. Strikwerda et al. // Optica. 2015. . Vol. 2, no. 2. P. 116.

- [12] Sub-cycle control of terahertz high-harmonic generation by dynamical Bloch oscillations / O. Schubert, M. Hohenleutner, F. Langer et al. // *Nature Photonics*. 2014. . Vol. 8, no. 2. P. 119–123.
- [13] Li S., Jones R. Ionization of Excited Atoms by Intense Single-Cycle THz Pulses // *Physical Review Letters*. 2014. . Vol. 112, no. 14.
- [14] Matsunaga R., Shimano R. Nonequilibrium BCS State Dynamics Induced by Intense Terahertz Pulses in a Superconducting NbN Film // *Physical Review Letters*. 2012. . Vol. 109, no. 18.
- [15] Energy-Gap Dynamics of Superconducting NbN Thin Films Studied by Time-Resolved Terahertz Spectroscopy / M. Beck, M. Klammer, S. Lang et al. // *Physical Review Letters*. 2011. . Vol. 107, no. 17.
- [16] Glossner A., Zhang C., Kikuta S. et al. Cooper Pair Breakup in YBCO under Strong Terahertz Fields. 2012.
- [17] Observation of Gigawatt-Class THz Pulses from a Compact Laser-Driven Particle Accelerator / A. Gopal, S. Herzer, A. Schmidt et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2013. Aug. Vol. 111. P. 074802.
- [18] Towards Terawatt-Scale Spectrally Tunable Terahertz Pulses via Relativistic Laser-Foil Interactions / G.-Q. Liao, H. Liu, G. G. Scott et al. // *Physical Review X*. 2020. . Vol. 10, no. 3.
- [19] Divergence-Free Transport of Laser-Produced Fast Electrons Along a Meter-Long Wire Target / H. Nakajima, S. Tokita, S. Inoue et al. // *Physical Review Letters*. 2013. . Vol. 110, no. 15.

*Куратов Андрей Сергеевич*

Механизмы генерации сверхсильных терагерцовых полей при взаимодействии релятивистски  
интенсивных лазерных импульсов с твердотельными мишенями

Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать 10.10.2023. Заказ № 172-02/17-2023

Объем 1.0 печ.л. Тираж 80 экз.

Типография ФГУП ВНИИА

127055, Москва, Сущевская ул., д. 22

Тел. 499 978 7803