

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Объединенного института высоких
температур Российской академии наук
академик РАН

Петров О.Ф.

« » ноября 2018г.



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Оладышкина Ивана Владимировича «Механизмы оптико-терагерцовой конверсии на поверхности металлов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика

Диссертационная работа Оладышкина И.В. посвящена теоретическому исследованию физических механизмов, ответственных за излучение терагерцовых (ТГц) волн при воздействии фемтосекундного лазерного излучения на металлы. Генерация ТГц излучения при лазерном воздействии на вещество в последнее время исследуется достаточно интенсивно как экспериментально, так и теоретически многими научными группами. Это связано с возможностью использования ТГц импульсов в различных областях науки и техники, таких как биология, астрофизика, спектроскопия, медицина, системы безопасности и беспроводной связи. Поэтому **актуальность** темы диссертации не вызывает сомнений.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 99 страниц, включая 16 рисунков. Список литературы содержит 74 наименования.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сделан обзор литературы, сформулированы цели и задачи работы, описаны методы исследования, а также научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиту, изложена основная информация об апробации результатов работы.

В **первой главе** диссертации исследованы низкочастотные токи, возникающие в металле под действием наклонно падающего *p*-поляризованного лазерного импульса из-за мгновенных квадратичных нелинейных эффектов – пондеромоторной силы и сходных с ней усреднённых «медленных» сил. Показано, что при одночастичном описании электронного газа наличие границы приводит к формированию низкочастотного нелинейного поверхностного тока из-за возникновения поверхностного заряда под действием поперечной компоненты электрического поля лазерного излучения. Решена задача об излучении поверхностного тока и проанализировано низкочастотное поле в дальней зоне и найдена полная энергия ТГц сигнала. В этой же главе также развита более полная – гидродинамическая – модель электронного газа, в рамках которой получены несколько усреднённых низкочастотных сил. Помимо источника поверхностного тока

гидродинамическое описание даёт два новых типа нелинейных источников, которые можно интерпретировать как пондеромоторную силу и «давление света» на полуограниченный электронный газ. Рассмотрено излучение этих источников и показано, что все они генерируют электромагнитный импульс с одинаковой временной формой и фазой. При сравнении нелинейных источников установлено, что доминирующий вклад в ТГц сигнал в рамках модели мгновенного квадратичного отклика вносит поверхностный ток, который получается при простейшем одночастичном описании среды. Сделано обобщение развитой модели на случай полуметалла – среды с анизотропной эффективной массой носителей заряда; количественное рассмотрение опирается на хорошо известные характеристики висмута. Показано, что мгновенный квадратичный отклик висмута в оптимальной ориентации образца должен существенно превосходить отклик хорошо проводящих металлов из-за низкой эффективной массы электрона и более слабой экранировки электромагнитных полей.

Во **второй главе** рассматривается тепловой механизм генерации ТГц отклика полуограниченного металла на воздействие фемтосекундных лазерных импульсов. В рамках этой модели генерации основным источником низкочастотной поляризации среды является продольный градиент температуры электронного газа, который возникает в процессе отражения лазерного импульса от металла из-за теплопереноса в оптическом скин-слое. Решена задача о генерации низкочастотных электромагнитных полей заданным движущимся распределением тепловой энергии электронов. Рассмотрена диффузионная модель теплопереноса в электронном газе и получена оценка на длительность терагерцового сигнала и его полную энергию. Показано, что в большинстве металлов градиент температуры вблизи поверхности будет существовать в течение десятых долей пикосекунды, что соответствует наблюдаемой длительности терагерцовых импульсов. Проведено обобщение тепловой модели генерации ТГц излучения на случай частоты столкновений электронов, зависящей от температуры. Показано, что в этом случае энергия терагерцового сигнала в процесс нагрева электронной подсистемы перестает быть квадратичной по интенсивности лазерного излучения. На основе этого результата предложен метод восстановления зависимости эффективной частоты столкновений от температуры по экспериментальным результатам зависимости энергии ТГц сигнала от энергии лазерного импульса.

Третья глава посвящена обобщению теплового механизма генерации ТГц излучения на случай структурированных металлов, при этом основное внимание уделено роли поверхностных плазмонов в процессе формирования ТГц отклика гофрированных поверхностей. Решена задача о возбуждении поверхностного плазмона на оптической частоте лазерным импульсом, падающим под произвольным углом на гофрированную поверхность металла. Показано, что амплитуда одной из дифракционных волн содержит резонансный знаменатель, обращение которого в ноль соответствует возбуждению поверхностного плазмона, распространяющегося по границе металла. Найдена временная форма волнового пакета поверхностных плазмонов при воздействии квазимонохроматического гауссова лазерного импульса, а также приведена оценка дифракционных потерь плазмона при распространении вдоль гофрированной поверхности металла. Показано, что в определенных условиях перерассеяние плазмона в отражённую волну может происходить быстрее, чем его поглощение в металле, что объясняет

прекращение роста энергии ТГц сигнала при увеличении амплитуды гофрировки металла. В рамках тепловой модели ТГц отклика затухание поверхностных плазмонов рассмотрено как дополнительный канал нагрева электронной подсистемы. Выполненные оценки показали, что для типичных условий эксперимента это поглощение может превосходить собственное поглощение металла с плоской поверхностью. В этой главе также рассмотрена возможность генерации ТГц излучения металлическими наночастицами из-за неоднородного нагрева электронной подсистемы и последующего перераспределения тепла.

В заключении сформулированы основные результаты, изложенные в диссертационной работе.

Научная новизна основных результатов исследований, представленных в диссертационной работе, заключается в том, что в ней впервые в рамках гидродинамического описания проведено рассмотрение полной системы низкочастотных нелинейных источников тока, возникающих в металле под действием лазерного импульса, падающего на его поверхность под произвольным углом. Показано, что помимо исследованной ранее пондеромоторной силы при наклонном падении необходимо учитывать два других нелинейных источника, равных ей по порядку величины. Также в работе предпринято обобщение развитой модели мгновенного квадратичного отклика на случай полуметалла – среды с анизотропной эффективной массой носителей заряда. В работе впервые предложен и теоретически проанализирован тепловой механизм генерации терагерцового излучения при отражении фемтосекундных лазерных импульсов от поверхности металла. Показано, что неоднородный нагрев электронного газа лазерным импульсом приводит к формированию градиента температуры, под действием которого возбуждаются низкочастотные токи в среде и происходит генерация электромагнитных полей терагерцового диапазона. Выполнено обобщение теплового механизма ТГц отклика на случай нелинейного режима нагрева металла, при котором частота столкновений электронов зависит от их температуры. На основе данного обобщения впервые предпринята попытка объяснения неквадратичной зависимости энергии ТГц сигнала от энергии лазерного импульса, наблюдаемой в различных экспериментах. Как следствие, предложен косвенный метод определения частоты столкновений свободных электронов и восстановления динамики температуры электронной подсистемы вблизи поверхности металла по измерениям полной энергии и временной формы ТГц сигнала. В рамках обобщения теплового механизма генерации ТГц отклика предложена модель конверсии поверхностных плазмонов на оптической частоте в низкочастотное излучение. Показано, что учёт поверхностных плазмонов в виде дополнительного канала поглощения лазерного излучения позволяет интерпретировать как сам факт резонансного поведения ТГц сигнала, так и некоторые экспериментальные особенности процесса конверсии. Кроме того, в диссертации впервые указано на возможность излучения ТГц волн из-за возникновения низкочастотных токов в металлических наночастицах, что связано с их неоднородным нагревом под действием излучения лазера и последующем перераспределением тепла в электронной подсистеме.

Теоретическая и практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в том, что в ней впервые теоретически проанализировано электромагнитное излучение терагерцового диапазона, возникающие из-за теплового воздействия

фемтосекундного лазерного излучения на металлы. Полученные аналитические выражения для генерируемых полей являются достаточно общими и с высокой точностью подтверждаются результатами численного моделирования. Поэтому можно утверждать, что основная **теоретическая значимость** диссертации заключается в обобщении известного эффекта тепловой нелинейности на случай взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов с поверхностью металла и металлическими структурами. Результаты диссертационного исследования позволяют интерпретировать многие экспериментальные особенности конверсии фемтосекундных лазерных импульсов в терагерцовое излучение, включая запаздывающий характер ТГц сигнала и сложную зависимость его энергии от энергии лазерного импульса. **Практическая значимость** работы связана, прежде всего, с предложением нового экспериментального метода исследования кинетики электронов в металлах, опирающегося на эффект оптико-терагерцовой конверсии. Результаты, полученные в диссертации, могут быть рекомендованы для использования в Физическом институте РАН, Институте общей физики РАН, Объединенном институте высоких температур РАН, Институте прикладной физики РАН, Институте физики микроструктур РАН, НИЦ «Курчатовский институт», Троицком институте термоядерных и инновационных исследований.

Представленное исследование опирается на известные физические модели, широко используемые при изучении взаимодействия мощного электромагнитного излучения с металлами, а также на ряд общетеоретических методов, имеющих строгое математическое обоснование: теорию возмущений, спектральные разложения и другие. Основные аналитические результаты сопоставлялись с данными численного моделирования, полученными в рамках аналогичных физических моделей, с экспериментальными данными и теоретическими результатами других научных групп. Полученные автором результаты **достоверны**, выводы и заключения **обоснованы**.

Публикации и апробация результатов. Основные результаты диссертационной работы докладывались на научных семинарах в ИПФ РАН, ИФМ РАН, ВНИИ автоматики им. Н.Л. Духова, НИИ физики РГПУ им. А.И. Герцена, а также на международных и российских конференциях. Материалы диссертации опубликованы в ведущих российских и зарубежных научных журналах: Письма в ЖЭТФ, ЖЭТФ, Optics Letters, Journal of Optics и других. Всего по теме исследования опубликовано 8 статей в рецензируемых журналах (из них 7 – в журналах из списка ВАК).

Отмечая общий высокий научный уровень диссертационной работы, следует сделать некоторые **замечания** по существу.

1. На стр. 30 в формулах (1.25) – (1.27) вызывает вопрос обратно пропорциональная зависимость энергии ТГц излучения от продольного размера лазерного импульса L . Отсюда следует, что чем короче лазерный импульс, тем больше энергия ТГц сигнала, что физически не очень понятно. Так как ограничения снизу на длительность лазерного излучения не приводятся, то при очень малых L получаем экстремально большую энергию ТГц полей.
2. В первой главе опущен вопрос о спектре ТГц излучения. Чем определяются положение, высота и полуширина спектральной линии? Как спектральные характеристики зависят от параметров лазерного импульса и угла падения? Ответы на эти вопросы представляли бы интерес.

3. В формуле (1.37) на стр. 33 нет ли особенности при нормальном падении лазерного излучения, когда $\alpha \rightarrow \pi/2$? Так как ток j_0 (1.7) пропорционален $\cos\alpha$, то в правой части (1.37) имеем $\cos\alpha$ в знаменателе.
4. Вызывает вопрос зависимость магнитного поля (1.77) от энергии электронов в металле на стр. (1.77). При $v_T \rightarrow 0$ получаем нулевое магнитное поле, что из физических соображений не очень понятно.
5. В параграфах 2.1 – 2.2 главы 2 основное внимание уделено вычислению энергии ТГц излучения и сравнению ее с экспериментальными результатами. Интерес представляет также исследование влияния лазерного нагрева металла на спектр, диаграмму направленности и пространственно-временной профиль ТГц сигнала.

Кроме этого имеются **замечания** по оформлению диссертации.

1. На стр. 24 в правых частях формул (1.2), (1.3) следовало бы написать Re – символ реальной величины или же знак комплексного сопряжения, так как скорость электронов это действительная величина.
2. В формулы (1.19) – (1.22) на стр. 28, 29 и в формулу (1.32) на стр. 33 должна входит частота ТГц поля ω , а не частота лазерного излучения ω_0 . В формуле (2.14) на стр. 63, в формулах (2.18), (2.19) на стр. 65 и в формуле (2.24) на стр. 2.24 наоборот следует заменить ω на ω_0 .
3. В формуле (1.29) на стр. 31 угол падения α почему-то обозначен буквой γ .
4. Графики зависимости энергии ТГц излучения от угла падения 1.2 и 1.6 в значительной степени дублируют друг друга. Из двух рисунков можно было оставить только рисунок 1.6, как более информативный.
5. На рис. 1.4, 1.5 введено обозначение T_e , которое не поясняется.
6. В формуле (2.25) на стр. 68 вводится обозначение a для численного коэффициента, зависящего от зонной структуры металла. Ранее этой буквой обозначался поперечный размер лазерного импульса (1.23).
7. В формуле (3.2) вводится обозначение $\alpha(z)$ для угла наклона границы металла относительно оси z . Далее для этого угла наклона используется уже другое обозначение - $\theta(z)$.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы. Диссертация Оладышкина И.В. «Механизмы оптико-терагерцовой конверсии на поверхности металлов» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, вносящий значительный вклад в теорию генерации терагерцового излучения при воздействии фемтосекундного лазерного излучения на металлы.

Автореферат правильно и достаточно полно отражает основное содержание диссертационной работы.

В целом совокупность научных результатов, сформулированных и обоснованных в диссертации Оладышкина И.В., соответствует всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК Российской Федерации, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Оладышкин И.В. заслуживает присуждения ему

ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика.

Работа докладывалась и обсуждалась на семинаре ОИВТ РАН под руководством академика О.Ф. Петрова 31 октября 2018г. (протокол № 23).

Отзыв составил

Фролов А.А.

Сведения о составителе отзыва:

Фролов Александр Анатольевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории теории лазерно-плазменных воздействий, отдела лазерной плазмы.

Адрес электронной почты: frolov@ihed.ras.ru. Тел.: +7(495) 485-97-22.

Наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук.

Почтовый адрес: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2.

Сведения о составителе отзыва и подпись Фролова А.А. удостоверяю

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук
доктор физико-математических наук



Амиров Р. Х.