

Отзыв официального оппонента

кандидата физико-математических наук Оладышкина Ивана Владимировича на диссертационную работу Данилова Егора Алексеевича «Нелинейные явления при взаимодействии импульсов лазерного излучения с проводниками», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Диссертационная работа Е.А. Данилова посвящена теоретическому исследованию генерации звука и электромагнитных волн терагерцового диапазона при облучении металлов фемтосекундными лазерными импульсами. В диссертации рассматриваются лазерное излучение умеренной интенсивности, воздействие которого не приводит к повреждению материала и заключается, главным образом, в неоднородном нагреве электронов и их вытеснении из скин-слоя пондеромоторной силой. Основное содержание работы составляет подробное аналитическое решение задач о генерации и распространении электромагнитных и звуковых волн, возбуждаемых за счёт теплового и пондеромоторного воздействия оптического импульса.

Несмотря на обилие экспериментальных данных по поведению твёрдых тел при облучении фемтосекундными лазерными импульсами, полноценная количественная теория многих сопутствующих эффектов не развита, а в некоторых случаях не предложена даже качественная интерпретация наблюдений. В общем случае это связано с комплексным характером физических процессов, протекающих на сверхкоротких временных масштабах и, прежде всего, с необходимостью самосогласованного описания как нелинейных электродинамических эффектов, так и пространственно-временной динамики самой среды в неравновесном состоянии. Наблюдение терагерцового отклика и регистрация акустических волн может дать новую информацию о состоянии материала во время и после поглощения лазерного импульса. Поэтому развитие теории данных физических эффектов представляется весьма актуальным. Безусловно, не менее актуальна и задача поиска новых источников импульсного терагерцового излучения.

Диссертация Е. А. Данилова состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объём диссертации – 119 страниц, включая 27 рисунков. Список литературы содержит 120 наименований.

Во введении приводится обзор современного состояния исследований по теме диссертации, обосновывается актуальность, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы; приводятся сведения о научных публикациях автора и о представлении результатов на конференциях. Также во введении формулируются основные цели и задачи исследования, приводятся положения, выносимые на защиту.

В первой главе решается задача о генерации терагерцовых полей при цилиндрической фокусировке фемтосекундного лазерного импульса в узкую полосу на поверхности металла.

Рассмотрены механизмы генерации, связанные с тепловым и пондеромоторным воздействием лазерного излучения на электроны, получены аналитические выражения для Фурье-образов низкочастотного магнитного поля. Одним из ключевых результатов главы, помимо получения самих итоговых формул, является разделение ТГц поля на две компоненты: объёмное излучение (квазицилиндрическая волна, расходящаяся от вытянутой облучаемой области) и поверхностная волна, распространяющаяся вдоль границы металл-вакуум.

Вторая глава логически продолжает первую. Она посвящена сравнению амплитуд поверхностной и квазицилиндрической волн при различных параметрах среды и на различных расстояниях от линии фокусировки. В частности, автор показывает, что поле поверхностной волны может доминировать в некоторой области вблизи границы металла, если частота столкновений электронов в низкочастотном поле много меньше обратной длительности лазерного импульса. При этом наибольшая эффективность генерации поверхностной волны достигается в случае, когда эффективная частота столкновений в лазерном поле много больше, чем в низкочастотном. Из-за дисперсии сгенерированная поверхностная волна изменяет временную форму при распространении, что, в принципе, позволяет отличить её от квазицилиндрической волны в эксперименте.

Третья глава посвящена теории генерации звука в металлических плёнках под действием фемтосекундных лазерных импульсов. Рассматриваются три основных механизма генерации звука: нагрев и быстрое расширение кристаллической решётки, градиент давления неоднородно нагретых электронов и пондеромоторное воздействие лазерного излучения на электроны (ранее не изучалось в контексте генерации акустических колебаний). Получены аналитические решения для смещения атомов решётки (в Фурье-пространстве) с учётом отражения поля от подложки и конечной теплопроводности. Сопоставлены вклады трёх указанных механизмов генерации в различных областях спектра и показано, что вклад пондеромоторного механизма становится доминирующим в терагерцовой области при малой частоте столкновений электронов.

Четвёртая глава является развитием предыдущей главы. В ней автор анализирует возможность детектирования звуковых колебаний с помощью зондирующих оптических импульсов (основной экспериментальный метод детектирования звука на ГГц и ТГц частотах). С этой целью исследуется вопрос, как смещение атомов в звуковой волне влияет на коэффициент отражения пробного оптического излучения. В главе 4 получены формулы, связывающие относительное изменение коэффициента отражения металла ($\Delta R/R$) с амплитудой звука, а также проанализирован спектральный состав и временная зависимость функции $\Delta R(t)/R$ для плёнок разной толщины и для разных материалов подложки. Отдельно обсуждаются условия, при которых работают упрощённые модели генерации звука в плёнках.

В заключении кратко формулируются основные результаты диссертационного исследования.

Диссертация Е. А. Данилова, несомненно, выполнена на высоком теоретическом уровне. К её достоинствам стоит отнести получение многих решений в аналитическом виде, либо, как минимум, стремление к максимально полному аналитическому исследованию поставленных задач. Для достижения этой цели автор использует достаточно широкий набор инструментов математической физики. Как правило, поставленные в диссертации задачи не просто решаются для определённой области параметров: автор подробно рассматривает и сопоставляет между собой решения, соответствующие различным с физической точки зрения предельным случаям (например, различным частотам столкновений, глубинам металлической плёнки, скорости переноса тепла и т.д.). В результате работа создаёт впечатление глубокого и всестороннего теоретического исследования.

Стоит отдельно отметить оригинальность задачи о влиянии звуковых волн на отражение пробных оптических импульсов, сформулированной в Главе 4. Несмотря на то, что теоретическая модель содержит два неизвестных параметра, характеризующих возмущение диэлектрической проницаемости металла при деформации в акустической волне (см. уравнение (4.23)), сама постановка вопроса об оценке акустооптических эффектов в металлах представляется весьма перспективной.

Далее приведены основные замечания к диссертационной работе.

1) К общим недостаткам диссертации стоит отнести сравнительное малое внимание, уделённое автором сопоставлению теоретических результатов с экспериментом. Действительно, не для каждой из рассмотренных задач можно найти эксперимент, в точности подходящий под её условия. Однако во многих случаях были бы уместны не просто количественные оценки, но и сопоставление этих оценок с экспериментальными данными по порядку величины либо обсуждение того, насколько в принципе реализуема регистрация сигналов с полученной интенсивностью в эксперименте. Так, например, оценка полной энергии ТГц излучения в конце раздела 2.4. и её обсуждение выглядят незавершёнными.

2) Наиболее детальное сравнение теории с экспериментом приводится в Главе 4 (см., например, заключительную часть раздела 4.4.). В частности, автор интерпретирует нетривиальную зависимость амплитуды звукового сигнала от толщины металлической плёнки, наблюдавшуюся в экспериментах, что является несомненным достоинством работы. Однако, в этом разделе не обсуждается хотя бы примерное абсолютное значение возмущения коэффициента отражения ΔR , измеренное в эксперименте. Возможно, сопоставление с экспериментом позволило бы оценить плохо известные константы, описывающие возмущение диэлектрической проницаемости металла при прохождении акустических волн.

3) Некоторые переходы между формулами и даже некоторые уравнения, вводимые в текст впервые, комментируются излишне кратко или поясняются только ссылкой на литературу. Для технических выкладок это менее принципиально. Но, например, определённо стоило бы пояснить

смысл и происхождение уравнения (1.10), поскольку оно описывает возбуждение низкочастотных токов внутри металла и, таким образом, является базовым для последующих разделов диссертации. В частности, стоит пояснить взаимосвязь уравнения (1.10) с уравнением Эйлера или уравнением Навье-Стокса, которое можно было бы применять в гидродинамической модели электронов.

Аналогично, стоило бы более подробно обосновать квадратичную зависимость эффективной частоты столкновений электронов от частоты действующего поля, которая вводится в начале раздела 2.3 на странице 41 (а затем появляется в более конкретном виде в ур. (3.54)). Эта зависимость также достаточно важна для изложения, поскольку она позволяет выделить нетривиальную область параметров, где, например, особенно эффективно возбуждается поверхностная низкочастотная волна.

4) В конце третьей главы приводится достаточно подробный анализ эффективности генерации звуковых волн за счёт трёх факторов: градиента давления электронов, пондеромоторной силы лазерного импульса и расширения самой кристаллической решётки при её нагреве. Однако основное внимание уделяется сравнению этих источников *по модулю* и в спектральной области, а их интерференция между собой не обсуждается. Поскольку далее обсуждается возможность детектирования звука в металлах оптическими методами, представляется логичным прокомментировать характер интерференции этих источников между собой (особенно для области частот, где их вклады сопоставимы).

Диссертация написана достаточно концентрированно и лаконично, что характерно для многих теоретических работ. В тексте встречается относительно небольшое количество опечаток, которое не затрудняет понимание работы. Однако, при знакомстве с диссертацией вызывает неудобство частое использование буквенных обозначений, которые были введены в тексте несколькими разделами ранее (о смысле обозначений следовало бы напоминать читателю).

Приведённые замечания носят, в первую очередь, характер уточнений и пожеланий, и не влияют на общую высокую оценку полученных результатов и уровня представленной диссертации. Достоверность и обоснованность научных положений, сформулированных в диссертации, не вызывает сомнений и обуславливается строгостью методов теоретической физики, применяемых в работе. Новизна и значимость полученных результатов подтверждается их публикацией в 9 научных статьях в ведущих российских и зарубежных научных журналах, входящих в перечень ВАК и международные базы данных. Результаты, представленные в диссертации, были апробированы на нескольких крупных профильных научных конференциях.

Текст диссертации оформлен в соответствии с требованиями ВАК, а автореферат корректно отражает основное содержание и результаты диссертационного исследования.

Диссертация Данилова Егора Алексеевича «Нелинейные явления при взаимодействии импульсов лазерного излучения с проводниками» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Данилов Егор Алексеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Отзыв составил:

Оладышкин Иван Владимирович,

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории нелинейной спектроскопии Отдела нелинейной электродинамики Федерального исследовательского центра Института прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук

Оладышкин Иван Владимирович

22 сентября 2025 г.

Адрес: 603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46.

Телефон: 8 (831) 416-47-54

Электронная почта: oladyshkin@ipfran.ru

Подпись старшего научного сотрудника Лаборатории нелинейной спектроскопии Отдела нелинейной электродинамики ИПФ РАН, к.ф.-м.н. Оладышкина Ивана Владимировича заверяю:

Учёный секретарь ИПФ РАН

И.В. Корюкин

Список работ по официального оппонента кандидата физико-математических наук И.В. Оладышкина по тематике диссертации Е.А. Данилова "Нелинейные явления при взаимодействии импульсов лазерного излучения с проводниками" в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. **Oladyshkin I.**, Biermann battery effect in laser-excited metals//Physical Review B. – 2025. – V. 111. – №. 14. – P. L140301
2. Fadeev D. and **Oladyshkin I.**, Numerical study of ultrafast optical instability causing structured light absorption in metal //Optics Letters. – 2023. – V. 48. – №. 22. – P. 6060-6063.
3. **Oladyshkin I.V.**, Bodrov S.B., Korzhimanov A.V., Murzanev A.A., Sergeev Y.A., Korytin A.I., Tokman M.D. and Stepanov A.N., Polarized light emission from graphene induced by terahertz pulses //Physical Review B. – 2022. – V. 106. – №. 20. – P. 205407.
4. Preobrazhensky E.I., **Oladyshkin I.V.** and Tokman M.D., Optical properties of graphane in infrared range // Physica Scripta. – 2022. – V. 97. – №. 11. – P. 115803.
5. **Oladyshkin I.**, Self-induced decay of intense laser pulse into a pair of surface plasmons //Physical Review B. – 2022. – V. 106. – №. 8. – P. L081408.
6. **Oladyshkin I.V.**, Erukhimova M.A., and Tokman M.D., Magnetic dipole absorption of light at intersubband transitions in quantum wells // Journal of Optics – 2020. – V. 23. – №. 1. – P. 015402.
7. **Oladyshkin I.**, Fadeev D., and Mironov V., Laser-induced anisotropy of electronic pressure and excitation of edge currents inside metal //Optics Letters. – 2020. – V. 45. – №. 22. – P. 6270-6273.