

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук

Кузелева Михаила Викторовича

на диссертацию Данилова Егора Алексеевича

«Нелинейные явления при взаимодействии импульсов лазерного излучения с проводниками», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.19 – Лазерная физика

Диссертация Данилова Е.А. посвящена исследованию двух нелинейных явлений, возникающих при воздействии на металл фемтосекундного лазерного импульса. Первое из них – это генерация низкочастотных электромагнитных полей. Актуальность исследования генерации таких полей связана с возможностью их использования, например, в спектроскопии или томографии. Обычно экспериментальные и теоретические работы посвящены изучению объемных волн, уходящих от поверхности металла. В свою очередь, околоповерхностная структура низкочастотного электромагнитного поля изучена слабо. В частности, помимо объемных волн могут возникать и поверхностные низкочастотные волны. Изучение пространственной структуры низкочастотных полей, а также выявление оптимальных условий возбуждения поверхностных волн, представленное в диссертации, представляет значительный научный интерес. В работе также описана лазерная генерация импульсов звука в пленке металла. Такие импульсы используются при изучении механических свойств образцов и их структуры, поиске трещин, спектроскопии. Во многих экспериментах возбуждение звука происходит в тонких металлических пленках. В таких пленках важны особенности, связанные с их конечной толщиной. Поэтому детальное теоретическое описание лазерной генерации звука в пленке металла, представленное в диссертации, представляет интерес. Также в последние несколько лет множество экспериментальных работ посвящено изучению генерации звука терагерцового диапазона частот. Возбуждение такого звука может быть связано с еще ранее неизученными механизмами генерации. В диссертации рассмотрен один из таких механизмов – пондеромоторное воздействие на электроны. Такое дополнение к теории лазерной генерации звука представляет отдельный интерес. Из сказанного выше можно заключить, что тема диссертации является актуальной.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы (120 наименований). Общий объем диссертации - 119 страниц, 27 рисунков.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследований, дан обзор соответствующей научной литературы, сформулированы цель и задачи работы. Представлены выносимые на защиту положения и обоснованы научная новизна и значимость работы. Приведена информация об апробации работы и список публикаций автора по теме.

Глава 1 посвящена теории генерации низкочастотных электромагнитных полей. Рассмотрено воздействие на металл фемтосекундного импульса лазерного излучения, сфокусированного в узкую полосу. Описаны электромагнитное поле и ток в металле на частоте лазерного излучения. После этого была описана генерация низкочастотных токов и электромагнитных полей, изменяющихся за время порядка длительности лазерного импульса, и возникающих за счет действия пондеромоторной силы на электроны и неоднородного нагрева электронов. Было показано, что суммарное низкочастотное поле состоит из объемной волны, имеющей вид квазицилиндрической волны, и поверхностной волны, и были записаны выражения, описывающие эти поля.

Глава 2 посвящена анализу результатов предыдущей главы. Описана конкуренция между поверхностной и объемной низкочастотными волнами. Было показано, что если частота столкновений электронов в низкочастотном поле меньше обратной длительности лазерного излучения, то будет иметься область доминирования поверхностной волны. При этом чем меньше частота столкновений и длительность лазерного излучения, тем больше размеры этой области. Также было показано, что эффективность генерации поверхностной волны может быть повышена посредством увеличения несущей частоты лазерного излучения. Помимо этого, было дано описание физических характеристик объемной волны, таких как распределение энергии по углам и частотам, а также зависимость полной энергии от ширины полосы фокусировки.

В **Главе 3** описывается возбуждение импульсов звука, возникающих при воздействии импульса несфокусированного лазерного излучения на пленку металла на подложке из диэлектрика. Записаны и решены уравнения для смещения атомов решетки, возникающего из-за нагрева решетки и электронов, в приближениях оптически толстой пленки и однородно нагреваемой пленки. Проведен анализ также и для более общего случая с учетом неоднородности температуры и отражения лазерного поля от подложки. Кроме того, предложен новый механизм генерации звука, связанный с пондеромоторным воздействием на электроны. Описана генерация звука за счет такого механизма, и проведено его сравнение с механизмами генерации, связанными с нагревом решетки и электронов. Показано, что пондеромоторное воздействие может определять генерацию звука терагерцового диапазона частот.

В Главе 4 проанализированы модуляции коэффициента отражения пленки металла, вызванные наличием деформации решетки. Описание проведено при различных толщинах пленки и параметрах лазерного излучения. Показано, что генерация и распространение звуковых импульсов в пленке сопровождаются появлением импульсов на профиле изменения коэффициента отражения. При этом если происходит нагрев задней поверхности пленки, то на профиле изменения коэффициента отражения наблюдаются два набора импульсов: один связан с генерацией звука на границе металл–вакуум, а второй — на границе металл–диэлектрик. Также продемонстрировано, что в случае однородного нагрева пленки уменьшение ее толщины приводит к увеличению амплитуды звуковых импульсов и модуляций коэффициента отражения. Наибольшее усиление достигается, если толщина пленки меньше глубины скин-слоя.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

Диссертация Данилова Е.А. представляет собой существенное дополнение к теории лазерной генерации терагерцовых электромагнитных полей и импульсов звука. В работе изучена конкуренция между объемными и поверхностными низкочастотными электромагнитными волнами, описано влияние толщины пленки и параметров лазерного излучения и образца на генерацию звука, и связанные с ним модуляции коэффициента отражения, а также развита теория генерации терагерцового звука с учётом пондеромоторного воздействия на электроны. Полученные результаты полезны и с практической точки зрения, поскольку позволяют планировать соответствующие эксперименты и интерпретировать их результаты. Выносимые на защиту положения обладают научной значимостью и новизной, а их достоверность обеспечивается обоснованностью используемых физических моделей и надежностью применяемого математического аппарата. Содержание автореферата соответствует диссертации. Материалы диссертации опубликованы в 9 статьях в научных журналах и докладывались на различных профильных конференциях.

Имеется ряд **замечаний**:

1. В работе присутствуют опечатки и не вполне корректные формулировки и термины. Приведу несколько примеров. На странице 14 при обсуждении уравнений (1.2) и (1.3) вектор магнитной индукции назван напряженностью магнитного поля, а индукция электрического поля названа электромагнитной индукцией; на стр. 47 приведено незаконченное неравенство $v t_p \gg$; на стр. 97 вместо «коэффициент отражения» дважды написано «коэффициент выражения».

2. Не совсем понятно, почему в работе возбуждаемые при лазерном облучении металла низкочастотные поля называются полями терагерцового диапазона. Как справедливо пишет, например, на стр. 16 сам автор «характерные частоты низкочастотных полей порядка обратной длительности лазерного импульса», т.е. $\omega \sim t_p^{-1}$. Обратная длительность фемтосекундного оптического импульса попадает в более высокочастотный диапазон. Правда, в случае Рис. 2.10 получаются терагерцы, но там $t_p = 100 \text{ фм}$, а это – скорее пикосекундный диапазон, чем фемтосекундный.
 3. Что за величина $\varepsilon_0(\omega_0)$ введена на стр. 15 в выражении для волнового числа k_L ? Физический смысл ее понятен, но в дальнейшем, особенно при конкретных расчетах, она никак не конкретизируется. Вероятно, полагается $\varepsilon_0(\omega_0) = 1$.
 4. Если огибающая лазерного импульса имеет фемтосекундную длительность, то в общем случае не очень хорошо считать, что она является медленной функцией времени. Действительно, в настоящее время широко используются лазерные импульсы оптического диапазона длительностью всего в несколько фемтосекунд. Конечно, при длительности импульса $t_p = 100 \text{ фм}$ применимость метода медленных амплитуд сомнению не подлежит.
 5. Важную роль в работе имеет соотношение между частотами столкновений в высокочастотном и низкочастотном диапазонах, т.е. автор диссертации предполагает (по-видимому, справедливо), что частота столкновений зависит от частоты, а значит, частотная дисперсия среды, облучаемой лазером, оказывается более сложной, чем в формуле Друдэ. Следовало бы более подробно обсудить это обстоятельство: чем обусловлена зависимость частоты столкновений от частоты поля, как это обстоятельство может сказаться на методике расчетов и т.п.
 6. В настоящее время известно огромное число работ с результатами компьютерного моделирования взаимодействия лазерного излучения с веществом. При этих расчетах численно решаются, по сути, те же уравнения, которые приближенно решал и автор диссертации. К сожалению, какие-то сопоставления результатов диссертации с результатами компьютерных экспериментов в работе отсутствуют. Кстати, отсутствует и сопоставление с результатами реальных экспериментов, хотя экспериментальные данные при обсуждении параметров исследуемых в работе систем, использованы автором широко.
- Указанные замечания не снижают научной значимости представленной работы.

На основании всего вышеизложенного, можно заключить, что диссертационная работа «Нелинейные явления при взаимодействии импульсов лазерного излучения с проводниками» подтверждает научную квалификацию Данилова Е.А. и полностью удовлетворяет 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 ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор МГУ им. М.В. Ломоносова
Кузелев Михаил Викторович

Контактные данные:

e-mail: kuzelev@mail.ru, рабочий телефон: 8(495)939-25-47

Кафедра физической электроники, физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.04.02 – «Теоретическая и математическая физика»

Адрес места работы: 119991, ГСП-1, Москва Ленинские горы, дом 1, строение 2, Физический Факультет

Д.ф.-м.н., проф.

Кузелев М.В.

19.09.2025

И. о. декана физического факультета
МГУ им. М.В. Ломоносова,
д.ф.-м.н., профессор

Белокуров В.В.

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

1. Kartashov I.N., **Kuzelev M.V.**, Tumanov A.V. Beam instability in a plasma microwave amplifier with an absorber // *Physics of Plasmas*. – 2025. – Vol. 32. – No. 2. – P. 023103.
2. Ершов А.В., Карташов И.Н., **Кузелев М.В.**, Диэлектрические и плазменно-диэлектрические черенковские усилители субтерагерцового диапазона на релятивистских электронных пучках большой плотности // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2024. – Т. 165. – № 6. – С. 857-869.
3. Kartashov I.N., **Kuzelev M.V.**, On modeling of nonlinear dynamics of an electron beam in a plasma microwave amplifier // *Plasma Physics Reports*. – 2024. – Vol. 50. – No. 5. – P. 597-602.
4. Карташов И.Н., **Кузелев М.В.**, Электродинамика плазменного соленоида и электромагнитные свойства индуктивного разряда // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2024. – Т. 165. – № 5. – С. 725-741.
5. Kartashov I.N., **Kuzelev M.V.**, Suppression of self-excitation by a local absorber in a relativistic plasma microwave amplifier // *Physics of Wave Phenomena*. – 2022. – Vol. 30. – No. 5. – P. 330-335.
6. Карташов И.Н., **Кузелев М.В.**, Использование коаксиальной электродинамической системы для усиления волн СВЧ-диапазона при развитии пучково-плазменной неустойчивости // *Физика плазмы*. – 2021. – Т. 47. – № 6. – С. 531-540.
7. Карташов И.Н., **Кузелев М.В.**, Излучаемые поверхностные волны в слоистых плазменно-диэлектрических структурах и перспективы их применения в плазменной СВЧ-электронике // *Физика плазмы*. – 2021. – Т. 47. – № 5. – С. 428-440.