

## Отзыв

официального оппонента к. ф.-м. н. Маслова Алексея Владимировича  
на диссертацию Оладышкина Ивана Владимировича  
«Механизмы оптико-терагерцовой конверсии на поверхности металлов»,  
представленную на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.03 - радиофизика

Диссертационная работа Оладышкина Ивана Владимировича посвящена построению теории нелинейного отклика металлов на субпикосекундных временных масштабах. Такая теория является важным направлением расширения знаний о нелинейной электродинамике твёрдого тела в оптическом и терагерцовом диапазонах. Исследование терагерцового диапазона бурно развивается во всем мире в последние 20 лет. Одним из методов эффективной генерации терагерцовых импульсов является взаимодействие фемтосекундных оптических импульсов с твёрдым телом. Используемые на практике механизмы терагерцовой генерации в полупроводниках довольно хорошо изучены. В то же время были получены значительные результаты по измерению терагерцового сигнала от металлических поверхностей. Несмотря на наличие значительного количества экспериментальных данных, механизмы генерации терагерцового излучения от металлических поверхностей остаются дискуссионными. Это связано как со сложностями точного измерения терагерцового импульса (его временной формы и спектральной мощности в абсолютных единицах), так и неполным соответствием экспериментальных данных и результатов простейших теоретических моделей отклика. Таким образом, развитие теории нелинейного отклика металлов представляется актуальной задачей. Такие теоретические результаты могут способствовать не только объяснению существующих экспериментальных данных, но, что особенно ценно, появлению более эффективных методов генерации терагерцового излучения, а также новых методов диагностики субпикосекундных процессов в твёрдом теле.

В связи с обозначенной целью в диссертации решались следующие общие задачи:

- 1) Исследование нелинейного отклика в рамках гидродинамической модели электронного газа. Расчёт терагерцового поля, генерируемого в результате физических процессов вблизи поверхности металла. Расчёт энергии излучения и диаграммы направленности. Обобщение теории на случай полуметаллов с анизотропной эффективной массой носителей заряда.

2) Разработка модели терагерцового отклика металла на основе теплового механизма. В рамках этой модели основным источником терагерцового отклика является продольный градиент температуры электронного газа, который возникает вблизи металлической поверхности.

3) Изучение терагерцовой генерации при использовании структурированных металлических поверхностей и металлических частиц. Расчёт возбуждения поверхностного плазмона плоской монохроматической волной и импульсом конечной длительности. Изучение роли возбуждаемых плазмонов на терагерцовое излучение.

Решение обозначенных задач было проведено тщательно и применяемые приближения были подробно описаны. Получены конкретные аналитические формулы для полей вблизи поверхности металла и для энергии излучения. Следует отметить хорошее владение диссертантом аналитическими методами решения уравнений и умением упростить результаты, используя типичные значения физических величин. Это позволило получить довольно простые формулы, например, для энергии терагерцового излучения и диаграммы направленности. Полученные простые формулы оказались очень полезными. В частности, была предсказана возможность усиления отклика в материалах с низкой плотностью носителей, например, полуметаллах.

Приоритетной частью работы считается разработка модели терагерцового отклика на основе теплового механизма. Действительно, нагрев электронного газа под воздействием фемтосекундного оптического импульса может приводить к сильной неоднородности его температуры, что в свою очередь способствует появлению электрического поля вблизи границы металла. Диссертантом были получены формулы для терагерцового излучения, генерируемого движущимся распределением тепловой энергии электронов. Было показано, что полученные оценки для энергии терагерцового излучения хорошо соответствуют значениям терагерцового сигнала, получаемого в типичных экспериментальных условиях. Важным результатом построенной тепловой теории является возможность объяснить нелокальность (инерционность) терагерцового сигнала, что нельзя сделать используя только мгновенный квадратичный отклик. Развитая теория также предсказывает различное качественное поведение терагерцовой энергии в зависимости от энергии оптического импульса. В частности, было предсказано, что сначала терагерцовая энергия растёт квадратично, а затем экспоненциально. Были получены конкретные формулы для оценки величины электрон-электронных столкновений на основе изменения характера роста терагерцового отклика. Таким образом, построенная тепловая теория отклика может служить



основой для диагностики субпикосекундных процессов в металле путём измерения зависимости мощности терагерцового сигнала от оптического.

В целом выводы диссертации обоснованы и содержат в себе решения поставленных задач. Достоверность аналитически полученных результатов подтверждается их соответствием результатам численного моделирования и экспериментальным данным.

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Во введении описано современное состояние экспериментальных и теоретических исследований по теме работы, обоснована актуальность выбранной темы, сформулирована цель работы, обоснована новизна работы и её практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту, а также представлен список публикаций по теме работы.

В первой главе описывается отклик металлов из-за мгновенных квадратичных нелинейных эффектов. Отклик рассчитывается в рамках гидродинамической модели электронного газа и находятся свойства генерируемого терагерцового излучения. Во второй главе рассматривается тепловой механизм генерации терагерцового излучения. В третьей главе исследуется отклик металлов при наличии структурирования поверхности. В заключении сформулированы основные выводы и положения диссертационной работы.

Несмотря на несомненные научные достоинства работы, следует отметить и некоторые недостатки. Хотелось бы высказать конкретные замечания и пожелания.

1) Длительность терагерцового импульса, как правило, примерно соответствует длине оптического импульса. Распределение нелинейных токов на поверхности металла сравнимо с длиной терагерцовой волны. Это может свидетельствовать о наличии ближнего поля, которое пренебрегалось при решении. Хотелось бы иметь более точный расчёт задачи излучения с учётом ближнего поля, чтобы была возможность оценить количественно точность полученных аналитических формул для излучаемого поля. При проверке формул в работе было проведено сравнение формулы, полученной интегрированием вектора Пойнтинга около поверхности металла, и формулы, полученной интегрированием поля в дальней зоне. При интегрировании поля в дальней зоне брались только малые углы. Это требует пояснений, так как интегрирование, казалось бы, должно проводиться по всем углам.

2) По-видимому, в формулах (1.16) и (1.108) для проекции вектора Пойнтинга пропущен знак «-». Возможно, пропущен знак «-» и в формулах (1.15), (2.12).

3) При использовании гофрированной поверхности было предсказано увеличение терагерцового излучения за счёт возбуждения поверхностного плазмона падающим оптическим импульсом. С другой стороны, нелинейные токи в этом случае, возможно, будут генерировать не только уходящее объёмное терагерцовое излучение, но и поверхностные волны. Интересно было бы понять, насколько важен этот процесс и будет ли он наоборот приводить к снижению мощности терагерцового импульса, излучаемого в вакуум.

В целом работа хорошо написана и аккуратно оформлена. Присутствуют только отдельные опечатки и мелкие недочёты, которые я могу указать:

- 1) Некоторые разделы диссертации имеют названия, но не пронумерованы. Например, раздел 1.5 поделён на три части без номеров. Это относится и к некоторым другим разделам. Далее, подраздел «Давление света» в разделе 1.5 имеет три пронумерованные секции без заголовков.
- 2) Стр. 31, формула (1.29): по-видимому, вместо  $\gamma$  надо было использовать  $\alpha$  (угол падения).
- 3) Рис. 1.4: непонятен смысл относительных единиц для осей (x, y координаты и магнитное поле).
- 4) Стр. 28, опечатка: «... при взаимодействии с поверхности металла ...»
- 5) Стр. 57, опечатка: «... при переходе от хорошо металлов к полуметаллам ...»

Диссертация Оладышкина И. В. соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», а соискатель заслуживает присвоения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 - радиофизика.

Официальный оппонент

Маслов Алексей Владимирович, к. ф.-м. н., доцент кафедры общей физики,

Федеральное государственное автономное

образовательное учреждение высшего образования

«Национальный исследовательский Нижегородский

государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ)

603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23

Эл.почта: avmaslov@rf.unn.ru, тел.: +7 (831) 462-32-71

Подпись Маслова А. В. заверяю:

Учёный секретарь ННГУ, канд. социол. наук

28 ноября 2018 г.



Черноморская Л. Ю.