

## ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертационную работу Есаулкова Михаила Николаевича «Роль проводимости и нелинейной поляризации среды в ориентации главной оси эллипса поляризации терагерцового излучения, образующегося при самовоздействии и взаимодействии фемтосекундных импульсов в газах и проводящих плёнках», представленную на соискание ученой степени кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика

Диссертационная работа Есаулкова М.Н. посвящена экспериментальному исследованию нелинейных процессов генерации терагерцового излучения при взаимодействии мощного фемтосекундного лазерного излучения с такими нелинейными средами, как плазма оптического пробоя газов и тонкие плёнки диоксида ванадия. Основной фокус работы делается на исследовании состояния поляризации терагерцового излучения, но также уделяется внимание определению его пространственных характеристик и спектра.

**Актуальность** и интерес к данной тематике обусловлен тем, что плазма оптического пробоя газов является одним из наиболее востребованных и перспективных источников импульсного терагерцового излучению благодаря сочетанию широкого спектра генерации и высокой пиковой амплитуды ТГц поля. При этом вопрос о состоянии поляризации терагерцового излучения долгое время являлся наименее исследованным для такого класса источников, и представленная работа является примером систематического исследования, восполняющего данный пробел. Генерация терагерцового излучения в тонких пленках диоксида ванадия является не исследованным ранее явлением. Тем не менее, она является родственной к задаче о генерации терагерцового излучения на поверхностях металлов, по которой существует небольшое количество экспериментальных и теоретических работ. Суммируя, можно заключить, что выбранная в диссертационной работе тематика является весьма актуальной задачей лазерной физики и нелинейной оптики. В работе используются современные и эффективные методы исследования импульсного терагерцового излучения: техники спектроскопии с временным разрешением, основанные на электрооптическом эффекте в кристалле ZnTe и на нелинейном процессе генерации второй гармоники лазерного излучения в присутствии терагерцового поля (так называемая методика ABCD-детектирования), а также автокорреляционный метод, реализованный при помощи интерферометра Майкельсона. Применение этих методов позволяет наиболее полно исследовать спектральные и поляризационные характеристики широкополосного терагерцового излучения, которое в описанных экспериментах имело спектр от 0.1 до 15 ТГц.

**Научная новизна** данной работы связана с выявлением состояний поляризации терагерцового излучения, возникающего в процессе оптического пробоя газов импульсами первой и второй гармоники титан-сапфирового лазера, в зависимости от параметров поляризации и временной задержки этих импульсов; с обнаружением конической пространственной структуры терагерцового излучения из плазмы оптического пробоя; с обнаружением и исследованием явления генерации терагерцового излучения в плёнках диоксида ванадия при их взаимодействии с лазерным излучением.

**Обоснованность и достоверность результатов**, представленных в диссертации, обусловлена показанной воспроизводимостью экспериментальных данных, выполнением экспериментов с использованием современного оборудования и методик, качественным согласием экспериментальных данных с данными, известными из литературных источников. Результаты работ были опубликованы в ряде российских и зарубежных рецензируемых научных журналов.

**Значимость результатов диссертации** для науки и практики определяется исследованиями новых эффектов: генерации терагерцового излучения в пленке двуокиси

ванадия, а также исследованию поляризационных и спектральных характеристик терагерцового излучения газового пробоя. Диссертация помимо научного, имеет важное значение для практики, в частности для дистанционного зондирования газов, создания спектрометров терагерцового диапазона.

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, содержит 147 страниц (включая титульный лист), 52 рисунка, 2 таблицы и 181 ссылку в списке литературы.

Во введении обосновывается актуальность выбранной тематики и научная новизна работы, приводится обзор известных на момент написания диссертации работ по тематике генерации импульсного терагерцового излучения в плазме оптического пробоя и тонких проводящих плёнках.

Первая глава, носящая скорее обзорный характер, посвящена описанию нескольких теоретических моделей, описывающих стадии генерации терагерцового импульса в плазме оптического пробоя газов. Генерация, обусловленная свободными электронами, возникающими при фотоионизации газа, и генерация, обусловленная связанными электронами среды на нелинейности третьего порядка, рассматриваются независимо друг от друга. Приводятся состояния поляризации ТГц импульса, которые возникают в рамках той или иной теоретической модели, и автор диссертации показывает, что для разных выбранных моделей эти состояния различны.

Во второй главе описываются экспериментальные методики, применяемые в работе. Основное внимание уделяется созданию спектрометра с независимым управлением излучением первой и второй гармоники лазерного импульса с принудительной стабилизацией разности длин плеч, по которым распространяются пучки двух гармоник. Для детектирования ТГц излучения и анализа состояния его поляризации используется сразу несколько методик, позволяющих работать с широкополосным излучением и определять состояние его поляризации.

Третья глава содержит основные экспериментальные результаты по определению поляризационных и спектральных характеристик терагерцового излучения. Демонстрируется состояние и ориентация эллипса поляризации терагерцового излучения для различных комбинаций поляризации импульсов первой и второй гармоники титан-сапфирового лазера. Обнаруживается качественное различие экспериментально наблюдаемой поляризации и поляризации, получаемой в рамках выбранных теоретических моделей. Интересным результатом является показанная возможность управления направлением линейной поляризации терагерцового импульса путём изменения временной задержки между импульсами первой и второй гармоники. Кроме того, в главе показано изменение поляризации излучения второй гармоники, происходящее в процессе взаимодействия лазерного излучения с плазмой оптического пробоя, и поляризация излучения третьей гармоники. Спектральные характеристики излучения определяются при помощи интерферометра Майкельсона, автор демонстрирует терагерцовое излучение на частотах от 0.1 до 15 ТГц. Приводится пример использования такого источника ТГц излучения для фурье-спектроскопии.

В четвертой главе исследуется пространственный профиль интенсивности терагерцового излучения. Несколькими методиками автор показывает, что терагерцовое излучение имеет коническую пространственную структуру, определяет распределение частот внутри этого конуса. При помощи матрицы микроболометров демонстрируется фокусировка ТГц пучка в пятно с характерным размером 500 мкм.

Пятая глава посвящена обнаружению и исследованию процесса генерации ТГц излучения в эпитаксиальных плёнках диоксида ванадия. Описывается методика получения пленок, изменение их свойств при фазовом переходе из непроводящего состояния в проводящее при нагреве. Обнаруживается, что при взаимодействии с фемтосекундным лазерным импульсом в плёнках происходит генерация терагерцового

излучения, изучаются энергетические и поляризационные зависимости этого процесса, делается предположение о природе явления.

В заключении перечислены основные результаты диссертационной работы

В автореферате диссертации перечислены научная новизна, практическая значимость, цели диссертационной работы, кратко приведены основные результаты, полученные в работе, приведен список публикаций автора в журналах и сборниках тезисов. Автореферат диссертации правильно и полно отражает содержание диссертационной работы.

В то же время, хотелось бы отметить следующие замечания по диссертации:

1. В Главе 5 «Генерация ТГц излучения в плёнках диоксида ванадия» Рис 5.5. приведены зависимости ТГц излучения с пленки окиси ванадия от плотности мощности накачки, обнаружена сверхлинейная зависимость и сделан вывод, что сверхлинейность определяется оптически индуцированным фазовым переходом в пленке окиси. Следовательно, происходит необратимое фазовое превращение, которое можно было бы определить по гистерезису, если провести измерения как с увеличением, так и со снижением мощности накачки и определить необратимые изменения в пленке. К сожалению этого не было сделано, поэтому объяснение остается гипотезой.

2. Пленка диоксида ванадия, учитывая возможный фазовый переход, может иметь сложную структуру, например кристаллиты, разделенные аморфными областями. Косвенно на структурирование указывает зависимость свойств пленки от толщины. К сожалению в работе не проведены исследования пленки с использованием оптической, атомно-силовой и электронной микроскопии, которые могли бы пролить свет на ее структуру и дать данные для объяснения наблюдаемых эффектов, в частности объяснение эмиссии терагерцового излучения.

3. Недостаточно аргументированно объяснение механизма генерации ТГц излучения как следствия движения носителей на границе двуокиси ванадия и сапфира. Действительно, не получил объяснения факт отсутствия генерации на плёнках диоксида ванадия, выращенных на подложках с-среза сапфира, где даже в проводящей фазе амплитуда генерируемого излучения была очень мала.

Тем не менее, указанные замечания не носят принципиального характера и не снижают научной значимости работы. По теме диссертации опубликовано 8 работ в ведущих рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК РФ, а полученные результаты неоднократно докладывались на международных и российских научных конференциях.

На основании изложенного, считаю, что диссертационная работа М.Н. Есаулкова «Роль проводимости и нелинейной поляризации среды в ориентации главной оси эллипса поляризации терагерцового излучения, образующегося при самовоздействии и взаимодействии фемтосекундных импульсов в газах и проводящих плёнках» отвечает всем требованиям ВАК РФ и требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в редакции Постановления №842 Правительства РФ от 24 сентября 2013 года, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Есаулкин Михаил Николаевич, несомненно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

Официальный оппонент

Зав. кафедрой инженерной фотоники,  
д. ф.-м. н., профессор



Денисюк Игорь Юрьевич

Подпись Денисюка И.Ю. заверяю  
Ученый секретарь Университета ИТМО

Марусина Мария Яковлевна