

ОТЗЫВ

официального оппонента д. ф.-м. н. Урюпина Сергея Александровича на диссертационную работу Бодрова Сергея Борисовича «Нелинейно-оптическая генерация и диагностические применения импульсного терагерцового излучения», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика

Диссертационная работа посвящена актуальной тематике – поиску и разработке новых схем оптико-терагерцового преобразования, а также оптимизации ранее предложенных, но недостаточно исследованных, схем конверсии излучения видимого диапазона в терагерцовое излучение. Не менее актуальны рассмотренные в диссертации вопросы использования терагерцового излучения для изучения нелинейно-оптических явлений, составляющих основу нелинейной оптики.

Диссертация состоит из введения, пяти больших глав, заключения, списка цитируемой литературы и списка публикаций по диссертации.

Во введении на основе обзора литературы обоснована актуальность диссертационной работы, указаны ее цель и задачи, отмечены научная новизна и практическая значимость результатов, приведены выносимые на защиту основные положения, дано краткое описание содержания глав диссертации.

В первой главе диссертации представлены двумерные теоретические расчеты терагерцового поля, генерируемого нелинейной поляризацией, движущейся с групповой скоростью лазерного импульса. Рассмотрено несколько вариантов генерации терагерцового поля, реализующихся при досветовой и сверхсветовой скорости лазерного импульса, а также при наличии и отсутствии фокусировки лазерного излучения. Выполнены расчеты поля, выходящего из нелинейного кристалла, в котором реализуется генерация. Полученные выражения для генерируемого терагерцового поля позволяют видеть режимы, в которых можно ожидать наиболее эффективную генерацию, и составляют теоретическую основу для описания генерации в кристаллах, в которых можно не учитывать истощение лазерного импульса и изменение его формы.

Вторая глава диссертации посвящена исследованию генерации импульсов терагерцового излучения при воздействии на кристаллы лазерных импульсов со скошенным фронтом интенсивности. Как и в первой главе, сначала излагаются теоретические расчеты поля, порождаемого заданным источником нелинейной поляризации. Наряду с более детальным анализом рассмотренной ранее схемы генерации, предложена и всесторонне изучены новая схема, в которой для генерации используется

плоскопараллельная пластина ниобата лития, расположенная между двумя призмами. Показано, что спектральные характеристики излучения и эффективность генерации в условиях новой схемы сравнимы с реализующимися в используемой обычно схеме. Теоретические расчеты подтверждены соответствующими экспериментами. Также теоретически исследована генерация в условиях, когда скошенный фронт интенсивности создается дифракционной решеткой, нанесенной на поверхность кристалла.

В третьей главе исследованы закономерности черенковского высвечивания терагерцового излучения из нескольких сэндвич-структур. Исследованы условия, в которых лазерный импульс в основном возбуждает одну моду в сэндвич-структуре. Выполнены расчеты напряженности генерируемого поля и спектрального состава излучения. Расчеты сравниваются с результатами экспериментов с использованием пластин ниобата лития толщиной в несколько десятков микрон. Выявлена возможность повышения эффективности генерации до значений близких к одному проценту. Показано, что при использовании протяженных сэндвич-структур и широкого цилиндрического пучка накачки можно получить терагерцовые импульсы с энергией около одного микроджоуля.

Важное место в диссертации занимают вопросы, связанные с генерацией второй гармоники в центрально-симметричных средах. Изучению этих вопросов посвящена четвертая глава диссертации, которая начинается с подробного изложения одномерной теории взаимодействия распространяющихся вдоль одного направления импульсов излучения видимого и терагерцового диапазонов частот. Теоретические расчеты дополнены экспериментами, выполненными с использованием пластин плавленого кварца. В дальнейшем показано, как использование эффекта генерации второй гармоники в поле терагерцового импульса позволяет обнаружить неоднородности восприимчивости третьего порядка в условиях, когда линейные оптические свойства образца слабо отличаются от свойств неоднородного вкрапления. Экспериментально показано, что таким способом можно обнаружить тонкий слой оптического клея между слоями плавленого кварца. Значительное внимание уделено измерениям кубической нелинейности в непрозрачных или частично прозрачных кристаллах. Эксперименты выполнены с использованием кристаллов кремния, теллуридов и халькогенидов стекла. Выявлена возможность получения информации о величине встроенного электрического поля, которое может оказывать сильное влияние на нелинейные оптические явления вблизи поверхности образца. На основании полученных экспериментальных данных дана оценка встроенного электрического поля на поверхности кремния. Далее получены интересные данные об эффекте Керра в жидкостях, на которые воздействует импульс терагерцового излучения большой интенсивности. Для ацетона такие данные полностью оригинальны. Еще один

раздел в этой главе посвящен экспериментальному изучению люминесценции графена, на который воздействовало терагерцовое излучение с большой плотностью потока энергии. Измерены спектры люминесценции в широком диапазоне длин волн, перекрывающем весь видимый диапазон. Выполнен анализ возможности детектирования терагерцового поля, усиливающегося на резких неоднородностях микроструктур.

В пятой главе предложен и экспериментально проверен новый метод диагностики эволюции плотности плазмы на временах в несколько наносекунд. Физической предпосылкой для эффективного использования терагерцового излучения при изучении эволюции плотности в канале филамента в воздухе является соизмеримость основной частоты терагерцового импульса и плазменной частоты электронов в канале. Установлено, что теоретические расчеты эволюции плотности плазмы из-за рекомбинации находятся в согласии с экспериментальными данными, полученными с использованием предложенного метода диагностики плотности.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Диссертационная работа Бодрова С.Б. представляет собой цельное и законченное исследование в области нелинейной оптики. Все основные результаты диссертации являются новыми и представляют значительный интерес.

Несомненным достоинством диссертации является ее практическая направленность на разработку источников ТГц излучения с улучшенными характеристиками. Предложенные в диссертации схемы оптико-терагерцовых конверторов могут найти применение в ряде практических приложений ТГц излучения.

В качестве достоинства диссертации следует отметить выполнение экспериментальных исследований на лазерном оборудовании мирового уровня и высокий уровень теоретического анализа. Хорошее согласие экспериментальных результатов с результатами используемых теоретических моделей позволяет говорить о достоверности сделанных в диссертации выводов.

Обоснованность и достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается также тем, что они не противоречат теоретическим и экспериментальным данным, полученным другими исследователями, доложены на авторитетных конференциях и опубликованы в высокорейтинговых рецензируемых журналах.

По содержанию работы имеются следующие замечания:

1. При теоретическом описании генерации терагерцового излучения не учитывалось истощение лазерного импульса, которое может быть существенным при не малой

толщине нелинейного кристалла. Стоило бы указать условия, в которых изменением лазерного импульса можно пренебречь в рассматриваемых кристаллах.

2. Если в случае генерации терагерцового излучения обычными импульсами влияние формы лазерного импульса на генерируемое поле в какой-то мере изучено, то при использовании импульсов со скошенным фронтом интенсивности ситуация несколько сложнее. Вследствие одновременной зависимости функций, описывающих распространение фронта фазы и фронта интенсивности от одной и той же координаты, желателен анализ зависимости результатов от вида огибающей интенсивности.
3. В сэндвич-структуре длина волны на основной частоте лазерного импульса мала по сравнению с толщиной пластины, а длина волны на частотах изменения огибающей, напротив, много больше толщины пластины. Может ли это быть дополнительной причиной, ограничивающей использование такой сэндвич-структуры для генерации терагерцовых импульсов? Желательно добавить соответствующий комментарий.
4. При обсуждении эффектов, связанных с генерацией второй гармоники, важна величина нелинейной восприимчивости третьего порядка. В этой связи было бы полезно представить выражение для тензора нелинейной восприимчивости (или той его компоненты, которая важна для рассмотрения) полученное в какой-либо физической модели, применимой, например, для описания кристаллов, используемых в диссертации. Если это не просто, то хотя бы указать физические механизмы, ответственные за отклик на поле в третьем порядке по напряженности.
5. При численных расчетах эволюции плотности плазмы в филаменте не учитывалась диффузия электронов, а также их теплопроводность, в уравнении для температуры электронов. По-видимому, для этого есть основания. Однако оценки, позволяющие видеть возможность не учитывать эти процессы, были бы вполне уместными, особенно если температура филамента становится большой.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы и не ставят под сомнение достоверность полученных результатов и защищаемых положений. Тематика и содержание диссертации полностью соответствует специальности 1.3.19. Лазерная физика. Основные результаты работы опубликованы в 28 авторитетных рецензируемых научных журналах, которые входят в список журналов ВАК РФ, рекомендованных для опубликования основных результатов диссертации. Выводы диссертации соответствуют целям, задачам и положениям, выносимым на защиту. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Бодрова Сергея Борисовича «Нелинейно-оптическая генерация и диагностические применения импульсного терагерцового излучения» является завершенной научно-квалификационной работой и удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842, предъявляемым к диссертациям, представленным на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Бодров Сергей Борисович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Официальный оппонент:

Высококвалифицированный главный научный сотрудник Физического института имени П.Н. Лебедева РАН (г. Москва), доктор физико-математических наук (01.04.08. Физика плазмы)

22 декабря 2025 г.



Урюпин Сергей Александрович

Я, Урюпин Сергей Александрович, даю согласие на обработку моих персональных данных (приказ Минобрнауки России от 01.07.2015 №662) и на включение моих персональных данных в аттестационные документы соискателя ученой степени доктора физико-математических наук Бодрова Сергея Борисовича.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Почтовый адрес: 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д. 53

Тел.: (499) 132-63-03

E-mail: uryupin@sci.lebedev.ru

Подпись С.А. Урюпина заверяю

Ученый секретарь Физического института

им. П.Н. Лебедева РАН,

к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник



А.В. Колобов