ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Бодрова Сергея Борисовича на тему «Нелинейно-оптическая генерация и диагностические применения импульсного терагерцового излучения», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Представленный автореферат диссертации Бодрова Сергея Борисовича отражает масштабное исследование, посвященное одной из наиболее динамично развивающихся областей современной фотоники — разработке методов генерации мощного импульсного терагерцового излучения и его использованию для диагностики быстропротекающих процессов и материаловедения. Актуальность данной темы сложно переоценить. Терагерцовый диапазон (0.1–10 ТГц) долгое время оставался труднодоступным для исследований из-за отсутствия компактных и эффективных источников когерентного излучения. В последние десятилетия прорыв в этой области связан с применением нелинейно-оптических методов преобразования фемтосекундных лазерных импульсов. Разработка высокоэффективных источников терагерцового излучения, а также создание на их основе новых диагностических методик, является ключевой задачей, решение которой открывает перспективы для фундаментальных исследований в физике конденсированного состояния, химии, биологии, а также для приложений в медицине, системах безопасности, неразрушающего контроля и высокоскоростной связи.

Научная значимость работы Бодрова С.Б. определяется тем, что в ней последовательно и на высоком уровне решен комплекс взаимосвязанных задач, охватывающих всю цепочку от фундаментальной теории и создания новых источников до разработки оригинальных диагностических методов. Автором впервые разработана последовательная электродинамическая теория генерации терагерцового излучения при оптическом выпрямлении ультракоротких лазерных импульсов в электрооптических кристаллах, которая в отличие от упрощенных моделей учитывает такие важные факторы, как наличие границ кристалла, конечность поперечного размера лазерного пучка и дисперсию среды, включая случай скошенного фронта интенсивности. Этот теоретический фундамент позволил не только глубоко проанализировать известные эффекты, но и предложить новые, более эффективные схемы генерации.

На основе теоретических предпосылок в диссертации предложены и блестяще экспериментально реализованы два новых класса оптико-терагерцовых преобразователей. Первый класс основан на усовершенствованной схеме генерации скошенными импульсами, где пластина ниобата лития размещена между двумя согласующими призмами. Такая геометрия устраняет ключевые недостатки стандартной призменной схемы, позволяет эффективно использовать объем кристалла и является масштабируемой для высокоэнергетической накачки, что открывает путь к созданию источников с рекордными энергетическими характеристиками. Второй класс — это высокоэффективные черенковские преобразователи на основе тонкого волноводного слоя $LiNbO_3$, прижатого к кремниевой призме. Показанная эффективность преобразования до ~1% для субмиллиджоульных импульсов накачки с длиной волны 2.1 мкм является выдающимся результатом. Особенно важно, что работа носит не только прикладной, но и глубокий исследовательский характер: в ней детально изучена природа насыщения эффективности, влияние нелинейных эффектов (многофотонного поглощения, фазовой самомодуляции) и предложены пути их минимизации.

Отдельного внимания заслуживает вторая часть работы, посвященная диагностическим применениям сильных терагерцовых полей. Здесь научная новизна и значимость проявляются в разработке целого ряда оригинальных методов. Строгая теория и эксперимент по генерации второй гармоники фемтосекундного излучения в поле терагерцового импульса привели к важному фундаментальному выводу: в типичных условиях генерация локализована на границах среды, что позволило предложить новый метод нелинейно-оптического детектирования малоконтрастных неоднородностей и границ раздела. Проведены пионерские измерения абсолютных нелинейных коэффициентов Керра для полярных и неполярных жидкостей в терагерцовом поле, показавшие их отличие от коэффициентов для оптического и постоянного полей, что дает новую информацию о динамике молекулярных откликов. Продемонстрирована принципиальная возможность измерения встроенного электрического поля в кремнии с помощью поверхностной генерации второй гармоники, индуцированной терагерцовым импульсом, что представляет большой интерес для микроэлектроники. Ярким прикладным достижением является метод визуализации терагерцового пучка и усиленного ближнего поля через наведенную люминесценцию в графене, а также предложенный и реализованный эффективный метод диагностики динамики электронной концентрации в лазерно-плазменной филаменте путем измерения рассеяния терагерцового импульса.

Работа выполнена на высочайшем научно-техническом уровне с применением современного лазерного оборудования и методик измерений. Полученные результаты имеют ярко выраженный инновационный характер, что подтверждается 28 публикациями в высокорейтинговых рецензируемых журналах, участием в ведущих международных конференциях, а также патентом. Результаты диссертации вносят существенный вклад в развитие нелинейной оптики, терагерцовой спектроскопии и диагностики, открывая новые возможности как для фундаментальных исследований нелинейных взаимодействий и сверхбыстрых процессов, так и для создания перспективных устройств и технологий.

В качестве замечаний, не снижающих общей высокой оценки работы, можно отметить следующее:

1. В автореферате подробно описаны схемы преобразователей и их эффективность, однако для более полного сравнительного анализа было бы полезно привести сводную таблицу с ключевыми параметрами (эффективность, энергия, поле, спектральный диапазон) предложенных и наиболее распространенных аналогов.
2. При описании метода диагностики плазмы посредством терагерцового рассеяния стоит более явно указать его принципиальные ограничения, связанные с необходимостью независимой информации о радиусе плазменного канала и частоте столкновений для точного определения абсолютной концентрации.
3. На Рис. 19 представлена экспериментальная зависимость сигнала второй гармоники от задержки, хорошо согласующаяся с квадратом поля терагерцового импульса. Для усиления доказательной базы теории локализации генерации на границах было бы полезно также привести сопоставление с результатами численного моделирования на основе выведенных в работе формул.

Тем не менее, представленный автореферат убедительно демонстрирует, что диссертационное исследование Бодрова Сергея Борисовича является самостоятельной, целостной и завершенной научной квалификационной работой, выполненной на мировом уровне. В целом, судя по автореферату и публикациям автора по теме диссертации, можно

сделать вывод, что тематика работы соответствует специальности 1.3.19. Лазерная физика, работа удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора физико-математических наук, а Бодров Сергей Борисович заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Профессор кафедры общей физики и волновых процессов
физического факультета ФГБОУВО «Московский
государственный университет имени М.В.Ломоносова»
(МГУ),
доктор физико-математических наук
(1.3.19. Лазерная физика)

Фёдор Викторович Потёмкин
«19» января 2026 г.

Физический факультет ФГБОУВО «Московский
государственный университет имени М.В.Ломоносова»
(МГУ),
Почтовый адрес: 119991, ул. Ленинские горы, д. 1, стр.2,
телефон: +7(495) 939-53-18
e-mail: potemkinfv@my.msu.ru,

Подпись Ф.В. Потёмкина заверяю,
Учёный секретарь физического факультета ФГБОУВО «Московский
государственный университет имени М.В.Ломоносова»
(МГУ),
доцент, доктор физико-математических наук

Сергей Юрьевич Стремоухов