

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
**ИНСТИТУТ СПЕКТРОСКОПИИ**  
**Российской академии наук**  
**(ИСАН)**

ул. Физическая, д. 5, г. Троицк, Москва, 108840  
Тел.: 8 (495) 851-05-79, тел./факс: 8 (495) 851-08-86  
e-mail: [isan@isan.troitsk.ru](mailto:isan@isan.troitsk.ru) [www.isan.troitsk.ru](http://www.isan.troitsk.ru)

16.01.2026 № 11221-01-1255/9

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора

Института спектроскопии РАН  
(приказ ИСАН от 15.12.2025 № 65)

А.Ю. Плодухин

2026 г.



### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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

Разработка эффективных источников импульсного терагерцового излучения высокой интенсивности на основе нелинейно-оптического преобразования фемтосекундных лазерных импульсов в электрооптических кристаллах – активно развивающееся направление современной нелинейной оптики. Интенсивное терагерцовое излучение востребовано в таких новых приложениях, как ускорение и пространственно-временная фокусировка заряженных частиц, сверхбыстрое управление параметрами порядка в веществе, нелинейная терагерцовая спектроскопия и др. Несмотря на значительный прогресс последних двух десятилетий, в ходе которого рекордная эффективность оптико-терагерцовой конверсии возросла с 0,01% до 1%, а энергия получаемых терагерцовых импульсов достигла уровня миллиджоулей, создание эффективного, широкополосного и доступного преобразователя лазерного излучения в терагерцовое по-прежнему остается актуальной задачей. Решению этой проблемы посвящена значительная часть настоящей диссертационной работы.

Другая, не менее важная часть диссертации посвящена разработке новых направлений применения импульсного терагерцового излучения. Благодаря росту энергии импульса и появлению мощных терагерцовых источников появилась возможность эффективного исследования нелинейных явлений в этом диапазоне. Среди них изученные в диссертационной работе индуцированные терагерцовым полем оптическая люминесценция и генерация второй оптической гармоники, а также терагерцовый эффект Керра. Создание диагностического инструментария на их основе имеет большое значение для изучения новых материалов, диагностики биологических тканей и ряда других приложений.

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

Во введении представлен литературный обзор современных методов генерации импульсного терагерцового излучения фемтосекундными лазерными импульсами, а также некоторых важных нелинейно-оптических эффектов с участием терагерцовых импульсов. Сформулированы цели и задачи работы, обоснована актуальность проводимых исследований. Изложены положения, выносимые на защиту, отмечены научная новизна, а также теоретическая и практическая значимость результатов. Перечислены основные методы исследований и отмечен личный вклад автора.

В первой главе изложена аналитическая теория генерации терагерцового излучения при оптическом выпрямлении фемтосекундных лазерных импульсов в слое электрооптического кристалла. Описана динамика формирования структуры терагерцового поля и введены понятия характеристических длин, позволяющих наглядно интерпретировать динамику наблюдаемых явлений. Для адекватного описания высвечивания в окружающее пространство ближнего терагерцового поля получены модифицированные формулы Френеля и закон Снеллиуса. Рассчитаны структура и энергия генерируемых полей для ряда распространенных электрооптических кристаллов, а также даны рекомендации по достижению максимальной эффективности оптико-терагерцовой конверсии. В завершение главы предложен метод повышения пространственного разрешения терагерцовой эмиссионной микроскопии.

Во второй главе теоретически и экспериментально исследована генерация терагерцового излучения при оптическом выпрямлении скошенных лазерных импульсов, т.е. импульсов с наклонным фронтом интенсивности относительно фазового фронта. Описана структура и динамика формирования терагерцового поля в приближении заданной накачки. В более реалистичной модели, учитывающей расплывание импульса накачки из-за угловой дисперсии скошенного импульса, представлена обобщенная теория генерации для стандартной схемы с оптико-терагерцовым преобразованием в призме из кристалла  $\text{LiNbO}_3$ . Показано, что высокая эффективность оптико-терагерцовой конверсии и хорошее качество терагерцового пучка могут быть достигнуты без предполагаемой ранее параллельности фронта интенсивности и плоскости изображения решетки, формирующей скошенный лазерный импульс. Экспериментально исследована стандартная схема генерации в зависимости от параметров накачки и температуры кристалла. Установлено, что энергия накачки, соответствующая насыщению эффективности, не зависит от температуры кристалла  $\text{LiNbO}_3$  в диапазоне 10-300 К. Предложена и экспериментально апробирована новая схема генерации с

использованием слоя  $\text{LiNbO}_3$ , помещенного между двумя согласующими призмами для ввода оптической накачки и вывода генерируемого излучения, для которой продемонстрирована эффективность  $\sim 0,1\%$ , сопоставимая со стандартной. Это открывает перспективы генерации высокоэнергетических (на уровне мДж) терагерцовых импульсов с использованием коммерчески доступных широкоапертурных пластин  $\text{LiNbO}_3$ .

В третьей главе предложены, теоретически описаны и экспериментально исследованы оригинальные оптико-терагерцовые преобразователи черенковского типа. В таких преобразователях оптическая накачка распространяется вдоль тонкого (30-50 мкм) слоя электрооптического материала ( $\text{LiNbO}_3$ ), а генерируемое за счет черенковского синхронизма терагерцовое излучение выводится через боковую поверхность слоя с помощью кремниевой призмы. Изучено влияние энергии, длительности, chirpa и центральной длины волны фемтосекундной накачки, а также толщины слоя  $\text{LiNbO}_3$  на энергию и спектр генерируемого излучения. Продemonстрирована эффективность генерации около  $0,4\%$  при накачке излучением на длине волны титан-сапфирового лазера (0,8 мкм) и более  $1\%$  – при накачке на длине волны около 2 мкм. В преобразователях с большой (5 см) шириной слоя  $\text{LiNbO}_3$  достигнута генерация терагерцовых импульсов с энергией 1,2 мкДж и напряженностью терагерцового поля (при острой фокусировке) 350-500 кВ/см. В заключительной части главы исследована возможность использования кристалла DKDP для генерации терагерцового излучения в схеме с поверхностно-боковым выводом. Показано, что, несмотря на экстремально высокое поглощение ( $> 200 \text{ см}^{-1}$  на частоте 1 ТГц), в данной схеме возможна широкополосная терагерцовая генерация, пригодная для проведения спектроскопии с временным разрешением.

В четвёртой главе исследованы нелинейно-оптические эффекты с участием импульсного терагерцового излучения и продемонстрирована их применимость для диагностики различных материалов. Теоретически и экспериментально изучена генерация второй оптической гармоники фемтосекундного лазерного импульса, индуцированная в centrosymmetric средах полем пикосекундного терагерцового импульса. Установлено, что при определённых условиях вторая гармоника возникает при пространственно-временном перекрытии оптического и терагерцового импульсов только вблизи границ раздела сред. На основе этого эффекта предложен и экспериментально реализован метод обнаружения оптически малоконтрастных границ в прозрачных материалах. Методом генерации отраженной второй гармоники в поле терагерцового импульса измерены кубические нелинейные восприимчивости кремния, халькогенидных и теллуридных стёкол, а также проведены измерения величины встроенного приповерхностного поля в кремнии. Проведено экспериментальное исследование терагерцового эффекта Керра в

полярных и неполярных жидкостях. Показано, что для неполярных жидкостей (бензол, четыреххлористый углерод) терагерцовые константы Керра совпадают с известными константами для эффекта Керра в оптическом и постоянном полях, тогда как для полярных жидкостей (ацетона и хлороформа) измеренные константы принимают промежуточные значения, что объясняется значительным вкладом постоянного дипольного момента молекул и его инерционностью на субпикосекундном временном масштабе воздействия терагерцового импульса. Экспериментально исследована индуцированная терагерцовым полем оптическая люминесценция в графене и продемонстрирована возможность визуализации терагерцового пучка. Зарегистрировано усиление люминесценции вблизи металлического острия, помещенного в поле терагерцового импульса.

В пятой главе предложен и экспериментально апробирован новый метод диагностики электронной концентрации в плазменном канале филамента, основанный на измерении энергии рассеяния зондирующего терагерцового импульса. С помощью данного метода исследована наносекундная динамика электронной концентрации при филаментации в воздухе в зависимости от давления воздуха и напряженности внешнего постоянного электрического поля. Результаты измерений сопоставлены с численным моделированием. Экспериментально показано, что снижение давления и наличие внешнего поля приводят к замедлению распада плазмы. Дано теоретическое объяснение полученным результатам.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Диссертационная работа характеризуется тесной взаимосвязью теории и эксперимента, что подчеркивает её фундаментальность и целостность. Значимым результатом является весомый вклад в создание эффективных источников терагерцового излучения на основе нелинейно-оптического преобразования фемтосекундного лазерного излучения в электрооптических кристаллах. Особого внимания заслуживают черенковские преобразователи, исследованные в третьей главе. Их ключевое преимущество — высокая эффективность при сравнительно низкой энергии накачки (порядка 10–100 мкДж), что открывает перспективы для интеграции в лазерные системы с высокой средней мощностью (~100 Вт) и высокой частотой повторения импульсов (~1 МГц). Разработанные в диссертации методы диагностики расширяют возможности практического применения импульсного терагерцового излучения. В частности, оригинальным и перспективным представляется метод использования индуцированной терагерцовым импульсом второй оптической гармоники для обнаружения скрытых дефектов в прозрачных материалах.

Диссертация представляет собой завершённый научный труд. Все её основные положения научно новы и соответствуют современному мировому уровню

исследований. Теоретические выводы и практические рекомендации имеют убедительное обоснование, что подтверждает их достоверность.

После ознакомления с работой считаем возможным высказать следующие замечания:

1. В тексте диссертации содержится достаточно большое количество грамматических и орфографических ошибок, встречаются пропуски слов.

2. Формулировки некоторых защищаемых положений слишком громоздки и содержат много специфических деталей, что затрудняет восприятие универсальности и масштаба полученных результатов.

3. Практически для всех описываемых экспериментов в диссертации представлены подробные теоретические расчеты и модели, что, несомненно, увеличивает их научную весомость. При этом в ряде случаев недостает наглядного объяснения физического смысла рассматриваемых эффектов (см., например, рассмотрение эффекта локализации генерации второй гармоники на границах среды в гл. 4).

4. При расчетах различных схем генерации терагерцового излучения не рассматриваются эффекты нелинейного взаимодействия, которые, согласно проведенным автором экспериментам, существенно ограничивали эффективность преобразования.

5. В работе определены константы Керра для ряда жидкостей путем регистрации их терагерцового нелинейно-оптического отклика. При этом экспериментальные кривые содержат шумы достаточно большой амплитуды, что вызывает вопрос о надежности полученных таким способом значений. Прояснить ситуацию могло бы указание погрешностей для итоговых величин, однако, погрешности в работе не приводятся (причем не только в данном разделе, но и в других случаях, когда это было бы уместно).

Указанные недостатки не являются принципиальными и не влияют на положительную оценку диссертационной работы. Тематика и содержание диссертации полностью соответствуют специальности 1.3.19. Лазерная физика. Основные результаты работы опубликованы в 28 статьях в высокорейтинговых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных результатов диссертации. Автореферат полностью 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.

Диссертационная работа и настоящий отзыв, подготовленный кандидатом физико-математических наук Мельниковым Алексеем Алексеевичем и доктором физико-математических наук Чекалиным Сергеем Васильевичем, обсуждались на семинаре Отдела лазерной спектроскопии Института спектроскопии РАН (протокол № 1 от 26 ноября 2025 г.) и получили положительную оценку.

Старший научный сотрудник  
Лаборатории спектроскопии ультрабыстрых процессов  
Отдела лазерной спектроскопии ИСАН,  
кандидат физ.-мат. наук (01.04.05 - Оптика)  
тел. 8 (495) 851-02-37  
e-mail: melnikov@isan.troitsk.ru

А. А. Мельников

Зав. Лабораторией спектроскопии ультрабыстрых процессов  
Отдела лазерной спектроскопии ИСАН,  
профессор, доктор физ.-мат. наук (01.04.05 - Оптика)  
тел. 8 (495) 851-02-37  
e-mail: chekalin@isan.troitsk.ru

С. В. Чекалин

« 16 » 01 2026 г.

*Подписи Мельникова А. А. и  
Чекалина С. В. заверяю*

*Ученой секретарь ИСАН  
К.Ф.-М.Н. Кельдишера В.Р.*



Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт спектроскопии  
Российской академии наук (ИСАН)

Адрес: 108840 г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, 5

Веб-сайт: <https://isan.troitsk.ru/>

e-mail: [isan@isan.troitsk.ru](mailto:isan@isan.troitsk.ru)

Телефон: 8 (495) 851-0579; 8 (495) 851-0221