

"УТВЕРЖДАЮ"

Врио проректора по научной работе
ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский университет ИТМО»
кандидат физико-математических наук

 Белашенков Н. Р.
«1» сентября 2023 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Абрамовского Никиты Андреевича
«Опτικο-терагерцовые конверторы на основе электрооптических кристаллов с
неколлинearным распространением импульса накачки и терагерцовых волн»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
научной специальности 1.3.19. Лазерная физика

Актуальность диссертационного исследования обусловлена быстрым развитием различных технологий, основанных на использовании электромагнитного излучения терагерцового диапазона. Например, техники терагерцовой спектроскопии во временной области и терагерцового имиджинга находят применение для решения таких практических задач, как неразрушающий контроль композитных материалов и покрытий, инспекция почтовых отправлений, контроль качества продуктов питания. Терагерцовые поля высокой напряженности используются для ускорения и компрессии электронных сгустков, управления магнитным порядком и динамическими состояниями в веществе. Одним из основных методов «настоьной» генерации терагерцового излучения стало оптическое выпрямление фемтосекундных лазерных импульсов в электрооптических кристаллах. При этом для достижения опτικο-терагерцового синхронизма в сильно нелинейных кристаллах, например ниобата лития, используют конверсионные схемы с неколлинearным распространением лазерного импульса накачки и генерируемых терагерцовых волн. Развитию таких неколлинearных схем опτικο-терагерцовой конверсии и посвящена диссертация Абрамовского Н.А.

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

Во введении дан обзор литературы по теме исследования и обоснована актуальность работы, сформулирована ее цель, указана научная новизна и практическая значимость результатов, приведены выносимые на защиту основные положения, а также

сведения о публикациях и апробации результатов, кратко изложено содержание диссертации.

Первая глава диссертации посвящена разработке оптико-терагерцового конвертера фемтосекундных лазерных импульсов. Основным элементом данного конвертера является структура, состоящая из двух согласующих призм и расположенной между ними пластины ниобата лития. Особенностью данного конвертера является использование лазерных импульсов, у которых фронт интенсивности не параллелен линиям постоянной фазы (фазовым фронтам). В диссертации изложены как теоретические расчеты, так и результаты экспериментальной апробации конвертера, в котором в качестве входной призмы использовалась кювета с водой. В работе указаны преимущества такого конвертера по сравнению со стандартной схемой, в которой генерация терагерцового излучения происходит в вырезанном в виде призмы кристалле ниобата лития. В частности, возможность масштабирования генерируемой терагерцовой энергии при сохранении высокого качества генерируемого терагерцового пучка.

Вторая глава диссертации посвящена разработке оптико-терагерцового конвертера черенковского типа с двусторонним выводом терагерцового излучения из слоя ниобата лития через призмы полного внутреннего отражения и формированием единого терагерцового пучка. Проведено численное (FDTD) моделирование процесса конверсии, приведены результаты экспериментального исследования конвертера, в котором для повышения мощности накачки используется титан-сапфировый усилитель. Показано, что предложенная схема позволяет достичь высокой эффективности конверсии (0,35%), равномерности и высокого качества терагерцового пучка. Экспериментально продемонстрирована работоспособность конвертера и при накачке оптическим источником с малой энергией импульса.

В третьей главе диссертации экспериментально продемонстрировано масштабирование генерируемой терагерцовой энергии в оптико-терагерцовом конвертере черенковского типа. Исследованный конвертер представляет собой тонкий слой ниобата лития прикрепленный к кремниевой призме. Система допускает использование пучков накачки с различной пространственной апертурой, максимальные значения которой могут достигать нескольких сантиметров. Это дает возможность работать с импульсами накачки имеющими энергию порядка сотен микроджоулей. Реализация такой системы позволила осуществить генерацию терагерцового импульса с энергией 1,2 мкДж и напряженностью поля 0,5 МВ/см.

Четвёртая глава диссертации посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию черенковского излучения терагерцовых волн при оптическом выпрямлении фемтосекундных лазерных импульсов в электрооптических кристаллах в режиме многофотонного поглощения лазерной накачки. С помощью численного (FDTD)

моделирования предсказан эффект сильного уширения спектра черенковского излучения при высоких интенсивностях накачки. Для объяснения этого явления выдвинута гипотеза, что при высоких мощностях накачки существенную роль начинают играть токи фотогенерируемых свободных носителей. В диссертации приведены результаты экспериментального исследования черенковского излучения терагерцовых волн импульсами титан-сапфирового лазера в кристалле ниобата лития в режиме трехфотонного поглощения, подтверждающие эффект уширения спектра и его связь с генерацией носителей.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Диссертационная работа Абрамовского Н.А. представляет собой цельное исследование в области нелинейной оптики. Все основные результаты диссертации являются новыми и представляют существенный интерес для исследователей, работающих в области терагерцового излучения. К наиболее значимым научным достижениям диссертационного исследования можно отнести результаты, перечисленные ниже.

Предложено и экспериментально апробировано применение плоских слоев ниобата лития в новой схеме конвертора, преобразующего лазерные импульсы в терагерцовое излучение. Схема обеспечивает более высокое качество генерируемого терагерцового пучка по сравнению со стандартной схемой на основе призмы из ниобата лития. Также предложенная схема дает возможность масштабирования, что позволяет использовать в качестве оптической накачки лазерные импульсы с большой энергией.

Предложена и экспериментально апробирована новая схема оптико-терагерцового конвертора черенковского типа в виде тонкого слоя ниобата лития, расположенного между двумя кремниевыми призмами полного внутреннего отражения. Такая схема обеспечивает равномерный спектр генерируемого терагерцового излучения и высокое качество терагерцового пучка.

Впервые продемонстрирована возможность масштабирования генерируемой терагерцовой энергии в оптико-терагерцовом конверторе черенковского типа при увеличении поперечного размера конвертора и пучка накачки до нескольких сантиметров и увеличения энергии импульса накачки до сотен микроджоулей.

Теоретически предсказан и экспериментально обнаружен эффект сильного уширения спектра черенковского терагерцового излучения, генерируемого фемтосекундными лазерными импульсами в электрооптических кристаллах, в условиях многофотонного поглощения лазерной накачки.

Несомненным достоинством диссертации является сочетание теоретического анализа, численного моделирования и экспериментальной проверки предсказанных эффектов. Это позволило провести комплексное исследование процессов генерации

терагерцового излучение и дать необходимое теоретическое объяснение экспериментально обнаруженным эффектам. Следует отметить, что проведенное автором диссертации численное моделирование показало не только качественное, но и количественное совпадение теоретических и экспериментальных результатов. Диссертационное исследование Н.А. Абрамовского является существенным вкладом в понимание процессов, протекающих при нелнейной конвертации оптических импульсов с терагерцового излучение.

Важно также отметить, что изложенные в диссертации результаты могут найти широкое практическое применение. Например, исследованный в диссертации широкоапертурный оптико-терагерцовый конвертор лазерных импульсов перспективен как источник терагерцовых импульсов большой (в несколько мДж) энергии с высоким качеством терагерцового пучка. Предложенная в диссертации сэндвич-структура в виде тонкого слоя ниобата лития между двумя кремниевыми призмами полного отражения может быть использована как основа эффективного источника излучения для терагерцовой спектроскопии. Оптико-терагерцовый конвертор черенковского типа с большим (несколько сантиметров) поперечным размером позволяет использовать оптическую накачку с энергией импульсов достигающей сотен мкДж. Устройства такого типа потенциально могут стать более простой и удобной заменой приборов, основанных на распространенной технике оптического выпрямления скошенных лазерных импульсов. Эффект уширения спектра терагерцового черенковского излучения при оптическом выпрямлении фемтосекундных лазерных импульсов в электрооптических кристаллах в режиме многофотонной генерации свободных носителей представляет интерес как новый способ увеличения ширины полосы оптико-терагерцовых конверторов.

Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечивается применением апробированных экспериментальных, теоретических и численных методов. Результаты диссертации не противоречат теоретическим и экспериментальным данным, полученными другими исследователями, многократно докладывались на международных конференциях и опубликованы в высокорейтинговых международных рецензируемых журналах.

По содержанию работы имеются следующие замечания.

1. Диссертация написана очень компактно, что одновременно является и достоинством и недостатком работы. Стремление сократить объем текста привело к тому, что для понимания некоторых, в общем-то, несложных вещей, требуется неоправданно большое время. Также возможно, что сформулированные ниже замечания 3-6 связаны именно с тем, что в тексте диссертации иногда отсутствуют необходимые пояснения.

2. В диссертации проведено тщательное моделирование динамики электромагнитного излучения в различных устройствах. Данные численного моделирования находятся в хорошем согласии с экспериментальными результатами. В качестве пожелания хотелось бы заметить, что, возможно, в диссертации следовало бы сделать больший акцент на фундаментальной значимости обсуждаемых эффектов.
3. В первой главе диссертации исследуется зависимость эффективности генерации терагерцового излучения от угла при вершине входной призмы конвертера θ . Эта зависимость показана на рисунке 1.3(а). При этом делается утверждение, что при $n_d = 2.16$ максимум эффективности достигается при $\theta = 63^\circ$. В этом же разделе диссертации утверждается, что при $n_d > 2.16$ максимум интенсивности достигается при угле полного внутреннего отражения θ_{\max} . Из рисунка 1.2(б) следует, что при $n_d = 2.16$ этот критический угол становится равен $\theta_{\max} = 90^\circ$. Таким образом, из текста диссертации непонятно, как же эффективность генерации зависит от угла θ при $n_d \approx 2.16$.
4. Во второй главе диссертации обсуждается черенковский механизм генерации терагерцового излучения оптическими импульсами, распространяющимися в слое ниобата лития. Основная часть теоретических результатов этой главы получена путем численного решения уравнений 2.3-2.4. Очевидно, что эти уравнения должны быть дополнены соответствующими граничными условиями. Однако в тексте диссертации отсутствует какое-либо обсуждение этого вопроса. Также следует отметить, что интерпретация рисунка 2.2 является вовсе не простой задачей. Совершенно не очевидно, где же на этом рисунке изображена, например, «квазиплоская волна, распространяющаяся параллельно слою ниобата лития». Также непросто понять, где же на этом рисунке «вклад переходного излучения».
5. В третьей главе диссертации делается утверждение, что многократное отражения терагерцового излучения от границ нелинейного кристалла приводит к «паразитным осцилляциям» в спектре излучения, показанном на рисунке 3.5а. В этом случае, действительно, можно было бы ожидать квазиэквидистантных особенностей в спектре излучения. Возможно, в диссертации следовало бы привести аналитическую оценку для соответствующих резонансных частот и сравнить ее с численными и экспериментальными результатами.
6. В работе подробно обсуждается (глава 4), что генерация свободных носителей приводит к уширению спектра терагерцового излучения. Действительно, и теоретические и экспериментальные результаты говорят о том, что такой факт имеет место. Однако, к сожалению, в диссертации не обсуждается физическая причина этого явления. Также хотелось бы заметить, что для наглядной

иллюстрации обсуждаемого эффекта следовало бы напрямую сравнить спектры излучения, посчитанные при и без учета эффекта генерации свободных носителей.

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки выполненных исследований и не ставят под сомнение достоверность полученных результатов и вынесенных на защиту положений. Основные результаты диссертации Абрамовского Н.А. опубликованы в 10 научных работах, в том числе 5 статьях в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Диссертация является завершенной научно-квалификационной работой, удовлетворяющей всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Абрамовский Н.А. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Диссертационная работа и настоящий отзыв, составленный доктором физико-математических наук Юлиным Алексеем Викторовичем, обсуждались на семинаре физического факультета Университета ИТМО 14 июня 2023 и получили положительную оценку.

Декан физического факультета Университета ИТМО,
кандидат физико-математических наук



Мельчакова И.В.

Отзыв составил:

Ведущий научный сотрудник физического факультета Университета ИТМО,
доктор физико-математических наук



Юлин А.В.

Сведения о составителе отзыва:

Юлин Алексей Викторович, ведущий научный сотрудник физического факультета Университета ИТМО. доктор физико-математических наук (01.04.05. Оптика), ведущий научный сотрудник.

Контактные данные: a.yulin@metalab.ifmo.ru, +7 981 953 12 79.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» (Университет ИТМО)

Адрес: 197101 Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, 49, лит. А.

E-mail: od@itmo.ru, Web: <http://itmo.ru/>, Тел.: +7 (812) 607-02-83

« 11 » 09 2023 г.