

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Ушакова Александра Александровича

«Частотно-угловые распределения терагерцового излучения из плазмы при фокусировке фемтосекундного лазерного излучения в воздухе и получение терагерцевых изображений фазовых объектов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21- «Лазерная физика».

Актуальность

Диссертационная работа А.А. Ушакова посвящена изучению методов получения и регистрации терагерцового излучения с применением лазерных ультракоротких импульсов. Данная область исследований является сравнительно новой и потому остается актуальной. Работа затрагивает одни из самых интересных ее направлений: аспекты генерации терагерцового излучения в газовой плазме и построение изображений. Нестационарные плазменные источники сверхширокополосных терагерцовых импульсов привлекают внимание исследователей в связи с тем, что не обладают ограничением сверху на мощность лазерных импульсов, и перспективны для дистанционного зондирования и визуализации – практически важных направлений как в биомедицинских исследованиях, так и в технике, производстве.

Анализ содержания диссертации

Диссертационная работа Ушакова А.А. содержит решение ряда важных экспериментальных задач в области получения и детектирования терагерцового излучения с применением лазерного излучения. Материал подается с глубоким пониманием физики рассматриваемых явлений, содержит необходимые теоретические сведения, описание используемых моделей, необходимые численные расчеты и оригинальные результаты изящно выполненных экспериментов.

Во введении указывается актуальность выбранной темы, излагаются цели и задачи.

Первая глава содержит обзор литературы по направлениям представленных в работе исследований. Последовательно обосновывается необходимость проводимых исследований.

Во второй главе приводятся результаты исследований угловых и частотно-угловых распределений терагерцового излучения из плазмы, индуцированной при различной фокусировке фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе при атмосферном давлении. Проведение экспериментов, нацеленных на решение поставленных в работе задач, потребовало от диссертанта приобретения первоклассных навыков работы с импульсным широкополосным ТГц излучением, сложно поддающимся юстировке. Отдельно следует отметить технически сложный эксперимент по измерению частотно-угловых распределений ТГц излучения, генерируемого в плазменном канале. В одной из используемых для этого установок (установка 3, на рисунке 2.1) применялась техника электро-оптического детектирования, при этом часть установки, на которой находились опто-механические компоненты детектора, вращалась вокруг плазменного канала. Это

неизбежно требовало подбора и компенсации задержки приходящего сбоку референтного фемтосекундного импульса для каждой угловой точки.

В третьей главе исследуется энергетика терагерцового излучения, распространяющегося в противоположную сторону, относительно направления следования двухчастотных лазерных импульсов накачки, которые формируют в результате жесткой фокусировки нестационарную плазму, выступающую в роли широкополосного источника.

В четвертой главе приводятся ход и результаты исследований новых экспресс-подходов к регистрации терагерцовых полей и сравниваются техники анализа временных профилей для визуализации фазовых характеристик прозрачных в терагерцовом диапазоне частот объектов.

Конец каждой из глав, содержащих оригинальные, полученные диссертантом результаты сопровождается выводами, где кратко отражены ключевые аспекты проведенных исследований. В заключении подведены итоги по всей работе в целом, и формулируются основные результаты диссертационной работы. Представленная к защите диссертационная работа Ушакова А.А. является завершенным научным трудом.

Основные научные результаты, полученные в диссертации, степень их обоснованности и достоверности

В диссертации представлены результаты, определяющие оптимальный режим фокусировки излучения накачки – лазерных импульсов фемтосекундной длительности основной и удвоенной гармоник – для направленной генерации излучения терагерцового частотного диапазона с унимодальным частотно-угловым спектром. Экспериментально зарегистрированы импульсные терагерцовые волновые поля, распространяющиеся в обратную, противоположную направлению распространения излучения двухчастотной лазерной накачки сторону. Оценены энергетические параметры таких «обратных» полей по отношению к сонаправленным с накачкой, «прямым», полям.

С позиций достигаемого динамического диапазона произведено сравнение двух методик регистрации ТГц поля на электрооптический кристалл и матричный фотоприемник: теневой, в скрещенных линейных поляризаторе и анализаторе, и интерференционную, реализуемую с использованием двух призм Волластона. Показавшая наилучший динамический диапазон теневая методика была успешно применена для построения изображений прозрачных в терагерцовом диапазоне объектов. Любопытным является предложенный в диссертации новый корреляционный подход к обработке зарегистрированных временных профилей прошедшего через исследуемый образец терагерцового излучения, обеспечивающий сравнительно высокий контраст получаемых изображений фазовых характеристик.

Приводимые в работе выводы хорошо и тщательно обоснованы. В качестве примера упомяну особенно понравившийся вспомогательный эксперимент, доказывающий достоверность регистрации слабого сигнала обратного ТГц излучения.

Для этого была реализована перманентная регистрация как обратного, так и отраженного назад от последовательно перемещаемой металлической пластины прямого излучения.

Достоверность экспериментально полученных результатов не вызывает сомнения, поскольку они находятся в согласии с теоретическими представлениями, подкреплены результатами численного моделирования и приводятся в сопровождении с хорошо сформулированной интерпретацией. Помимо этого, о достоверности свидетельствует обширный список апробаций результатов на всероссийских и международных конференциях а также опыт взаимодействия с передовыми международными учеными.

Новизна исследований и полученных результатов

Научная новизна проводимых в работе исследований и полученных автором результатов обосновывается приведенным в первой главе литературным обзором, охватывающим наиболее актуальные и современные работы в предметной области, подтверждается 6 публикациями в профессиональных отраслевых изданиях с хорошей научной репутацией, в пяти из которых А.А. Ушаков является первым автором.

Обоснованность и достоверность экспериментальных результатов, выводов и заключений диссертации подтверждается использованием современного экспериментального оборудования и общепризнанных методик, согласованием получаемых экспериментальных данных с результатами численного моделирования и с ранее полученными экспериментальными результатами в других научных группах.

Значимость результатов для науки и практики, рекомендации по их использованию

Результаты исследований обладают широким кругом возможных применений: терагерцовая спектроскопия с разрешением по времени, визуализация объектов, томография и другие.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в следующих организациях: ИОФ РАН (г. Москва), ФИ РАН (г. Москва), ИПФ РАН (г. Нижний Новгород), НГУ (г. Новосибирск), ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск), МГУ имени М.В. Ломоносова (г. Москва), Университет ИТМО (г. С.-Петербург), ИСАН (г. Москва).

По тексту диссертационной работы у меня возникло несколько **вопросов**, которые не влияют принципиально на высокую оценку содержания диссертации, но ответ на которые я хотел бы услышать от автора:

1. Исследование угловых и частотно-угловых распределений ТГц излучения, генерируемого в плазменном канале, описываемое во второй главе проводилось с использованием двух различных установок с разной длительностью: 35 и 150 фс. Почему в установке 1 не удлинители короткий импульс, и тем самым не обеспечили идентичность экспериментальных условий?
2. На рис. 3.6. показано, что передаточная функция сильно больше единицы на самых низких частотах. Почему?
3. В интерференционной схеме измерения ТГц поля как именно проходили пробные лучи через призмы Волластона и под какими углами они приходили на матричный

фотодетектор? Каким образом производилась обработка (демодуляция) интерференционных полос на изображениях поверхности электрооптического кристалла, и как влияли параметры обработки на упоминаемые на странице 94 искривления волновых фронтов?

4. Сравнение динамического диапазона теневой и интерференционной методик измерения ТГц поля выявило превосходство первой более чем в 2,5 раза. При этом, максимально возможный для измерения уровень сигнала ТГц поля одинаков, поскольку определяется свойствами электрооптического кристалла. Следовательно, различия в динамическом диапазоне обусловлены разным уровнем шума. Какова его природа в случае каждой из рассматриваемых техник, которая обуславливает данные различия?
5. В главе 4 не говорится, как именно располагался объект относительно отображающей его на систему детектирования линзы, хотя в опубликованной диссертантом статье [Ushakov A. et al. Broadband in-line terahertz 2D imaging: comparative study with time-of-flight, cross-correlation, and Fourier transform data processing // J. Opt. Soc. Am. B. 2018] указано, что измерения проводились в $2f$ - $2f$ конфигурации. В этом случае, когда объект освещается коллимированным лучом, а затем его изображение формируется линзой, на экспериментально полученных пространственных распределениях фазового запаздывания неизбежно должны присутствовать сферические аберрации. В тексте диссертации ничего про это не говорится. Почему?

Имеется также несколько **замечаний**, по большей мере связанных с некорректным использованием научной терминологии, и присутствующими в тексте речевыми ошибками:

- Страница 50: Нельзя относить работы по голографии [171-173], основанной на интерференции двух волн (пусть даже и непрерывного излучения терагерцового частотного диапазона) к *«некогерентным техникам измерения»*, поскольку интерференционный принцип регистрации предполагает наличие когерентности между объектной и опорной волнами.
- Страница 94: при описании сечений фронтов ТГц импульсов неудачно и неоднократно используется лексема «полоса», поскольку она конфликтует с термином «интерференционная полоса». Тем более, что в том же самом абзаце упоминается интерференционная методика регистрации.
- Страница 55 «вопрос диаграммы направленности»;
- Страница 72 «Пластина ИТО оказывала «изменение» на процесс измерения двумя способами» (видимо имелось ввиду «оказывала влияние»).
- Страница 72 «для оценки абсолютной эффективности генерации обратного ТГц излучения необходимо знать отражение пластины ИТО в ТГц диапазоне частот» - (На самом деле, необходимо знать коэффициент отражения).
- Страницы 77-78 «...ТГц **пучок**, идущий в обратном направлении от микроплазмы как от точечного источника коллимировался параболическим зеркалом, **а размер его пучка** при этом определяется в основном диаметром параболического зеркала».
- На рисунке 4.1 показано, что кристалл ZnTe коллимирует проходящее на него оптическое излучение.

Оценка работы, заключение

Отмеченные замечания не влияют в целом на общую высокую оценку диссертации. Она представляет собой законченную научно-квалификационную работу, содержащую обоснованное экспериментальное решение задачи. Новые результаты, полученные соискателем, имеют научно-практическое применение, а выводы работы грамотно обоснованы. Тема диссертации соответствует специальности 01.04.21 «Лазерная физика». Основные результаты изложены в 6 статьях, включенных в перечень рецензируемых научных изданий ВАК. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Представляемая к защите работа полностью удовлетворяет требованиям к кандидатским диссертациям, которые установлены «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (ред. от 10.06.2017), а ее автор, Ушаков Александр Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – «Лазерная физика».

Официальный оппонент

ведущий научный сотрудник Международного научного центра
оптической и квантовой информатики, биофотоники
факультета фотоники и оптоинформатики

Университет ИТМО

к.ф.-м.н.

Н.В. Петров

«28» марта 2019 г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (199004, С.-Петербург, Кадетская линия, д.3, к.2, лит. А, 207, тел. 8 (812) 232-97-04.

Подпись к.ф.-м.н., Н.В. Петрова удостоверяю:

Начальник управления кадров



В.М. Шепелева

29.03.2019,

С отзывом ознакомлен

01.04.2019