

## ОТЗЫВ

официального оппонента к. ф.-м. н. Назарова Максима Михайловича  
на диссертационную работу Шугурова Александра Ивановича  
«Детектирование терагерцовых волн ультракороткими лазерными импульсами в  
толстых электрооптических кристаллах»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.3.19. Лазерная физика

Диссертационная работа Шугурова Александра Ивановича посвящена методам измерения ТГц импульсов с временным разрешением в кристаллах GaAs и LiNbO<sub>3</sub> в конфигурациях с большой длиной взаимодействия. Большая длина взаимодействия импульсов достижима благодаря использованию неколлинеарных методов детектирования, где пробный оптический импульс распространяется под углом Черенкова к терагерцовому импульсу. Однако, экспериментальная демонстрация методов была до этого осуществлена только в схемах использующих кристалл LiNbO<sub>3</sub>, где негативное влияние двулучепреломления препятствует стабильному детектированию. Следовательно, усовершенствование и расширение метода неколлинеарного детектирования является перспективной и актуальной задачей. Также актуальным является обеспечение гладкого, широкополосного спектра чувствительности ТГц детекторов в особенности со стороны высоких ТГц частот. Универсальность схемы детектирования для различных длин волн лазерного стробирующего фемтосекундного импульса – один из самых интересных результатов полученных в данной работе.

Диссертационная работа состоит из трёх оригинальных глав, а также необходимых введения, заключения и перечней формальных критериев.

Во введении представлен обзор литературы для всех глав, обосновывается актуальность цели и новизна задач, приводятся пара основных формул. В конце перечислены требующиеся для диссертации характеристики работы.

Первая глава посвящена рассмотрению кристалла GaAs и неколлинеарных а также коллинеарных схем, в толстом во всех измерениях кристалле, с использованием фемтосекундного волоконного лазера с длиной волны 1.5 мкм.

Вторая глава отличается от первой тем, что добавился другой режим измерения пробного пучка. Помимо модуляции поляризации (автор называет её эллипсометрической схемой) разработан режим модуляции интенсивности по сечению пучка (названный не очень наглядным термином «неэллипсометрический»). Тут много новизны и оригинальности, хотя динамический диапазон слабее, чем в обычном методе детектирования.

Третья глава посвящена применению ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) при распространении пробного импульса вдоль тонкого слоя кристалла, а измеряемый ТГц импульс вводится через призму и боковую поверхность. Вглубь сильно поглощающего кристалла ТГц фактически не распространяется, тонкий слой поверхности работает на протяжённом участке. Схема перспективная благодаря универсальности к длине волны пробного излучения, что показано на примере эрбиевого и титан-сапфирового лазеров.

В заключении подводятся итоги работы и сделаны общие выводы.

К диссертации есть несколько не критичных замечаний по применению к спектроскопии:

- 1. Необходимость использовать именно толстые кристаллы для ТГц детектирования в применении к спектроскопии не очевидна. Большинство характеристических резонансов (поликристаллических веществ) находятся в диапазоне 1-3 ТГц. Таким образом, из рис. 1.4 следует, что для практической спектроскопии в ряде случаев предпочтительнее использовать коллинеарную схему детектирования с кристаллом GaAs толщиной 1 мм, чей диапазон детектирования достигает 3 ТГц. При этом спектральное разрешение достигает 50 ГГц, что вполне достаточно для ТГц измерений твёрдых тел и растворов. Более высокое спектральное разрешение требуется только в редко используемых случаях ТГц-импульсной спектроскопии газов.*
- 2. Проблему возникновения переотражений в тонком кристалле, препятствующих получению гладкого спектра, можно решить несколькими известными путями: присоединить кристалл детектор на оптический контакт с толстым диэлектриком равного преломления, смоделировать переотражения и вычесть их*

*из советующего участка сигнала, занулить мешающий участок как в сигнальном, так и в опорном импульсах. Бороться с переотражениями путём увеличения длины взаимодействия, как предлагается в диссертации - более сложный и громоздкий способ*

3. *К сожалению, не приводится исследований уровня шума и фона в разработанных детекторах. В диссертации отмечается, что увеличением временного окна до  $\sim 160$  пс можно получить спектральное разрешение до  $\sim 6$  ГГц, однако это работает только при крайне высоком динамическом диапазоне как источника так и приёмника ТГц излучения, как минимум потребуется низкий уровень шума пробного пучка. В действительности, при усложнении экспериментальной схемы динамический диапазон может уменьшиться настолько, что детектирование на сотнях пикосекунд отстройки станет невозможным, поскольку искомый узкополосный сигнал спадёт ниже уровня шума. Таким образом, из диссертации остается неясным, достижимы ли рассчитанные спектральные разрешения?*

Высказанные замечания являются скорее пожеланиями к учёту в дальнейшей работе, они не касаются сути разработанных новых и полезных схем ТГц детектирования, не снижают общего хорошего впечатления от диссертации, содержащей решения научных задач, имеющих практическое значение для терагерцовой спектроскопии и для исследований с разрешением по времени. Работа подробная, оригинальная, хорошо оформленная. Автореферат правильно отражает основное содержание диссертации. Тематика и содержание диссертации полностью соответствует специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Основные результаты работы были опубликованы в 3 статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных результатов диссертации, а также были представлены на 9 международных и российских конференциях, что свидетельствует о достаточной степени опубликованности и апробации результатов соискателя. Научные положения и выводы являются обоснованными, а основные результаты диссертационной работы согласуются в частных случаях с имеющимися теоретическими и экспериментальными данными других авторов, что подтверждает достоверность полученных результатов.

Диссертационная работа «Детектирование терагерцовых волн ультракороткими лазерными импульсами в толстых электрооптических кристаллах» удовлетворяет требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842, предъявляемым к диссертациям, представленным на соискание степени кандидата наук, а ее автор, Шугуров Александр Иванович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Официальный оппонент:

Начальник лаборатории Сверхсильных Световых Полей, федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (г. Москва), кандидат физико-математических наук (01.04.21) *ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА*

 Назаров Максим Михайлович

19 апреля 2023 г.

Я, Назаров Максим Михайлович, 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 кандидата физико-математических наук Шугурова Александра Ивановича.

ФГБУ НИЦ «Курчатовский институт»

Почтовый адрес: 123182, Россия, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

Тел.: 8-916-352-87-02

E-mail: nazarov\_mm@nrcki.ru

Подпись Назарова М.М. заверяю

Главный учёный секретарь

НИЦ «Курчатовский Институт»

к.ф.-м.н.



 К. Е. Борисов.