

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

кандидата физико-математических наук Князева Григория Алексеевича
о диссертационной работе Купрейчика Максима Игоревича
«Акустооптическое взаимодействие в двуосных кристаллах»,
представленной на соискание учёной степени кандидата
физико-математических наук по специальности 1.3.4. Радиофизика

Диссертационная работа Купрейчика М.И. посвящена управлению параметрами светового излучения посредством акустооптической (АО) дифракции в двуосных кристаллах. Последние отличаются от традиционно используемых в акустооптике одноосных сред более сложным типом оптической и АО анизотропии, что обеспечивает богатое разнообразие существующих в них режимов взаимодействия света и ультразвука. Первые попытки применения двуосных материалов в коммерческих АО устройствах датируются началом 1980-гг. и связаны с кристаллами семейства халькогенидов таллия. Новая волна интереса к двуосным средам пошла в 2010-гг. Вначале она была инициирована появлением кристаллов семейства двойных вольфраматов, а чуть позднее – двойных молибдатов. На кристаллах калий-редкоземельных вольфраматов созданы и серийно выпускаются такие АО устройства, как лазерные затворы, сдвигатели частоты и модуляторы оптического излучения. В качестве универсальной основы для АО приборов инфракрасного диапазона в настоящее время всерьез рассматривается орторомбический кристалл иодида индия InI, выделяющийся крайне широким диапазоном прозрачности и чрезвычайно высокой АО эффективностью. Видимым препятствием для массового применения этих и других перспективных двуосных сред в коммерческой акустооптике являются отсутствующие рекомендации по выбору подходящего среза кристалла. Вместе с несовершенными алгоритмами оптимизации геометрии АО дифракции это не позволяет полноценно раскрыть имеющийся у двуосных материалов высокий потенциал для создания АО приборов с улучшенными характеристиками. Возникающие новые перспективные сферы применения АО устройств и растущая конкуренция со стороны других оптоэлектронных приборов делают диссертационную работу Купрейчика М.И. своевременной и актуальной.

Диссертация представлена на 222 страницах и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 240 наименований.

Первая глава содержит базовые сведения об АО эффекте в анизотропной среде. Рассмотрены основные геометрии АО взаимодействия в одноосном кристалле, применяющиеся при изготовлении серийных АО устройств. Изложен ковариантный метод расчета параметров световых мод в двуосной среде, устанавливающий компактную аналитическую связь векторов групповой и фазовой скорости волн. Оригинальным результатом главы являются разработанные диссертантом алгоритмы численного анализа АО эффекта в косых срезах двуосного кристалла, позволяющие проводить оптимизацию геометрии взаимодействия под каждый конкретный АО прибор.

Во **второй главе** проведен анализ фазового синхронизма в плоскостях

симметрии двуосного кристалла для процессов АО дифракции, сопровождающихся сменой оптической моды на ортогональную (процессы $o \rightarrow e$ и $e \rightarrow o$), и получены следующие результаты:

- продемонстрировано существование в двух из трех главных плоскостей трех различных режимов широкоапертурной АО дифракции;
- найдены и аналитически описаны все имеющиеся в них сверхширокоапертурные конфигурации АО взаимодействия;
- доказано, что при распространении ультразвука по нормали к бирадиали двуосного кристалла реализуется специальный, широкополосный режим широкоапертурной АО дифракции, названный автором низкоселективным (НС).

В **третьей главе** проведено исследование различных режимов АО взаимодействия в орторомбическом кристалле теоарсенида таллия Tl_3AsS_4 . Получены следующие результаты:

- обстоятельно изучены характеристики НС дифракции в плоскости симметрии и логично обоснована возможность ее использования в многофункциональном АО приборе нового типа – широкоапертурном АО дефлекторе;
- продемонстрировано существование в той же плоскости особого, нечувствительного к поляризации света режима дифракции и на его основе предложена новая схема АО модулятора неполяризованного излучения;
- найдены срезы кристалла Tl_3AsS_4 , оптимальные для создания энергоэффективных АО дефлекторов инфракрасного диапазона.

Четвертая глава посвящена ромбическому кристаллу йодноватой кислоты α - $HI O_3$. Рассмотрено перспективное применение этого материала в таких АО приборах, как неколлинеарные фильтры, дисперсионные линии задержки, а также в предложенном диссертантом в третьей главе широкоапертурном АО дефлекторе. Получены следующие результаты:

- обнаружено существование в плоскостях симметрии двух новых переходных топологий двумерной передаточной функции, отвечающих сверхширокоапертурным режимам АО дифракции;
- логично обоснована возможность создания на двуосном кристалле АО монохроматора с заметно расширенным угловым полем зрения;
- доказана необходимость использования в оптической схеме такого АО прибора специальной сопрягающей системы, компенсирующей выраженную дисперсию угла Брэгга широкоапертурной геометрии;
- обстоятельно изучены характеристики НС режимов АО взаимодействия на продольной акустической волне, распространяющейся вдоль одной из осей симметрии двуосного кристалла, и обоснована перспективность их использования в перестраиваемых АО линзах, дефлекторах бездифракционных световых пучков и АО сдвигателях частоты лазерного излучения.

Пятая глава является логическим продолжением предыдущих глав. В ней проанализированы новые возможности по управлению светом, появляющиеся при возбуждении ультразвука в кристалле фазированной решеткой пьезопреобразователей (ФРП). Получены следующие результаты:

- выведено выражение для эффективности брэгговской АО дифракции в акустическом поле ФРП из произвольного числа секций;

- обнаружено, что в случае многоэлементной противофазной ФРП режим НС взаимодействия может быть реализован для широкого диапазона направлений ультразвука в плоскости оптических осей;
- показано, что применение электронно-управляемой ФРП позволяет снизить требования к точности изготовления АО ячейки под широкоапертурный АО дефлектор до технологически приемлемого уровня в 0.3° ;
- изучены все нечувствительные к поляризации света режимы АО взаимодействия в плоскости оптических осей двуосного кристалла, существующие в акустическом поле ФРП, и спрогнозированы их перспективные применения в АО модуляторах и дефлекторах неполяризованных световых пучков.

В **заключении** перечислены основные результаты работы.

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, апробирована публикациями в рецензируемых научных журналах и докладами на профильных конференциях. Получен ряд важных как с научной, так и с практической точки зрения результатов в слабо разработанном направлении – акустооптике двуосных кристаллов. По моему мнению, главная **ценность работы** состоит в подробном теоретическом изучении режимов АО дифракции в двуосных кристаллах, которые в будущем могут послужить основой для АО приборов с улучшенными характеристиками и новым функционалом.

При общей высокой оценке к работе имеются некоторые замечания:

1. В разделах 3.3.2 и 5.4 установлено, что для корректной работы широкоапертурного АО дефлектора на двуосном кристалле точность выведения звуковой грани ячейки должна быть не ниже нескольких угловых минут. Однако имеется вероятность, что вследствие термооптического эффекта при работе дефлектора будет возникать сравнимый или еще более сильный температурный дрейф оптимального направления ультразвука. Хотелось бы уточнить у автора, исследовал ли он этот вопрос.
2. В разделе 4.3.1 произведен поиск срезов кристалла α -ННО₃, оптимальных для АО монохроматоров, причем одним из параметров оптимизации выбрана спектральная разрешающая способность. Вместе с тем хорошо известно, что для большинства задач гиперспектральной фильтрации изображений не требуется высокое спектральное разрешение. Вероятно, при проведении оптимизации вместо спектральной разрешающей способности следовало выбрать угловую ширину поля зрения.

Сделанные замечания носят уточняющий характер и никак не снижают общей положительной оценки проделанной работы. Полученные в диссертации новые фундаментальные результаты свидетельствуют о перспективности применения двуосных кристаллах во многих типах АО устройств.

Считаю, что диссертация «Акустооптическое взаимодействие в двуосных кристаллах» соответствует специальности 1.3.4. Радиофизика (по физико-

математическим наукам), а также критериям, определённым пп. 2.1–2.5 «Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», предъявляемым к кандидатским диссертациям, и оформлена согласно приложениям № 8 и 9 «Положения о совете по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова», а её автор — Купрейчик Максим Игоревич — заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. Радиофизика.

Официальный оппонент:

Князев Григорий Алексеевич,
кандидат физико-математических наук

Место работы и должность:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», физический факультет, кафедра нанофотоники, доцент

_____ Г.А. Князев
«26» марта 2026 года

Адрес места работы:

119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2
Телефон: +7 (495) 939-28-98
E-mail: contact@nanolab.phys.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена докторская диссертация:

01.04.03 — «Радиофизика»

Подпись Князева Григория Алексеевича ЗАВЕРЯЮ:

Ученый секретарь ученого совета физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова
д.ф.-м.н., доцент

_____ С.Ю. Стремouxов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», физический факультет

Телефон: +7 (495) 939-31-60

E-mail: info.ff@org.msu.ru