

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук Мазура Михаила Михайловича  
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

В настоящее время акустооптические (АО) устройства, построенные на взаимодействии света и ультразвука в оптически прозрачных средах, широко применяются при решении различных технических и научных задач. Перечень используемых в них материалов весьма обширен и включает в себя как оптически изотропные, так и анизотропные среды, в том числе двуосные. Применение двуосных кристаллов различной симметрии в АО устройствах прорабатывалось, начиная с 1980-гг, однако их внедрение в коммерческую акустооптику началось лишь в 2010-гг. Первыми (и пока единственными) стали моноклинные кристаллы семейства KREW, послужившие основой для лазерных АО затворов и сдвигателей частоты. Массовому применению двуосных сред в АО устройствах препятствует, в первую очередь, слабая изученность АО эффекта в таких материалах, затрудняющая поиск оптимальной геометрии взаимодействия света и ультразвука.

Диссертационная работа М.И. Купрейчика посвящена изучению особенностей АО взаимодействия в двуосных кристаллах, связанных со сложным типом их оптической анизотропии. Основной задачей исследования являлся поиск геометрий дифракции света, позволяющих создавать АО устройства с новыми функциональными возможностями. Актуальность выбранной тематики обусловлена расширением сферы применения АО приборов в различных областях научных исследований и технических применений.

Диссертация представлена на 222 страницах, включающих 87 рисунков, 2 таблицы и перечень цитируемой литературы из 240 наименований. Рукопись состоит из введения, пяти глав основного текста и заключения.

Во **введении** проведен анализ текущего состояния дел в сфере акустооптики двуосных кристаллов. Сформулированы цели и задачи исследования, обоснована новизна и практическая значимость полученных результатов.

В **первой главе** приведены общие сведения об АО эффекте в оптически и акустически анизотропных средах. Сделан краткий обзор существующих АО устройств на одноосных кристаллах и методов управления их характеристиками. Также в первой главе описаны разработанные диссертантом алгоритмы численного исследования АО эффекта в двуосных средах, позволяющие оценить эффективность и избирательность дифракции света в любом выбранном срезе кристалла, а также оптимизировать геометрию АО взаимодействия под тот или иной АО прибор.

**Вторая глава** посвящена исследованию фазового АО синхронизма при анизотропной дифракции в главных плоскостях двуосного кристалла. Изучена

структура зависимостей углов Брэгга от частоты ультразвука в различных срезах главных плоскостей. Впервые проведена классификация всех существующих в них режимов широкоапертурной дифракции. Проанализированы условия на дефлекторную геометрию АО взаимодействия. Показано, что в плоскости оптических осей двуосного кристалла существует уникальный, широкоугольный режим этой геометрии, названный диссертантом низкоселективным.

**В третьей главе** на примере двуосного ромбического кристалла теоарсенида таллия  $Tl_3AsS_4$  проведено всестороннее исследование ранее упомянутого низкоселективного режима АО дифракции. Обоснована перспективность его применения в АО линзах, дефлекторах сфокусированных и бездифракционных световых пучков, а также в АО сдвигателях частоты лазерного излучения. Раскрыт основной недостаток этого режима, предъявляющего крайне высокие требования к точности ориентирования звуковой грани АО кристалла, выходящие за рамки существующих технологических допусков. Кроме того, в главе диссертантом впервые показано, что в плоскости оптических осей двуосного кристалла существует нечувствительная к поляризации света геометрия анизотропной АО дифракции, и спрогнозирована возможность ее применения в АО модуляторах неполяризованного оптического излучения.

**Четвертая, наиболее насыщенная материалом глава** посвящена широко известному двуосному кристаллу йодноватой кислоты  $\alpha\text{-HfO}_3$ . Для этого кристалла проведена оптимизация геометрии дифракции света под неколлинеарный АО фильтр и дисперсионную линию задержки. Впервые описаны режимы широкоугольной геометрии, максимизирующие поле зрения АО монохроматора на двуосном кристалле при работе как с симметричной, так и с асимметричной угловой апертурой. Спрогнозированы их возможные применения в АО системах спектральной и пространственной фильтрации световых полей. Важный результат главы – анализ влияния дисперсии показателей преломления двуосного кристалла на работу перестраиваемого неколлинеарного АО фильтра и вывод о необходимости использования сторонних оптических элементов, компенсирующих сильную спектральную зависимость угла Брэгга. Кроме того, в данной главе диссертантом найдены оптимальные конфигурации низкоселективной АО дифракции на продольной акустической волне, распространяющейся вдоль нормали к плоскости оптических осей кристалла  $\alpha\text{-HfO}_3$ . На их основе предложены многофункциональные широкоапертурные АО дефлекторы с расширенным диапазоном углов сканирования.

**В пятой главе** на примере кристаллов  $\alpha\text{-HfO}_3$  и  $Tl_3AsS_4$  демонстрируется возможность гибкого управления характеристиками предложенных в третьей главе диссертации АО устройств при возбуждении ультразвука активной фазированной решеткой пьезоэлектрических преобразователей. Показано, что использование четырехэлементной решетки позволяет в 10 раз смягчить требования к точности ориентирования образца двуосного кристалла под широкоапертурный АО дефлектор. Также в данной главе автором предложен и детально проработан способ расширения частотного диапазона ранее упомянутой, нечувствительной к поляризации света геометрии анизотропной дифракции за счет фазированной решетки, позволяющий использовать эту геометрию

не только в модуляторах, но и дефлекторах неполяризованного излучения.

**В заключении** приведены основные результаты и выводы работы. Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, апробирована публикациями в авторитетных научных изданиях и докладами на известных профильных конференциях. С моей точки зрения, наибольшая **ценность** работы заключается в том, что автором впервые в столь полном объеме проведен анализ различных режимов акустооптической дифракции в двуосных кристаллах. Особенно ценными являются разделы, посвященные:

1. Комплексному анализу параметров широкоапертурного АО взаимодействия в двуосном кристалле, позволившему выделить наиболее оптимальные срезы для решения задач спектральной и пространственной фильтрации световых пучков.
2. Детальному исследованию характеристик низкоселективной АО дифракции в двуосном кристалле, позволившему предложить практические применения, определить требования к точности изготовления АО ячейки и разработать оригинальный способ снижения этих требований до приемлемого уровня в несколько десятков угловых минут.

По содержанию работы имеются следующие замечания:

1. В главе 3 диссертантом предложен новый однокристальный АО модулятор неполяризованного света, построенный на особой конфигурации поперечного АО рассеяния на сдвиговой акустической волне в двуосном кристалле. В то же время в серийных АО модуляторах этого класса используется более скоростная продольная акустическая мода, что обеспечивает высокое быстродействие и широкий частотный диапазон. Требуется уточнить, имеются ли у предлагаемого модулятора какие-то другие преимущества над серийными аналогами, кроме потенциально большей величины коэффициента АО качества  $M_2$ .
2. В главе 4 автором детально исследованы различные перспективные режимы АО взаимодействия в кристалле  $\alpha$ -НПО<sub>3</sub>. В большинстве случаев количественные расчеты проводились для излучения с  $\lambda = 633$  нм. Однако, из-за получаемых высоких частот ультразвука, возможные практические применения обсуждаются для длин волн  $\lambda > 1$  мкм. Вероятно, и расчеты нужно было проводить для этих длин волн.

Указанные замечания формальны и не снижают высокой оценки проделанной работы. Полученные в диссертации новые результаты вносят весомый вклад в понимание особенностей АО дифракции в оптически двуосных кристаллах и преимуществ при их использовании в АО устройствах.

Считаю, что диссертация «Акустооптическое взаимодействие в двуосных кристаллах» соответствует специальности 1.3.4. Радиофизика (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным 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:

**Мазур Михаил Михайлович,**  
доктор технических наук

Место работы и должность:

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ВНИИФТРИ), отделение акустооптических измерений и лазерной оптоэлектроники, лаборатория № 920, начальник лаборатории

\_\_\_\_\_ М.М. Мазур

«23» марта 2026 года

Адрес места работы:

141570, Московская область, г. Солнечногорск, рабочий посёлок Менделеево, промзона ВНИИФТРИ, корпус 68  
Телефон: +7 (495) 526-63-63  
E-mail: office@vniiftri.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена докторская диссертация:

01.04.01 — «Приборы и методы экспериментальной физики»

Подпись Мазура Михаила Михайловича ЗАВЕРЯЮ:

Специалист по персоналу ВНИИФТРИ

\_\_\_\_\_ И.А. Фролова

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ВНИИФТРИ)

Телефон: +7 (495) 526-63-63

E-mail: office@vniiftri.ru