

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ



УДК 621.373.826,538.9

Разработка перспективных акустооптических перестраиваемых фильтров на кристалле SiO₂ и исследование их характеристик

Д.А. Бакеев

Липецкий государственный педагогический университет имени П.П. Семенова-Тян-Шанского, г. Липецк, Российская Федерация

Аннотация

Акустооптические перестраиваемые фильтры (АОПФ) широко применяются для эффективного выбора и пропускания определенной длины волны от широкополосного источника излучения. В работе проанализированы основные свойства АОПФ на базе кристаллов различных классов, показано влияние анизотропии кристаллов на их акустоэлектрические свойства. На основе известных экспериментальных данных предложена теоретическая модель описания полосы пропускания с учетом пьезоэлектрических эффектов. Цель данной исследовательской работы — определение оптимальных условий работы АОПФ на кристалле кварца, в частности выявление оптических свойств от взаимной ориентации кристалла и лучей падающего света. Показано, что распространение акустической моды под углом 101,2° к плоскости рассматриваемого кристалла не зависит от оптической длины волны. Разработанная теоретическая модель, определяющая полосу пропускания фильтра, соответствует экспериментальным данным.

Ключевые слова: акустооптика, акустооптический эффект, акустоэлектрические свойства, кристаллический кварц, акустооптический перестраиваемый фильтр

Для цитирования. Бакеев Д.А. Разработка перспективных акустооптических перестраиваемых фильтров на кристалле SiO₂ и исследование их характеристик. *Молодой исследователь Дона*. 2024;9(4):4–10.

Development of Promising Acousto-Optical Tunable SiO₂ Crystal Filters and Investigation of Their Characteristics

Dmitrii A. Bakeev

Lipetsk State Pedagogical University named after P.P. Semenov-Tyan-Shansky, Lipetsk, Russian Federation

Abstract

Acousto-optical tunable filters (AOTFs) are widely used to efficiently select and transmit a specific wavelength from a broadband radiation source. This work analyzes the main properties of AOTFs based on crystals of various classes. Based on known experimental data, a theoretical model for describing the passband taking into account piezoelectric effects is proposed. The aim of this research work is to determine the optimal operating conditions for AOPF on a quartz crystal, in particular, to identify optical properties from the mutual orientation of the crystal and incident light rays. It is shown that the propagation of an acoustic mode at an angle of 101.2° to the plane of the crystal under consideration is independent of the optical wavelength. The developed theoretical model that determines the filter bandwidth corresponds to the experimental data.

Keywords: acousto-optics, acousto-optical effect, acoustoelectric properties, crystalline quartz, acousto-optical tunable filter

For citation. Bakeev DA. Development of Promising Acousto-Optic Tunable SiO₂ Crystal Filters and Investigation of Their Characteristics. *Young Researcher of Don*. 2024;9(4):4–10.

Введение. Акустооптические перестраиваемые фильтры (АОПФ) используются во многих приложениях, например в перестраиваемых лазерах, а также в оптической рефлектометрии [1–4]. АОПФ содержит оптически прозрачный кристалл, который возбуждается акустическими волнами: когда акустические волны проникают через кристалл, показатель преломления меняется в ответ на волну, и это заставляет кристалл действовать как дифракционная решетка для света, который падает на кристалл. В настоящее время АОПФ применяются в качестве дисперсионных элементов [5]. При этом важно учитывать главные характеристики АОПФ: паразитные окна пропускания, их величину и положение, а также поляризационный контраст и наличие акустических резонансов, которые способны привести передаточные характеристики к их неравномерности [6, 7]. Так, при исследовании характеристик акустооптического перестраиваемого фильтра «Фотон» (рис. 1), который описан в работе [8], были обнаружены существенные недостатки его конструкции.

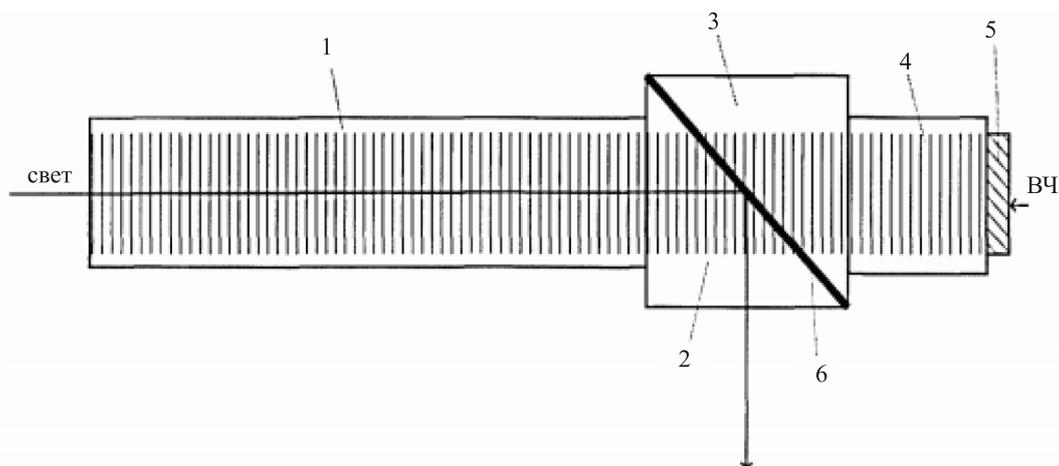


Рис. 1. Конструкция АОПФ «Фотон»: 1 — светозвукопровод из кристаллического кварца;

2, 3 — призмы из плавленого кварца для разделения светового и звукового пучков;

4 — звукопровод из плавленого кварца с нанесенным пьезопреобразователем; 5, 6 — металлическое зеркало

Оказалось, что резонансы звукопровода и буфера с поворотным зеркалом делают передаточную характеристику АОПФ изрезанной. Период по частоте у звукопровода с пьезопреобразователем оказался 800 кГц, у буферного звукопровода — около 400 кГц. Глубина изрезанности передаточной характеристики АОПФ в некоторых точках превышала 10 %. Установка такого АОПФ в резонатор лазера приводит к сильной неравномерности выходной мощности от длины волны, излучаемой лазером [8].

Цель данной исследовательской работы — определение оптимальных условий работы АОПФ на кристалле кварца, в частности выявление оптических свойств от взаимной ориентации кристалла и лучей падающего света. Конструкция акустооптического фильтра с использованием кристалла кварца была доработана с учетом вышеупомянутых факторов, а после проведены исследования.

Основная часть. В основе акустически настроенного оптического фильтра лежит коллинеарная акустооптическая дифракция в оптически анизотропной среде. Используется ориентация кристалла, при которой падающий свет одной поляризации дифрагирует в ортогональную поляризацию акустическим пучком. Согласование импульсов между падающим оптическим лучом, акустическим лучом и ортогонально поляризованным выходным оптическим лучом будет происходить только для очень узкого диапазона оптических частот. Только для этого диапазона падающих оптических частот происходит кумулятивная дифракция в ортогональную поляризацию.

Все опубликованные на сегодняшний день научные исследования касаются конструкций АОПФ с использованием трех кристаллов: ниобата лития, молибдата кальция и кварца [9, 10]. Данные классы материалов показывают необходимое фотоупругое взаимодействие, подходящее для перестраиваемых оптических фильтров. Подходящие кристаллографические ориентации можно разделить на два широких класса на основе акустических свойств пути распространения. Ранние результаты были сосредоточены на направлениях, в которых используемый путь распространения акустических сигналов является изотропным. На этих трассах акустическая фазовая и групповая скорости коллинеарны. Однако далее будет показано, что удовлетворительные характеристики перестраиваемого фильтра также могут быть получены в акустически анизотропных направлениях распространения, то есть там, где акустическая групповая и фазовая скорости неколлинеарны. При правильном выборе ориентации кристалла и используемой акустической моды уширение оптической полосы, вызванное изменениями двулучепреломления, может быть скомпенсировано эффектами, обусловленными расходимостью акустической фазы и групповых скоростей [11, 12].

Акустически изотропный случай. Для изотропных образцов используемая акустическая мода распространяется по акустически изотропному пути. Светособирающая способность любого оптического элемента пропорциональна площади элемента, умноженной на телесный угол этого элемента. Эффективная работа фильтра требует, чтобы весь входной свет с заданной оптической длиной волны проходил через фильтр, независимо от направлений распространения входного света.

В кристалле SiO₂, используемом в качестве АОПФ, справедливы соотношения [13]:

$$f_a = f_0 \frac{V_a}{c} |\Delta n|, \quad (1)$$

$$P_D = \frac{\lambda_0^2 \rho V_a^3}{2n_0^3 n_i^3 p^2 L^2}, \quad (2)$$

$$B \cong \frac{1}{2|\Delta n|L}, \quad (3)$$

где f_a — акустическая частота; f_0 — оптическая частота; V_a — акустическая фазовая скорость; c — скорость света в вакууме; Δn — двулучепреломление, равное где n_i и n_o — показатели преломления для входного и поляризованного выходного света, соответственно; P_D — плотность акустической мощности для 100 % пропускания; λ_0 — длина волны оптического излучения в вакууме; ρ — плотность кристалла; p — константа фотоупругости; L — длина взаимодействия; а B — оптическая ширина полосы. Эти уравнения требуют, чтобы любая используемая ориентация кристалла демонстрировала двойное лучепреломление и ненулевое значение фотоупругой константы [13].

Исходя из условий чистой симметрии, если направление распространения является осью симметрии второго, четвертого или шестого порядка или перпендикулярно плоскости симметрии отражения, путь распространения звука вдоль этой оси изотропен. В кристаллах также существуют направления для одной или несколько мод, распространяющихся по изотропным путям. Эти направления зависят от значения констант упругости конкретной используемой среды и, следовательно, являются функцией внешних переменных, таких как температура и давление [14] (рис. 2).

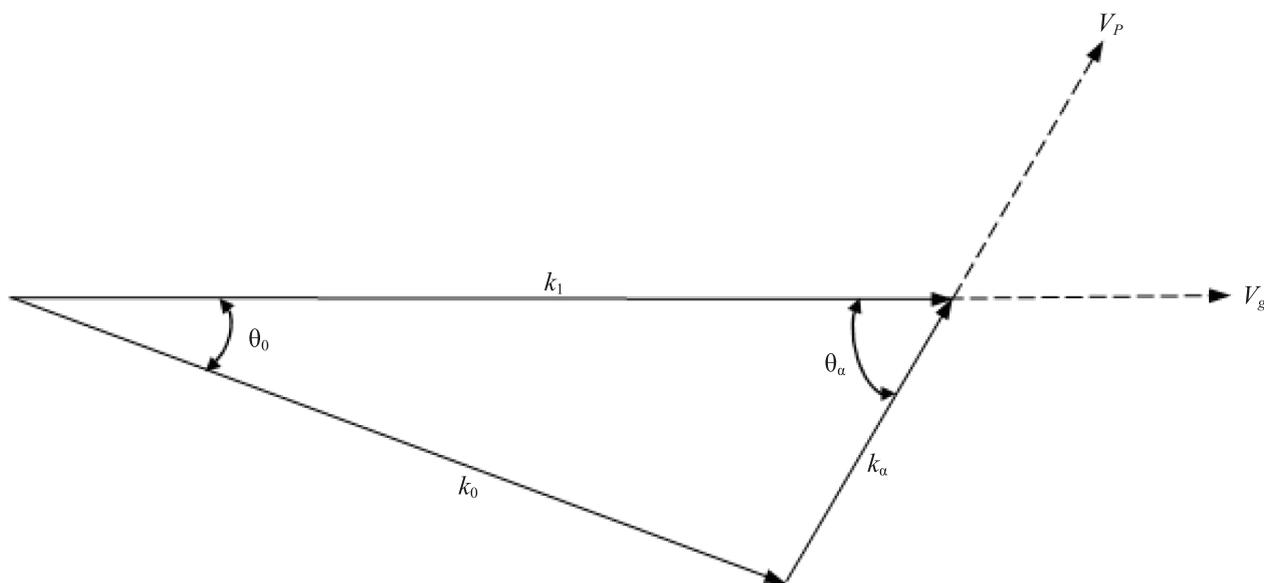


Рис. 2. k -векторная диаграмма. Условия согласования по импульсу, когда входной свет k_1 распространяется коллинеарно с акустической групповой скоростью V_g и синхронизирован по фазе с акустическим лучом k_α для создания выходного светового луча k_0

Определение ориентации направления распространения, для которого акустический тракт является изотропным, не гарантирует, что он подходит для перестраиваемых фильтров. Исследование тензора фотоупругости необходимо, чтобы определить, будет ли выбранная акустическая мода правильно взаимодействовать с входным световым лучом. Подходящая ориентация существует в классах моноклинных кристаллов. Продольное распространение акустических мод вдоль оси уникальной диады имеет как коллинеарную фазовую и групповую скорость, так и необходимое фотоупругое взаимодействие (таблица 1) [15].

Возможные ориентации АОПФ в акустически изотропных направлениях

Класс кристаллов		Группы точек	Возможные ориентации
Анаксияльные кристаллы	Изотропный	Все	Отсутствуют
	Кубический	Все	Отсутствуют
Одноосные кристаллы	Тригональные I _a	32, 3m	Только ось X (продольный режим)
	Тригональные I _b	3m	Ось X (продольный режим) Ось Y (режим сдвига)
	Тетрагональные I _a	4, 4/m	Плоскость X, Y (Z-поляризованный режим сдвига)
	Тетрагональные I _b	$\bar{4}$	4 возможные ориентации в плоскости X, Y (Z-поляризованный режим сдвига)
	Гексагональные I	6, $\bar{6}$, 6m	Плоскость X, Y (Z-поляризованный режим сдвига)
	Тригональные II	3, $\bar{3}$	Отсутствуют
	Тетрагональные II	422, 4mm, $\bar{4}2m$, 4mmm	Отсутствуют
Двухосные кристаллы	Триклинные	Все	Отсутствуют
	Моноклинные	Все	Ось диады (продольная ось)
	Орторомбические	Все	Отсутствуют

Акустически анизотропный случай. Результаты, представленные в таблице 1, показывают, что возможно только ограниченное число ориентаций, когда акустическая фаза и групповая скорость должны быть коллинеарны. В данном кристалле эти решения могут не существовать или могут быть не идеальными из-за требований к акустической мощности или частоте. Требуемая акустическая мощность пропорциональна кубу скорости звука, а частота звука прямо пропорциональна скорости звука. Использование поперечной акустической моды может требовать только той мощности, которая необходима для ориентации с использованием продольной моды с удвоенной скоростью. Кроме того, акустическая частота может быть уменьшена в 21 раз. Это снижение акустической мощности и частоты оправдывает поиск других направлений для оптимизации работы устройства.

Правильная работа перестраиваемого оптического фильтра требует, чтобы оптическая полоса пропускания фильтра, определенная с использованием полностью коллимированного входного света, существенно не ухудшалась, когда на входе используется конус света. Оптимальной ориентацией кристалла является та, которая позволяет смещать направление ввода света на небольшой угол α вокруг направления акустической групповой скорости, сохраняя при этом акустическую частоту и оптические характеристики (рис. 3, 4).

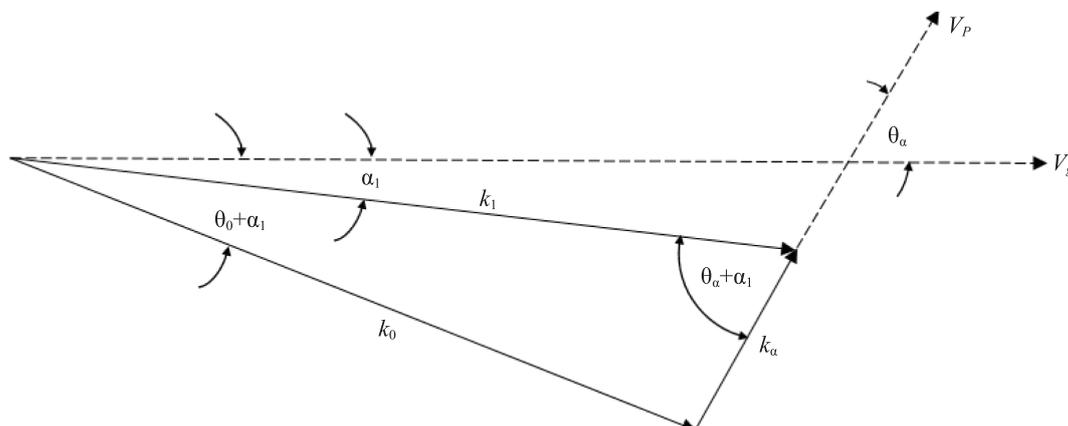


Рис. 3. k -векторная диаграмма для света, входящего в фильтр под другим углом α_1 , в той же плоскости, что и на рис. 2

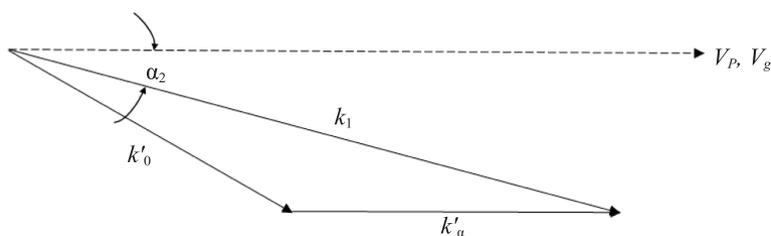


Рис. 4. k-векторная диаграмма для света, входящего в фильтр под другим углом, в плоскости, ортогональной рис. 2

Условия согласования k-векторов теперь приводят к выражению:

$$f_a = \frac{V_a}{\cos(\theta_a + \alpha_1)} \frac{\Delta n(a_1)}{\lambda_0}. \tag{4}$$

Аналогично изменение направления света на малые углы, перпендикулярные плоскости акустической групповой и фазовой скоростей, как показано на рис. 4., где $k'_0 = k_0 \cos\theta$ и $k'_\alpha = k_\alpha \cos\theta_\alpha$. Здесь и k'_0 — проекции k_0 и k_α на плоскость, содержащую k_i и ортогональную плоскости рис. 2 и 3. Опять же, условия согласования k-векторов с использованием тех же приближений, что и раньше, приводят к формуле:

$$f_a = \frac{V_a}{\cos\theta_a} \frac{\Delta n(a_2)}{\lambda_0}. \tag{5}$$

В обоих уравнениях фазовая скорость звука V_a остается постоянной независимо от угла α [16, 17].

Экспериментальные результаты и их обсуждение. В качестве материала использовался кварц, тригональный кристалл в точечной группе 32. Сводка экспериментальных результатов [14–17] представлена в таблице 2.

Таблица 2

Экспериментальные результаты, акустически анизотропный случай $\lambda = 6328 \text{ \AA}$,
 $L = 10 \text{ см}$, неколлимированный полуугол = 1

Угол ориентации относительно оптической оси Y, плоскости Z	Коллимированный источник света	Неколлимированный источник света
90°	3,5 Å	70 Å
58°	5 Å	175 Å
101,2°	3,7 Å	3,7 Å

Первый пример включает распространение входного света коллинеарно с акустической групповой скоростью вниз по оси Y. Имеет преимущество в том, что изменение двойного лучепреломления при небольших изменениях направления входного света составляет от нуля до первого порядка. Однако мода чистого сдвига, которая распространяется с групповой скоростью вдоль оси Y, имеет угол 17,5° между направлением групповой скорости и направлением фазовой скорости. Хотя не все уравнения выполняются, следовательно, возможна только частичная компенсация. Фильтр правильно работает с коллимированным светом, как и ожидалось, но, когда угол входной апертуры АОПФ открыт на половину угла волны 1°.

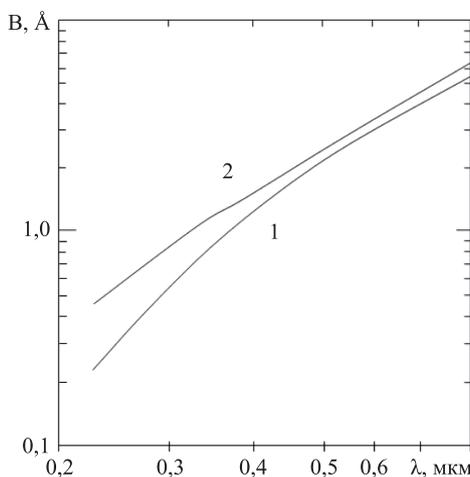


Рис. 5. Фильтрация оптической полосы пропускания в зависимости от оптической длины волны

Данные на рис. 5 приведены для кварцевой точки на расстоянии 101, 20 от оптической оси в плоскости Y, Z. Кривая 1 показывает полосу пропускания половинной мощности, полученную для полностью коллимированного света. Кривая 2 показывает полосу пропускания, измеренную при увеличении полуугла оптического приема до 3°.

$$2ctn\theta = -\tan\left[\theta - \tan^{-1}\left(\frac{c_{44}\tan\theta - c_{14}}{c_{66} - c_{14}\tan\theta}\right)\right]. \quad (6)$$

Уравнение (6) было решено с использованием итерационных компьютерных методов для ориентации, которая удовлетворяет всем упомянутым ранее требованиям. Определенный угол составил 101,13°. Дальнейший компьютерный запуск, пренебрегая ранее использовавшимися предположениями и включая пьезоэлектрические эффекты, дал угол 101,204°. Это свидетельствует о том, что предположения оправдались: результаты не показывают заметной разницы в оптической полосе пропускания фильтра при увеличении половины угла входной апертуры от 0° до 1°.

Было обнаружено, что эта ориентация относительно независима от длины волны в области прозрачности кристалла. Рис. 5 представляет собой график коллимированных и неколлимированных оптических полос пропускания в зависимости от оптической длины волны. Неколлимированный пучок имел половинный угол 3°.

С использованием данной ориентации было построено довольно большое количество АОПФ. Эти фильтры работают на длинах волн от менее 2000 Å до более 1 мкм. Скорректированные коэффициенты пропускания 90 % или более были достигнуты в УФ-диапазоне при мощности ВЧ-возбуждения 1–5 Вт с использованием преобразователя сдвигового режима на ниобате лития. Фильтры обычно имеют длину 10 см, площадь апертуры 10 мм² и внешний полуугол приема 5°.

Заключение. В данной работе продемонстрировано, как анизотропия кристаллов влияет на их акустоэлектрические свойства. Изложенные условия не ограничивают оптимальную ориентацию в кварце плоскостью V, Z, однако обширный компьютерный поиск показал, что нет других пригодных для использования ориентаций фильтра, кроме тех, что упомянуты в этой работе, распространения по оси X с использованием акустической продольной моды и распространения на 101, 204° в плоскости Y, Z с использованием чисто сдвиговой моды [17–19]. Разработанная теоретическая модель, определяющая полосу пропускания фильтра, соответствует известным экспериментальным данным.

Список литературы

1. Takada K., Yamada H. Narrow-Band Light Source with Acoustooptic Tunable Filter for Optical Low-Coherence Reflectometry. *IEEE Photonics Technology Letters*. 1996;8(5):658–660. <https://doi.org/10.1109/68.491571>
2. Батшев В.И., Мачихин А.С., Козлов А.Б. Боритко С.В., Шарикова М.О., Карандин А.В. и др. Перестраиваемый акустооптический фильтр для спектральных диапазонов 450...900 нм и 900...1700 нм. *Радиотехника и электроника*. 2020;65(7):667–673. <https://doi.org/10.31857/S0033849420070025>
3. Батшев В.И., Козлов А.Б., Шарикова М.О., Мачихин А.С., Мартынов Г.Н., Горевой А.В. и др. Экспериментальные исследования оптических характеристик акустооптического фильтра, работающего в диапазоне 450...1700 нм. *Радиотехника и электроника*. 2022;67(12):1220–1226. <https://doi.org/10.31857/S0033849422120026>
4. Yushkov K.B., Gurov V.V., Molchanov V.Ya. Engineering of AOTF Transfer Function for Phase Imaging Microscopy and Optical Trapping. In: *European Conferences on Biomedical Optics*, 20–24 June 2021, OSA Technical Digest (Optica Publishing Group); 2021. P. ETu3B.5.
5. Canova L., Xiaowei Chen, Trisorio A., Jullien A., Assion A., Tempea G., et al. Carrier-Envelope Phase Stabilization and Control Using a Transmission Grating Compressor and an AOPDF. *Optics Letters*. 2009; 34(9):1333–1335. <https://doi.org/10.1364/OL.34.001333>
6. Юшков К.Б., Молчанов В.Я., Хазанов Е.А. Соотношение неопределенности для модулированных широкополосных лазерных импульсов. *Успехи физических наук*. 2021;191(8):874–881. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.06.038793>
7. Юшков К.Б. Цифровой алгоритм управления программируемыми акустооптическими фильтрами: численное моделирование контраста и быстродействия. *Известия вузов. Радиофизика*. 2019;62(11):875–889. URL: https://radiophysics.unn.ru/sites/default/files/papers/2019_11_875.pdf (дата обращения: 29.04.2024).
8. Мазур М.М. *Физические и технологические основы разработки акустооптических приборов*. Дис. докт. тех. наук. Москва: НТЦ Уникального приборостроения РАН; 2007. 224 с.
9. Привезенцев В.В., Палагушкин А.Н., Штейнман Э.А., Терещенко А.Н., Колесников Н.Н., Макунин А.В. и др. Изменение структуры и свойств кварца, последовательно имплантированного ионами Zp и F, в процессе термических отжигов. *Труды научно-исследовательского института системных исследований Российской академии наук*. 2019;9(2):24–31. <https://doi.org/10.25682/NIISI.2019.2.0003>

10. Власова К.В., Коновалов А.Н., Макаров А.И., Андреев Н.Ф., Кожеватов И.Е., Силин Д.Е. Синтетический кристаллический кварц как оптический материал для силовой оптики. *Известия высших учебных заведений. Радиофизика*. 2019;62(6):490–498. URL: <https://radiophysics.unn.ru/issues/2019/6/490?ysclid=lzurlvd8oc608655739> (дата обращения: 29.04.2024).
11. Voloshinov V.B. Close to Collinear Acousto-Optical Interaction in Paratellurite. *Optical Engineering*. 1992;31(10):2089–2094. <https://doi.org/10.1117/12.58877>
12. Chang I.C. Collinear Beam Acousto-Optical Tunable Filters. *Electronics Letters*. 1992;28(13):1255–1266. <https://doi.org/10.1049/el:19920793>
13. Sapriel J., Charissoux D., Voloshinov V., Molchanov V. Tunable Acoustooptic Filters and Equalizers for WDM Applications. *Journal of Lightwave Technology*. 2002;20(5):892–899. <https://doi.org/10.1109/JLT.2002.1007946>
14. Molchanov V., Makarov O. Quasicollinear Acoustooptic Filters Using Strong Acoustic Anisotropy in Tellurium Dioxide Crystal. *Journal of Physics: Conference Series*. 2007;92:1–4. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/92/1/012070>
15. Chang I.C., Xu J. High Performance AOTF for the Ultraviolet. In: *IEEE Ultrasonics Symposium*. 1998 P. 289–1292. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.1998.765075>
16. Voloshinov V., Neelam Gupta. Ultraviolet-Visible Imaging Acousto-Optical Tunable Filters in KDP. *Applied Optics*. 2004;43(19):3901–3909. <https://doi.org/10.1364/AO.43.003901>
17. Ponomarev A.N., Rodionov I.D., Teterin G. Wide Aperture Acousto-Optic Tunable Filters for Visible and UV Lights. *SPIE*. 1995:2449:200–207.
18. Визен Ф.Л., Захаров В.М., Калинин Ю.К. Акустооптический фильтр «Фотон». *Приборы и техника эксперимента*. 1979;(6):170.
19. Молчанов В.Я., Китаев Ю.И., Колесников А.И., Нарвер В.Н., Розенштейн А.З., Солодовников Н.П. и др. *Теория и практика современной акустооптики*. Москва: Издательский Дом НИТУ «МИСиС»; 2015. 459 с.

Об авторе:

Дмитрий Александрович Бакеев, аспирант кафедры математики и физики Липецкого государственного педагогического университета имени П.П. Семенова-Тянь-Шанского (398020, РФ, г. Липецк, ул. Ленина, 42), bakeev.98@mail.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Dmitrii A. Bakeev, Postgraduate Student of the Department of Mathematics and Physics, Lipetsk State Pedagogical University named after P.P. Semenov-Tyan-Shansky (42, Lenin St., Lipetsk, 398020, RF), bakeev.98@mail.ru

Conflict of Interest Statement: the author does not have any conflict of interest.

The author has read and approved the final manuscript.