

УДК 538.9

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-3-120-131>

Разработка математической модели коллинеарного фильтра на основе кварца (SiO_2) и его практическая реализация

Д. А. Бакеев^{1✉}, В. В. Филиппов^{1,2}

¹Липецкий государственный педагогический университет имени П. П. Семенова-Тян-Шанского ул. Ленина, д. 42, г. Липецк, 398020, Российская Федерация

²Московский государственный университет технологий и управления имени К. Г. Разумовского (Первый казачий университет), Липецкий казачий институт технологий и управления (филиал) ул. Краснознаменная, влд. 4, г. Липецк 398006, Российская Федерация

✉ e-mail: bakееv.98@mail.ru

Резюме

Цель работы. Разработка и апробация теоретической модели акустооптического квазиколлинеарного перестраиваемого фильтра на кристаллическом кварце, работающего в спектральном диапазоне 0,25–0,4 мкм со спектральным разрешением 0,2 нм.

Методы. В работе анализируются основные свойства акустооптических перестраиваемых фильтров на базе кристаллов различных классов. На основе литературного анализа и проведенных расчетов предложена и практически реализована опытная модель АОПФ. Изучение физических свойств фильтрации света на кристалле $\alpha\text{-SiO}_2$ осуществлялось экспериментальным методом. Практические исследования спектральной перестройки устройства по экспериментальным оптическим частотам были проведены в предлагаемой ультразвуковой системе стоячей волны в соответствии с перестроенной характеристикой. На основе известных экспериментальных данных предложена теоретическая модель описания полосы пропускания с учетом пьезоэлектрических эффектов.

Результаты. Показано влияние анизотропии кристаллов на их акустоэлектрические свойства. Определены оптимальные кристаллографические параметры работы фильтров на кристалле оксида кремния. Разработана компьютерная модель АОПФ, реализованная на базе численных расчетов в среде Wolfram Mathematica. Экспериментально выявлено, что в красной части исследуемого спектра наблюдается максимальная интенсивность частот дифрагированного света, что соответствует наиболее близким к собственным частотам пьезопреобразователя, одновременно в синем и фиолетовом спектрах, было замечено наименьшее пропускание. Практическими исследованиями подтверждено, что уширения полос пропускания фильтра происходит вследствие увеличения расходимости света.

Выводы. Обоснована и разработана математическая модель акустооптического квазиколлинеарного перестраиваемого фильтра на кристаллическом кварце, на основе которой выполнен расчет АОПФ, работающего в спектральном диапазоне 0,25–0,4 мкм со спектральным разрешением около 0,2 нм.

Ключевые слова: акустооптический эффект; акустоэлектрические свойства; кристаллический кварц; акустооптический перестраиваемый фильтр.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Бакеев Д. А., Филиппов В. В. Разработка математической модели коллинеарного фильтра на основе кварца (SiO_2) и его практическая реализация // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 14, № 3 С. 120–131. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-3-120-131>

Поступила в редакцию 20.06.2024

Подписана в печать 09.08.2024

Опубликована 24.09.2024

© Бакеев Д. А., Филиппов В. В., 2024

Development of a mathematical model of a collinear filter based on Quartz (SiO₂) and its practical implementation

Dmitriy A. Bakeev^{1✉}, Vladimir V. Filippov^{1,2}

¹Lipetsk State Pedagogical University named after P.P. Semenov-Tyan-Shansky
42 Lenina Str., Lipetsk 398020, Russian Federation

²Moscow State University of Technologies and Management named after K.G. Razumovsky
(First Cossack University), Lipetsk branch
4 Krasnoznamennaya Str., Lipetsk 398006, Russian Federation

✉ e-mail: bakeev.98@mail.ru

Abstract

Purpose of the work. Development and testing of a theoretical model of an acousto-optic quasi-collinear tunable filter on crystalline quartz, operating in the spectral range of 0.25-0.4 microns with a spectral resolution of 0.2 nm.

Methods. The paper analyzes the basic properties of acousto-optic tunable filters based on crystals of various classes. Based on literature analysis and calculations, an experimental AOTF model was proposed and practically implemented. The study of the physical properties of light filtration on an α -SiO₂ crystal was carried out using an experimental method. Practical studies of the spectral tuning of the device at experimental optical frequencies were carried out in the proposed ultrasonic standing wave system in accordance with the tuning characteristic. Based on known experimental data, a theoretical model for describing the passband taking into account piezoelectric effects is proposed.

Results. The influence of crystal anisotropy on their acoustoelectric properties is shown. The optimal crystallographic parameters for the operation of filters on a silicon oxide crystal have been determined. A computer model of AOTF has been developed, implemented on the basis of numerical calculations in the Wolfram Mathematica environment. It was experimentally revealed that in the red part of the spectrum under study, the maximum intensity of the frequencies of diffracted light is observed, which corresponds to those closest to the natural frequencies of the piezoelectric transducer, while at the same time, in the blue and violet spectra, the lowest transmission was observed. Practical studies have confirmed that the broadening of the filter passbands occurs due to an increase in the divergence of light.

Conclusions. A mathematical model of an acousto-optic quasi-collinear tunable filter on crystalline quartz was substantiated and developed, on the basis of which the calculation of the AOTF operating in the spectral range of 0.25 - 0.4 μm with a spectral resolution of about 0.2 nm was performed.

Keywords: acousto-optic effect; acoustoelectric properties; crystalline quartz; acousto-optic tunable filter.

Conflict of interest: The authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Bakeev D.A., Filippov V.V. Development of a mathematical model of a collinear filter based on Quartz (SiO₂) and its practical implementation. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2024;14(3):120–131. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-3-120-131>

Received 20.06.2024

Accepted 09.08.2024

Published 24.09.2024

Введение

Акустооптический перестраиваемый фильтр содержит оптически прозрачный кристалл, который возбуждается акустическими волнами [1]. Когда акустические волны проникают через кристалл, показатель преломления меняется в ответ на волну. Это заставляет кристалл действовать как дифракционная решетка для света, который падает на кристалл [2].

Акустооптический перестраиваемый фильтр (англ. Acousto-optic tunable filter) используется во многих приложениях, например, в перестраиваемых лазерах [3], а также в оптической рефлектометрии [4].

В настоящее время весьма активно в качестве дисперсионных элементов применяются акустооптические перестраиваемые фильтры (АОФП) [5]. При этом

важно обращать внимание на самые главные характеристики АОПФ: паразитные окна пропускания, их величина и положение, а также поляризационный контраст и наличие акустических резонансов, которые способны привести передаточные характеристики к их неравномерности. Учет основных параметров АОПФ позволяет создавать такие устройства, управляемые с помощью вычислительной техники [6], и оптимизировать необходимые свойства непосредственно при работе фильтра [7].

При изучении кварцевых АОПФ были выявлены наиболее общие характерные недостатки [8]. 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 период по частоте 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.

АОПФ являются современными оптоэлектронными устройствами с полностью электронным управлением полосы пропускания, имеют малые габариты [9], низкую потребляемую мощность [10]. Поэтому разработка методики расчета квазиколлинеарных фильтров, работающих в УФ-области спектра, с более совершенными характеристиками и решающими важные задачи на современном этапе развития оптических технологий [1].

Целью данной работы является теоретическая разработка и компьютерная реализация модели акустооптического квазиколлинеарного перестраиваемого фильтра на кристаллическом кварце, работающего в спектральном диапазоне 0,25–0,4 мкм.

Материалы и методы

Все представленные в работе расчеты показателей преломления для обыкновенной и необыкновенной волн в кварце (SiO_2) проводились с помощью проприетарного программного обеспечения Wolfram Mathematica 12 [11]. Данная система компьютерной алгебры не только обеспечивает численные расчеты, но также оснащена различными аналитическими возможностями, вследствие чего результаты могут выводиться помимо алфавитно-цифрового вида ещё и в форме графиков [12].

Для расчета показателей преломления использовалась дисперсионная формула Шотта [13]:

$$n^2 = a_0 + a_1\lambda^2 + a_2\lambda^{-2} + a_3\lambda^{-4} + a_4\lambda^{-6} + a_5\lambda^{-8}, \quad (1)$$

где n – коэффициент преломления; a – коэффициент формулы Шотта; λ – длины волны [14].

Рассчитываем коэффициент преломления для обыкновенной волны с помощью формулы Шотта [15].

Коэффициенты формулы Шотта для обыкновенной волны кристаллического кварца имеют вид

$$\begin{aligned} a_{00} &= 2,35676495; \\ a_{01} &= -1,13996924 \cdot 10^{-2}; \\ a_{02} &= 1,08741656 \cdot 10^{-2}; \\ a_{03} &= 3,32066914 \cdot 10^{-5}; \\ a_{04} &= 1,08609346 \cdot 10^{-5}; \\ a_{05} &= -3,10123984 \cdot 10^{-7}; \\ \lambda &= 0,320 \text{ нм}. \end{aligned}$$

Исходя из вышеуказанных аспектов формула Шотта будет иметь вид

$$n_0 = [a_{00} + a_{01}\lambda^2 + a_{02}\lambda^{-2} + a_{03}\lambda^{-4} + a_{04}\lambda^{-6} + a_{05}\lambda^{-8}]^{\frac{1}{2}} = 1,5723. \quad (2)$$

Далее рассчитываем коэффициент преломления кристаллического кварца для необыкновенной волны с помощью формулы Шотта.

Коэффициенты формулы Шотта для
необыкновенной волны:

$$\begin{aligned} a_{e0} &= 2,38421862; \\ a_{e1} &= -1,20653449 \cdot 10^{-2}; \\ a_{e2} &= 1,10138430 \cdot 10^{-2}; \\ a_{e3} &= 1,28863130 \cdot 10^{-4}; \\ a_{e4} &= 1,68747314 \cdot 10^{-7}; \\ a_{e5} &= 4,92022338 \cdot 10^{-8}; \\ \lambda &= 0,320 \text{ нм}. \end{aligned}$$

Следовательно,

$$n_e = [a_{e0} + a_{e1}\lambda^2 + a_{e2}\lambda^{-2} + a_{e3}\lambda^{-4} + a_{e4}\lambda^{-6} + a_{e5}\lambda^{-8}]^{\frac{1}{2}} = 1,5822. \quad (3)$$

Результаты расчета показателей преломления для обыкновенной и необыкновенной волн для кристаллического кварца представлены в таблице 1.

Таблица 1. Показатели преломления кристалла кварца при температуре 18°C

Table 1. Refractive indices of crystalline quartz at a temperature of 18°C

λ , нм	n_0	n_e	λ , нм	n_0	n_e	λ , нм	n_0	n_e
257,3	1,59622	1,60714	435,8	1,55379	1,56322	667,8	1,54155	1,55057
263,1	1,59309	1,60389	467,8	1,55103	1,56037	670,8	1,54147	1,55048
274,9	1,58752	1,59813	480,0	1,55012	1,55943	706,5	1,54049	1,54947
291,3	1,58096	1,59136	486,1	1,54968	1,55898	728,1	1,53995	1,54891
303,4	1,57695	1,58720	508,6	1,54823	1,55747	766,5	1,53907	1,54800
312,3	1,57433	1,58448	518,4	1,54765	1,55688	794,8	1,53848	1,54739
325,2	1,57091	1,58095	533,8	1,54680	1,55600	844,7	1,53752	1,54640
340,4	1,56747	1,57738	546,1	1,54617	1,55535	1000,0	1,53503	1,54381
358,7	1,56391	1,57370	579,1	1,54467	1,55379	1014,1	1,53483	1,54360
396,8	1,55813	1,56772	589,3	1,54425	1,55335	1083,0	1,53387	1,54260
404,6	1,55715	1,56671	627,8	1,54282	1,55188	1200,0	1,53232	1,54098
410,2	1,55650	1,56603	643,8	1,54229	1,55133	1300,0	1,53102	1,53962
434,0	1,55396	1,56340	656,3	1,54190	1,55093	1529,6	1,52800	1,53646

Наиболее известным и изученным из двулучепреломляющих материалов является кварц [16]. Кристаллы кварца обладают высоким оптическим качеством, достаточно тверды, не гигроскопичны, легко поддаются обработке [17]. Широкое применение приобрел синтетический кварц, по своим свойствам и размерам не уступающий природным кристаллам. Промышленностью в основном выпускается кварц в виде Z-кристаллов, имеющих толщину

вдоль оптической оси до 50 мм. При толщинах более 50 мм вдоль оптической оси используются X-кристаллы. Основными дефектами материала, как природного, так и синтетического кварца, являются двойники, свили, секториальность, легко выявляемые оптическими методами. Природа этих дефектов и механизм их возникновения до конца не выяснены, однако считается установленным, что они связаны с захватом примесей и колебаниями термодинамических параметров в процессе роста

кристаллов. Исследование образцов кварца рентгеновскими дифракционными методами позволило выявить дефект, называемый полосчатостью. В кристалле наблюдаются полосы, отличающиеся друг от друга концентрацией захваченной примеси, а следовательно, и показателем преломления, а также параметрами решётки [18]. Принято считать, что показатели преломления исключительно постоянны, как у природных, так и у искусственных кристаллов кварца, если отсутствуют указанные выше неоднородности [19].

Для продольной моды в α -кварце, распространяющейся вдоль кристаллографической оси, фазовая скорость акустической волны равна [20]

$$V_a = 5750 \text{ м/с.} \quad (4)$$

В свою очередь, спектральный диапазон работы фильтра λ равен от 0,25 мкм до 0,4 мкм. Показатели преломления для обыкновенной и необыкновенной волн соответственно вычисляются по формулам

$$n_o = \left[\frac{a_{o0} + a_{o1}\lambda^2 + a_{o2}\lambda^{-2} + a_{o3}\lambda^{-4} + a_{o4}\lambda^{-6} + a_{o5}\lambda^{-8}}{\lambda} \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (5)$$

$$n_e = \left[\frac{a_{e0} + a_{e1}\lambda^2 + a_{e2}\lambda^{-2} + a_{e3}\lambda^{-4} + a_{e4}\lambda^{-6} + a_{e5}\lambda^{-8}}{\lambda} \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (6)$$

Перестроечная кривая вычисляется по формуле

$$f = \frac{V_a}{\lambda(n_e - n_o)}. \quad (7)$$

Длина области акустооптического взаимодействия определялась для трех

значений L : 40, 60 и 100 мм. Ширина спектральной линии определяется по формуле

$$\Delta\lambda = \frac{0,8\lambda^2}{\Delta n L}, \quad (8)$$

где λ – длина волны; Δn – разность коэффициентов преломления необыкновенной и обыкновенной волн; L – длина области акустооптического взаимодействия.

Результаты и их обсуждение

Изучение фильтрации света на кристалле α -SiO₂ осуществлялось экспериментальным методом. Коллинеарное акустооптическое взаимодействие пучков на кристаллическом кварце было опытным путем зафиксировано вдоль оси X при скорости $V_a = 5750$ м/с распространения продольной акустической волны. Воспользовавшись методом вакуумной сварки, пьезоэлектрический преобразователь из ниобата лития ($Y+36^\circ$) – среза квадратного сечения ($d = 0,5$ см) был прикреплен перпендикулярно оси X на грань кристалла. В реализованном (при возбуждении ультразвука в виде цугов волн с длительностью T), режиме бегущей акустической волны (с длиной области взаимодействия пучков $L = VT$), была зафиксирована интенсивность дифрагированного света. Ее длина L изменялась от 40 до 100 мм в зависимости от диапазона меняющихся значений $T = (0-9)$ мкс длительности акустического цуга. На рисунке 1 продемонстрирована схема экспериментальной установки для отслеживания особенностей фильтрации света в режиме квазиколлинеарного акустооптического взаимодействия.

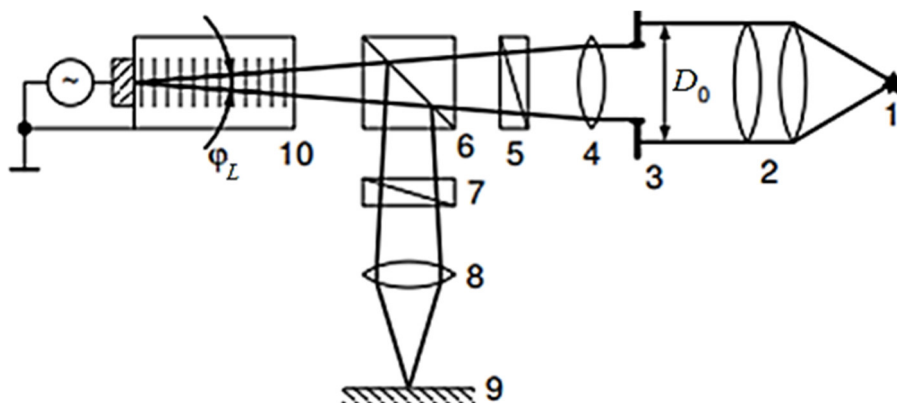


Рис. 1. Схема фильтрации света

Fig. 1. Light filtering circuit

Источником излучения световых волн была кварцевая лампа 1. Коллиматор 2 использовался в совокупности с поляризатором 5 для формирования пучка световых волн плоскостной поляризации. Пучок света должен параллельно звуку просачиваться сквозь кристалл. Фокусирующая линза 4, задействованная в экспериментальной установке вкупе с ирисовой диафрагмой 3 диаметром D_0 , способствовала калиброванному изменению расходимости падающей волны света $\Delta\phi_L$. Механические волны в пьезоэлектрическом кристалле создают акустические волны в оптически прозрачном кристалле, которые проходят через материал и поглощаются на другом конце. Акустические волны вызывают решетчатую структуру для сжатия и релаксации в ответ на колебания акустических волн. Это приводит к периодическим изменениям показателя преломления в кристалле, в результате чего материал будет действовать как дифракционная решетка для света. Падающий на кварцевый кристалл 10 световой пучок, промодулированный фазовой решеткой, в виде стоячих волн выделялся используемой разделительной призмой 6 вместе с анализатором 7. В дальнейшем пучок фокусировался линзой 8 на визуа-

лизирующий люминесцентный экран 9 фотоприемника или же его окно. При проведении измерений принимаем условие, что $\Delta\phi_L$ (изменение фазы света, вызванное акустической волной в анизотропной среде) превосходит изменение фазы света в стандартной среде $\Delta\phi_s$ (без воздействия акустических волн) [7].

Максимальная интенсивность испускаемого дифрагированного света была замечена на ультразвуковых частотах [8], которые близки к собственной частоте используемого пьезоэлектрического преобразователя. Это соответствует красному спектральному диапазону видимого света. В синей, а также фиолетовой частях спектрального диапазона пропускание при используемой акустооптической фильтрации было замечено значительно меньше, что объясняется фактическим рассогласованием параметров задействованного пьезопреобразователя и источника генерирования электрической мощности. Наблюдения спектральной перестройки устройства по экспериментальным оптическим частотам были проведены в ультразвуковой системе стоячей волны (рис. 2) в соответствии с перестроечной характеристикой.

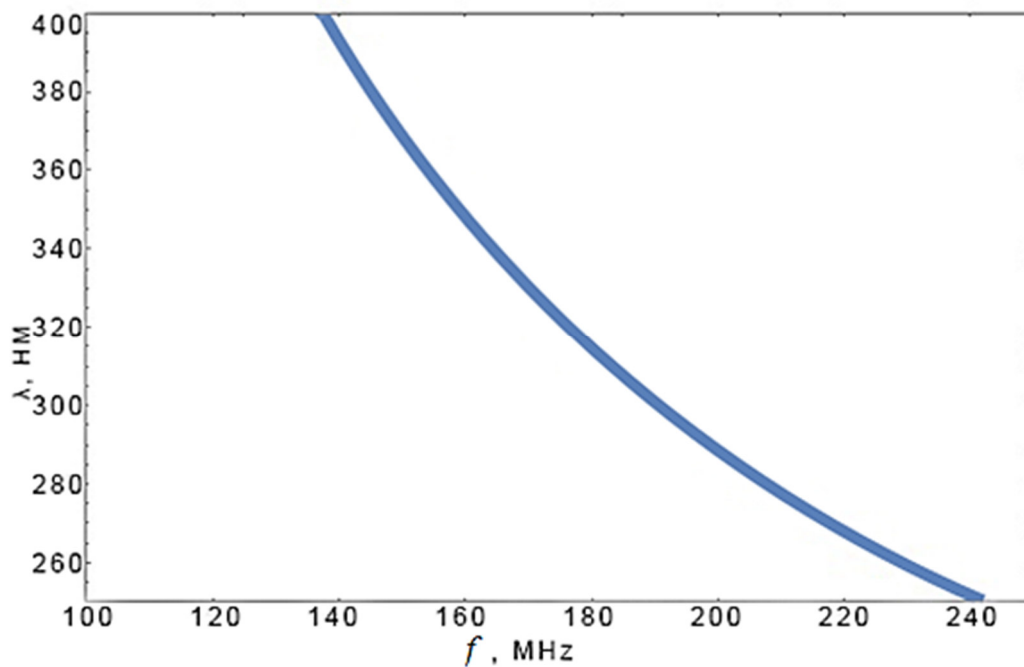


Рис. 2. Перестроечная характеристика фильтра на кристалле α -SiO₂

Fig. 2. Tuning characteristics of a filter on an α -SiO₂ crystal

Источник когерентного света с длиной волны $\lambda_0 = 465$ нм был задействован для оценки влияния на разрешающую силу расходимости оптического пучка $\Delta\varphi_L$ и определения полосы пропускания. Луч источника когерентного света расширялся телескопом до диаметра максимального отверстия ирисовой диафрагмы. Тогда как его расходимость изменялась в диапазоне $\Delta\varphi_L = 0,01 - 0,12$, условие $\Delta\varphi_L > \Delta\varphi_s$ все равно выполнялось. Вблизи $f = \Delta n V / \lambda_0$ при постоянной величине $\lambda_0 = \text{const}$ оценивалась полоса пропускания $\Delta\lambda$ по диапазону перестройки частоты Δf . На рисунке 3 продемонстрирован ряд кривых $\Delta\lambda(L)$ при различных расходимостях светового пучка $\Delta\varphi_L$.

Согласно представленным зависимостям на рисунке 3, полоса пропускания $\Delta\lambda$ уменьшается с увеличением длины области взаимодействия пучков. Экспериментальные кривые на рисунке 3 определены

по формуле (8) на основе опытных значений λ , Δn и L .

Также экспериментально исследовалась зависимость полосы пропускания $\Delta\lambda$ от расходимости света $\Delta\varphi_L$ при трех длинах области взаимодействия пучков (40; 60 и 100 мм). Было установлено, что с увеличением расходимости света происходит предсказанное теорией уширение полосы пропускания. Кроме того, экспериментальные результаты подтвердили теоретические выводы о том, что требования к степени коллимации лучей возрастают с увеличением длины области взаимодействия пучков. Например, заметное расширение полосы пропускания при $L = 100$ мм начинает сказываться при $\Delta\varphi_L > 0,04$, в то время как для $L = 40$ мм полоса пропускания при $\Delta\varphi_L = 0,04$ практически не зависит от расходимости света и почти полностью определяется условием рассогласования волновых векторов (условием фазовой синхронизации) [8].

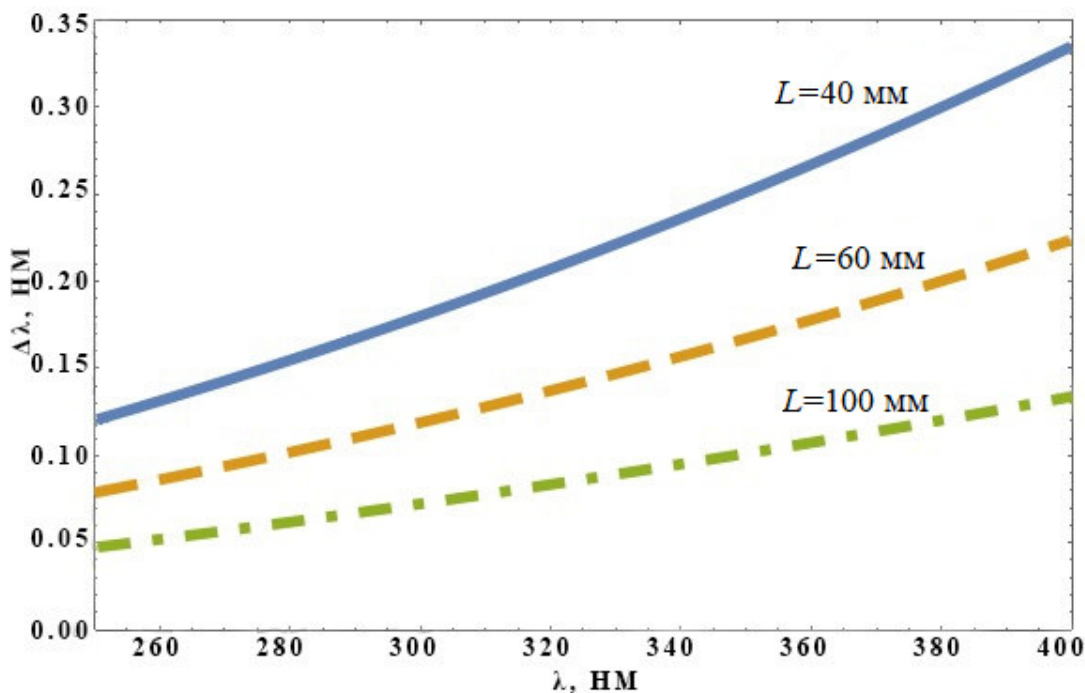


Рис. 3. Зависимость полосы пропускания от спектрального диапазона работы фильтра

Fig. 3. Dependence of the bandwidth on the spectral range of the filter operation

При экспериментальных значениях $L = 40$ мм, $\lambda_0 = 400$ нм и $\Delta\varphi_L < 0,04$ опытно получено $\Delta\lambda = 0,35$ нм (соответствующее теоретическое $\Delta\lambda = 0,32$ нм). Если, например, длительность акустического цуга увеличить вдвое ($T = 19$ мкс) или включить режим стоячей волны ультразвука, то полоса пропускания сократится в два раза: $\Delta\lambda = 0,16$ нм.

Выводы

На основе полученной математической модели был рассчитан коллинеарный акустооптический перестраиваемый фильтр на основе кварца (SiO_2), работающий в спектральном диапазоне 0,25–0,4 мкм, и получены следующие результаты:

- спектральное разрешение фильтра 0,2 нм;
- реализованный частотный диапазон перестройки 140–240 МГц;
- в красной части спектра наблюдается максимальная интенсивность частот дифрагированного света, что соответ-

ствует наиболее близким к собственным частотам пьезопреобразователя. В свою очередь, в синем и фиолетовом спектрах было замечено наименьшее пропускание. Это можно объяснить рассогласованием параметров генератора электрической мощности и пьезоэлектрического преобразователя;

– экспериментально подтверждены теоретические прогнозы о том, что при увеличении длины области акустооптического взаимодействия пучков соответственно возрастают и требования к степеням коллимации лучей;

– опытным путем подтверждено, что уширение полос пропускания происходит вследствие увеличения расходимости света.

Таким образом, в ходе работы была обоснована и разработана математическая модель акустооптического квазиколлинеарного перестраиваемого фильтра на кристаллическом кварце, на основе которой выполнен расчет АОПФ, работающего в спектральном диапазоне 0,25–0,4 мкм со

спектральным разрешением 0,2 нм. Представленные экспериментальные результаты по измерению характеристик АОПФ полностью согласуются с теоретическими

предположениями и подтверждают корректность полученной в ходе выполнения работы математической модели.

Список литературы

1. Экспериментальные исследования оптических характеристик акустооптического фильтра, работающего в диапазоне 450...1700 нм / В. И. Батшев, А. Б. Козлов, М. О. Шарикова, А. С. Мачихин, Г. Н. Мартынов, А. В. Горевой [и др.] // Радиотехника и электроника. 2022. Т. 67, № 12. С. 1220–1226. <https://doi.org/10.31857/S0033849422120026>
2. Yushkov K. B., Makarov O. Yu., Molchanov V. Y. A. Novel protocol of hyperspectral data acquisition by means of an acousto-optical tunable filter with synthesized transmission function // Optics Letters. 2019. Vol. 44, no. 6. P. 1500. <https://doi.org/10.1364/OL.44.001500>
3. Перестраиваемый акустооптический фильтр для спектральных диапазонов 450...900 нм и 900...1700 нм / В. И. Батшев, А. С. Мачихин, А. Б. Козлов, С. В. Боритко, М. О. Шарикова, А. В. Карандин [и др.] // Радиотехника и электроника. 2020. Т. 65, № 7. С. 667–673.
4. Yushkov K. B., Gurov V. V., Molchanov V. Y. Engineering of AOTF transfer function for phase imaging microscopy and optical trapping // Optics InfoBase Conference Papers. Optica Publishing Group, 2021. P. ETu3B.5. <https://doi.org/10.1364/OL.44.001500>
5. Carrier-envelope phase stabilization and control using a transmission grating compressor and an AOPDF / L. Canova, X. Chen, A. Trisorio, R. Lopez-Martens, A. Assion, G. Tempea [et al.] // Optics Letters. 2009. Vol. 34. P. 1333–1335. <https://dx.doi.org/10.1364%2FOL.34.001333>
6. Юшков К. Б. Цифровой алгоритм управления программируемыми акустооптическими фильтрами: численное моделирование контраста и быстродействия // Известия вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62, № 11. С. 875–889.
7. Юшков К. Б., Молчанов В. Я., Хазанов Е. А. Соотношение неопределенности для модулированных широкополосных лазерных импульсов // Успехи физических наук. 2021. Т. 191, № 8. С. 874–881. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.06.038793>
8. Теория и практика современной акустооптики / В. Я. Молчанов, Ю. И. Китаев, А. И. Колесников, В. Н. Нарвер, А. З. Розенштейн, Н. П. Солодовников [и др.]. М.: МИСиС, 2015. 459 с.
9. Беляева А. С., Романова Г. Э. Анализ эффективности принципиальных схем перестраиваемого источника на базе акустооптического фильтра // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 11. С. 933–940. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2021-64-11-933-940>
10. Применение акустооптического эффекта / М. С. Петрова, И. С. Долгополов, Е. А. Антонычева, А. В. Сую // Бюллетень научных сообщений. 2019. № 24. С. 25–32.
11. Wolfram S. An elementary introduction to the wolfram language. Third Edition. Campaign, IL.: Wolfram Media, 2023. 376 p.
12. Bernard E. Introduction to machine learning. Campaign, IL.: Wolfram Media, Inc. 2021. 422 p.
13. Bass M. Handbook of Optics. New York: McGraw-Hill Companies, 1995. 1606 p.
14. Palik E.D. Handbook of optical constants of solids. Vol. 2. New York: Academic Press, 2010. 1024 p.
15. Макарова Д. Г., Ефремов В. С. Применение дисперсионных формул материалов в субмиллиметровом диапазоне длин волн // Вестник Сибирской государственной геодезической академии. 2012. № 1(17). С. 122–132.

16. Изменение структуры и свойств кварца, последовательно имплантированного ионами Zn и F, в процессе термических отжигов / В. В. Привезенцев, А. Н. Палагушкин, Э. А. Штейнман, А. Н. Терещенко, Н. Н. Колесников, А. В. Макунин [и др.] // Труды научно-исследовательского института системных исследований Российской академии наук. 2019. Т. 9, № 2. С. 24–31. <https://doi.org/10.25682/NIISI.2019.2.0003>
17. Власова К. В., Коновалов А. Н., Макаров А. И. Синтетический кристаллический кварц как оптический материал для силовой оптики // Известия вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62, № 6. С. 490–498.
18. Российский синтетический кристаллический кварц как материал для выходных каскадов мощных лазерных систем / А. Н. Коновалов, К. В. Власова, А. И. Макаров, Н. Ф. Андреев, И. Е. Кожеватов, Д. Е. Силин // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2019. № 2(107). С. 112–118.
19. Колобов А. Ю., Сычева Г. А. Синтез непрозрачного кварцевого стекла для производства огнеупорной кварцевой керамики // Физика и химия стекла. 2021. Т. 47, № 3. С. 273–285. <https://doi.org/10.31857/S0132665121030057>
20. Люминесценция кварца под действием ударной волны / В. И. Веттегрень, А. В. Воронин, В. С. Куксенко, Р. И. Мамалимов, И. П. Щербаков // Физика твердого тела. 2014. Т. 56, № 2. С. 315–317. <https://doi.org/10.1134/S106378341402032>

References

1. Batshev V.I., Kozlov A.B., Sharikova M.O., Machikhin A.S., Martynov G.N., Gorevoy A.V., et al. Experimental studies of the optical characteristics of an acousto-optical filter operating in the range 450...1700 nm. *Radiotekhnika i elektronika = Radio engineering and electronics*. 2022;67(12):1220–1226. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0033849422120026>
2. Yushkov K.B., Makarov O.Yu., Molchanov V. Y. A. Novel protocol of hyperspectral data acquisition by means of an acousto-optical tunable filter with synthesized transmission function. *Optics Letters*. 2019;44(6):1500. <https://doi.org/10.1364/OL.44.001500>
3. Batshev V.I., Machikhin A.S., Kozlov A.B., Boritko S.V., Sharikova M.O., Karandin A.V., et al. Tunable acousto-optical filter for the spectral ranges 450...900 nm and 900...1700 nm. *Radiotekhnika i elektronika = Radio engineering and electronics*. 2020;65(7):667–673. (In Russ.)
4. Yushkov K.B., Gurov V.V., Molchanov V.Y. Engineering of AOTF transfer function for phase imaging microscopy and optical trapping. *Optics InfoBase Conference Papers*. Optica Publishing Group, 2021. P. ETu3B.5. <https://doi.org/10.1364/OL.44.001500>
5. Canova L., Chen X., Trisorio A., Lopez-Martens R., Assion A., Tempea G., et al. Carrier-envelope phase stabilization and control using a transmission grating compressor and an AOPDF // *Optics Letters*. 2009;(34):1333–1335. <https://dx.doi.org/10.1364%2FOL.34.001333>
6. Yushkov K.B. Digital algorithm for controlling programmable acousto-optical filters: numerical modeling of contrast and performance. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2019;62(11):875–889. (In Russ.)
7. Yushkov K.B., Molchanov V.Ya., Khazanov E.A. Uncertainty relation for modulated broadband laser pulses. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Physics-Uspekhi*. 2021;191(8):874–881. (In Russ.) <https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.06.038793>
8. Molchanov V.Ya., Kitaev Yu.I., Kolesnikov A.I., Narver V.N., Rosenshtein A.Z., Solodovnikov N.P., et al. Theory and practice of modern acousto-optics. Moscow: MISIS; 2015. 459 p. (In Russ.)

9. Belyaeva A.S., Romanova G.E. Analysis of the effectiveness of circuit diagrams of a tunable source based on an acousto-optical filter. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie = Journal of Instrument Engineering*. 2021;64(11):933–940. (In Russ.) <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2021-64-11-933-940>
10. Petrova M.S., Dolgoplov I.S., Antonycheva E.A., Syuy A.V. Application of the acousto-optic effect. *Byulleten' nauchnykh soobshchenii = Bulletin of Scientific Communications*. 2019;(24):25–32. (In Russ.)
11. Wolfram S. An elementary introduction to the wolfram language. Third Edition. Campaign, IL.: Wolfram Media; 2023, 376 pp.
12. Bernard E. Introduction to Machine Learning. Publisher: Wolfram Media, Inc. 2021. 422 pp.
13. Bass M. Handbook of Optics. New York: McGraw-Hill Companies, 1995. 1606 p.
14. Palik E.D. Handbook of optical constants of solids. Vol. 2. New York: Academic Press; 2010. 1024 p.
15. Makarova D.G., Efremov V.S. Application of dispersion formulas of materials in the submillimeter wavelength range. *Vestnik Sibirskoi gosudarstvennoi geodezicheskoi akademii = Bulletin of the Siberian State Geodetic Academy*. 2012;1(17):122–132. (In Russ.)
16. Privezentsev V.V., Palagushkin A.N., Shteinman E.A., Tereshchenko A.N., Kolesnikov N.N., Makunin A.V., et al. Change in the structure and properties of quartz sequentially implanted with Zn and F ions during thermal annealing. *Trudy nauchno-issledovatel'skogo instituta sistemnykh issledovaniy Rossiiskoi akademii nauk = Proceedings of the Scientific Research Institute for System Research Russian Academy of Sciences*. 2019;9(2):24–31. (In Russ.) <https://doi.org/10.25682/NIISI.2019.2.0003>
17. Vlasova K.V., Konovalov A.N., Makarov A.I. Synthetic crystalline quartz as an optical material for power optics. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2019;62(6):439–446. (In Russ.)
18. Konovalov A.N., Vlasova K.V., Makarov A.I., Andreev N.F., Kozhevnikov I.E., Silin D.E. Russian synthetic crystalline quartz as a material for output stages of high-power laser systems. *Izvestiya Rossiiskoi akademii raketnykh i artilleriiskikh nauk = Proceedings of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences*. 2019;2(107):112–118. (In Russ.)
19. Kolobov A.Yu., Sycheva G.A. Synthesis of opaque quartz glass for the production of refractory quartz ceramics. *Physics and chemistry of glass*. 2021;47(3):273–285. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0132665121030057>
20. Vettegren V.I., Voronin A.V., Kuksenko V.S., Mamalimov R.I., Shcherbakov I.P. Luminescence of quartz under the action of a shock wave. *Fizika tverdogo tela = Solid State Physics*. 2014;56(2):315–317. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S106378341402032>

Информация об авторах / Information about the Authors

Бакеев Дмитрий Александрович, аспирант кафедры математики и физики, Липецкий государственный педагогический университет имени П. П. Семёнова-Тянь-Шанского, г. Липецк, Российская Федерация, e-mail: bakeev.98@mail.ru, ORCID: 0000-0001-8212-2447

Dmitry A. Bakeev, Post-Graduate Student of the Department of Mathematics and Physics, Lipetsk State Pedagogical University named after P. P. Semenov-Tyan-Shansky, Lipetsk, Russian Federation, e-mail: bakeev.98@mail.ru, ORCID: 0000-0001-8212-2447

Филиппов Владимир Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики и физики, Липецкий государственный педагогический университет имени П. П. Семенова-Тян-Шанского; профессор кафедры естественных и технических наук, Московский государственный университет технологий и управления имени К. Г. Разумовского (Первый казачий университет), Липецкий казачий институт технологий и управления (филиал), г. Липецк, Российская Федерация, e-mail: wwfilippow@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4323-351X

Vladimir V. Filippov, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor of the Department Mathematics and Physics, Lipetsk State Pedagogical University named after P.P. Semenov-Tyan-Shansky; Professor of the Department of Natural and Technical Sciences, Moscow State University of Technologies and Management named after K.G. Razumovsky (First Cossack University), Lipetsk Branch, Lipetsk, Russian Federation, e-mail: wwfilippow@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4323-351X