

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА РАБОТЫ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ И ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДАМИ

© 2024 г. Н. В. Поликарпова^{a, b, *}, В. Э. Пожар^b

^aМосковский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, Ленинские горы 1, Москва, 119991 Россия

^bНаучно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, ул. Бутлерова 15, Москва, 117342 Россия

*e-mail: polikarpnv@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.04.2023 г.

После доработки 17.10.2023 г.

Принята к публикации 19.12.2023 г.

Теоретически и экспериментально исследованы акустооптические характеристики кристалла парателлурита с углом среза $\alpha = 10.2^\circ$. Кристалл использован в акустооптическом фильтре для обработки оптических изображений в видимом и инфракрасном свете. Экспериментально определен электрический диапазон перестройки фильтра на основе частотной зависимости мощности, поглощаемой пьезоэлектрическим преобразователем фильтра. Сделаны оценки диапазона настройки фильтра по оптическим длинам волн. На длинах волн света $\lambda = 1.15$ и $\lambda = 0.63$ мкм рассчитаны зависимости брэгговского угла падения от частоты ультразвука. При измерении эффективности дифракции в режиме работы дефлектора обнаружено, что диапазон перестройки фильтра по оптическим длинам волн оказывается отличным от предсказанного в результате измерения электрических характеристик преобразователя и становится уже.

Ключевые слова: акустооптика, парателлурит, акустооптический фильтр, пьезопреобразователь, частотный диапазон

DOI: 10.31857/S0320791924020061, **EDN:** YNJURU

ВВЕДЕНИЕ

Явление дифракции света на дифракционной решетке, созданной в кристаллах распространяющейся в них акустической волной, широко используется в различных областях науки и техники. С помощью акустооптического (АО) взаимодействия можно, изменяя характеристики акустической волны, эффективно управлять световым пучком, осуществляя модуляцию его амплитуды, фазы и частоты, а также меняя направление распространения пучка [1–52]. В качестве областей применения АО приборов можно отметить оптику, спектроскопию, оптоэлектронику, обработку оптических изображений, лазерную физику и др.

В современной акустооптике широко применяются кристаллы, отличающиеся большой анизотропией своих оптических и акустических свойств. Среди этих кристаллов выделяется парателлурит (TeO_2), на основе которого создаются устройства видимого

и ИК диапазона спектра (до 5 мкм), в частности, такие важные приборы как перестраиваемые АО фильтры [7–10, 24–26, 31–39, 45–48, 52]. Эти фильтры выделяют из оптического пучка, имеющего сплошной или линейчатый спектр оптических частот, оптические лучи, заключенные в узких спектральных интервалах $\delta\lambda$. Длина волны света λ , пропущенная фильтром, определяется частотой акустической волны f , а интенсивность выходного излучения зависит от мощности ультразвука.

АО фильтры обладают рядом преимуществ перед аналогичными устройствами других классов. Их несомненным достоинством является возможность быстрой электронной перестройки длины волны отфильтрованного излучения. К другим преимуществам АО фильтров относятся: широкий диапазон перестройки; работа в реальном масштабе времени; компактность и малый вес; отсутствие механического перемещения отдельных элементов; высокое спектральное разрешение; малые световые

потери; ограниченное энергопотребление; компьютерное управление устройством; возможность обработки оптических изображений с высоким пространственным разрешением.

Одной из основных характеристик АО фильтра является диапазон перестройки длины волны света $\Delta\lambda$. Этот диапазон зависит от физических характеристик кристалла и определяется интервалом перестройки акустической частоты. В современных устройствах величина $\Delta\lambda$, как правило, не превышает октавы. Ее ограничение обусловлено резонансными свойствами пьезоэлектрического преобразователя АО ячейки, системой согласования преобразователя с ВЧ генератором, а также селективным характером АО взаимодействия [1–52]. Для расширения диапазона перестройки могут применяться различные методы. Например, на АО кристалле размещаются два или несколько пьезоэлектрических преобразователей с резонансными частотами, отличающимися в два и более раз [8]. Еще одним способом расширения частотного диапазона является использование технологии “beam steering”, когда при изменении частоты электрического сигнала меняется ориентация эквивалентного волнового фронта акустического пучка [43].

Тестирование любого АО прибора начинается с измерения его частотных характеристики. Проводится это двумя независимыми методами: электрическим — путем определения коэффициента стоячей волны (КСВ) или параметра S_{11} в электрическом тракте ВЧ генератор—преобразователь, а также оптическим методом — по измерению интенсивности дифрагированного светового пучка в режиме малой эффективности дифракции. В таком режиме эффективность дифракции пропорциональна мощности ультразвука, поэтому можно ожидать полное соответствие результатов этих двух методов измерений. Однако наши исследования показали, что существует заметное расхождение результатов как по форме частотных характеристик, так и по ширине

частотного диапазона [11]. Причины подобной особенности в настоящее время остаются невыясненными. Целью данной работы являлось измерение частотных характеристик обоими методами, их сопоставление и обсуждение возможных причин расхождения экспериментальных результатов.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Основным элементом АО прибора является АО ячейка, изготовленная обычно из двулучепреломляющего кристалла определенного среза, в котором с помощью пьезоэлектрического преобразователя возбуждается акустическая волна. В фильтрах, дефлекторах, широкополосных модуляторах, анализаторах спектра радиосигналов и других АО приборах используется, как правило, режим бегущих акустических волн. Поэтому на грани кристалла, противоположной преобразователю, располагается поглотитель ультразвука (рис. 1а). Акустическая волна создает в кристалле объемную фазовую дифракционную решетку, движущуюся со скоростью звука V . Проходящий через АО ячейку световой пучок дифрагирует в акустическом поле, создавая на выходе типичную дифракционную картину. Ее иллюстрирует соответствующая векторная диаграмма, показанная на рис. 1б и отвечающая широкоугольной геометрии АО взаимодействия, используемой для фильтрации изображений, когда касательные к поверхностям волновых векторов параллельны друг другу.

В современной акустооптике используются обычно достаточно высокие акустические частоты в десятки и сотни мегагерц, а дифракция имеет характер, близкий к брэгговскому режиму с двумя дифракционными максимумами нулевого и первого порядков [1–4]. Наиболее эффективное рассеяние света наблюдается при падении светового пучка под углом Брэгга θ_B , который определяется формулой

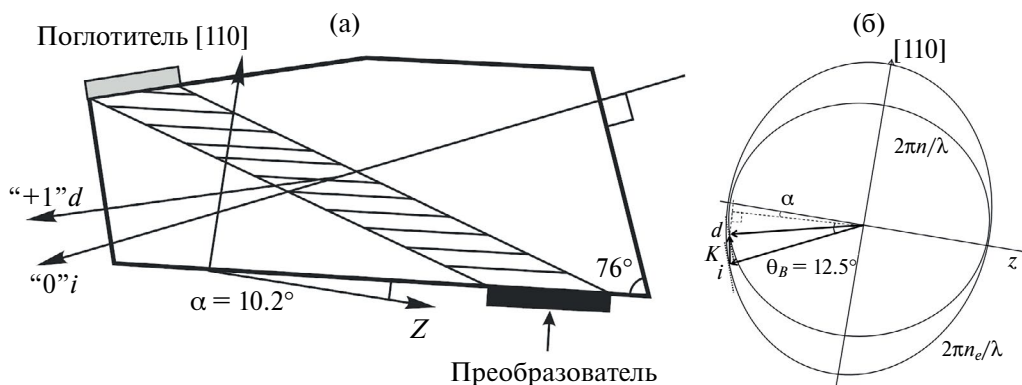


Рис. 1. (а) — Общий вид кристалла и ход лучей в ячейке акустооптического фильтра, (б) — векторная диаграмма широкоугольной геометрии АО взаимодействия, используемой для фильтрации изображений.

$$\sin \theta_B = -\frac{\lambda f}{2n_i V} \left[1 + \frac{V^2}{\lambda^2 f^2} (n_i^2 - n_d^2) \right]. \quad (1)$$

Здесь n_i и n_d — показатели преломления для падающего и дифрагированного оптического излучения.

В акустооптике кристаллов важную роль играет поляризация света. Необходимая поляризация задается входным поляризатором (не показанным на рис. 1а). В случае кристалла парателлурита, использованного в нашей работе, надо учитывать также и оптическую активность кристалла, которая определяет эллиптическую поляризацию собственных мод этого материала.

Если на АО ячейку падает световой поток, содержащий различные спектральные компоненты, то в дифракции будет участвовать и эффективно рассеиваться звуком лишь свет с длиной волны λ , удовлетворяющей условию Брэгга (1) на заданной акустической частоте f . При неизменном угле падения света и изменении частоты звука f происходит выделение из падающего спектра отдельных спектральных компонент с длинами волн λ .

В АО фильтрах на основе кристалла парателлурита используется анизотропная дифракция света со сменой поляризации дифрагированного излучения [6–8]. Дифракция происходит на медленной акустической моде, распространяющейся в плоскости $(1\bar{1}0)$ под углом α к направлению $[110]$ кристалла. В нашей работе использовалась ячейка с углом среза $\alpha = 10.2^\circ$. Сдвиговая акустическая мода имела скорость $V = 0.71 \times 10^5$ см/с и распространялась с углом акустического сноса 54° (рис. 1). Длина преобразователя в плоскости АО взаимодействия равнялась $L = 5$ мм. Акустическая волна на рисунке условно показана горизонтальными штрихами. Угол наклона входной оптической грани кристалла парателлурита составлял 76° . На рисунке показан ход основного и дифрагированного световых лучей на выходе фильтра. Это лучи нулевого и первого порядков дифракции.

Измерения проводились с использованием гелий-неонового лазера на двух длинах волн оптического излучения: $\lambda_1 = 0.633$ мкм и $\lambda_2 = 1.15$ мкм. Падающее излучение имело необыкновенную поляризацию (в плоскости чертежа), а дифрагированное излучение первого порядка — обыкновенную поляризацию. При угле среза $\alpha = 10.2^\circ$ можно пренебречь эффектом оптической активности и воспользоваться следующими приближенными выражениями для показателей преломления:

$$n_i(\theta_i) = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \sin^2(\theta_i - \alpha) + n_e^2 \cos^2(\theta_i - \alpha)}}, \quad (2)$$

$$n_d = n_o,$$

где θ_i — угол падения света, отсчитываемый от фронта акустической волны, n_o и n_e — главные показатели преломления кристалла для обыкновенной и необыкновенной поляризаций оптических волн соответственно. На длинах волн λ_1 и λ_2 показатели преломления соответственно равны: $n_o = 2.26$, $n_e = 2.41$ и $n_o = 2.20$ и $n_e = 2.34$. На рис. 2 квадратными точками показана рассчитанная по формулам (1) и (2) кривая для фильтра без учета дисперсии показателей преломления кристалла. Круглыми точками показана та же кривая, но с учетом дисперсии n_o и n_e .

На рис. 3 представлены частотные зависимости углов Брэгга $\theta_B(f)$, рассчитанные по формулам (1)–(2) для указанных длин волн света. Области с вертикальными и горизонтальными касательными, равными нулю, оптимальны для работы дефлекторов и фильтров. Здесь выполняются условия: $d\theta_B/df = 0$ и $df/d\theta_B = 0$ [1–4, 7–10, 24–26, 31–39, 45–48, 52].

Точками на графиках показаны результаты измерений. Настройка на угол Брэгга производилась по стандартной методике путем регистрации максимума дифрагированного света с помощью фотоэлектронного умножителя ФЭУ-62, диапазон чувствительности которого включал весь видимый свет и ближний инфракрасный диапазон с длинами волн до 1.2 мкм. В установке использовалась измерительная шкала для определения угла падения оптического излучения на входную грань кристалла.

Измерение частотного диапазона перестройки АО ячейки Δf проводилось в дефлекторном режиме работы, поскольку, как следует из рис. 3, в этом случае не происходит существенного изменения угла Брэгга при больших вариациях частоты ультразвука. Поэтому световые лучи на каждой

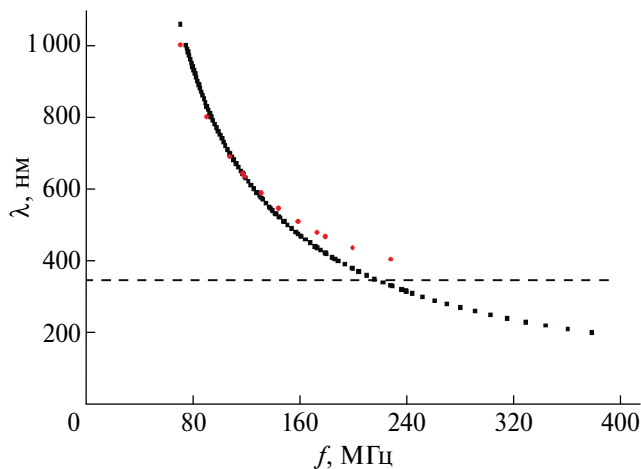


Рис. 2. Кривая настройки фильтра на кристалле парателлурита с углом среза $\alpha = 10.2^\circ$.

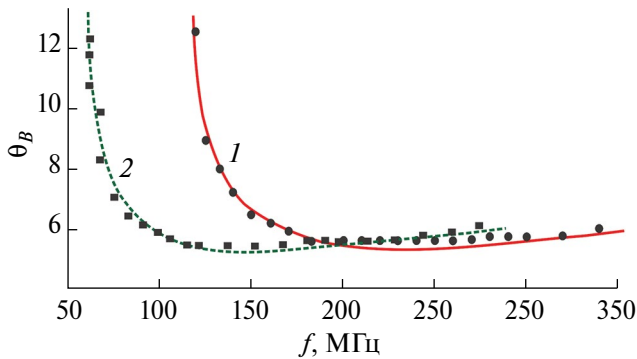


Рис. 3. Экспериментальные и теоретические зависимости угла падения света необыкновенной поляризованной оптической волны с длиной волны $\lambda = 0.633$ мкм (кривая 1) и $\lambda = 1.15$ мкм (кривая 2) от частоты ультразвука.

частоте пересекают акустический звуковой столб практически в одном и том же месте и под одним и тем же углом падения. Таким образом, достигается достоверная информация о мощности акустической волны, так как интенсивность дифрагированного света в линейном режиме работы АО ячейки (при малой эффективности дифракции) прямо пропорциональна управляющей мощности. Измеряя зависимость эффективности дифракции от частоты ультразвука, можно определить мощность акустической волны на каждой из оптических частот диапазона перестройки ячейки. Оценивая этот диапазон по уровню ослабления интенсивности дифрагированного света в 2 раза по сравнению с максимальным, определяем полосу Δf .

Выходной импеданс ВЧ генератора обычно заметно отличается от входного импеданса пьезопреобразователя, который, как правило, включает как активную, так и реактивную компоненту. Поэтому для получения эффективного возбуждения ультразвука в АО ячейке в широкой полосе частот приходится применять согласующие реактивные элементы: конденсаторы и катушки индуктивности. В нашей работе настройка системы осуществлялась с помощью векторного анализатора цепей фирмы Rohde&Schwarz отдельно для каждой длины волны оптического излучения.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АО ЯЧЕЙКИ

На рис. 4 пунктирной линией представлены результаты экспериментов, выполненных на разных длинах волн света: $\lambda_1 = 0.633$ мкм (рис. 4а) и $\lambda_2 = 1.15$ мкм (рис. 4б). Для удобства сравнения графиков по оси ординат отложены нормированные величины: P/P_m — для электрической мощности,

поглощаемой преобразователем, и I/I_m — для относительной эффективности дифракции.

Максимальная эффективность дифракции не превышала 5%, что обеспечивало условие слабого режима АО взаимодействия и, следовательно, линейную зависимость эффективности дифракции от акустической мощности. В обоих случаях ошибка измерений была порядка 3%.

Измерения, выполненные на разных длинах волн, позволили обнаружить общую закономерность: несовпадение результатов электрических и оптических измерений полосы АО взаимодействия, заметно превышающее ошибку измерений. При этом диапазон перестройки, измеренный оптическим методом, оказался уже по сравнению с тем, который был определен через параметр S_{11} электрическим методом, показанным на рис. 4 сплошной кривой. В частности, из рис. 4а следует, что по уровню 3 дБ диапазон перестройки ультразвука, на графике показанный сплошной линией, заключен в пределах от 75 до 250 МГц, если судить по поглощенной электрической мощности. Отсюда и из рис. 2 следует, что использованная ячейка должна была обеспечить фильтрацию изображений в спектральном диапазоне от 1000 до 400 нм, т.е. в полосе $\Delta\lambda = 600$ нм.

Однако измерение диапазона перестройки оптическим методом показало другой результат: от 120 до 240 МГц, что дает диапазон перестройки фильтра от 650 до 300 нм с шириной $\Delta\lambda = 350$ нм, т.е. в 1.5 раза меньше.

Аналогичный результат был получен при измерениях в ИК диапазоне (рис. 4б). В этом случае, в соответствии с рис. 3, пришлось заменить согласующие элементы преобразователя, чтобы сдвинуть полосу эффективного возбуждения ультразвука в более низкий частотный диапазон. Вследствие этого изменилась форма частотных характеристик. Однако обнаруженное в работе несоответствие частотных характеристик, измеренных оптическим и ВЧ методами, проявилось с той же тенденцией: электрические измерения дали более широкую полосу возбуждения ультразвука по сравнению с оптическим методом. Как следует из графиков, в первом варианте $\Delta f = 120$ МГц, а во втором — $\Delta f = 135$ МГц.

Несовпадение результатов электрических и оптических измерений указывает на то, что электрическая энергия от ВЧ генератора высокой частоты не преобразуется полностью в энергию акустического пучка, особенно на краях частотного диапазона. Причины потерь весьма разнообразны: влияние паразитных параметров электрической цепи (емкостей и индуктивностей), затухания звука, возбуждение паразитных акустических мод и др. Особо следует отметить влияние на АО дифракцию неоднородности акустического

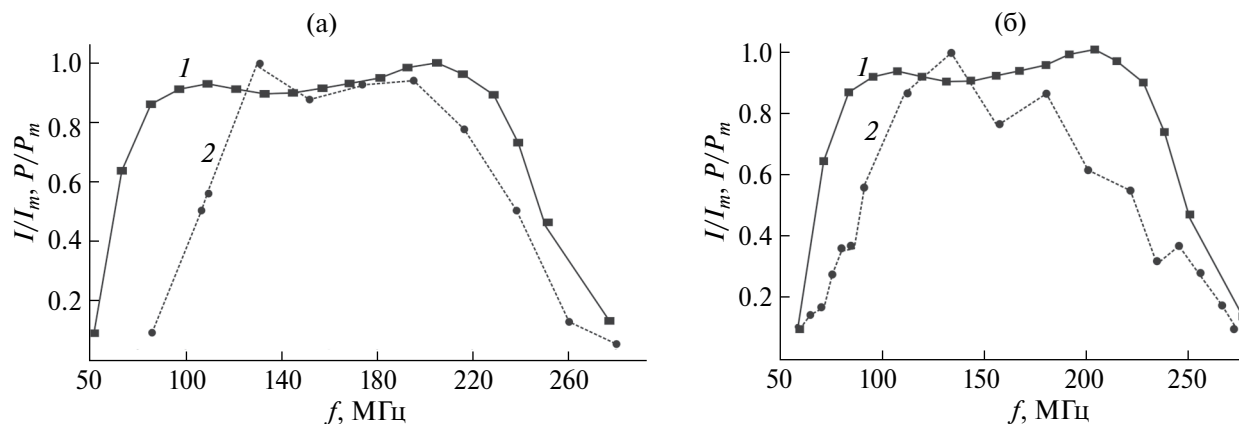


Рис. 4. Частотная зависимость поглощенной ВЧ мощности в тракте генератор—пьезопреобразователь (кривая 1), зависимость эффективности дифракции от частоты ультразвука (кривая 2) для длины волны (а) — $\lambda = 1.15$ мкм и (б) — $\lambda = 0.633$ мкм.

поля. Световой пучок при АО взаимодействии пропускается через ближнюю зону дифракции акустического пучка, где присутствует большая как амплитудная, так и фазовая неоднородность акустического поля [34]. При этом амплитудная неоднородность лишь уменьшает эффективность дифракции, тогда как фазовая неоднородность дополнительно искажает форму акустического волнового фронта. Все эти обстоятельства следует учитывать при изготовлении АО приборов. Для получения максимально достоверных результатов по частотным характеристикам АО ячеек следует ориентироваться на результаты оптического тестирования, тогда как электрические измерения рассматривать лишь как предварительные.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе измерена частотная зависимость электрической мощности, поглощаемой нагрузкой в тракте генератор—преобразователь. Показано, что частотный диапазон работы преобразователя равен 75–250 МГц. При акустооптических измерениях эффективности дифракции в зависимости от частоты ультразвука, проводимых в режиме дефлектора, показано, что акустическая мощность в ячейке эффективно возбуждается в диапазоне частот 90–225 МГц. Это означает, что реальный диапазон настройки фильтра по оптическим длинам волн оказывается в 1.5 раза меньше в сравнении с результатами электрических измерений. Наиболее вероятными причинами обнаруженного несоответствия результатов электрических и оптических измерений являются нагрев кристалла, возбуждение нежелательных акустических мод, потери на излучение электромагнитной энергии в пространство и потери энергии в цепи электрического согласования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (гранта № 19-19-00606).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балакий В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985.
2. Xu J., Stroud R. Acousto-optic devices: Principles, design and applications. New York: John Wiley, 1992.
3. Goutzoulis A., Pape D. Design and fabrication of acousto-optic devices. New York: Marcel Dekker, 1994.
4. Ярув А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. М.: Мир 1987.
5. Gupta N. Acousto-Optics, in Optical Engineer's Desk Reference, ed. W. Wolfe, (Optical Society of America, Washington D.C., 2003).
6. Chang C. Tunable acousto-optic filters: an overview / Eds Houston J.B. in Acousto-Optics: Device Development/Instrumentation/Applications. Proc. SPIE. 1976. V. 90. P. 12–22.
7. Voloshinov V.B. Close to collinear acousto-optical interaction in paratellurite // Opt. Eng. 1992. V. 31. № 10. P. 2089–2094.
8. Пожар В.Э., Пустовойт В.И. Возможности создания новых систем видения на основе акустооптических видеоспектрометров // Радиотех. и электрон. 1996. Т. 41. № 10. С. 1272–1278.
9. Sapriel J., Charissoux D., Voloshinov V., Molchanov V. Tunable acousto-optic filters and equalizers for WDM applications // J. Lightwave Techn. 2002. V. 20. № 5. P. 892–899.
10. Gupta N., Voloshinov V. Development and characterization of two-transducer imaging acousto-optic tunable filters with extended tuning range // Appl. Opt. 2007. V. 46. № 7. P. 1081–1088.

11. *Polikarpova N.V., Pozhar V.E.* Frequency Range of Operation of the Piezoelectric Transducer of the Acousto-Optic Filter // 2022 Int. Conf. on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT), Astrakhan, Russian Federation. 2022. P. 1–4.
12. *Антонов С.Н., Резвов Ю.Г.* Акустооптическая дифракция в ультразвуковом поле профилированного по ширине преобразователя // Акуст. журн. 2022. Т. 68. С. 270–277.
13. *Котов В.М.* Акустооптический расщепитель-вращатель плоскости поляризации двухцветного излучения // Акуст. журн. 2022. Т. 68. С. 14–21.
14. *Антонов С.Н., Резвов Ю.Г.* Акустооптический поляризационно-нечувствительный двухкоординатный дефлектор // Акуст. журн. 2021. Т. 67. С. 138–144.
15. *Антонов С.Н.* Широкоугольный поляризационно-независимый акустооптический модулятор лазерного излучения на основе парателлурита // Акуст. журн. 2020. Т. 66. С. 8–15.
16. *Котов В.М.* Широкополосная акустооптическая модуляция оптического излучения // Акуст. журн. 2019. Т. 65. С. 471–476.
17. *Проклов В.В., Резвов Ю.Г., Подольский В.А.* Теория акустооптической фильтрации излучения в многочастотном акустическом поле в ближней зоне плоского пьезоэлектрического преобразователя // Акуст. журн. 2018. Т. 64. С. 669–675.
18. *Магдич Л.Н., Балакий В.И., Манцевич С.Н.* Электронная перестройка частоты акустооптического синхронизатора мод лазера // Акуст. журн. 2017. Т. 63. С. 606–613.
19. *Котов В.М.* Акустооптическая брэгговская дифракция в парателлурите на боковых лепестках пространственного спектра излучения акустического преобразователя // Акуст. журн. 2016. Т. 62. С. 525–530.
20. *Котов В.М.* Брэгговская дифракция трехцветного излучения в кристалле парателлурита // Акуст. журн. 2015. Т. 61. С. 701–704.
21. *Поликарпова Н.В., Мальнева П.В., Волошинов В.Б.* Анизотропия упругих волн в кристалле теллура // Акуст. журн. 2013. Т. 59. С. 332–338.
22. *Дьяконов Е.А., Волошинов В.Б., Поликарпова Н.В.* Акустооптическое исследование необычных случаев отражения объемных упругих волн в кристалле парателлурита // Акуст. журн. 2012. Т. 58. С. 121–131.
23. *Волошинов В.Б., Поликарпова Н.В., Можжаев В.Г.* Близкое к обратному отражение объемных акустических волн при скользящем падении в кристалле парателлурита // Акуст. журн. 2006. Т. 52. С. 297–305.
24. *Suhre D.R., Gottlieb M., Taylor R., Melamed N.T.* Spatial resolution of imaging non-collinear acousto-optic filters // Opt. Eng. 1993. V. 43. P. 2118–2121.
25. *Dekemper E., Fussen D., Opstal B. Van, Vanhamel J., Pieroux D., Vanhellemont F., Matashvili N., Franssens G., Voloshinov V., Janssen C., Elandalousi H.* ALTIUS: a spaceborne AOTF-based UV-VIS-NIR hyperspectral imager for atmospheric remote sensing // Proc. SPIE. 2014. V. 9241. P. 92410L.
26. *Dekemper E., Loodts N., Opstal B. Van, Maes J., Vanhellemont F., Matashvili N., Franssens G., Pieroux D., Bingen C., Robert C., Devos L., Aballea L., Fussen D.* Tunable acousto-optic spectral imager for atmospheric composition measurements in the visible spectral domain // Appl. Opt. 2012. V. 51. P. 6259–6267.
27. *Glenar D.A., Hillman J.J., Saif B., Bergstrahl J.* Acousto-optic imaging spectropolarimetry for remote sensing // Appl. Opt. 1994. V. 33. P. 7412–7424.
28. *Cheng L.J., Mahone J.C., Reyes G.F., Suiter H.R.* Target detection using an AOTF hyperspectral imager / Eds Casasent D.P. and Chao D. in Optical Pattern Recognition V. Proc. SPIE. 1994. V. 2237. P. 251–258.
29. *Voloshinov V.B., Molchanov V.Ya., Mosquera J.C.* Spectral and polarization analysis of optical images by means of acousto-optics // Optics and Laser Tech. 1996. V. 28. P. 119–127.
30. *Tang G.C., Chen J.T., Katz A., Celmer E.J., Krumm R.W., Alfano R.R.* Ultraviolet visible acousto-optic tunable spectroscopic imager for medical diagnostics // J. Biomed. Opt. 1998. V. 3. P. 80–84.
31. *Voloshinov V.B.* Imaging experiments based on application of non-collinear tunable acousto-optic filters / Eds Mericsko R.J. in 27-th AIPR Workshop: Advances in Computer-Assisted Recognition. Proc. SPIE. 1998. V. 3584. P. 116–127.
32. *Voloshinov V.B., Gupta N.* Investigation of magnesium fluoride crystals for imaging acousto-optic tunable filter applications // Appl. Opt. 2006. V. 45. P. 3127–3135.
33. *Gupta N.* Acousto-optic tunable filters for Infrared Imaging in Acousto-optics and Photoacoustics / Eds Reibold R. Proc SPIE. 2005. V. 5953. Art. 59530O 1–10.
34. *Mosquera J.C., Voloshinov V.B.* Wide-Aperture Acousto-Optic Interaction in Birefringent Crystals // Optics and Spectroscopy. 2006. V. 101. № 4. P. 675–682.
35. *Georgiev G.D., Glenar D.A., Hillman J.J.* Spectral characterization of tunable acousto-optic filters used in imaging spectroscopy // Appl. Opt. 2002. V. 41. P. 209–217.
36. *Gupta N., Voloshinov V.* Hyperspectral imager, from ultraviolet to visible, with a KDP acousto-optic tunable filter // Appl. Opt. 2004. V. 43. P. 2752–2759.
37. *Voloshinov V., Gupta N.* Ultraviolet-visible imaging acousto-optic tunable filters in KDP // Appl. Opt. 2004. V. 43. P. 3901–3909.
38. *Belikov B., Bouimistryuk G.Ya., Voloshinov V.B., Magdich L.N., Mitkin M.I., Parygin V.N.* Acousto-optic filtration of images // Tech. Phys. Lett. 1984. V. 10. P. 1225–1229.

39. *Voloshinov V.B., Yushkov K.B., Linde B.* Improvement in performance of TeO₂ acousto-optic imaging spectrometer // *J. of Optics A: Pure and Appl. Opt.* 2007. V. 9. № 4. P. 341–347.
40. *Korpe A., Adler R., Desmares P., Watson W.* A television display using acoustic deflection and modulation of coherent light // *Proc. IEEE.* 1966. V. 54. № 10. P. 1429–1437.
41. *Coquin G.A., Griffin J.P., Anderson L.K.* Wide-band acousto-optic deflectors using acoustic beam steering // *IEEE Trans. Son. Ultrason.* 1970. V. SU–17. № 1. P. 34–40.
42. *Balakshy V., Kupreychik M., Mantsevich S., Molchanov V.* Acousto-optic cells with phased-array transducers and their application in systems of optical information processing // *Materials.* 2021. V. 14. № 2. Art. 451. P. 1–12.
43. *Манцевич С.Н., Балакший В.И.* Акустооптическое взаимодействие в неоднородном акустическом поле // *Оптика и спектроскопия.* 2015. Т. 118. № 4. С. 646–652.
44. *Voloshinov V.B.* Anisotropic light diffraction on ultrasound in tellurium dioxide single crystal // *Ultrasound.* 1993. V. 31. P. 333–338.
45. *Gupta N., Voloshinov V.B.* Hyperspectral imaging performance of a TeO₂ imaging acousto-optic tunable filter in the ultraviolet region // *Optics Lett.* 2005. V. 30. P. 985–987.
46. *Gupta N.* Fiber-couple AOTF Spectrometers / Eds Gannot I. in *Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics and Treatment Applications VI.* Proc. SPIE. 2006. V. 6083. Art. 60830U 1–12.
47. *Gupta N., Dahmani R., and Choy S.* Acousto-optic tunable filter based visible-to near-infrared spectropolarimetric imager // *Opt. Eng.* 2002. V. 41. P. 1033–1038.
48. *Gupta N., Suhre D.R., and Gottlieb M.* LWIR spectral imager with an 8-cm⁻¹ passband acousto-optic tunable filter // *Opt. Eng.* 2005. V. 44. Art. 094601 1–7.
49. *Belikov B., Voloshinov V.B., Kasyanov A.B., Parygin V.N.* Broadband matching of an Acousto-optical-cell transducer using Youla's complex normalization theory // *Radioelectron. Commun. Sys.* 1988. V. 31. P. 28–33.
50. *Chen W.K., Satyanarayana C.* General theory of broadband matching // *IEEE Proc.* 1982. V. 29. P. 96–102.
51. *Zha Q.Z., Chen W.K.* Broad-band impedance matching of the RLC generator and load // *J. Franklin Inst.* 1991. V. 328. P. 317–337.
52. *Vanhamel J., Dekemper E., Voloshinov V., Neefs E., Didier F.* Electrical bandwidth testing of an AOTF transducer as a function of the optical diffraction efficiency // *J. Opt. Soc. Am.* 2019. V. 36. № 8. P. 1361–1366.

Study of the Frequency Range of Operation of a Piezoelectric Converter Acoustooptical Filter Using Electrical and Optical Methods

N. V. Polikarpova^{1, 2, *}, V. E. Pozhar²

¹*Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Faculty of Physics,
Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russia*

²*Scientific and technological center for unique instrument making of the Russian Academy of Sciences,
st. Butlerova, 15, Moscow, 117342 Russia*

*e-mail: polikarpnv@yandex.ru

The acousto-optical characteristics of a paratellurite crystal with a cut angle $\alpha = 10.2^\circ$ have been studied theoretically and experimentally. The crystal is used in an acousto-optical filter for processing optical images in visible and infrared light. The electrical tuning range of the filter was experimentally determined based on the frequency dependence of the power absorbed by the piezoelectric filter transducer. Estimates of the filter tuning range based on optical wavelengths have been made. At light wavelengths $\lambda = 1.15$ and $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$, the dependences of the Bragg angle of incidence on the ultrasound frequency were calculated. When measuring the diffraction efficiency in the deflector operating mode, it was found that the tuning range of the filter over optical wavelengths turns out to be different from that predicted by measuring the electrical characteristics of the converter and becomes narrower.

Keywords: acousto-optics, paratellurite, acousto-optical filter, piezoelectric transducer, frequency range