

УДК 535.55:681.78

СПЕКТРАЛЬНО-ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ АКУСТООПТИЧЕСКАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КРИСТАЛЛЕ БРОМИДА РТУТИ

© 2022 г. Е. А. Дьяконов¹, *, Д. Л. Пороховниченко¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, Москва, Россия

*E-mail: ead1989@gmail.com

Поступила в редакцию 24.08.2021 г.

После доработки 06.09.2021 г.

Принята к публикации 22.09.2021 г.

Проведено исследование широкоугольной геометрии акустооптического взаимодействия в кристалле бромида ртути. Найдены условия, при которых возможна одновременная дифракция обеих собственных мод кристалла в противоположные порядки дифракции. Показано, что геометрия взаимодействия остается неизменной в спектральном диапазоне 3–30 мкм. Полученные результаты позволяют создать акустооптический фильтр инфракрасного излучения с произвольной поляризацией.

DOI: 10.31857/S0367676522010100

ВВЕДЕНИЕ

Широкоугольный акустооптический фильтр представляет собой устройство, позволяющее выделять из оптического изображения заданную спектральную компоненту. Как и другие акустооптические устройства, он действует по принципу дифракции света на ультразвуке. Длина волны излучения, выделяемая фильтром, регулируется путем изменения частоты ультразвука. Сравнительно широкое угловое поле зрения, давшее название устройству и составляющее единицы или десятки угловых градусов, позволяет обрабатывать неколлимированные пучки и оптические изображения, что является важным свойством в ряде прикладных задач.

Акустооптические фильтры, основанные на кристалле парателлурида TeO_2 , давно известны и применяются [1]. Однако парателлурит прозрачен лишь в спектральной области от 0.33 до 5 мкм. Для работы на больших длинах волн необходимо искать другие материалы, которые сочетали бы прозрачность в необходимой области спектра с хорошими акустооптическими свойствами. В этом отношении интересны кристаллы моногалогенидов ртути Hg_2X_2 ($\text{X} = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$). Они обладают широким диапазоном прозрачности от видимого излучения до длин волн около 20, 30 и 40 мкм соответственно, а также высокими коэффициентами акустооптического качества M_2 [2]. Кроме того, эти кристаллы также являются оптически анизотропными, что позволяет применить

в них известную схему акустооптического фильтра лишь с небольшими изменениями [3–7].

Возможность создания широкоугольного акустооптического фильтра на основе бромида ртути Hg_2Br_2 была обоснована в работе [7]. Там рассматривалась обычная схема акустооптического фильтра [1], которая требует линейно поляризованного излучения, соответствующего одной из собственных волн кристалла. Это создает сложности при работе с неполяризованным или частично поляризованным излучением от тепловых источников, что особенно актуально в инфракрасной области спектра. Однако существует и более совершенная, спектрально-поляризационная схема акустооптического фильтра, при которой входное излучение может иметь произвольное состояние поляризации. В кристалле это излучение распадается на две собственные моды, линейно поляризованные во взаимно ортогональных направлениях. Геометрия взаимодействия подобрана так, что условие брэгговского синхронизма выполняется одновременно для обеих собственных мод кристалла, но при этом они отклоняются в противоположные порядки дифракции. Это позволяет анализировать одновременно спектральную и поляризационную структуру оптического пучка. Известна реализация спектрально-поляризационной схемы акустооптического фильтра в кристалле парателлурида [8]. Целью настоящей работы стало исследование подобной же геометрии взаимодействия в кристалле бромида ртути.

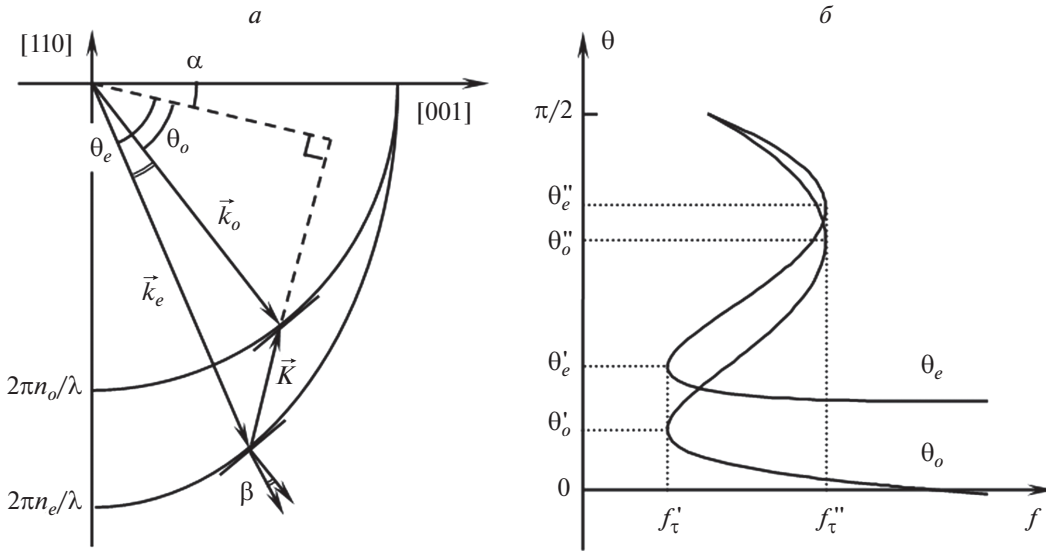


Рис. 1. Векторная диаграмма (а) и угло-частотная характеристика (б) широкоугольной дифракции.

ГЕОМЕТРИЯ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

На рис. 1а показана векторная диаграмма, которая иллюстрирует взаимную ориентацию волновых векторов взаимодействующих волн в широкоугольном режиме дифракции. Брэгговский синхронизм соответствует замыканию векторного треугольника, состоящего из волновых векторов обыкновенной волны \vec{k}_o , необыкновенной волны \vec{k}_e и ультразвука \vec{K} , причем взаимодействие сопровождается сменой поляризации излучения. Иначе говоря, если обыкновенная волна падает под углом θ_o , то имеет место дифракция в -1 -й порядок под углом θ_e . А если необыкновенная волна падает под углом θ_e , то имеет место дифракция в $+1$ -й порядок под углом θ_o . Условием широкоугольной геометрии является независимость частоты брэгговского синхронизма f от углов падения и дифракции:

$$\partial f / \partial \theta_o = 0, \quad \partial f / \partial \theta_e = 0. \quad (1)$$

Это условие позволяет применять акустооптическое устройство для обработки неколлимированных пучков излучения и оптических изображений. Графически оно соответствует тому, что касательные к волновым поверхностям взаимодействующих волн параллельны между собой.

Углы θ_o , θ_e и частота брэгговского синхронизма f связаны между собой зависимостью, которая называется угло-частотной характеристикой:

$$f = \frac{V(\alpha)}{\lambda} \left(n_i(\theta_e, \alpha) \sin \theta_e \pm \sqrt{n_o^2 - n_i^2(\theta_e, \alpha) \cos^2 \theta_e} \right), \quad (2)$$

$$n_o \cos \theta_o = n_i(\theta_e, \alpha) \cos \theta_e,$$

где λ — длина волны излучения, а угол α определяет направление распространения ультразвука (рис. 1а). Показатель преломления необыкновенной волны n_i зависит от направления распространения, а обыкновенной — является неизменным и равен n_o . Зависимость скорости звука V от направления определяется кристаллографической плоскостью, в которой происходит взаимодействие. В свою очередь, эта плоскость (лежащая в плоскости чертежа рис. 1а) выбирается из условия максимального акустооптического качества. В работе [6] показано, что в кристалле бромида ртути оптимальные условия взаимодействия получаются в плоскости (110), в отличие от кристалла парателлурита, где применяется плоскость (100). Графики угло-частотных зависимостей при фиксированном направлении распространения ультразвука показаны на рис. 1б. Как видно, условие (1) может быть выполнено в двух различных геометриях взаимодействия, одна из которых определяется углами θ'_o , θ'_e и частотой f'_τ , а другая — углами θ''_o , θ''_e и частотой f''_τ . Все эти величины зависят от угла среза кристалла α .

Если добиться выполнения дополнительных условий

$$\theta'_e = \theta''_o = \theta_i, \quad f'_\tau = f''_\tau = f_\tau, \quad (3)$$

то при падении излучения под углом θ_i дифракция будет наблюдаться вне зависимости от его поляризации. Действительно, падающее излучение в любом случае распадется на две собственных волны кристалла, одна из которых испытает дифракцию в $+1$ -й порядок, а другая — в -1 -й, как показано на рис. 2а. По соотношению интен-

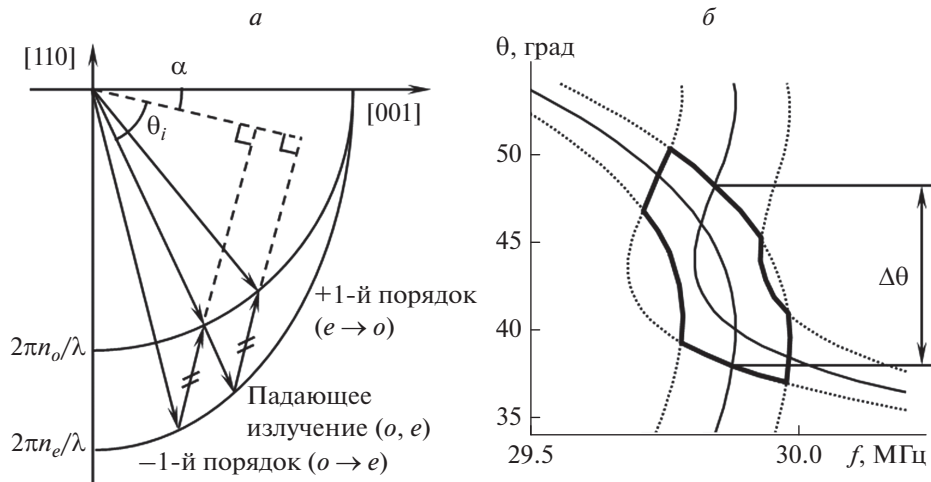


Рис. 2. Векторная диаграмма (а) и угло-частотная характеристика (б) спектрально-поляризационного фильтра.

сивностей излучения, отклоненного в оба порядка, можно судить о поляризации излучения на входе фильтра [8]. Сложность реализации спектрально-поляризационной геометрии заключается в том, чтобы добиться одновременного выполнения обоих условий (3).

ВЫБОР УГЛА СРЕЗА КРИСТАЛЛА

Как показано в работе [8], в кристалле параллелирита существует угол среза α , при котором угло-частотные характеристики для обеих собственных волн имеют совпадающий участок широкоугольной геометрии, который и может использоваться в спектрально-поляризационном фильтре. Однако в бромиде ртути аналогичной конфигурации угло-частотных характеристик не наблюдается ни при каком угле среза кристалла. В этом можно убедиться, если варьировать угол среза α в выражении (2) и построить серию угло-частотных характеристик для различных значений данного параметра. Вместе с тем, известно, что акустооптическое взаимодействие имеет место не только при точном выполнении условия брэгговского синхронизма, но и в некоторой конечной области частот и углов падения вблизи этого условия. Можно показать, что эта область в $f - \theta$ пространстве ограничена характеристиками (2), соответствующими углам среза $\alpha \pm \Delta\alpha/2$, где $\Delta\alpha = 0.89V/fl$ – ширина углового спектра ультразвука, определяемая в свою очередь размером пьезоэлемента l . Таким образом, для одновременной дифракции обеих собственных волн кристалла не требуется точного совпадения угло-частотных характеристик, а достаточно перекрытия областей синхронизма вблизи них.

Совпадение углов θ'_e и θ''_o в бромиде ртути достигается при угле среза, равном $\alpha = 16.5^\circ$, при этом разница частот брэгговского синхронизма

для обеих собственных волн составляет величину $f''_o - f'_e = 1.1$ МГц при $\lambda = 10$ мкм и обратно пропорциональна длине волны. При увеличении угла среза до $\alpha = 16.8^\circ$ эти частоты совпадают, однако соответствующие углы падения отличаются на $\theta'_e - \theta''_o = 8^\circ$. Отсюда получаются пределы оптимальных углов среза для спектрально-поляризационной геометрии. Дальнейшие расчеты проведены исходя из промежуточного значения $\alpha = 16.6^\circ$.

На рис. 2б представлены угло-частотные зависимости для двух поляризаций падающего излучения. Длина волны излучения принята равной $\lambda = 10$ мкм. Пунктирными линиями показаны границы области брэгговского синхронизма при длине пьезоэлемента $l = 5$ мм. В области, обведенной жирной линией, возможна одновременная дифракция обеих собственных мод кристалла в различные порядки. Частотный диапазон дифракции Δf определяется обычным образом [7] и оказывается различным для двух направлений поляризации излучения. Разрешающая способность акустооптического фильтра $R = \lambda/\Delta\lambda = f/\Delta f$ ограничена диапазоном Δf для +1-го порядка дифракции, более широким, чем для –1-го. Угловая апертура $\Delta\theta$ определяется иначе, чем для обычного акустооптического фильтра. Она ограничена не только совпадением обеих областей брэгговского синхронизма, но и пространственным перекрытием соседних дифракционных порядков [8]. Последний фактор не позволяет достичь угловой апертуры более $\Delta\theta_{\text{макс}} = 12.5^\circ$ в данной геометрии взаимодействия.

ХАРАКТЕРИСТИКИ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА

Важной особенностью кристалла бромиде ртути является слабая дисперсия показателя прелом-

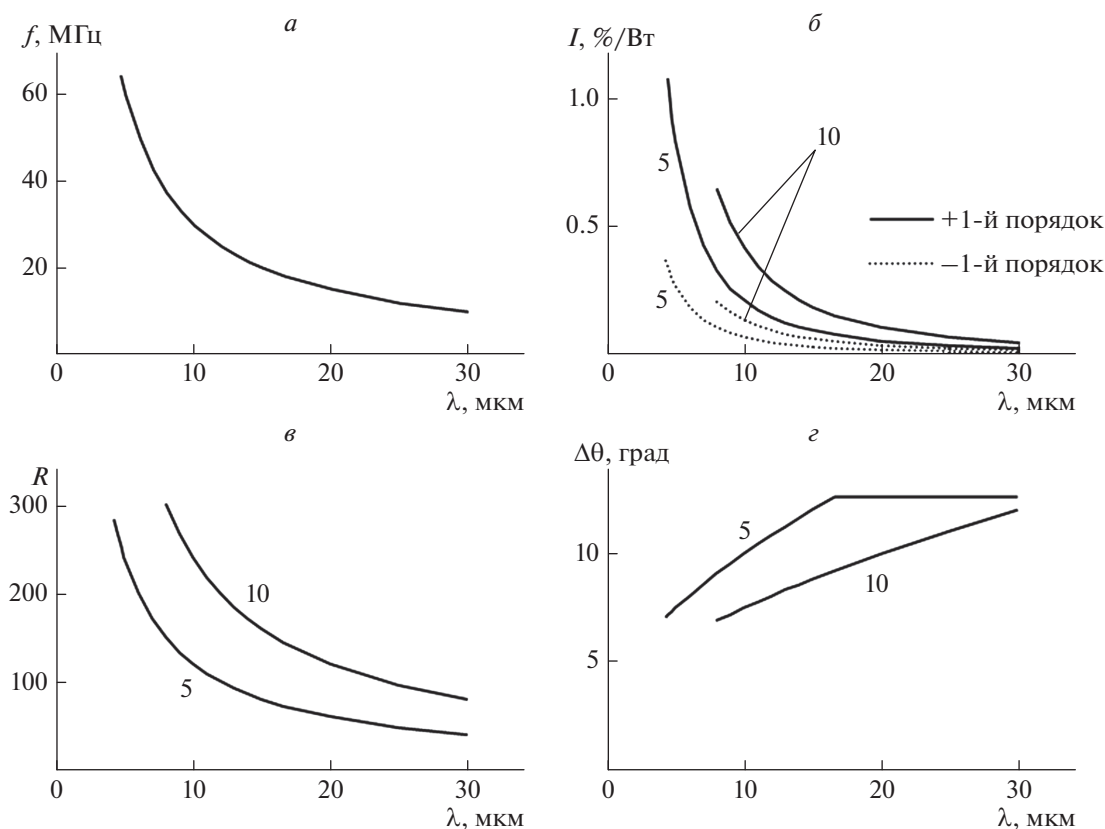


Рис. 3. Кривая перестройки (а), эффективность дифракции (б), разрешающая способность (в) и угловая апертура (г) спектрально-поляризационного фильтра в зависимости от длины волны. Цифры возле кривых соответствуют размеру пьезоэлемента l в миллиметрах.

ления на длинах волн $\lambda = 3\text{--}30$ мкм [9], в результате чего геометрия взаимодействия не зависит от длины волны излучения. Это обстоятельство выгодно отличает бромид ртути от большинства акустооптических материалов, в том числе парателлуриата, в которых приходится принимать специальные меры по компенсации дисперсии (наклон выходной грани и т.п.). Такая компенсация становится особенно сложной в случае спектрально-поляризационного фильтра, когда ее необходимо применять одновременно к двум волнам, распространяющимся под углом друг к другу и имеющим различные законы дисперсии показателя преломления [8].

Расчетные зависимости основных параметров акустооптического взаимодействия от длины волны показаны на рис. 3. Коэффициенты акустооптического качества кристалла вычислялись по методике, описанной в работе [7]. Угловая апертура $\Delta\theta$ приведена внутри кристалла; вне кристалла она будет больше, пропорционально показателю преломления. Расчеты проведены для двух продольных размеров пьезоэлемента l , равных 5 и 10 мм, а его поперечный размер считается равным $d = 8$ мм. Максимальный размер l ограничен тем, что с его

увеличением области синхронизма в коротковолновом краю диапазона становятся слишком узкими и перестают перекрываться. Следует отметить, что полное использование всего спектрального диапазона $\lambda = 3\text{--}30$ мкм в одном устройстве невозможно из-за ограниченной частотной полосы пьезоэлемента. При разработке акустооптического фильтра для какой-либо конкретной задачи можно выбрать любой диапазон перестройки в пределах этого интервала без изменения геометрии кристалла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для создания акустооптических устройств, работающих в инфракрасной области спектра, необходим поиск и исследование новых акустооптических материалов. Одним из таких материалов является кристалл бромида ртути, пригодный для реализации широкоугольной геометрии акустооптического взаимодействия. В настоящей работе проведено исследование спектрально-поляризационного режима взаимодействия, позволяющего одновременно анализировать не только спектральный состав излучения, но и его поляри-

зацию. Как показывают результаты работы, надлежащий выбор угла среза кристалла позволяет достичь одновременной дифракции обеих собственных мод кристалла в противоположные дифракционные порядки. Важно, что режим дифракции при этом остается широкоугольным, что дает возможность обрабатывать неколлимированные пучки или оптические изображения. Кроме того, кристалл бромида ртути обладает достаточно слабой дисперсией показателя преломления в спектральном диапазоне 3–30 мкм. Поэтому геометрия акустооптического взаимодействия оказывается независимой от длины волны излучения, что значительно упрощает расчет и применение акустооптического фильтра.

Практическая значимость работы определяется возможностью использовать ее результаты при разработке акустооптических устройств на длинах волн вплоть до 30 мкм, в настоящее время еще не освоенных в акустооптике.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-12-00072).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bass M. Handbook of optics. V. 2. Ch. 12. N.Y.: McGraw Hill, 1995.
2. Barta C., Barta C. Jr. // Mat. Sci. Forum. 1990. V. 61. P. 93.
3. Knuteson D.J., Singh N.B., Gottlieb M. et al. // Opt. Engin. 2007. V. 46. No. 6. Art. No. 064001.
4. Amarsinghe P.M., Kim J.S., Trivedi S. et al. // Proc. SPIE. 2017. V. 10404. Art. No. 104040T.
5. Pierson A., Philippe C. // Proc. SPIE. 2019. V. 11180. Art. No. 1118064.
6. Porokhovnichenko D.L., Ryu J., Zinkin D.V., Voloshinov V.B. // Proc. SPIE. 2019. V. 11210. Art. No. 112100M.
7. Dyakonov E.A., Porokhovnichenko D.L., Ryu J., Balakshy V.I. // Appl. Opt. 2021. V. 60. No. 8. P. 2348.
8. Voloshinov V.B., Mosquera J.C. // Opt. Laser. Technol. 1996. V. 28. No. 2. P. 119.
9. Porokhovnichenko D.L., Dyakonov E.A., Ryu J., Balakshy V.I. // Opt. Engin. 2021. V. 60. No. 2. Art. No. 020501.

Spectral-polarization acousto-optic filtering of infrared radiation in mercury bromide crystal

E. A. Dyakonov^{a, *}, D. L. Porokhovnichenko^a

^a Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: ead1989@gmail.com

We investigated the wide-angle geometry of acousto-optic interaction in a mercury bromide crystal. The conditions of simultaneous diffraction of both eigenmodes of the crystal into opposite diffraction orders are found. It is shown that the geometry of the interaction remains unchanged in the spectral range of 3–30 μm. The obtained results make it possible to create an acousto-optical filter for infrared radiation with arbitrary polarization.