

УДК 534.8

Н. В. Поликарпова*

кандидат физико-математических наук, доцент

М. В. Марунин*

аспирант

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

НЕВЗАИМНОЕ ОТРАЖЕНИЕ УПРУГИХ ВОЛН ОТ СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЫ В КРИСТАЛЛЕ ПАРАТЕЛЛУРИТА

Одно из наиболее востребованных применений акустооптики связано с проектированием новых устройств для управления оптическими лучами с помощью ультразвука. Рабочие параметры акустооптических устройств определяются геометрией упругих волн, распространяющихся в кристаллах. Многочисленные приложения используют уникальные геометрические и физические свойства ультразвуковых волн в кристалле парателлурита. Последний обладает чрезвычайно сильной анизотропией упругих свойств и крайне низкой скоростью звука вдоль отдельных направлений. Исследования сосредоточены на конфигурациях упругих волн с обратным отражением, при котором необходимая акустическая волна индуцируется в обратном направлении в результате сложения двух волн. Показано, что при обратном отражении возбуждается дополнительная волна, которая может быть исключена правильным сочетанием фаз двух исходных мод. Исследованы все характеристики волн, включая их направления, поляризацию и углы сноса, а также рассчитаны коэффициенты отражения. Доказано, что, хотя геометрия отражения при не взаимном отражении несимметрична, для потоков энергии выполняется условие взаимности, что позволяет создать устройство со сложением акустических пучков.

Ключевые слова: акустооптическое взаимодействие, анизотропия упругих свойств, парателлурит.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-12-00057.

N. V. Polikarpova*

PhD, Phys.-Math., Associate Professor

M. V. Marunin*

PhD Student

*M. V. Lomonosov Moscow State University

NONRECIPROCAL REFLECTION OF ELASTIC WAVES FROM A FREE BOUNDARY IN A PARATELLURITE CRYSTAL

One of the most popular applications of acousto-optics is related with the design of new devices for controlling optical beams using ultrasound. The operating parameters of acousto-optic devices are determined by the geometry of elastic waves propagating in crystals. Numerous applications exploit the unique geometric and physical properties of ultrasonic waves in a paratellurite crystal. The latter has an extremely strong anisotropy of elastic properties and an extremely low speed of sound along certain directions. Research is focused on back-reflection elastic wave configurations, in which the desired acoustic wave is induced in the opposite direction as a result of the addition of two waves. It is shown that an additional wave is excited upon back reflection, which can be eliminated by a correct combination of the phases of the two initial modes. All characteristics of the waves, including their directions, polarization and drift angles, have been studied, and the reflection coefficients have

also been calculated. It has been proved that although the reflection geometry in nonreciprocal reflection is asymmetric, the reciprocity condition is satisfied for the energy fluxes, which makes it possible to create a device with the addition of acoustic beams.

Keywords: acousto-optic interaction, anisotropy, paratellurite.

Введение

Акустооптика исследует явление взаимодействия световых лучей с дифракционными решетками, индуцированными акустическими возмущениями. Наиболее востребованное практическое приложение акустооптики – создание новых устройств, позволяющих управлять световыми потоками с помощью ультразвука в среде [1–3]. Такие устройства дают возможность управлять направлением, интенсивностью и поляризацией электромагнитной волны.

Основные закономерности акустооптического взаимодействия обусловлены структурой акустического пучка, которая в свою очередь определяется степенью анизотропии используемого материала. В акустооптике используются материалы, обладающие физическими свойствами, отличными от традиционных материалов. Поэтому актуальным направлением исследований стало изучение характеристик акустических волн, распространяющихся в таких средах. Отличительная особенность материалов, используемых в акустооптике, состоит в сильной анизотропии упругих свойств, вследствие чего в кристаллах могут происходить необычные физические процессы и явления, не наблюдающиеся в изотропных и слабо анизотропных средах [1–3].

Акустическая анизотропия материала проявляется в сильной зависимости фазовой скорости волн от направления распространения в кристалле, а также приводит к отклонению направления распространения упругой энергии от направления распространения акустического волнового фронта. Известно, что направление групповой скорости волн в анизотропных средах в общем случае не совпадает с соответствующим направлением фазовой скорости [1–3]. В плоскости XY кристалла парателлурита (TeO_2) угол сноса между акустической групповой и фазовой скоростью достигает рекордной величины $\psi = 74^\circ$ [1–3]. Это значение угла акустического сноса является максимальным для всех известных материалов, используемых в настоящее время в науке и технике при комнатных температурах. Оказалось, что не только распространение, но и отражение упругих волн в анизотропных средах представляет большой интерес. Анализ отражения делает возможным существование ряда новых эффектов, которые нельзя наблюдать в изотропных материалах [1–3]. Известно, что ориентацию отраженных волн в анизотропной среде в зависимости от направления сложно предсказать, не выполнив точный расчет. Это приводит к тому, что направления отраженных волн, возникающих при возбуждении волн в обратном направлении, не совпадают с волнами, генерируемыми в прямом направлении.

Целесообразно рассмотреть, каким образом ведет себя волна на границе раздела двух изотропных сред (рис. 1, *a*). Известно, что в изотропной среде скорость акустической волны не зависит от направления распространения, поэтому поверхность обратных скоростей представляет собой окружность. Волновой век-

тор $\vec{k}_1$ исходной волны составляет угол падения θ_1 с нормалью к границе (рис. 1, а). Для того чтобы найти возможные отраженные и преломленные волны, необходимо выполнить условие равенства тангенциальных составляющих падающей, отраженной и преломленной волн. Можно обозначить проекцию волнового вектора $\vec{k}_1$ падающей волны как AO . Для нахождения отраженных и преломленных волн необходимо отложить вдоль границы отрезок $OB = AO$ и восстановить нормаль к границе до пересечения с поверхностями обратных скоростей. Полученные в результате построения волновые векторы $\vec{k}_2$ и $\vec{k}_3$ задают направления для одной отраженной и одной преломленной волн соответственно. В силу того, что поверхность обратных скоростей представляет собой окружность, угол падения равен углу отражения, поэтому $\theta_1 = \theta_2$.

Следующим шагом является возбуждение волны, с волновым вектором, равным по абсолютной величине вектору $\vec{k}_2$ и имеющим противоположное направление, т. е. направленной навстречу отраженной волне. Угол падения в этом случае выбирается равным углу отражения θ_2 . В результате прохождения волной границы формируется картина, изображенная на рис. 1, б. Можно видеть, что в случае возбуждения волны в обратном направлении угол отражения (рис. 1, б) равен углу падения волны θ_1 , под которым возбуждалась волна первоначально (рис. 1, а).

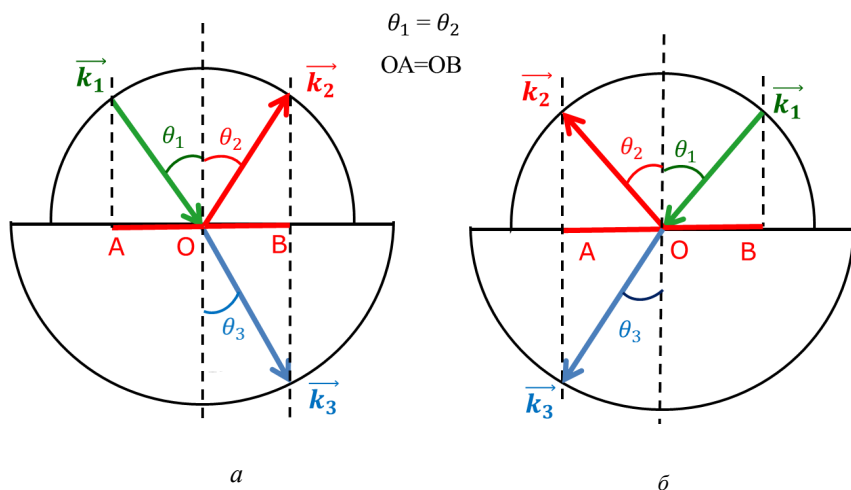


Рис. 1. Отражение и преломление упругих волн на границе раздела двух изотропных сред: а – прямое прохождение волной границы; б – обратное прохождение волной границы

Рисунок 1 демонстрирует полную симметрию поведения волн при распространении в прямом и обратном направлениях. То есть не важно, в каком

направлении возбуждается акустическая волна в рассматриваемом случае, поскольку амплитуды отраженных и преломленных волн, а также углы падения и преломления не изменяются. Это позволяет говорить о взаимном отражении и преломлении волн в изотропной среде.

Иначе происходит отражение волн в анизотропных средах. Для анализа был выбран кристалл парателлурита, как наиболее часто использующийся в акустооптических устройствах. Как было показано ранее, этот материал обладает рекордно высокой анизотропией упругих свойств, не наблюдающейся в других монокристаллах. Берется плоскость ХУ, поскольку она является самой анизотропной и в ней все явления ярче выражены. Рассмотрение случаев возбуждения волн в обратном направлении показывает, что не наблюдается взаимное отражение, как в изотропных материалах, в то время как энергия симметрично распределяется для различных случаев углов падения и наклона границы относительно кристаллофизических осей.

Таким образом, описанный случай отражения показал, что, в отличие от изотропной среды, в анизотропном материале направления отраженных волн лишь частично совпадают с первоначальной картиной, что говорит о невязимности акустического отражения в анизотропной среде. С другой стороны, симметрия наблюдается для коэффициентов отражения упругих волн. Подобное невязимное отражение может быть использовано для создания устройства на основе двух преобразователей (рис. 2), возбуждающих одну моду посредством разных геометрий отражения.

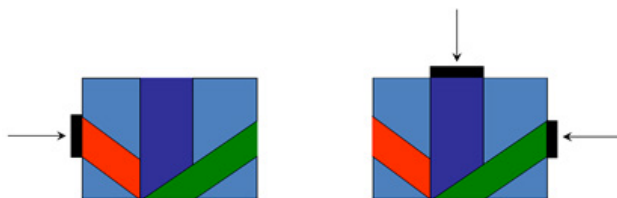


Рис. 2. Устройство на основе двух преобразователей, возбуждающих одну моду посредством разных геометрий

Библиографический список

1. Voloshinov V. B., Polikarpova N. V. Application of Acousto-Optic Interactions in Anisotropic Media for Control of Light Radiation // *Acustica-Acta Acustica*. 2003. Vol. 89. P. 930–935.
2. Волошинов В. Б., Поликарпова Н. В., Можаяев В. Г. Близкое к обратному отражение объемных акустических волн при скользящем падении в кристалле парателлурита // *Акустический журнал*. 2006. Т. 52, № 3. С. 1–9.
3. Polikarpova N. V., Voloshinov V. B., Ivanova P. A. Nonreciprocal Reflection of Elastic Waves at Free Crystal Boundary // *IEEE Xplore Digital Library*, 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2019. P. 1–4.