

УДК 534.8

Н. В. Поликарпова*

кандидат физико-математических наук, доцент

Е. А. Дьяконов*

кандидат физико-математических наук

И. К. Чиж*

студент

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ В РАЗЛИЧНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ В КРИСТАЛЛЕ ПАРАТЕЛЛУРИТА

Представлены результаты исследования отражения объемной акустической волны в кристалле диоксида теллура. Исследованы многократные отражения акустических волн от двух свободных границ, разделяющих кристалл и вакуум. Для этого используется особая конфигурация кристалла в виде тетрагональной призмы с двумя параллельными и двумя взаимно наклоненными гранями. Пьезоэлектрический преобразователь генерирует квазипоперечную акустическую волну с углом сноса между акустической фазой и групповой скоростью, равным 74° . Исходная волна генерируется преобразователем при угле падения более 90° . Снос акустической энергии обеспечивает падение волны на наклонную границу кристалла. Падение сопровождается своеобразным ближним отражением собственной волны от наклонной грани. Доказано, что в плоскости (001) материала может распространяться до пяти медленных квазипоперечных акустических волн. Эти волны распространяются вдоль разных направлений, каждое из которых характеризуется определенным углом сноса. Рассчитаны и измерены параметры отраженных волн, такие как направления распространения, фазовые скорости и углы сноса, коэффициенты отражения и затухания. Все эти параметры определяются акустооптическими методами, включая шпирен-визуализацию и методы лазерного зондирования. Для этого призма освещена расширенными и сфокусированными лазерными лучами. На основании полученных результатов рассмотрена возможность разработки новой модификации квазиколлинеарного перестраиваемого акустооптического фильтра. Предложенный фильтр использует исследованное многократное отражение акустических волн в парателлурите. Как показано, медленные сдвиговые акустические волны могут запускаться в кристалле за счет многократных акустических отражений, а также за счет трансформации акустических мод, происходящей после отражений. Мы предлагаем использовать акустооптическое взаимодействие в плоскости (001) кристалла. В этом случае на боковые грани призмы можно одновременно направить несколько оптических лучей, коллинеарных потокам акустической энергии. Исследована геометрия акустооптического взаимодействия в кристалле. На основании требования условия согласования Брэгга рассчитаны частотные зависимости оптических углов падения от частоты ультразвука. Найдены оптимальные геометрии квазиколлинеарной дифракции света на акустических волнах. По сравнению с традиционными модификациями фильтров, предлагаемый прибор можно назвать оптическим многоканальным устройством, способным работать одновременно с несколькими оптическими лучами.

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

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-12-00072.

N. V. Polikarpova*

PhD, Phys.-Math., Associate Professor

E. A. Dyakonov*

PhD, Phys.-Math.

I. K. Chizh*

Student

*M. V. Lomonosov Moscow State University

INVESTIGATION OF THE ATTENUATION COEFFICIENT OF AN ULTRASONIC WAVE IN VARIOUS DIRECTIONS IN A PARATELLURITE CRYSTAL

We present results on a study of acoustic bulk wave reflection in the tellurium dioxide crystal. Multiple reflections of the acoustic waves from two free boundaries separating the crystal and the vacuum are examined. For the purpose, we employ a special configuration of the crystal in form of a tetragonal prism having two parallel and two mutually inclined facets. A piezoelectric transducer generates a quasi-shear acoustic wave with the walk-off angle between acoustic phase and group velocity equal to 74° . The initial wave is generated by the transducer at an incidence angle exceeding 90° . The acoustic energy walk-off provided the wave incidence on the inclined crystal boundary. The incidence is accompanied by a peculiar close-to-back reflection of the intrinsic wave from the inclined facet. It is proved that as much as five slow quasi-shear acoustic waves could propagate in the plane (001) of the material. These waves propagate along different directions each characterized by a specific walk-off angle. We calculate and measure parameters of the reflected waves such as the directions of propagation, the phase velocities and walk-off angles, the reflection and attenuation coefficients. All these parameters are determined by the acousto-optic methods including the Schlieren imaging and the laser probing methods. The prism is illuminated for the purpose by expanded and focused laser beams. Based on the obtained results, we examine a possibility to develop a new modification of a quasi-collinear tunable acousto-optic filter. The filter applies the studied multiple reflections of the acoustic waves in paratellurite. As shown, the slow shear acoustic waves may be launched in the crystal due to the multiple acoustic reflections and also due to transformation of acoustic modes taking place after the reflections. We propose usage of the acousto-optic interaction in the (001) plane of the crystal. In this case, a few optic beams could simultaneously be sent on the side facets of the prism collinearly with the acoustic energy flows. Acousto-optic interaction geometries are examined in the crystal. Based on the requirement of Bragg matching condition, we calculate frequency dependences of the optic incidence angles on the frequency of ultrasound. Optimal geometries of the quasi-collinear light diffraction by the acoustic waves are found. As compared to the traditional modifications of the filters, the proposed instrument may be called an optical multichannel device capable of a simultaneous operation with a several optical beams.

Keywords: acousto-optic interaction, anisotropy, paratellurite.

Введение

Кристалл парателлурита – один из наиболее часто применяемых материалов для акустооптических устройств. К основным особенностям парателлурита относится его сравнительно высокий коэффициент акустооптического качества, а также сильно выраженная анизотропия скоростей оптических и акустических волн, позволяющая реализовать множество разнообразных геометрий взаимодействия [1]. Важным свойством любого материала, применяемого в акустоэлектронике и акустооптике, является коэффициент затухания ультразвуковых волн. Поскольку эта величина пропорциональна квадрату частоты, именно она определяет практические пределы частотного диапазона устройства. Коэффициенты затухания чистых акустических мод в большинстве практически интересных материалов были измерены многими исследователями и весьма досто-

верно известны из литературы [2]. Очевидно, что в силу анизотропных свойств любого кристалла, коэффициент акустического затухания, так же как и скорость звука, зависит от направления распространения волны. Однако данные о конкретных величинах акустического затухания собственных мод, распространяющихся в произвольных кристаллографических направлениях, в настоящее время отсутствуют. Сильная анизотропия скорости звука в кристалле парателлурита приводит также к сильной анизотропии акустического затухания [3]. Например, медленная акустическая мода, распространяющаяся в направлениях $[110]$ и $[100]$ со скоростями 616 и 3100 м/с, характеризуется коэффициентами затухания, равными соответственно 16,0 и 3,4 дБ/(мкс·ГГц²). Таким образом, выяснение характера зависимости коэффициента акустического затухания от направления в кристалле парателлурита представляет особую важность. В работе [3] была построена теоретическая модель такой зависимости, однако она не подкреплена экспериментальными данными в промежуточных точках. Одна из наиболее интересных собственных мод кристалла парателлурита [4; 5] – медленная квазипоперечная волна, распространяющаяся в плоскости (001) под углом 8° к оси $[110]$. Она характеризуется углом сноса энергии, равным 74,3°. Данное значение является максимально возможным не только среди собственных мод кристалла парателлурита, но и вообще среди известных кристаллических материалов [1]. Экспериментальная оценка коэффициента затухания ультразвуковой волны с максимальным углом сноса и стала целью настоящей работы.

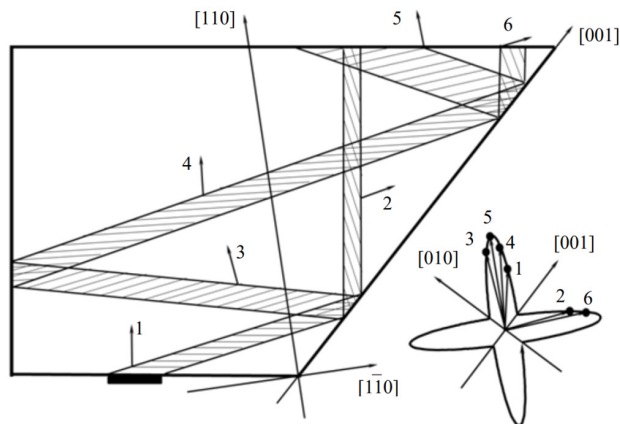


Схема акустооптической ячейки и геометрия волновых векторов ультразвука на поверхности обратных скоростей

Измерения проводились акустооптическим методом [4] в ячейке, схематично показанной на рисунке. Стрелка и цифра на рисунке возле каждого из волновых пучков соответствуют направлению его волнового вектора и услов-

ному номеру в тексте и таблице. В квадратных скобках – направления кристаллографических осей.

Конфигурация кристалла специально рассчитана так, чтобы в нем существовало несколько акустических пучков с углами сноса энергии, близкими к максимальному. Квазипоперечная ультразвуковая волна 1 возбуждается сдвиговым пьезопреобразователем, направление колебаний которого находится в плоскости рисунка. Одновременно с ней возбуждается еще одна собственная акустическая мода, не представляющая интереса в нашем исследовании и не показанная на рисунке. При падении волны 1 на смежную грань кристалла возникают две отраженные волны, обозначенные соответственно цифрами 2 и 3. В свою очередь, волна 3 отражается от противоположной грани кристалла, порождая волну 4, и т. д. Углы среза всех граней подобраны так, чтобы обеспечить наличие в ячейке волн с максимальными углами сноса энергии, а также по возможности наибольшую длину акустических столбов. Последнее условие необходимо для повышения точности измерения акустического затухания. Расчетные характеристики волн, распространяющихся в кристалле, приведены в таблице. Для углов сноса энергии даны абсолютные значения. Расчеты были выполнены на основе данных из литературы [2] в соответствии с методикой, изложенной в работе [6].

Характеристики акустических волн, распространяющихся в кристалле

Усл. №	Фазовая скорость, м/с	Направление волнового вектора отн. оси [001], град.	Направление лучевого вектора отн. оси [001], град.	Угол сноса энергии, град.	Групповая скорость, м/с
1	870	37,0	-37,3	74,3	3215
2	870	-37,0	37,3	74,3	3215
3	707	49,5	121,4	72,0	2288
4	727	40,1	-32,5	72,6	2431
5	642	37,3	109,7	62,4	1386
6	727	-40,1	32,5	72,6	2431

Для измерения коэффициента затухания в настоящей работе использованы волновые пучки 2 и 4. Измерения выполнены при нескольких значениях частоты в диапазоне от 120 до 185 МГц, затем все результаты приведены к частоте 1 ГГц в предположении квадратичной зависимости затухания от частоты. Найденный таким образом коэффициент затухания пучка 4 составляет $(15,2 \pm 1,2)$ дБ/(мкс-ГГц²). Волновой пучок 2 характеризуется значительно меньшим затуханием, величина которого поддается лишь грубой оценке и не превышает 7 дБ/(мкс-ГГц²). Можно полагать, что коэффициент затухания квазисдвиговых ультразвуковых волн, распространяющихся под небольшими углами (порядка нескольких градусов) к оси [110], лишь незначительно отличается от коэффициента затухания чистой сдвиговой моды в данном направлении. Однако дальнейшее отклонение волнового вектора ультразвука от оси [110] приводит к резкому снижению коэффициента затухания. Подобный характер зависимости акустического затухания от направления был теоретически пред-

сказан в работе [3] для другой кристаллографической плоскости парателлурита. Сделанные оценки коэффициентов затухания представляют практическую важность при разработке акустооптических фильтров [1], использующих квазиколлинеарную геометрию взаимодействия вблизи кристаллографической оси [110].

Библиографический список

1. Voloshinov V. B., Polikarpova N. V. Application of Acousto-Optic Interactions in Anisotropic Media for Control of Light Radiation // *Acta Acustica united with Acustica*. 2003. Vol. 89, № 6. P. 930.
2. Акустические кристаллы. Справочник / под ред. М. П. Шаскольской. М.: Наука, 1982.
3. Ахмеджанов Ф. Р., Азаматов З. Т., Болтабаев А. Ф., Рахимов Э. Т. Анизотропия затухания акустических волн в кристаллах парателлурита // *Ученые записки физического факультета Московского университета*. 2014. Т. 5. С. 145333.
4. Дьяконов Е. А., Волошинов В. Б., Поликарпова Н. В. Акустооптическое исследование необычных случаев отражения объемных упругих волн в кристалле парателлурита // *Акустический журнал*. 2012. Т. 58, № 1. С. 121.
5. Дьяконов Е. А., Волошинов В. Б., Поликарпова Н. В. Полуколлинеарный режим дифракции света на ультразвуке в среде с сильной упругой анизотропией // *Оптика и спектроскопия*. 2015. Т. 118, № 1. С. 172.
6. Поликарпова Н. В., Волошинов В. Б., Иванова П. А. Отражение плоских акустических волн при наклонном падении на грань кристалла диоксида теллура // *Акустический журнал*. 2019. Т. 65, № 6. С. 740.