

08

Акустооптическая ячейка на кристалле парателлурита с поверхностным возбуждением объемных акустических волн

© В.Б. Волошинов, П.А. Никитин, А.С. Трушин, Л.Н. Магдич

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

„НИИ Полюс“ им. М.Ф. Стельмаха, Москва

E-mail: volosh@phys.msu.ru

Поступило в Редакцию 6 апреля 2011 г.

Приводятся результаты исследования акустооптической ячейки на кристалле парателлурита, в которой объемные акустические волны возбуждались непосредственно с поверхности кристалла за счет собственного пьезоэлектрического эффекта материала. Сдвиговые акустические волны с частотой 50 МГц распространялись вдоль осей [001] и [110] кристалла с направлением поляризации вдоль оси $[1\bar{1}0]$. Для возбуждения ультразвука применена простейшая система из двух электродов, нанесенных на одну из граней исследуемого образца. Приводятся характеристики акустооптической ячейки и параметры акустических волн, измеренные на длине волны света 633 нм при помощи дифракции светового пучка на акустической дифракционной решетке.

Известно, что акустооптические устройства управления параметрами световых пучков находят широкое применение при решении различных задач в науке и технике, например в оптике, оптоэлектронике, спектроскопии, оптической обработке информации и лазерной технике [1–3]. С помощью акустооптических модуляторов и дефлекторов удается управлять амплитудой, частотой, фазой, поляризацией и направлением распространения световых пучков. Акустооптические приборы отличаются надежностью, возможностью быстрого электронного управления, незначительными управляющими мощностями и малыми габаритами, а также отсутствием механических движущихся частей [1–4].

На сегодняшний день большинство акустооптических приборов создается на основе кристаллов парателлурита (TeO_2). Этот кристалл отличается исключительно высокой акустооптической эффективностью,

определяемая величиной акустооптического качества, максимальное значение которого достигается в циркулярно поляризованном свете $M_2 = 1200 \cdot 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$. В линейно поляризованном свете величина качества уменьшается до $M_2 = 790 \cdot 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$ [1–3]. В дефлекторах и фильтрах применяются медленные сдвиговые акустические волны, бегущие в плоскости $(1\bar{1}0)$ с направлением поляризации вдоль оси $[1\bar{1}0]$. Именно для этих волн и характерны рекордно большие значения коэффициента M_2 .

Следует отметить, что одним из главных недостатков акустооптических приборов является их высокая стоимость, существенно ограничивающая более широкое применение акустооптических приборов в науке и технике. Она обусловлена сложностями и затратами при изготовлении пьезоэлектрических преобразователей и создании широкополосного акустического контакта между пластинкой преобразователя и кристаллом [2,3]. Для создания высокочастотных преобразователей применяется операция механической шлифовки, которая выполняется вручную, не допускает автоматизации и приводит к большому проценту брака, что еще более повышает цену акустооптического устройства.

В данной работе представлено описание акустооптической ячейки на кристалле TeO_2 , в которой отсутствует „пьезоэлектрический преобразователь“ в традиционном понимании этого термина, так как звуковые волны возбуждаются в кристалле за счет обратного пьезоэлектрического эффекта парателлуриата. Целью исследования было возбуждение и определение характеристик медленной сдвиговой акустической волны, распространяющейся вдоль оси $[110]$ с направлением поляризации вдоль оси $[\bar{1}10]$. Именно данная или близкие к ней акустические волны наиболее часто применяются в приборах акустооптики [1–3]. Следует отметить простоту технологических операций, примененных при изготовлении этой ячейки. Из кристалла парателлуриата был вырезан параллелепипед требуемой ориентации, после чего одна из граней образца была срезана под заданным углом φ для осуществления трансформации акустических мод. На другую грань были нанесены металлические электроды. Очевидно, что затраты на изготовление подобной акустооптической ячейки уменьшаются в десятки раз по сравнению с затратами на производство обычных ячеек с пьезоэлектрическими преобразователями в виде тонких кристаллических пластинок.

Кристаллы парателлуриата относятся к материалам тетрагональной сингонии кристаллографического класса 422 [1–5]. Помимо замет-

ного фотоупругого эффекта в кристаллах этого класса наблюдается электрооптический, а также прямой и обратный пьезоэлектрический эффект [4]. К сожалению, пьезоэлектрический эффект в парателлурите проявляется слабее, чем, например, в кристалле ниобата лития [5]. Тем не менее было высказано предположение о возможности поверхностного возбуждения объемных акустических волн в кристалле парателлурита [6]. В работе [7] сообщалось о возбуждении ультразвука с поверхности кристалла вблизи оси $[110]$ с помощью встречно-штыревого преобразователя. Наконец, в акустооптическом фильтре на кристалле парателлурита наблюдались пьезоэлектрические резонансы при электрооптическом управлении частотой брэгговского синхронизма [8]. Все эти исследования доказывают принципиальную возможность возбуждения с помощью собственного обратного пьезоэлектрического эффекта акустических волн в кристалле. В данной работе продемонстрирована возможность поверхностного возбуждения объемных волн ультразвука в парателлурите с помощью простейшей системы из двух металлических электродов. Схема ячейки и расположение электродов показаны на рис. 1. Эта акустооптическая ячейка могла быть использована в качестве акустооптического дефлектора или перестраиваемого фильтра.

Матрица пьезоэлектрических модулей кристалла парателлурита d_{ij} содержит два отличных от нуля коэффициента d_{14} и d_{25} . При приложении к кристаллу произвольного электрического поля \mathbf{E} с компонентами E_1 , E_2 и E_3 в кристалле возникает безразмерная упругая деформация $S_4 = d_{14}E_1$ и $S_5 = -d_{14}E_2$. Как известно, эти деформации соответствуют сдвиговым акустическим модам [1–4].

Расчет показывает, что приложение к кристаллу переменного электрического поля по направлению $[110]$ приводит к возникновению двух волн, распространяющихся вдоль оси Z с ортогонально направленными поляризациями по осям Y и X . Так как в кристаллах тетрагональной сингонии ось Z является осью симметрии четвертого порядка и, следовательно, акустической осью, можно ожидать, что эти две волны, распространяясь по кристаллу с одинаковой скоростью и частотой, рождают результирующую волну с направлением поляризации вдоль оси $[\bar{1}10]$.

Следует отметить, что сдвиговая акустическая волна, бегущая в кристалле по оси Z со скоростью $V_{001} = 2103$ м/с и с направлением поляризации по оси $[\bar{1}10]$, не используется в акустооптических ячейках

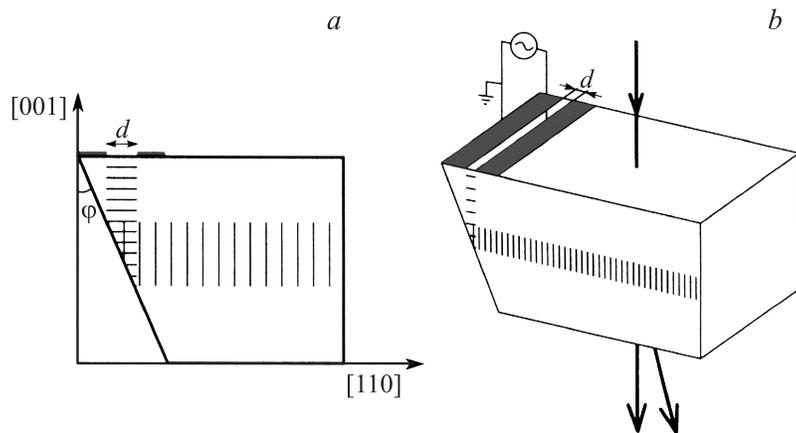


Рис. 1. Общий вид кристалла парателлурифта с нанесенными электродами для возбуждения ультразвука: *a* — схема распространения звука в кристалле; *b* — ход оптических лучей и акустических волн в кристалле парателлурифта.

из-за низкой величины акустооптического качества материала. Однако при наклонном падении и последующем отражении этой акустической волны от грани кристалла ее можно без потерь преобразовать в медленную сдвиговую акустическую моду, распространяющуюся вдоль оси $[110]$ со скоростью $V_{110} = 616 \text{ m/s}$ и с направлением поляризации вдоль оси $[\bar{1}10]$. Именно при дифракции света на этой акустической моде в кристалле парателлурифта реализуется максимальная величина акустооптического качества кристалла. Угол наклона φ акустической грани кристалла парателлурифта, обеспечивающий распространение волны вдоль оси $[110]$, определяется соотношением

$$\varphi = \arctg(V_{110}/V_{001}) = \arctg 0.293 = 16^\circ 20'. \quad (2)$$

В соответствии с проведенным теоретическим рассмотрением была изготовлена акустооптическая ячейка из кристалла парателлурифта, показанная на рис. 1. Она представляла собой куб со стороной около 1.0 cm и одной из граней, скошенной под углом φ . На рабочую грань кристалла, ортогональную оси Z , были нанесены два металлических электрода длиной $l = 0.6 \text{ cm}$, разделенные зазором $d = 0.03 \text{ cm}$. Ориентация электродов в плоскости (001) кристалла была строго задана.

К электродам на кристалле парателлурита было приложено переменное электрическое поле с частотой $f = 50$ МГц. Для увеличения эффективности возбуждения акустических волн было осуществлено согласование электрических параметров акустооптической ячейки с генератором ВЧ-мощности. Эквивалентная электрическая схема системы возбуждения звука в кристалле представляла собой параллельно включенные емкость и сопротивление. Для компенсации реактивной составляющей электрического импеданса и трансформации активных сопротивлений была использована автотрансформаторная схема подвода сигнала от генератора к нагрузке.

Металлические электроды были ориентированы на грани кристалла с таким расчетом, чтобы электрическое поле в зазоре было направлено по оси $[110]$. В соответствии с теоретическими выводами из зазора между электродами, т. е. с поверхности кристалла вдоль оси Z возбуждалась сдвиговая акустическая волна, имевшая направление поляризации вдоль оси $[\bar{1}10]$. Эта волна падала на боковую грань парателлурита, ориентированную под углом $\varphi = 16^\circ 20'$ к оси Z , как показано на рис. 1. При отражении волны от грани не происходило потерь акустической мощности и не менялось направление поляризации акустической моды. Поэтому волновой вектор отраженной волны был ориентирован в плоскости $(1\bar{1}0)$ вблизи оси $[110]$ образца.

При проведении экспериментов на ячейку под углом Брэгга, т. е. приблизительно вдоль оси Z было направлено излучение He–Ne-лазера с длиной волны $\lambda = 633$ нм, как показано на рисунке. На выходе ячейки наблюдалась дифракционная картина, состоявшая из максимумов $+1$ и -1 дифракционного порядка. При управляющей высокочастотной электрической мощности $P = 1.0$ Вт эффективность дифракции была приблизительно равна 1%. Из-за сложной структуры звукового поля в кристалле было сложно точно измерить КПД преобразования электрической мощности в акустическую. Однако приближенная оценка показывает, что коэффициент преобразования был порядка 1%. В эксперименте по углу отклонения дифрагированного света была определена скорость акустической волны $V_2 = 623 \pm 5$ м/с. Полученное в эксперименте относительно низкое значение акустической скорости доказывает, что в кристалле была возбуждена именно медленная акустическая мода, распространяющаяся вблизи оси $[110]$. Следует отметить, что измеренное значение скорости в пределах ошибки практически совпадало с ожидаемым значением $V_2 = 616$ м/с.

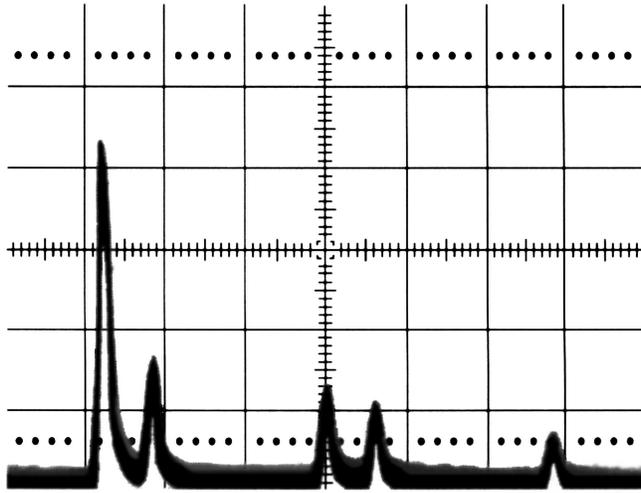


Рис. 2. Вид картины акустических импульсов в парателлурите, полученной на длине волны света 633 nm. Цена деления по оси абсцисс $15 \mu\text{s}$.

На рис. 2 показан общий вид картины акустических импульсов, полученный с экрана осциллографа, подключенного к фотоприемнику и регистрировавшего дифракцию в первом порядке. При этом цена деления шкалы осциллографа составляла $15 \mu\text{s}$, а лазерный пучок проходил на расстоянии 0.4 см от скошенной грани кристалла. Анализ вида наблюдаемой картины и оценка временных задержек между отдельными импульсами также убедительно доказывает тот факт, что акустические волны возбуждались в кристалле в соответствии с предсказаниями теории. Экспериментально полученное значение акустической скорости указывает на то, что угол наклона акустического волнового вектора α в плоскости $(1\bar{1}0)$ не превышает 2.5° . Это означает, что созданная ячейка может быть использована в качестве прототипа акустооптического дефлектора или фильтра [1–4,9,10].

Таким образом, в результате проведенного теоретического и экспериментального исследования была доказана возможность генерации с поверхности парателлурита медленной сдвиговой акустической моды вблизи оси $[110]$ кристалла. Для этого была использована система

из двух металлических электродов, разделенных небольшим зазором. Очевидно, что простым изменением угла среза образца, т.е. выбором угла наклона боковой грани акустооптической ячейки, можно добиться возбуждения волны ультразвука в плоскости $(\bar{1}10)$ кристалла под небольшими углами к направлению $[110]$ [1–4]. Именно эти акустические волны представляют наибольший интерес для соответствующих применений в акустооптике, например в современных акустооптических дефлекторах и перестраиваемых фильтрах.

Список литературы

- [1] Балакиев В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985.
- [2] *Xi J., Stroud R.* Acousto-optic devices. New York: Wiley, 1992.
- [3] *Goutzoulis A.P., Pape D.R.* Design and fabrication of acousto-optics devices. New York: Marcel Dekker, 1994.
- [4] Яков А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. М.: Мир, 1987.
- [5] Акустические кристаллы / Под ред. М.П. Шаскольской. М.: Наука, 1992.
- [6] Краковский А.А. // Изв. вузов. Физика. 1997. № 1. С. 8.
- [7] Задорин А.С., Серебрянников Л.Я., Шарангович С.Н. // Автометрия. 1991. № 1. С. 13.
- [8] Волошинов В.Б., Скрипкин Д.Б., Гупта Н. // Опт. и спектр. 1998. Т. 85. В. 5. С. 833–838.
- [9] *Voloshinov V.B., Polikarpova N.V.* // Appl. Opt. 2009. V. 48. N 7. P. 55.
- [10] Молчанов В.Я., Волошинов В.Б., Макаров О.Ю. // Квантовая электроника. 2009. Т. 39. № 4. С. 353–360.