

01;05;07;08;12

©1995 г.

РАСЧЕТ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА НА ОДНООСНОМ ГИРОТРОПНОМ КРИСТАЛЛЕ

В.М.Епихин

Научно-производственное объединение
Всесоюзный научно-исследовательский институт
физико-технических и радиотехнических измерений,
Менделеево, Московская область, Россия
(Поступило в Редакцию 18 апреля 1994 г.
В окончательной редакции 16 ноября 1994 г.)

В представлении показателей преломления одноосного гиротропного кристалла n_1 , n_2 поверхностями второго порядка проведен анализ акустооптической дифракции при произвольной ориентации волновых векторов света и звука в кристалле. Получены точные аналитические выражения для частоты звуковой волны как функции длины волны дифрагирующего излучения, углов ориентации волновых векторов и физических констант кристалла. Эти выражения хорошо описывают экспериментальные данные для двухполяризационного акустооптического фильтра на TeO_2 при введении эффективного параметра гиротропии кристалла $\delta(\theta)$, зависящего от угла θ между волновым вектором света и оптической осью. Этот факт свидетельствует о том, что при $\theta > 2^\circ$ угловые зависимости n_1 и n_2 описываются поверхностями более высокого порядка, чем второй. Для двухполяризационного фильтра на TeO_2 для $\lambda = 11500 \text{ \AA}$ $\delta(0)/\delta(55.6^\circ) \geq 10$, и влияние оптической активности парателлурида на спектральные параметры акустооптического фильтра пренебрежимо мало.

В последнее время перестраиваемые акустооптические фильтры (АОФ) на кристалле парателлурида (TeO_2) активно используются в практических устройствах. Как показано в [1,2], значительная величина гиротропии TeO_2 существенно изменяет характер анизотропной АО дифракции при распространении света вблизи оптической оси. Для диапазона характерных значений углов между волновым вектором излучения и оптической осью $7 \leq \theta \leq 90^\circ$ в АОФ на TeO_2 [3] влияние оптической активности TeO_2 на параметры АОФ пренебрежимо мало. В самом деле, многочисленные эксперименты показывают, что измеренные значения управляющей частоты АОФ отличаются от рассчитанных в приближении нулевой оптической активности [3] на десятки

доли-единицы процентов. Таковую же величину различия дают неопределенность физических констант кристалла [4] и технологическая погрешность при изготовлении светозвукопровода ($\approx 2'$). Кроме того, при необходимости можно провести индивидуальную калибровку АОФ по реперным лазерным длинам волн.

Более сложная ситуация возникает при расчете спектральных параметров двухполяризационного АОФ на TeO_2 , описанного в [5]. Пренебрежение оптической активностью может привести к тому, что центры реальных аппаратных функций для излучения взаимно ортогональных поляризаций в отличие от рассчитанных будут дистанцированы (т.е. будут "разбегаться") на спектральной шкале, что приведет к уширению суммарной аппаратной функции двухполяризационного АОФ.

Цель данной работы — анализ влияния гиротропии TeO_2 на спектральные параметры двухполяризационного АОФ и сравнение расчетных данных с экспериментальными.

В работе [1] было сделано предположение, что при распространении света вблизи оптической оси в одноосном гиротропном кристалле (например, TeO_2) угловые зависимости показателей преломления n_1 , n_2 для собственных мод кристалла (1), (2) имеют вид

$$\frac{n_1^2(\theta) \cos^2(\theta)}{n_0^2(1 + \delta)^2} + \frac{n_1^2(\theta) \sin^2(\theta)}{n_e^2} = 1,$$

$$\frac{n_2^2(\theta) \cos^2 \theta}{n_0^2(1 - \delta)^2} + \frac{n_2^2(\theta) \sin^2 \theta}{n_0^2} = 1,$$

$$\delta = [n_1(0) - n_2(0)]/2n_0 = \rho \cdot \lambda/2\pi n_0, \quad (1)$$

θ — угол отклонения волнового вектора световой волны от оптической оси, δ — параметр гиротропии, ρ — удельная вращательная способность кристалла.

Моды (1) и (2) переходят в необыкновенный и обыкновенный лучи соответственно при отсутствии оптической активности.

Предположим, что аналитические зависимости (1) справедливы для всего диапазона углов $0 \leq \theta \leq 90^\circ$. Следуя методике, изложенной в [3], получим аналитические выражения для управляющей частоты АОФ f в зависимости от длины волны фильтруемого излучения λ , ориентации волновых векторов звуковой γ и световой θ , φ волн, а также физических констант кристалла V , n_0 , n_e , ρ . Для вариантов дифракции (1 \rightarrow 2) и (2 \rightarrow 1) имеем

$$f^{1 \rightarrow 2} = \frac{V n_0}{\lambda} A(\gamma) A'(\theta) \left\{ B - [B^2 - C]^{1/2} \right\}, \quad (2)$$

$$f^{2 \rightarrow 1} = \frac{V n_0}{\lambda} A''(\gamma) A''(\theta) \left\{ -D + [D^2 + E]^{1/2} \right\}, \quad (3)$$

где

$$B = A(\gamma) [\cos \gamma \sin \theta \cos \varphi - (1 - \delta)^{-2} \sin \gamma \cos \theta],$$

$$C = (1 - \eta^2) \sin^2 \theta + 4\delta(1 - \delta^2)^{-2} \cos^2 \theta,$$

$$D = A''(\gamma) (\eta'^2 \cos \gamma \sin \theta \cos \varphi - \sin \gamma \cos \theta),$$

$$E = [(1 - \delta^2)^2 - 1] \cos^2 \theta + (1 + \delta^2)[(1 - \delta)^4 - \eta^2] \sin^2 \theta,$$

$$A(\gamma) = (1 - \delta) [\sin^2 \gamma + (1 - \delta)^2 \cos^2 \gamma]^{-1/2},$$

$$A'(\theta) = (1 + \delta) (\cos^2 \theta + \eta^2 \sin^2 \theta)^{-1/2},$$

$$A''(\gamma) = (\eta^2 \cos^2 \gamma + \sin^2 \gamma)^{-1/2},$$

$$A''(\theta) = (1 - \delta) [\cos^2 \theta + (1 - \delta)^2 \sin^2 \theta]^{-1/2},$$

$$\eta' = \eta(1 + \delta), \quad \eta = n_o/n_e.$$

При $\delta = 0$ $A(\gamma) = A''(\theta) = 1$ и (2), (3) переходят в соответствующие выражения, полученные в [5] в приближении нулевой оптической активности кристалла.

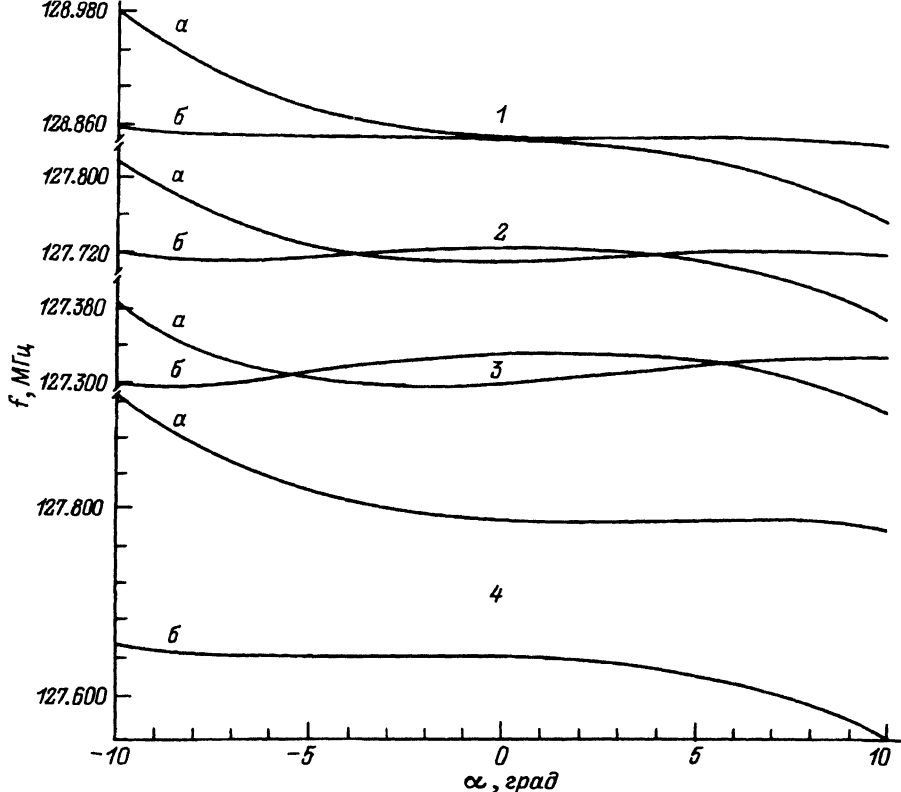
Заметим, что (2), (3) получены без каких-либо дополнительных допущений для произвольной ориентации волновых векторов в кристалле. Следовательно, эти выражения справедливы для любого акустооптического устройства. Для проверки соотношений (2), (3) они использовались при расчете параметров анизотропных дефлекторов на TeO_2 , описанных в [1] для значений длины волны излучения 4416, 5145, 6328, 11500 Å. Для каждой длины волны излучения вычислялась частота f_0 , соответствующая условию оптимального дефлектора ($\partial\theta/\partial f = 0$). Отличие вычисленных значений f_0 от приведенных в [1] не превышало 2%. Также по формулам (2), (3) были найдены значения f_{\min} для модулятора на TeO_2 , описанного в [2], для случаев распространения собственных оптических мод кристалла с $\lambda = 6328$ Å. Отличие рассчитанных значений от данных, приведенных в [2], не превышало 1%. Таким образом, полученные выражения (2), (3) хорошо описывают экспериментальные данные для малых отклонений волнового вектора света от оптической оси кристалла ($\theta \leq 2^\circ$).

Далее, выражения (2), (3) были использованы для анализа спектральных параметров двухполяризационного АОФ на TeO_2 на длине волны излучения $\lambda = 11500$ Å. На рисунке приведены расчетные зависимости резонансной частоты АОФ f от угла α между лучом и нормалью к передней грани кристалла светозвукопровода (геометрия взаимодействия и обозначения совпадают в введенными в [5]).

Вычисления проводились для четырех вариантов АОФ со следующими параметрами: $\gamma = 18.82^\circ$, $\theta = 55.55^\circ$, $\rho = 0$ (кривая 1); $\gamma = 18.86^\circ$, $\theta = 55.55^\circ$, $\rho = 0$ (кривая 2); $\gamma = 18.90^\circ$, $\theta = 55.55^\circ$, $\rho = 0$ (кривая 3); $\gamma = 18.86^\circ$, $\theta = 55.55^\circ$, $\rho = 21.7$ град/мм (кривая 4) ($\delta = 0.315 \cdot 10^{-4}$) [6]. Графики зависимостей $f^{1 \rightarrow 2}(\alpha)$ и $f^{2 \rightarrow 1}(\alpha)$ для каждого из вариантов представлены на рисунке кривыми 1-4.

Анализ полученных зависимостей показывает следующее.

1. Для всех вариантов с $\rho = 0$ графики имеют одну общую особенность, а именно кривые $f^{1 \rightarrow 2}(\alpha)$ и $f^{2 \rightarrow 1}(\alpha)$ для фиксированного γ симметричны в том смысле, что они почти совпадают при сдвиге по оси абсцисс на некоторый постоянный угол. Для количественной оценки можно ввести параметр симметрии $\xi = (f^{1 \rightarrow 2} m - f_m^{2 \rightarrow 1}) / \langle f_m \rangle \approx (f_M^{1 \rightarrow 2} - f_M^{2 \rightarrow 1}) / \langle f_M \rangle$, где f_m и f_M — значения локальных экстремумов кривых $f(\alpha)$. Для кривых графиков 1-3 $\xi \approx 10^{-6}$ и не зависит от γ .



Зависимости резонансной частоты двухполяризационного АОФ на TeO_2 от угла падения луча на переднюю грань кристалла при $\lambda = 11500 \text{ \AA}$ для четырех вариантов фильтра.

2. Поведение кривых $f(\alpha)$ очень чувствительно к значению параметра δ . При $\delta \neq 0$ симметрия кривых нарушается — они сдвигаются не только по оси абсцисс, но и по оси ординат. При $\delta = 0.315 \cdot 10^{-4}$ $\xi \approx 10^{-3}$. Следовательно, имеет место однозначное соответствие между параметром гиротропии δ одноосного кристалла и параметром симметрии ξ кривых $f(\alpha)$ двухполяризационного АОФ.

Сравним теперь результаты теории и эксперимента. Типичные экспериментально полученные кривые $f(\alpha)$ для двухполяризационного АОФ на TeO_2 приведены в [5]. В этом случае $\xi_{\text{эксп}} = \Delta f / \langle f \rangle \approx 10^{-4}$, где $\Delta f \approx 10 \text{ кГц}$ — погрешность измерений. Таким образом, экспериментальные данные противоречат результатам расчета, сделанного в предположении аналитической зависимости $n_{1,2}(\theta)$ для больших θ в виде (1). Следовательно, поверхности $n_{1,2}(\theta)$ имеют более сложный вид.

Предположим, теперь, что аналитические зависимости $n_{1,2}(\theta)$ сохраняют вид (1), однако параметр гиротропии имеет угловую зависимость $\delta = \delta(\theta)$. Для согласования экспериментальных данных с расчетными используем отмеченную выше однозначную связь параметров δ и ξ и сделаем верхнюю оценку значения эффективного параметра гиротропии TeO_2 для $\theta \approx 55.6^\circ$. Получаем $\delta(55.6^\circ) = \delta(0)/k$, при $k \geq 10$ $\xi \leq \xi_{\text{эксп}} = 10^{-4}$.

Выводы

1. Влияние гиротропии TeO_2 на АО дифракцию для больших углов отклонения волновых векторов излучения от оптической оси ($\theta > 2^\circ$) можно рассматривать в рамках традиционного подхода [1] с эффективным параметром гиротропии, зависящим от θ .

2. Для двухполяризационного АОФ на TeO_2 для $\lambda = 11\,500 \text{ \AA}$ эффективный параметр гиротропии $\delta(55.6^\circ)$ по крайней мере на порядок меньше параметра гиротропии кристалла $\delta(0)$. Для практических применений влияние оптической активности TeO_2 на спектральные параметры двухполяризационного АОФ пренебрежимо мало.

Список литературы

- [1] Warner A.W., White D.L., Bouner W.A. // J. Appl. Phys. 1972. Vol. 43. N 11. P. 4489–4495.
 - [2] Антонов С.Н., Котов В.М., Сотников В.Н. // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 1. С. 168–173.
 - [3] Епихин В.М., Визен Ф.Л., Галь В.В., Калинин Ю.К. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 12. С. 2410–2414.
 - [4] Блистанов А.А., Бондаренко В.С., Чкалова В.В. и др. Акустические кристаллы. Справочник. М., 1982. 633 с.
 - [5] Епихин В.М., Визен Ф.Л., Пальцев Л.Л. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 10. С. 1910–1917.
 - [6] Uchida N. // Phys. Rev. B. 1971. Vol. 4. N 10. P. 3736–3745.
-