

УДК 621.396

## ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В АНИЗОТРОПНЫХ АКУСТООПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ БРЭГГА

С. В. Заварин, Е. Л. Никишин

*Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Саратовский государственный технический университет»,  
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77  
E-mail: nikel55@rambler.ru*

Проанализирована геометрия анизотропной дифракции света на ультразвуковых волнах, возбуждаемых многоэлементным преобразователем, в оптически одноосном отрицательном кристалле ниобата лития. На основе рассмотрения оптических индикатрис показателей преломления обыкновенной и необыкновенной световых волн в кристалле найдено выражение для показателя преломления дифрагированной волны. Предложен метод расчёта частотно-угловых характеристик анизотропных акустооптических ячеек Брэгга с многоэлементными преобразователями.

*Ключевые слова:* акустооптический элемент Брэгга, анизотропная дифракция света, многоэлементный пьезопреобразователь.

**Введение.** Возможность использования анизотропной дифракции света на объёмных упругих волнах для создания широкополосных элементов Брэгга впервые была показана в [1]. Центральная частота рабочего диапазона такой ячейки Брэгга зависит от материала фотоупругой среды элемента и направления распространения ультразвуковой волны в кристалле, а ширина диапазона определяется геометрией акустооптического взаимодействия и ограничивается дифракционной расходимостью акустического пучка. Значительный интерес в плане улучшения параметров анизотропных ячеек Брэгга представляет использование для возбуждения упругих волн многоэлементных пьезопреобразователей [2]. Их применение, с одной стороны, позволяет добиться широкополосного согласования устройства с передающим волноводным трактом [3], с другой — даёт возможность выбора требуемого диапазона частот путём изменения геометрических параметров преобразователя, оставляя при этом неизменным срез кристалла. Такая возможность очень важна, если учитывать, что срез кристалла кроме диапазона частот определяет и эффективность акустооптического взаимодействия [4].

Цель предлагаемой работы — с помощью анализа частотно-угловой характеристики ячейки Брэгга оценить влияние параметров преобразователя на полосу и центральную частоту этого устройства.

**Анализ показателя преломления дифрагированной волны.** В работе [1] в соответствии с законами сохранения энергии и импульса получено выражение зависимости оптимального угла падения световой волны от частоты ультразвука для анизотропной ячейки Брэгга:

$$\sin \theta_i = \frac{\lambda_0}{2n_o v} \left[ f + \frac{v^2}{f \lambda_0^2} (n_o^2 - n_d^2) \right], \quad (1)$$

где  $\lambda_0$  — длина волны света в вакууме;  $v$  — скорость упругой волны в кристалле;  $f$  — частота этой волны;  $n_o$  — показатель преломления падающей обыкновенной световой волны;

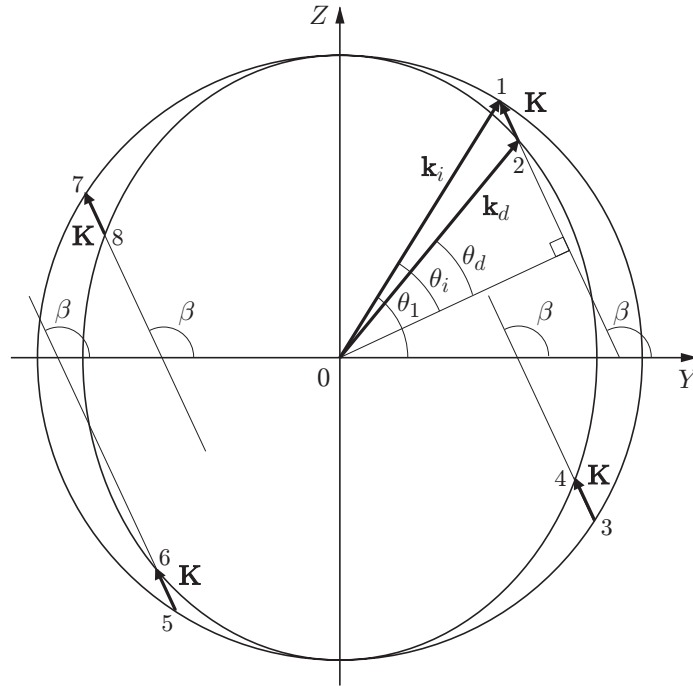


Рис. 1

$n_d$  — показатель преломления дифрагированной необыкновенной световой волны. Предлагаемый в данной работе метод расчёта частотно-угловой характеристики основан на анализе оптических индикатрис показателей преломления обыкновенной и необыкновенной световых волн в кристалле и нахождении показателя преломления дифрагированной световой волны  $n_d$ . В качестве примера фотоупругой среды выбран одноосный отрицательный кристалл ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) — один из перспективных акустооптических материалов. Векторная диаграмма происходящей в плоскости  $YZ$  анизотропной дифракции на упругой волне, распространяющейся в направлении, составляющем угол  $\beta$  с осью  $Y$ , изображена на рис. 1. Для ниобата лития при  $\beta \approx 120^\circ$  такая геометрия взаимодействия позволяет получить наиболее высокий коэффициент акустооптического качества [4].

Найдём выражение для показателя преломления дифрагированной волны  $n_d$ , в котором в качестве параметров выступают зависящие от частоты направление распространения возбуждаемой многоэлементным преобразователем упругой волны  $\beta$  и модуль её волнового вектора  $K = 2\pi f/v$ . Концы возможных волновых векторов дифрагированного света при заданных значениях этих параметров на рис. 1 отображаются точками 2, 4, 6 и 8. Искомая величина  $n_d$  определяется значениями координат этих точек, например для точки 2

$$n_d = \frac{\lambda_0}{2\pi} \sqrt{y_2^2 + z_2^2}. \quad (2)$$

Чтобы отыскать координаты точки 2, решим систему четырёх уравнений: окружности, которой принадлежит точка 1,

$$z_1^2 + y_1^2 = k_o^2, \quad (3)$$

эллипса, на котором расположена точка 2,

$$z_2^2/n_o^2 + y_2^2/n_e^2 = k_o^2/n_o^2, \quad (4)$$

прямой, проходящей через точки 1 и 2,

$$z_1 - z_2 = (y_1 - y_2) \operatorname{tg} \beta, \quad (5)$$

длины отрезка [1, 2]

$$\sqrt{(y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} = K. \quad (6)$$

Система уравнений (3)–(6) сводится к уравнению четвёртой степени относительно неизвестной координаты  $y_2$ :

$$\begin{aligned} A^2 y_2^4 - 4AK \cos \beta y_2^3 + 2K^2 [A(1 - 2 \cos^2 \beta) + 2] y_2^2 + \\ + 4K^3 \cos \beta y_2 + K^2 (K^2 - 4k_o^2 \sin^2 \beta) = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь использованы следующие обозначения:  $A = n_o^2/n_e^2 - 1$  ( $n_e$  — минимальная величина показателя преломления необыкновенной волны);  $k_o = 2\pi n_o/\lambda_0$  — модуль волнового вектора падающего света. В общем случае это уравнение имеет четыре корня, которые определяют модули волновых векторов дифрагированного света, соответствующие точкам 2, 4, 6 и 8.

Используя введённые обозначения и уравнение (4), выражение (2) можно переписать в виде

$$n_d = \frac{\lambda_0}{2\pi} \sqrt{k_o^2 - Ay_2^2}. \quad (8)$$

**Метод расчёта частотно-угловой характеристики.** Следует отметить, что параметры уравнения (7)  $\beta$  и  $K$  в случае использования для возбуждения ультразвуковой волны многоэлементного преобразователя являются взаимозависимыми. Направление распространения ультразвуковой волны  $\beta$  определяется срезом кристалла  $\alpha$ , параметрами многоэлементного преобразователя и частотой. На высоких частотах оно задаётся выражением

$$\beta = \alpha \pm v/fp, \quad (9)$$

где  $p$  — период многоэлементного преобразователя. Знак «+» или «-» зависит от того, на акустическом лепестке какой пространственной гармоники (соответственно +1 или -1) происходит акустооптическое взаимодействие. Кроме того, скорость ультразвуковой волны  $v$  вследствие анизотропии упругой среды также зависит от направления распространения  $\beta$ . Для рассматриваемой геометрии акустооптического взаимодействия в ниобате лития [5]

$$v = \sqrt{\frac{c_{66} \sin^2 \varphi + c_{44} \cos^2 \varphi - c_{14} \sin 2\varphi}{\rho}}, \quad (10)$$

где  $c_{14}$ ,  $c_{44}$ ,  $c_{66}$  — упругие константы ниобата лития;  $\rho$  — его плотность;  $\varphi = |\pi/2 - \beta|$ .

Таким образом, между частотой упругой волны  $f$ , её скоростью  $v$ , показателем преломления дифрагированной волны  $n_d$ , входящими в качестве параметров в выражение (1),

и углом распространения упругой волны  $\beta$  существует однозначное соответствие. Поэтому предлагаемый алгоритм нахождения частотно-угловой характеристики имеет следующий вид:

1. Задаём срез кристалла  $\alpha$ .
2. Выбираем пределы и шаг изменения направления распространения упругой волны  $\beta$ .
3. Для каждого заданного значения  $\beta$  по формуле (10) определяем величину скорости упругой волны  $v$ .
4. С учётом найденной скорости упругой волны ищем её частоту, работая на которой многоэлементный преобразователь излучает акустический лепесток в направлении  $\beta$ :

$$f = \frac{v}{|\beta - \alpha|p}. \quad (11)$$

5. При заданных величинах параметров  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $p$  находим модуль волнового вектора упругой волны:

$$K = \frac{2\pi f}{v} = \frac{2\pi}{|\beta - \alpha|p}. \quad (12)$$

6. Воспользовавшись полученными с помощью (12) значениями  $K$ , решаем уравнение четвёртой степени (7) и, используя выражение (8), определяем показатель преломления дифрагированной световой волны  $n_d$  для конкретного значения направления распространения ультразвука  $\beta$ .

7. Подставляя найденные значения  $v$ ,  $f$  и  $n_d$  в формулу (1), вычисляем угол Брэгга для падающей световой волны  $\theta_i$ .

8. Этот угол отсчитывается относительно нормали к направлению упругой волны (см. рис. 1), которое изменяется при смене частоты волны. Поэтому в заключение определяем требуемый угол падения света относительно оси  $Y$  кристалла:

$$\theta_1 = \theta_i + \beta - \pi/2. \quad (13)$$

9. Откладывая вдоль осей координат величины, найденные по формулам (11) и (13), для всего диапазона изменений угла  $\beta$  получаем частотно-угловую характеристику анизотропной акустооптической ячейки Брэгга с многоэлементным преобразователем.

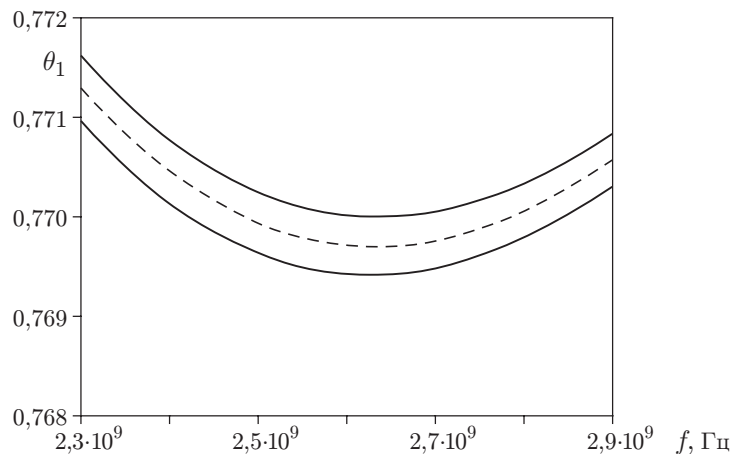


Рис. 2

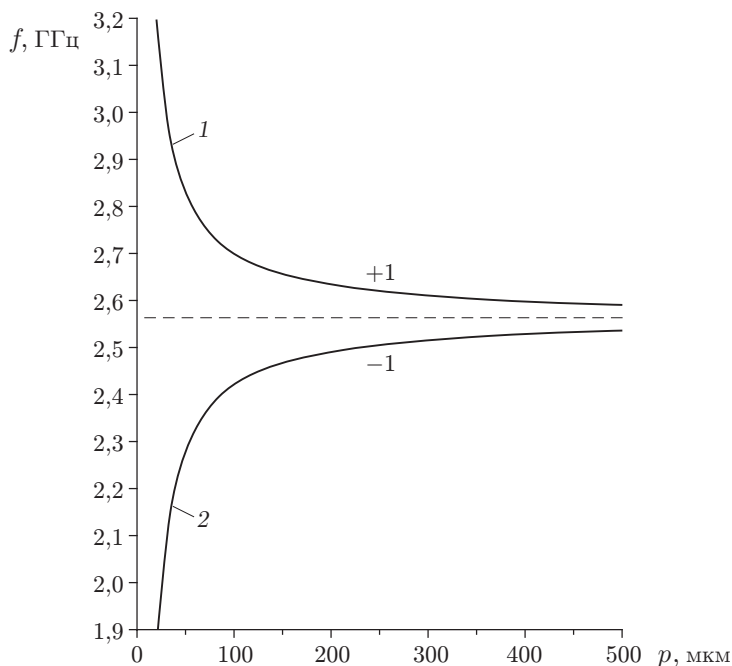


Рис. 3

На рис. 2 как пример показана рассчитанная частотно-угловая характеристика для анизотропной ячейки Брэгга на ниобате лития  $YZ + 120^\circ$  среза с многоэлементным преобразователем длиной 2 мм и периодом 200 мкм. Область углов, в которой снижение эффективности акустооптического взаимодействия не превышает 3 дБ, ограничена сплошными линиями. Полоса частот составляет величину около 420 МГц при центральной частоте 2633 МГц.

Анализ частотно-угловых характеристик анизотропных дефлекторов на ниобате лития  $YZ + 120^\circ$  среза с преобразователями одинаковой длины и различными периодами следования электродов позволил установить зависимость центральной частоты диапазона дефлектора от периода многоэлементного преобразователя. Для геометрии взаимодействия, соответствующей точке 2 (см. рис. 1), эта зависимость показана на рис. 3. Кривые 1 и 2 отображают зависимости при работе анизотропной брэгговской ячейки на акустических лепестках  $+1$  и  $-1$  пространственных гармоник многоэлементного преобразователя соответственно. Центральная частота анизотропного дефлектора на ниобате лития  $YZ + 120^\circ$  среза с одноэлементным преобразователем отмечена на рисунке пунктирной линией и равна 2563 МГц. Абсолютная полоса частот анизотропной акустооптической ячейки Брэгга на ниобате лития с многоэлементным преобразователем практически не зависит от его периода и совпадает с полосой частот анизотропной ячейки Брэгга с одноэлементным преобразователем для преобразователей равной длины. Необходимо отметить, что направление распространения упругой волны при рассмотренных значениях периода изменяется от  $116$  до  $123^\circ$ , что близко к оптимальной с точки зрения эффективности дифракции величине  $120^\circ$ .

**Заключение.** В данной работе показано, что абсолютная полоса частот анизотропной акустооптической ячейки Брэгга на ниобате лития с многоэлементным преобразователем практически не зависит от его периода и совпадает с полосой частот анизотропной ячейки Брэгга с одноэлементным преобразователем. Изменение периода преобразователя от 400 до 25 мкм позволяет менять центральную частоту при соответствующем выборе бокового лепестка диаграммы направленности преобразователя от 2 до 3 ГГц. При этом направле-

ние распространения упругой волны отличается незначительно от оптимального с точки зрения дифракционной эффективности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Dixon R. W.** Acoustic diffraction of light in anisotropic media // IEEE Journ. Quantum Electron. 1967. **QE-3**, N 2. P. 85–93.
2. **Chang I. C., Lee S.** Efficient wideband acousto-optic Bragg cells // Proc. of the IEEE Ultrasonics Symposium. 1983. Vol. 1. P. 427–430.
3. **А. с. 989520 СССР.** Многоканальный акустооптический дефлектор /Ю. А. Зюрюкин, Е. Л. Никишин, Н. М. Ушаков. Опубл. 1983, БИ № 2.
4. **Демидов А. Я., Задорин А. С., Пуговкин А. В.** Широкополосная аномальная дифракция света на гиперзвуке в кристалле  $\text{LiNbO}_3$  // Акустооптические методы и техника обработки информации: Межвуз. сб. Л.: ЛЭТИ, ЛИАП, 1980. С. 106–111.
5. **Кайно Г.** Акустические волны: Устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов: Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 656 с.

*Поступила в редакцию 24 июня 2011 г.*

---