

УДК 535.89+537.228.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ НЕПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА В КУБИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ

*Бережной А. А., Гуревич В. З., Попов Ю. В.*

Проведено теоретическое исследование возможности использования кубических электрооптических кристаллов для фазовой модуляции неполяризованного или поляризованного произвольным образом света. Для случаев centrosимметричных и неcentrosимметричных кубических кристаллов определены направления, в которых имеет место такой вид модуляции.

Эффективность систем адаптивной оптики существенным образом зависит от возможности осуществления оперативной фазовой коррекции волнового фронта оптического излучения в процессе его прохождения через систему оптической обработки. Основная проблема состоит в том, что коррекции при этом должно подвергаться неполяризованное или поляризованное произвольным образом излучение.

Электрооптические кристаллы, как правило, используются для фазовой модуляции света, плоскость поляризации которого ориентирована вдоль собственных векторов поляризации кристалла в плоскости сечения эллипсоида показателей преломления фронтом световой волны.

В настоящей работе рассматривается возможность использования кубических электрооптических кристаллов для фазовой модуляции света с произвольной поляризацией или неполяризованного.

Наиболее характерной особенностью кубических кристаллов является их оптическая изотропность в отсутствие внешних воздействий. При приложении к кубическому кристаллу электрического напряжения в кристалле возникает изменение показателя преломления, зависящее от величины поля по линейному или квадратичному закону в зависимости от того, является ли кристалл соответственно неcentrosимметричным или centrosимметричным.

Для фазовой модуляции неполяризованного света необходимо использовать кристаллический срез, для которого характерно отсутствие естественного и индуцированного двупреломления, т. е. основной особенностью этого среза должна являться оптическая изотропность как при отсутствии внешних воздействий (в кубических кристаллах это условие выполняется для всех направлений), так и при их наличии. Таким образом, основной задачей является определение кристаллических срезов, удовлетворяющих этим условиям.

Из соображений симметрии очевидно, что существование такого среза возможно только при использовании продольного электрооптического эффекта, так как поперечный электрооптический эффект нарушает изотропность кристалла в плоскости фронта световой волны.

Исследование оптической анизотропии, индуцированной в кубических кристаллах, проводилось на основе метода, изложенного в [1]. Ограничимся рассмотрением движения волнового вектора световой волны  $\mathbf{k}$  ( $\mathbf{k} \parallel \mathbf{E}_0$  для случая продольного электрооптического эффекта, где  $\mathbf{E}_0$  — вектор напряженности приложенного к кристаллу электрического поля) в плоскостях симметрии (100) и

(110). Для этих двух случаев направление волнового вектора  $\mathbf{k}$  будем определять относительно оси [001] углом  $\theta$ .

Можно показать, что значения показателей преломления в плоскости фронта световой волны представляются следующими выражениями

$$n_x = \left( \frac{1}{2} A \sin 2\varphi - B \sin^2 \varphi + C \right)^{-1/2}, \quad n_y = \left( -\frac{1}{2} A \sin 2\varphi - B \cos^2 \varphi + C \right)^{-1/2}. \quad (1)$$

Здесь угол  $\varphi$  определяет положение главных осей эллиптического сечения эллипсоида показателей преломления плоскостью фронта световой волны относительно оси [100] при движении волнового вектора в плоскости (100) и относительно оси [110] при движении волнового вектора в плоскости (110), т. е. относительно осей, перпендикулярных к плоскости движения волнового вектора.

В выражении (1) значения коэффициентов  $A, B, C$  зависят от плоскости, в которой движется волновой вектор, и определяются следующим образом:

для плоскости (100)

$$\left. \begin{aligned} A &= 2a_{12} \cos \theta + 2a_{13} \sin \theta, \\ B &= (a_{11} - a_{22}) + (a_{22} - a_{33}) \sin^2 \theta - a_{23} \sin 2\theta, \\ C &= a_{11}; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

для плоскости (110)

$$\left. \begin{aligned} A &= (a_{11} - a_{22}) \cos \theta + \sqrt{2} (a_{23} - a_{13}) \sin \theta, \\ B &= \frac{1}{2} (a_{11} - a_{22}) \sin^2 \theta + (a_{22} - a_{33}) \sin^2 \theta + \frac{\sqrt{2}}{2} (a_{13} + a_{23}) \sin 2\theta - a_{12} (1 + \cos^2 \theta), \\ C &= \frac{1}{2} (a_{11} + a_{22}) - a_{12}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $a_{ij} = r_{ijk} E_k$  для линейного электрооптического эффекта (нецентросимметричные кубические кристаллы) и  $a_{ijkl} = R_{ijkl} e E_k E_l$  для квадратичного электрооптического эффекта (центросимметричные кубические кристаллы);  $r_{ijk}$  и  $R_{ijkl}$  — линейный и квадратичный электрооптические коэффициенты соответственно.

Так как значения  $r_{ijk}$  и  $R_{ijkl}$  задаются обычно в кристаллофизических осях, то продольная составляющая поля должна быть представлена также в проекциях на эти оси. Эти выражения для проекций будут иметь вид

для плоскости (100) :  $E_1 = 0, E_2 = -E_0 \sin \theta, E_3 = E_0 \cos \theta;$

для плоскости (110) :  $E_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \sin \theta, E_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \sin \theta, E_3 = E_0 \cos \theta.$

Как указывалось выше, условием фазовой модуляции неполяризованного света является оптическая изотропность сечения эллипсоида показателей преломления фронтом световой волны, т. е. должно выполняться условие  $n_x = n_y$ . Из (1), (2) и (3) определяются следующие условия изотропности сечения:

для центросимметричных кристаллов

$$(100) : \Delta n = n_0^3 E_0^2 (R_{11} - R_{12} - 2R_{44}) \sin^2 2\theta_1 = 0, \quad (4)$$

$$(110) : \Delta n = \frac{1}{2} n_0^3 E_0^2 (R_{11} - R_{12} - 2R_{44}) \left( 1 - \frac{3}{2} \sin^2 \theta_2 \right) \sin^2 \theta_2 = 0; \quad (5)$$

для нецентросимметричных кристаллов

$$(100) : \Delta n = -\frac{1}{2} n_0^3 r_{41} E_0 \left( 1 - \frac{3}{2} \sin^2 \theta_3 \right) \cos \theta_3 = 0, \quad (6)$$

$$(110) : \Delta n = n_0^3 r_{41} E_0 \cos 2\theta_4 = 0. \quad (7)$$

Решая эти уравнения, можно определить значения углов для всех рассмотренных случаев

$$\theta_1 = \frac{1}{2} k\pi \rightarrow \{001\}; \quad \theta_2 = k\pi \rightarrow \{100\} \text{ или } \theta_2 = \arcsin \left( \sqrt{\frac{2}{3}} + 2\pi \right) \rightarrow \{111\};$$

$$\theta_3 = \frac{1}{2} k\pi \rightarrow \{001\}; \quad \theta_4 = k\pi \rightarrow \{100\} \text{ или } \theta_4 = \arcsin \left( \sqrt{\frac{2}{3}} + 2\pi \right) \rightarrow \{111\}.$$

Подставляя значения этих углов в (1), получаем значения изотропного изменения величины показателя преломления вдоль осей  $x$  и  $y$  при приложении электрического поля.

Выражения для всех четырех случаев имеют вид

$$\delta n_1 = \frac{1}{2} n_0^3 R_{12} E_0^2, \quad (8)$$

$$\delta n_2 = \frac{1}{6} n_0^3 (R_{11} + 2R_{12} - 2R_{44}) E_0^2, \quad (9)$$

$$\delta n_3 = 0, \quad (10)$$

$$\delta n_4 = \frac{1}{2\sqrt{3}} n_0^3 r_{41} E_0. \quad (11)$$

Из проведенного анализа следует, что для кубических centrosимметричных кристаллов существуют два направления изотропного индуцированного изменения фазы —  $\{001\}$  и  $\{111\}$ , а для неcentrosимметричных — одно —  $\{111\}$ , так как в направлении  $\{001\}$  электрооптический эффект отсутствует.

Важно отметить, что величина индуцированного изменения фазы для неcentrosимметричных кристаллов не зависит от структурных особенностей кристалла, а полностью определяется его симметрией, в то время как для centrosимметричных кристаллов в направлении  $\{111\}$  существенную роль играет анизотропия электрооптического эффекта, связанная со структурой кристалла. Анизотропия выражается в определенном соотношении между величинами и знаками квадратичных электрооптических коэффициентов, которое играет существенную роль в определении величины индуцированного изменения фазы, как следует из выражения (9). В случае изотропности электрооптического эффекта, которая выражается условием  $R_{11} - R_{12} = 2R_{44}$ , выражение (9) переходит в (8), т. е. в этом случае для любого направления будет наблюдаться чисто фазовая модуляция (отсутствие индуцированного двупреломления).

Существенная величина фазовой модуляции будет иметь место в сегнетоэлектрических электрооптических кристаллах типа перовскитов, находящихся в параэлектрической фазе, в которой они обладают кубической симметрией. Условие изотропности  $R_{11} - R_{12} = 2R_{44}$  для этих кристаллов практически всегда выполняется [2], поэтому в таких кристаллах, как титанат бария, титанат стронция и т. д., фазовая модуляция при продольном эффекте будет наблюдаться в любом направлении. Однако следует отметить, что в этих кристаллах  $R_{12} \ll R_{11}$ , поэтому эффективность такой модуляции незначительна.

В связи с этим следует обратить внимание на сегнетоэлектрические кристаллы с размытым фазовым переходом, для которых характерно нарушение изотропности. В этом случае наблюдается эффективная фазовая модуляция в направлении  $\{111\}$ . Величина полуволнового напряжения  $U_\pi$  (при котором наблюдается изменение фазы модулируемого света на  $\pi$ ) для фазовой модуляции этих кристаллов составляет  $U_\pi \approx 3.1 \sqrt{l}$ , где  $l$  — толщина кристаллической пластины. Следует отметить, что вследствие такого вида зависимости  $U_\pi$  от  $l$  величина  $U_\pi$  уменьшается с уменьшением толщины кристалла [3]. Однако такая зависимость имеет место лишь до определенной толщины кристалла, при которой происходит линеаризация эффекта. В связи с этим оптимальной является толщина  $l = 100 \div 300$  мкм.

Для неcentrosимметричных кристаллов эффективность фазовой модуляции зависит только от величины коэффициента  $r_{41}$ , фазовая модуляция имеет место в направлении  $\{111\}$ . Среди неcentrosимметричных кубических кристаллов наибольшее распространение получили кристаллы ZnSe, ZnS и  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ . Интересно отметить, что кристаллам  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  присуще свойство оптической активности, которое может оказать существенное влияние на фазовую модуляцию, поэтому их применение возможно лишь при небольших толщинах кристаллической пластины, что ограничивает величину управляющего напряжения. Однако с учетом того факта, что величина электрооптического коэффициента у кристаллов  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  выше, чем у ZnS и ZnSe примерно в 3 раза, они являются более перспективными для фазовой модуляции. Расчет показывает, что в кри-

сталлах  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  среза  $\{111\}$  изменение фазы на  $\pi$  возможно при подаче управляющего напряжения  $\sim 12.3$  кВ.

Экспериментальное исследование процесса фазовой модуляции неполяризованного света в кубических кристаллах магнониобата свинца (центросимметричный) и  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  (нецентросимметричный) показали хорошее качественное совпадение с теоретическими данными.

Итак, проведенные исследования показали возможность фазовой модуляции неполяризованного света при использовании кубических электрооптических кристаллов, центросимметричных и нецентросимметричных. Наибольший интерес для практического использования представляют сегнетоэлектрические кристаллы с размытым фазовым переходом типа магнониобата свинца. Полученные результаты позволяют направить усилия синтеза оптически однородных электрооптических кубических кристаллов по пути выращивания кристаллов определенных выше срезов для целей фазовой модуляции неполяризованного света.

#### Литература

- [1] Бережной А. А. — Опт. и спектр., 1982, т. 52, в. 2, с. 307—311.
- [2] Смоленский Г. А., Боков В. А., Исупов В. А., Крайчик Н. Н., Пасынков Р. Е., Шур М. С. Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики. Л., 1974.
- [3] Бережной А. А. — ФТТ, 1982, т. 14, в. 9, с. 2576—2580.

Поступило в Редакцию 12 сентября 1983 г.