

О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ  
МОДУЛЯТОРОВ НА ТОНКИХ ПЛАСТИНКАХ КРИСТАЛЛОВ PMN

И. И. Адрианова, А. А. Бережной, В. Г. Крастин и Ю. В. Попов

В работе обсуждается вопрос о возможности создания электрооптических элементов (ЭОЭ) из тонких кристаллических пластинок PMN. Исследованы ЭОЭ с электродами, нанесенными на «светопропускающую» поверхность кристаллов. Приводится метод расчета полуволновых напряжений в ЭОЭ с данной системой электродов с учетом неоднородности электрического поля в кристаллах.

Для кристаллов магнониобата свинца  $Pb_3MgNb_2O_9$  (PMN) характерна изотропность оптических свойств и большая величина поперечного квадратичного электрооптического эффекта [ $\cdot^2$ ]. Кроме того, в области напряженностей электрического поля выше  $E_0 = 4$  кВ/см в кристаллах PMN наблюдается линеаризация квадратичного электрооптического эффекта. Переход от квадратичного к линейному электрооптическому эффекту объясняется нелинейностью восприимчивости в сегнетоэлектриках с размытым фазовым переходом [ $^3$ ]. Все это позволяет создавать электрооптические элементы из тонких кристаллических пластинок PMN ( $l = 0.1 \div 0.2$  мм) с довольно малыми значениями полуволнового напряжения  $V_{\lambda/2}$ , причем такие ЭОЭ могут работать в режиме как квадратичного, так и линейного эффекта в зависимости от напряженности поля. Использование малых толщин кристаллов вдоль направления распространения света уменьшает влияние неоднородности кристалла на контрастность ЭОЭ.

Применение электродов, нанесенных на «светопропускающую» поверхность кристалла, дает возможность избежать влияния упругооптических напряжений, существующих в кристалле у его краев, на контрастность ЭОЭ, а также позволяют довольно легко задавать расстояние между электродами.

На полированную поверхность тонкой пластинки PMN может быть нанесена целая система электродов в виде полос, к каждой из которых подводится напряжение определенной полярности. Если отношение ширины полосы к расстоянию между соседними полосами будет достаточно мало, то возникает возможность получить ЭОЭ с широким «окном» и малыми оптическими потерями. Таким же способом можно создать целую систему независимо управляемых ЭОЭ на одной пластинке PMN [ $^4$ ].

Высказанные выше предложения были проверены на кристалле PMN, вырезанном в виде параллелепипеда с размерами  $5 \times 4 \times 1.1$  мм вдоль кристаллографических направлений (100), (010) и (001) соответственно. Электрическое поле прикладывалось в направлении (100), свет распространялся вдоль (001). Серебряные электроды наносились на одну или обе полированные («светопропускающие») грани кристалла. Расстояние между электродами изменялось в пределах от 0.025 до 0.5 см. В качестве источника света был использован He—Ne лазер ( $\lambda = 0.63$  мкм). Измерения проводились при комнатной температуре.

Дальнейшие рассуждения ведутся для случая, когда электроды нанесены только на одну из «светопропускающих» поверхностей кристалла.

Общее изменение индуцированного двупреломления  $\Delta n$  в кристаллах PMN с учетом линеаризации можно представить в следующем виде:



$$\Delta n = \frac{1}{2} n_0^3 [(R_{11} - R_{12}) f(E^2) + (r_{33} - r_{31}) \varphi(E)], \quad (1)$$

$$f(E^2) = \begin{cases} E^2 & \text{при } E \leq E_0, \\ E_0^2 & \text{при } E > E_0, \end{cases} \quad (1a) \quad \varphi(E) = \begin{cases} 0 & \text{при } E \leq E_0, \\ E - E_0 & \text{при } E > E_0, \end{cases} \quad (16)$$

где  $n_0$  — коэффициент преломления PMN,  $R_{11}$  и  $R_{12}$  — квадратичные электрооптические коэффициенты;  $r_{33}$  и  $r_{31}$  — линейные электрооптические коэффициенты;  $E_0$  — напряженность электрического поля, при которой начинается линейаризация квадратичного электрооптического эффекта. Исходя из формулы (1), легко получить выражение для величины полуволновой напряженности электрического поля

$$E_{\lambda/2} = \frac{\lambda}{(r_{33} - r_{31}) l n_0^3} + E_0 \left( 1 - \frac{(R_{11} - R_{12})}{(r_{33} - r_{31})} E_0 \right), \quad (2)$$

где  $l$  — размер кристалла в направлении распространения света. Подставляя в формулу (2) числовые значения входящих в нее величин,  $E_0 = 4$  кВ/см,  $n_0 = 2.57$ ,  $R_{11} - R_{12} = 1.31 \times 10^{-12}$  см<sup>2</sup>/В<sup>2</sup>,  $r_{33} - r_{31} = 167 \cdot 10^{-10}$  см/В [2],  $\lambda = 0.63$  мкм,  $l = 0.11$  см, в результате имеем значение полуволнового напряжения на первой ветви

$$V_{\lambda/2} = 4.78d, \text{ кв}, \quad (3)$$

где  $d$  — расстояние между электродами в сантиметрах. Из формулы (3) видно, что величина  $V_{\lambda/2}$  должна линейно зависеть от расстояния между электродами.

На рис. 1 показаны зависимости пропускания системы, состоящей из поляризатора, электрооптического элемента и анализатора, от прикладываемого к ЭОЭ напряжения и расстояния между электродами. При малых расстояниях между электродами преобладает линейный электрооптический эффект, так как  $E_0 = 4$  кВ/см достигается уже при очень малых управляющих напряжениях.

С увеличением  $d$  доля квадратичного эффекта возрастает. Переход от линейного к квадратичному электрооптическому эффекту сказывается на виде кривых пропускания. Так, кривая 1 характерна для чисто линейного эффекта, а кривая 6 приближается к виду, характерному для чисто квадратичного электрооптического эффекта. На рис. 2 приведена зависимость полуволновых напряжений от  $d$  (кривая 1), которые были определены по кривой пропускания. Зависимость имеет явно нелинейный характер. Такая несогласованность экспериментальных результатов с формулой (3) объясняется неоднородностью электрического поля внутри кристалла, возникающей при использовании предложенной системы электродов.

С целью учета влияния неоднородности электрического поля на параметры ЭОЭ было рассчитано распределение поля по толщине пластинки (вдоль направления распространения света) в центре «окна» [5]. Расчет проводился по формуле

$$E = \frac{d^2}{(d^2 + 4y^2)^{3/2}} V, \quad (4)$$

где  $y$  — текущее значение толщины кристалла,  $E$  — напряженность электрического поля в направлении, перпендикулярном направлению распространения света.

Неоднородность поля в кристалле можно учесть при расчете  $V_{\lambda/2}$ , представив кристалл в виде нескольких «слоев»  $l_i$ , в каждом из которых

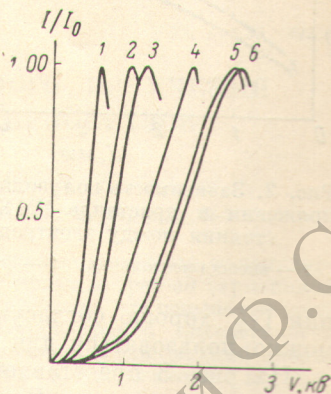


Рис. 1. Зависимость пропускания системы поляризатор—ЭОЭ—анализатор от прикладываемого напряжения при разных расстояниях между электродами.

1 — 0.25, 2 — 0.65, 3 — 1.04, 4 — 2.47, 5 — 3.2, 6 — 5 мм.

Ф. СКОРИНЫ



действует однородное электрическое поле, вычисленное по формуле (4). Тогда из формулы (1) получим выражение для суммарного изменения фазы прошедшего через ЭОЭ света

$$\Delta\Phi = \frac{\pi l_0}{\lambda} n_0^3 \sum_i (R_{11} - R_{12}) f(E_i^2) + (r_{33} - r_{31}) \varphi(E_i), \quad (5)$$

где  $l_0$  — толщина «слоя». Точность определения  $\Delta\Phi$  зависит от количества «слоев». В нашем случае условное деление кристалла на «слои» толщиной  $l_0 = 0.1$  мм дало достаточно высокую расчетную точность определения  $\Delta\Phi$ . На рис. 2 приведена зависимость полуволнового напряжения от  $d$ , рассчитанная по формуле (5). Видно, что при учете неоднородности электрического поля в кристалле экспериментальные значения

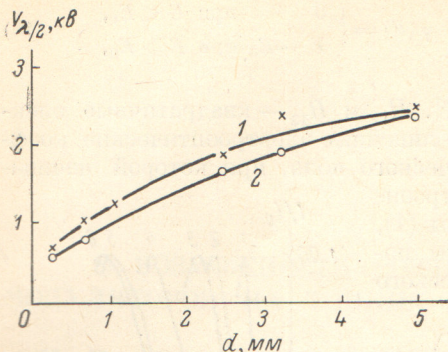


Рис. 2. Зависимость полуволнового напряжения в кристалле PMN от расстояния между электродами.

1 — экспериментальная, 2 — расчетная.

ния  $V_{\lambda/2}$  хорошо согласуются с расчетными. Таким образом, формулой (5) можно пользоваться для ориентировочного расчета  $V_{\lambda/2}$ .

На рис. 3 представлено рассчитанное по формуле (4) распределение электрического поля  $E$  по толщине кристалла. Из рис. 3 следует, что, варьируя толщину кристалла в направлении распространения света и расстояние между электродами, можно создать достаточно однородное поле внутри кристалла при нанесении электродов только на одну из «светопропускающих» поверхностей. Поле в кристалле можно считать однородным при соблюдении условия  $d \geq 4l$ .

Таким образом, в результате проведенных исследований была показана возможность создания электрооптических модуляторов на тонких пластинках кристаллов PMN. Нанесение электродов на «светопропускающую» поверхность пластинки позволяет варьировать расстояние между электродами, а также упрощает технологию изготовления электрооптического элемента.

Получено выражение для расчета полуволновых напряжений с учетом неоднородности электрического поля. Расчетные значения  $V_{\lambda/2}$  хорошо согласуются с экспериментальными. Показана возможность подбора геометрических размеров ЭОЭ расчетным путем.

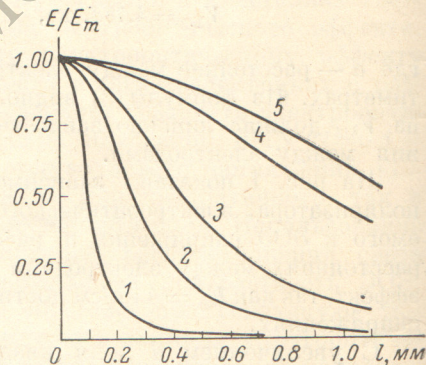


Рис. 3. Распределение электрического поля по толщине пластинки при электродах, нанесенных на ее поверхность, с расстоянием  $d$  между ними.

1 —  $d=0.25$ , 2 —  $0.65$ , 3 —  $1.04$ , 4 —  $2.47$ , 5 —  $3.2$  мм;  $E$  — напряженность поля на данной глубине,  $E_m$  — напряженность прикладываемого электрического поля.

#### Литература

- [1] А. А. Бережной. Изв. АН СССР, сер. физ., 31, 1154, 1967.
- [2] И. И. Адрианова, А. А. Бережной, В. В. Нефедова, В. А. Письменный, Ю. В. Попов, К. П. Скорнякова. Опт. и спектр., 35, 888, 1973.
- [3] Г. А. Смоленский, Н. Н. Крайник, А. А. Бережной, И. Е. Мыльникова. ФТТ, 10, 465, 1968.
- [4] I. H. Naertling, C. E. Land, I. A. m. Cer. Soc., 54, 17, 1971.
- [5] Н. Н. Миролубов, М. В. Костенко, М. Л. Левинштейн, Н. Н. Тиходеев. Методы расчета электростатических полей, 17. Изд. «Высшая школа», М., 1963.

Поступило в Редакцию 15 ноября 1973 г.