

## РАСЧЕТ ЛАЗЕРНЫХ ПОЛЯРИЗАТОРОВ НА ОСНОВЕ ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

Ю. А. Нестриженко

Приведен расчет поляризаторов на основе полного внутреннего отражения для различных ориентаций волновой нормали относительно собственных векторов электрического тензора. Приведены величины спектрального интервала поляризатора. Показано, что расширения спектрального интервала и увеличения поляризующего действия за счет изменения угла падения можно достичь ориентированием входных граней поляризатора под углом Брюстера и при использовании двулучепреломления.

Ранее приводился расчет поляризаторов на основе полного внутреннего отражения (ППВО), изготовленных из положительного кристалла, для различных ориентаций оптической оси относительно плоскости падения [1]. В настоящем сообщении приведен расчет коэффициента отражения  $K_n$  подавляемой компоненты поляризации, которая в ППВО не испытывает полного внутреннего отражения (ПВО) при угле ПВО для основной компоненты поляризации. Расчет проведен в зависимости от величины двулучепреломления (разницы показателей преломления ортогонально поляризованных лучей) и взаимной ориентации единичного вектора волновой нормали  $\mathbf{n}$  относительно собственных векторов электрического тензора  $\epsilon$  (изложенным в [1] способом) в общем случае для двuosных кристаллов, характеризующихся тремя главными значениями показателя преломления  $n_1 = \sqrt{\epsilon_1}$ ,  $n_2 = \sqrt{\epsilon_2}$  и  $n_3 = \sqrt{\epsilon_3}$ . Рассмотрен тот случай, когда один из собственных векторов электрического тензора  $\epsilon$ , например  $\epsilon_1$ , перпендикулярен плоскости падения, а два других —  $\epsilon_2$  и  $\epsilon_3$  — лежат в плоскости падения волн, причем один из них, например  $\epsilon_2$ , составляет угол  $\alpha$  с единичным вектором нормали к поверхности раздела  $\mathbf{q}$ . Заметим, что в двоякопреломляющих кристаллах зависимость коэффициента отражения  $p$ -компоненты от угла падения выражается в общем случае формулой Френеля для анизотропных сред, приведенной в [2], или формулой Френеля для изотропных сред [3], если  $n_2 = n_3$ , а  $s$ -компоненты — формулой Френеля для изотропных сред. При генерации  $p$ -компоненты увеличивается стойкость призмы к мощному излучению [4] и наблюдается большее сужение диаграммы направленности излучения лазера [5], чем при генерации  $s$ -компоненты.

1. Пусть  $n_2 > n_1 \leq n_3$ . Если  $n_2 > n_3$ , то при угле ПВО для  $p$ -компоненты,  $s$ -компонента отражается частично. Угол ПВО определяется из выражения

$$\sin \psi = (n')^{-1} = (n_2 n_3)^{-1} \sqrt{n_3^2 + (n_3^2 - n_2^2) [\mathbf{n} \epsilon_2]^2},$$

где  $n'$  — показатель преломления в направлении волновой нормали падающей волны  $\mathbf{n}$ . Коэффициент отражения  $s$ -компоненты при угле ПВО для  $p$ -компоненты определяется выражением

$$K_n = \left( \frac{n_1 \sqrt{n'^2 - 1} - \sqrt{n'^2 - n_1^2}}{n_1 \sqrt{n'^2 - 1} + \sqrt{n'^2 - n_1^2}} \right)^2.$$

Максимальное различие углов ПВО  $p$ - и  $s$ -компонент, а следовательно, и минимальный коэффициент отражения  $s$ -компоненты будет иметь место при условии, что  $(n\epsilon_2)=0$ , при этом  $\cos \alpha = \sin \psi = n^{-1}$ .

При  $n_2 = n_3 = n_0$  имеет случай одноосных отрицательных кристаллов (кальцит, корунд; оптическая ось перпендикулярна плоскости падения), для которых  $n' = n_0$  (для обычного,  $o$ -луча) и  $n_1 = n_e$  (для необыкновенного  $e$ -луча), а угол  $\alpha$  может быть любым. Если  $n_1 = n_3 = n_0$ , имеем случай одноосных положительных кристаллов (кварц; оптическая ось лежит в плоскости падения), для которых  $n' = n_2 = n_e$ .

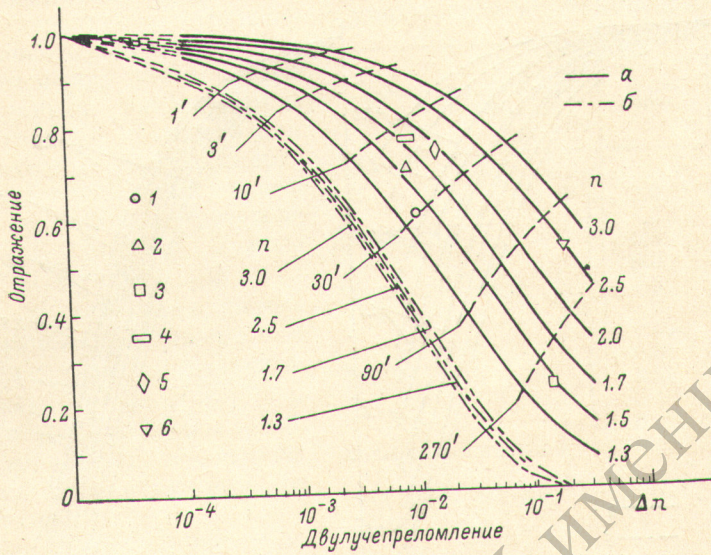


Рис. 1. Зависимость  $K_n$  от  $n$  и  $\Delta n$  для положительных и отрицательных кристаллов.

Коэффициенты отражения  $s$ -компоненты при угле ПВО для  $p$ -компоненты, рассчитанные по формуле (1), представлены на рис. 1 (кривые  $a$ ), где  $n = n_1$ , а  $\Delta n = |n_1 - n'|$ . Цифрами обозначены: 1 — фтористый магний, 2 — кварц, 3 — кальцит, 4 — корунд, 5 — вольфрамат кальция, 6 — двуокись титана. Штриховыми линиями указана разница между углами ПВО  $p$ - и  $s$ -компонент при различных  $n$ .

2. Если  $n_2 < n_1 \geq n_3$ , то при угле ПВО для  $s$ -компоненты  $p$ -компонента отражается частично. Угол ПВО  $s$ -компоненты определяется из условия  $\sin \psi = n_1^{-1}$ , коэффициент отражения  $p$ -компоненты при этом угле падения выразится формулой

$$K_u = \left( \frac{n_2 n_3 \sqrt{n_1^2 - n'^2} - \sqrt{A n_1^2 - n'^2}}{n_2 n_3 \sqrt{n_1^2 - n'^2} + \sqrt{A n_1^2 - n'^2}} \right)^2,$$

где  $A = n_2^2 + (n_3^2 - n_2^2)(qc)^2$ .

При  $n_2 = n_3 = n_e$  имеем случай одноосных положительных кристаллов (выражение для  $K_n$  приведено в [1]). Если  $n_1 = n_3 = n_0$ , имеем случай одноосных отрицательных кристаллов с оптической осью, лежащей в плоскости падения. Выражение для  $K_n$  совпадает в этом случае с приведенным в [1] выражением для  $K_n$  в положительном кристалле при замене индексов  $e$  и  $o$  на  $o$  и  $e$ . Максимальное различие между углами ПВО  $s$ - и  $p$ -компонент получаются в случае, если  $(n\epsilon_2) = 0$ . В этом случае  $\epsilon_2$  совпадает по направлению с единичным вектором оптической оси  $e$ , и должно соблюдаться условие  $(cq) = n_0^{-1}$ .

Коэффициент отражения  $p$ -компоненты при угле ПВО для  $s$ -компоненты приведен на рис. 1 (кривые  $b$ ). Коэффициент отражения луча по направлению поляризации в этих случаях для положительных и отрицатель-

ных кристаллов совпадают. На рис. 1 приведены коэффициенты отражения только для  $n=1.3, 1.7, 2.5, 3.0$ , так как коэффициенты отражения для  $n=1.5$  и  $2.0$  почти совпадают с коэффициентами отражения для  $n=1.7$  и  $2.5$  соответственно. Как видно из рис. 1, этот случай соответствует минимальному коэффициенту отражения подавляемой  $p$ -компоненты при угле ПВО для основной  $s$ -компоненты. Обращает на себя внимание также слабая зависимость  $K_n$  от  $n$ .

3. Если  $n_2 > n_1 > n_3$ , то при  $(n\varepsilon_2) = n_3 (n_2^2 - n_1^2)^{1/2} [n_1 (n_2^2 - n_3^2)^{1/2}] = \cos \beta$  углы ПВО для  $s$ - и  $p$ -компонент совпадают. Это происходит при

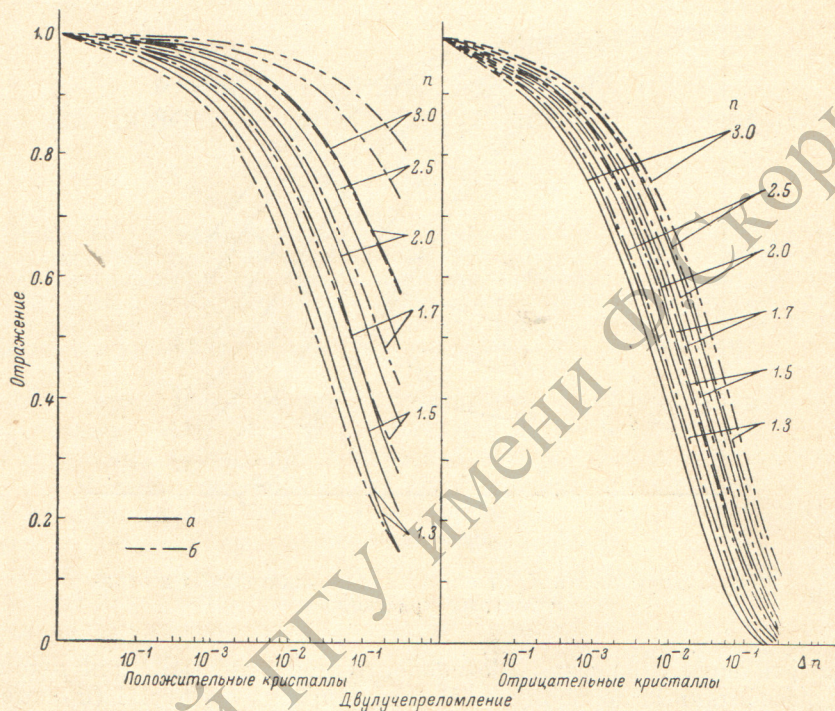


Рис. 2. Зависимость  $K_n$  от  $n$  и  $\Delta n$  в зависимости от ориентации  $c$  в плоскости падения.

$\alpha = \beta - \psi$ , где  $\psi = \arcsin (n')^{-1}$ . Если  $\alpha < \beta - \psi$ , ПВО испытывает  $p$ -компонента и рассмотрение сводится к случаю 1. Если  $\alpha > \beta - \psi$ , ПВО испытывает  $s$ -компонента и рассмотрение сводится к случаю 2.

4. На рис. 2 ( $n$  - меньший показатель преломления,  $\Delta n = |n_0 - n_e|$ ) приведены коэффициенты отражения подавляемой компоненты поляризации при различных ориентациях  $c$  (лежащего в плоскости падения) относительно нормали к поверхности раздела: кривые  $a$  соответствуют  $c \perp q$ , кривые  $b$  -  $c \parallel q$ . Эти случаи представляют определенный интерес, так как зачастую ориентация оптической оси обусловлена способом выращивания анизотропного кристалла. Соответствующие коэффициенты отражения для положительных кристаллов (ПВО испытывает  $p$ -компонента) рассчитывались по формулам, приведенным в [1], а для отрицательных (ПВО испытывает  $s$ -компонента) - по формулам, следующим из [1]

$$P_{\perp} = \left( \frac{n_e \sqrt{n_0^2 - 1} - n_0 \sqrt{n_0^2 - n_e^2}}{n_e \sqrt{n_0^2 - 1} + n_0 \sqrt{n_0^2 - n_e^2}} \right)^2,$$

$$P_{\parallel} = \left( \frac{n_0^2 - n_e \sqrt{(n_0^2 - 1)(n_0^2 - n_e^2)}}{n_0^2 - n_e \sqrt{(n_0^2 - 1)(n_0^2 - n_e^2)}} \right)^2.$$

Эти случаи соответствуют 1 и 2 при  $n_1 = n_3$  и  $\alpha = 0$  и  $90^\circ$  соответственно.

Спектральный диапазон поляризатора на основе полного внутреннего отражения зависит, естественно, от дисперсии двоякопреломляющего материала и величины анизотропии показателя преломления. Если в поляризаторе предельный угол ПВО соответствует  $\lambda_{расч.}$  с показателем преломления  $n'$ , то подавляемая компонента будет испытывать потери в диапазоне длин волн от  $\lambda_{расч.}$  до  $\lambda_{пред.}$ , для которой показатель преломления  $n_1 = n'$ . В таблице приведены  $\lambda_{расч.}$  и соответствующие им  $\lambda_{пред.}$  для некоторых материалов при условии максимального различия в углах ПВО для  $e$ - и  $o$ -лучей.

В поляризаторах, где ПВО испытывает  $p$ -компонента, возможно увеличение спектрального интервала и уменьшение коэффициента отражения  $s$ -компоненты за счет увеличения разницы между углами падения на границу раздела кристалл—изотропная среда  $\Delta\phi$  для них, если входные грани поляризатора изготовлены под углом Брюстера. Если для поляризатора с нормальной входной гранью  $\Delta\phi = (\Delta n/\bar{n}^2) [1 + (1/\bar{n}^2)]$ , где  $\bar{n} = \sqrt{n_1 n'}$ , то для поляризатора с входной гранью, ориентированной под углом Брюстера,  $\Delta\phi$  увеличивается на величину  $(\Delta n/\bar{n} \sqrt{\bar{n}^2 + 1}) [1 + (1/6(\bar{n}^2 + 1))]$ . Добавочное ослабление  $s$ -компоненты происходит также и за счет отражения от входных граней.

В 90-градусных поляризационных призмах на основе ПВО [6] может быть увеличено за счет использования двулучеотражения — различия в углах отражения  $o$ - и  $e$ -лучей при ориентации оптической оси в плоскости падения под углом к отражающим граням, отличным от 0 и 90°. Это явление применялось ранее в поляризаторах [7, 8], где условие ПВО выполняется для обеих компонент поляризации. Если, однако, угол падения в таких призмах сделать не 45°, а равным углу ПВО только для основной компоненты поляризации, то подавляемая компонента будет не только отклоняться от первоначального направления, но и значительно ослабляться при отражении от одной из катетных граней. Используя результаты работы [2], можно определить, что максимальное отклонение подавляемой компоненты происходит при ориентации оптической оси под углом 45° к отражающим граням и равно  $\Delta\phi = 2\Delta n (\bar{n}^2 - 1)/\bar{n}^3$ . Суммарное отклонение при отражении от обеих катетных граней равно  $2\Delta n/\bar{n}$ . Если в таком поляризаторе основная компонента является  $e$ -лучом, 90-градусный угол должен быть уменьшен на величину  $\Delta n/\bar{n}$ , для того чтобы после прохождения такой призмы  $e$ -луч не изменил своего направления. В поляризаторах с использованием двулучеотражения при  $\Delta n \geq 1/2\bar{n}^2$  коэффициент отражения  $p$ -компоненты равен нулю при угле ПВО для  $s$ -компоненты. В поляризаторах же без использования двулучеотражения это происходит при величине  $\Delta n$  в  $\bar{n}$  раз большей [1].

#### Литература

- [1] Ю. А. Нестриженко. Опт. и спектр., 24, 1000, 1969.
- [2] А. П. Хапалюк. ДАН БССР, 4, 505, 1960.
- [3] Р. Дитчберн. Физическая оптика. Изд. «Наука», М., 1965.
- [4] В. В. Любимов, И. А. Ферсман, Л. Д. Хазов. Квантовая электроника, 2, 107, 1971.
- [5] L. G. De Shazer, E. A. Maunder. Appl. Optics, 6, 431, 1967.
- [6] Ю. А. Нестеренко. ПТЭ, 4, 214, 1973.
- [7] A. Cotton. Compt. Rend. 193, 268, 1931.
- [8] Ю. Э. Камач, Е. Н. Козловский, В. М. Овчинников, В. А. Шамбуров. ДАН СССР, 185, 1285, 1969.

Поступило в Редакцию 15 января 1973 г.

Двоякопреломляющий материал	$\lambda_{расч.}$ , мкм	$\lambda_{пред.}$ , мкм
Кварц SiO <sub>2</sub>	2.0	1.3
	1.0	0.61
	0.5	0.4
	0.3	0.27
	2.3	0.18
Исландский шпат CaCO <sub>3</sub>	0.69	0.534
Корунд Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.64	0.526
	0.54	0.47
	0.40	0.37
	0.266	0.25
Вольфрамат кальция CaWO <sub>4</sub>	0.656	0.34
	0.71	0.34
Фтористый магний MgF <sub>2</sub>		