

## ОГРАНИЧЕНИЯ УГЛОВОЙ АПЕРТУРЫ КОМПЕНСАТОРОВ ФОНОВЫХ СИГНАЛОВ В ДИСКРЕТНЫХ СКАНАТОРАХ СВЕТА

Э. И. Голованевский, Г. В. Гусев и М. Н. Красильников

В статье производится анализ и даются расчетные соотношения для определения угловой апертуры переключателя поляризации с компенсацией фонового света. Определены допуски на изготовление оптических элементов переключателя. Точность приведенных соотношений подтверждается экспериментально.

В ячейках дискретных сканаторов поляризованного монохроматического света успешно применяются переключатели поляризации, работа которых основана на продольном электрооптическом эффекте Погкельса в Z-срезах кристаллов типа KDP [1].

На выходе переключателя поляризации необходимо иметь строго линейную поляризацию заданного направления при возможно больших углах отклонения проходящего пучка света от оси сканатора. При отклонении луча от оси на выходе переключателя за счет естественного двулучепреломления возникают другие состояния поляризации, обуславливающие появление «фонового» света. Для его компенсации могут быть применены переключатели, состоящие из двух кристаллов Z-среза типа KDP и 90-градусного вращателя поляризации [2]. Идеальный вращатель поворачивает на 90° азимут поляризации, не изменяя ее вида. Если такой вращатель расположен между двумя электрооптическими кристаллами, то разность фаз, возникающая при неосевом прохождении света через первый кристалл, компенсируется во втором.

В настоящей работе исследована компенсация фона, возникающего при наклонном падении линейно поляризованного монохроматического света на переключатель, состоящий из двух кристаллов типа KDP и 90-градусного вращателя поляризации. Определены допуски на изготовление оптических элементов такого переключателя поляризации, обеспечивающие получение заданной его угловой апертуры. Найденные расчетные соотношения подтверждаются экспериментально.

90-градусный вращатель поляризации в рассмотренном переключателе состоит из двух полуволновых пластин, угол между осями наибольшей скорости которых составляет 45°.

Расчет угловой апертуры переключателя можно провести с помощью метода Джонса. Матрица Джонса оптического элемента, изменяющего поляризацию проходящего света, в общем случае имеет вид [3]

$$D = \begin{vmatrix} \cos^2 \rho e^{j \frac{\delta}{2}} + \sin^2 \rho e^{-j \frac{\delta}{2}} & 2j \sin \rho \cos \rho \sin \frac{\delta}{2} \\ 2j \sin \rho \cos \rho \sin \frac{\delta}{2} & \sin^2 \rho e^{j \frac{\delta}{2}} + \cos^2 \rho e^{-j \frac{\delta}{2}} \end{vmatrix}. \quad (1)$$

Здесь  $\rho$  — азимут оси наибольшей скорости, отсчитываемый от горизонтальной оси  $x$ ;  $\delta$  — разность фаз между ортогонально поляризованными



компонентами светового пучка, являющаяся функцией угла падения света  $\beta$  на кристалл, т. е.  $\delta = \delta(\beta)$ .

Пусть на переключатель падает вертикально поляризованный свет. Тогда его нормированный вектор Джонса

$$V_{\text{вх.}} = \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix}.$$

Обозначим через  $\delta_1$  и  $\delta_4$  разности фаз, возникающие между ортогонально поляризованными составляющими при косом к оси  $Z$  прохождении света в кристаллах КДР, а соответствующие разности фаз в пластинах 90-градусного вращателя поляризации — через  $\delta_2$  и  $\delta_3$ . Согласно вышесказанному, все эти разности фаз зависят от угла падения света на переключатель. Введем величины  $\Delta\delta_2$  и  $\Delta\delta_3$ , характеризующие отличие разностей фаз  $\delta_2$  и  $\delta_3$  от соответствующей  $\lambda/2$ , обусловленные наклоном прохождения света через пластины вращателя поляризации, так что

$$\left. \begin{aligned} \Delta\delta_2 &= \delta_2(\beta) - \frac{2\pi d}{\lambda}(n_e - n_o), \\ \Delta\delta_3 &= \delta_3(\beta) - \frac{2\pi d}{\lambda}(n_e - n_o), \end{aligned} \right\} (2)$$

где  $d$  — толщина одной полуволновой пластины вращателя,  $\lambda$  — длина волны света в воздухе,  $n_o$  и  $n_e$  — показатели преломления обыкновенного и необыкновенного лучей в пластинах вращателя.

В соответствии с условиями работы переключателя поляризации разности фаз  $\delta_1$  и  $\delta_4$ , а также величины  $\Delta\delta_2$  и  $\Delta\delta_3$  полагаются малыми.

Взаимная ориентация элементов переключателя такова, что азимуты осей наибольшей скорости для обоих кристаллов КДР  $\rho = 0^\circ$ , для первой полуволновой пластины вращателя поляризации  $\rho = 90^\circ$  и для второй  $\rho = 45^\circ$ .

Учитывая общий вид матрицы Джонса, представленный выражением (1), вектор Джонса выходящего из переключателя поляризации светового пучка  $V_{\text{вых.}}$  с точностью до членов первого порядка малости может быть определен матричным произведением вида

$$V_{\text{вых.}} = \begin{vmatrix} 1 + j\frac{\delta_4}{2} & 0 \\ 0 & 1 - j\frac{\delta_4}{2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} -\frac{\Delta\delta_3}{2} & j \\ j & -\frac{\Delta\delta_3}{2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} j - \frac{\Delta\delta_2}{2} & 0 \\ 0 & -j - \frac{\Delta\delta_2}{2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 + j\frac{\delta_1}{2} & 0 \\ 0 & 1 - j\frac{\delta_1}{2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix}.$$

Четыре матрицы, стоящие перед вектором Джонса для входящего пучка света, учитывая порядок расположения элементов переключателя, отвечают (справа налево): первому кристаллу КДР ( $\rho = 0^\circ$ ), первой полуволновой пластине вращателя ( $\rho = 90^\circ$ ), второй полуволновой пластине вращателя ( $\rho = 45^\circ$ ), второму кристаллу КДР ( $\rho = 0^\circ$ ).

Результат умножения также с учетом членов первого порядка малости будет

$$V_{\text{вых.}} = \begin{vmatrix} 1 + j\frac{\delta_4 - \delta_1 - \Delta\delta_2}{2} \\ j\frac{\Delta\delta_3}{2} \end{vmatrix}.$$

Из полученного выражения видно, что для компенсации фонового света прежде всего необходима идентичность электрооптических кристаллов переключателя по их толщине и ориентации оси  $Z$ , при этом  $\delta_1 = \delta_4$ . Если это условие выполнено, то вектор Джонса выходящего пучка принимает более простой вид

$$V_{\text{вых.}} = \begin{vmatrix} 1 - j\frac{\Delta\delta_2}{2} \\ j\frac{\Delta\delta_3}{2} \end{vmatrix}. \quad (3)$$



Относительную интенсивность фонового света  $I_\phi$  определим из выражения

$$I_\phi = \frac{A_y^2}{A_x^2 + A_y^2} = \sin^2 \left( \arctg \frac{A_y}{A_x} \right), \quad (4)$$

где  $A_x$  и  $A_y$  — амплитуды ортогонально поляризованных компонент выходящего из переключателя пучка света.

Из соотношения (3) следует

$$\frac{A_y}{A_x} = \frac{\Delta\delta_3}{2},$$

что при подстановке в выражение (4) дает

$$\arcsin \sqrt{I_\phi} = \arctg \frac{\Delta\delta_3}{2}.$$

Так как  $\Delta\delta_3$  и  $I_\phi$  — малые величины ( $I_\phi = 0.01$ ), то последнее соотношение можно приближенно представить в виде

$$\sqrt{I_\phi} \approx \frac{\Delta\delta_3}{2}. \quad (5)$$

Пренебрегая пространственным разделением обыкновенного и необыкновенного лучей в кварцевых пластинах вращателя поляризации ( $n_e - n_o = 0.009$ ), а также зависимостью показателя преломления необыкновенного луча от угла падения, что вполне соответствует характеру сделанных в приведенном расчете допущений, и принимая затем во внимание соотношение (2), нетрудно найти, что

$$\Delta\delta_3 = \frac{2\pi d}{\lambda} (n_e - n_o) \frac{1 - \sqrt{1 - \sin^2 \beta / n_o^2}}{\sqrt{1 - \sin^2 \beta / n_o^2}}.$$

Для не слишком больших углов падения света ( $\beta \leq 15^\circ$ ) последнее выражение с точностью до 1% может быть представлено как

$$\Delta\delta_3 = \frac{2\pi d}{\lambda} (n_e - n_o) \frac{1}{2} \frac{\sin^2 \beta}{n_o^2}.$$

Учитывая это в соотношении (5), имеем

$$\sqrt{I_\phi} = \frac{1}{2} \frac{\pi d}{\lambda} \frac{n_e - n_o}{n_o^2} \sin^2 \beta. \quad (6)$$

Из соотношения (6) угловая апертура рассматриваемого переключателя поляризации

$$\alpha = 2\beta = 2 \arcsin \left( n_o \sqrt{\frac{2\lambda \sqrt{I_\phi}}{\pi d (n_e - n_o)}} \right). \quad (7)$$

Соотношение (7) получено при условии идентичности электрооптических кристаллов переключателя ( $\delta_1 = \delta_2$ ). Неидентичность кристаллов ограничит его угловую апертуру.

Используя известные [4] соотношения для интерференции поляризованного монохроматического света в одноосных кристаллах, можно определить допустимую разность толщин Z-срезов кристаллов в виде

$$|\Delta h| \leq \frac{\lambda}{\pi} \frac{n_o^2}{n_o - n_e} \frac{\sqrt{1 - \sin^2 \beta / n_o^2}}{\sin^2 \beta} \arcsin \sqrt{I_\phi}.$$

С учетом малости значений  $I_\phi$  и  $\sin^2 \beta / n_o^2$  величину  $\Delta h$  с практически достаточной точностью можно определить из выражения

$$|\Delta h| \leq \frac{\lambda}{\pi} \frac{n_o^2}{n_o - n_e} \frac{\sqrt{I_\phi}}{\sin^2 \beta}. \quad (8)$$



Это соотношение и определяет допуск на соответствие толщин электрооптических кристаллов в переключателях поляризации с компенсацией фонового света.

Для экспериментальной проверки полученных соотношений был собран переключатель поляризации, состоящий из двух кристаллов KDP Z-среза толщиной по 2 мм каждый и 90-градусного вращателя поляризации (две кварцевые полуволновые пластины толщиной по 0.595 мм).

Затем с помощью обычной схемы для исследования интерференции поляризованного света в двулучепреломляющих кристаллах [5] в свете He—Ne лазера ЛГ-36 ( $\lambda=0.6328$  мкм) измерялась максимальная интенсивность фона переключателя поляризации в зависимости от угла падения света. Аналогично исследовалась интенсивность фонового света, обусловленная одним 90-градусным вращателем поляризации.

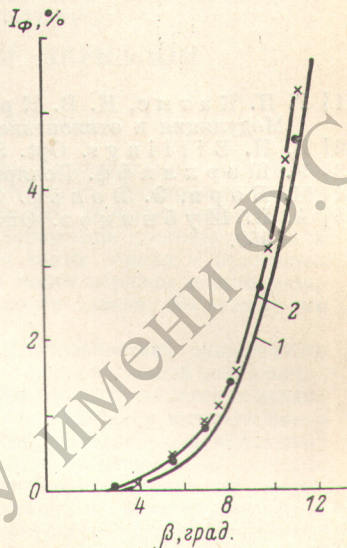
Допустимая разность толщин  $\Delta h$  Z-срезов кристаллов KDP ( $n_o=1.507$ ,  $n_e=1.467$ ), необходимая для получения угловой апертуры  $\alpha=2\beta=30^\circ$  при  $I_\phi=0.01$ , согласно соотношению (8), составляла величину  $|\Delta h| \leq 15$  мкм. Используемые нами пластинки кристаллов KDP (размером  $30 \times 30 \times 2$  мм<sup>3</sup>) фактически имели лучшее соответствие толщин:  $|\Delta h| \leq 1$  мкм. При этом отклонение оси Z от ориентации, соответствующей Z-срезу, не превышало 2 мин. Такой запас в допуске на соответствие толщин кристаллов переключателя позволял надежно выявить апертурные ограничения, вносимые вращателем поляризации света.

Результаты выполненных нами расчетов и экспериментов графически представлены на рисунке в форме зависимости относительной интенсивности фона  $I_\phi$  от угла падения света  $\beta$ . Кривая 1 рисунка соответствует рассчитанным по соотношению (6) значениям интенсивности фонового света. Кривая 2 отвечает экспериментально найденным ее значениям. При этом точки на кривой 2 относятся к величинам фона, обусловленного вращателем поляризации, а крестики — к интенсивности фона всего переключателя в целом.

Из рисунка видно, что угловые апертуры интенсивности фонового света переключателя и вращателя поляризации практически совпадают и достаточно близки к ее расчетному значению. Действительно, согласно соотношению (7), угловая апертура исследованного переключателя поляризации для  $I_\phi=0.01$  составляет величину  $\alpha=15^\circ 30'$ , тогда как экспериментально найденное ее значение  $\alpha=15^\circ$ . Полученное различие вполне объясняется неидеальностью элементов реального переключателя и неточностями, допущенными при его сборке и юстировке.

Результаты расчетов и экспериментов показывают, что угловая апертура рассмотренного переключателя поляризации в основном определяется 90-градусным вращателем. Она существенно ограничивается «неидеальностью» его работы, возникающей при наклонном падении света на переключатель.

Из анализа соотношения (7) можно заключить, что дальнейшее увеличение угловой апертуры такого переключателя поляризации до некоторого предела может быть достигнуто за счет уменьшения толщины полуволновых пластин вращателя. Так, например, вращатель поляризации с полуволновыми кварцевыми пластинами толщиной по 0.245 мм расширил бы угловую апертуру рассмотренного переключателя до величины  $\alpha=24^\circ$ .



Зависимость относительной интенсивности фонового света  $I_\phi$  от его угла падения  $\beta$  в воздухе.



## В ы в о д ы

Угловая апертура исследованного переключателя поляризованного света может быть легко рассчитана по приведенным в настоящей работе соотношениям. При этом достаточен расчет с точностью до членов первого порядка малости.

Интенсивность фонового света переключателя поляризации определяется не только взаимной точностью его электрооптических кристаллов, но и главным образом, ограниченностью угловой апертуры реально применяемого вращателя поляризации.

Относительное расширение угловой апертуры рассмотренного переключателя поляризации может быть достигнуто за счет уменьшения толщины полуволновых пластин вращателя.

## Литература

- [1] Г. П. Катус, Н. В. Кравцов, Л. Е. Чирков, С. М. Коновалов. Модуляция и отклонение оптического излучения. Изд. «Наука», М., 1967.
- [2] В. Н. Billings. *Opt. Soc. Am.*, 42, 12, 1952.
- [3] У. Шерклифф. Поляризованный свет. Изд. «Мир», М., 1965.
- [4] М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики. Изд. «Наука», М., 1970.
- [5] А. В. Шубников. Оптическая кристаллография. Изд. АН СССР, М.—Л., 1950.

Поступило в Редакцию 29 января 1974 г.