

ФОРМИРОВАНИЕ РАДИАЛЬНОЙ И АЗИМУТАЛЬНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2007 г. А. И. Конойко, канд. физ.-мат. наук; С. Н. Жданович, канд. физ.-мат. наук

ГНУ “Институт электроники Национальной академии наук Беларуси”, г. Минск, Беларусь

Рассматривается метод получения и управления радиальной и азимутальной поляризацией световых пучков на базе конической рефракции и электрооптики. Описана оптическая схема такого преобразователя поляризации светового излучения, и рассмотрено математическое преобразование фазы ортогональных поляризаций.

Коды OCIS: 260.5430.

Поступила в редакцию 22.02.2006.

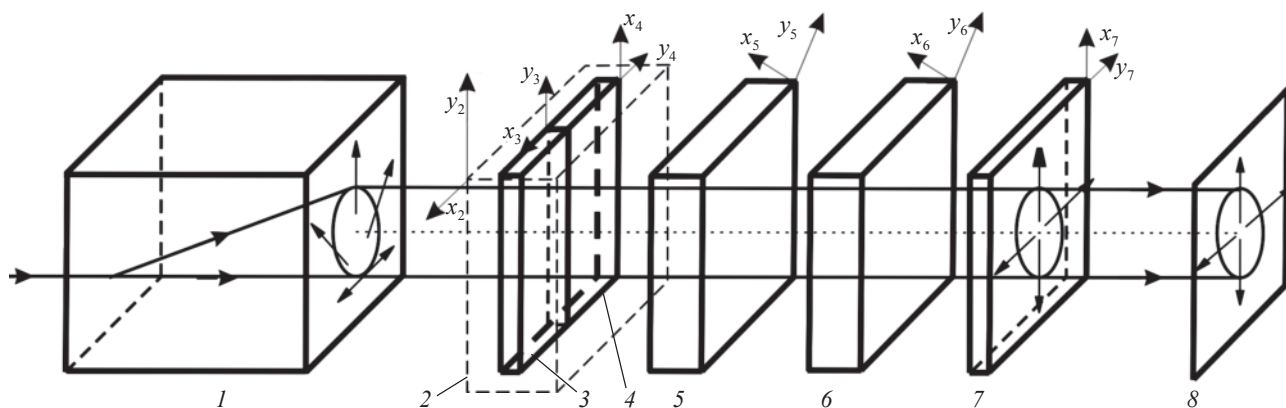
Введение

В настоящее время в связи с развитием оптических технологий особую роль играют методы повышения эффективности взаимодействия лазерного излучения с различного рода материалами. Так, например, при лазерной резке если используется излучение с радиальной поляризацией, то коэффициент поглощения материалов увеличивается в два раза по сравнению со случаем использования излучения, обладающего круговой поляризацией. При использовании излучения с азимутальной поляризацией коэффициент поглощения имеет ничтожные значения. Существующие в настоящее время методы получения радиальной и азимутальной поляризации [1, 2] не позволяют осуществлять оперативное переключение с одного вида поляризации на другой, что существенно ограничивает возможности применения в оптических технологиях.

На примере преобразователя поляризации светового излучения рассматривается формирование радиальной и азимутальной поляризации светового излучения на базе электрооптики и конической рефракции за счет аналогового изменения угла ориентации плоскости поляризации излучения по кольцу конической рефракции в разных направлениях.

Преобразователь поляризации светового излучения

Оптическая схема такого преобразователя поляризации светового излучения, представленная на рисунке, состоит из следующих элементов: 1 – двусосный кристалл с конической рефракцией, 2 – комбинированный фазовый элемент (КФЭ), состоящий из расположенных рядом в одной плоскости первого 3 и второго 4 фазовых $\lambda/4$ -элементов (ФЭ1 и ФЭ2); 5 – градиентный фазовый элемент (ГФЭ), обеспечивающий непрерывное изменение разности фаз между ортогональными составляющими электрического вектора световой волны по апертуре светового пучка от 0 до π ; 6 – электрооптический элемент (ЭОЭ), 7 – третий фазовый $\lambda/4$ -элемент (ФЭ3), 8 – экран. Причем одноименные оси анизотропии ФЭ1 и ФЭ2, входящих в КФЭ, повернуты относительно друг друга на угол 90° и относительно осей анизотропии ГФЭ и ЭОЭ на угол 45° . ФЭ3 обладает осями анизотропии, параллельными одноименным осям анизотропии одного из фазовых $\lambda/4$ -элементов, входящих в КФЭ. Плоскость градиента разности фаз между ортогональными составляющими световой волны ГФЭ параллельна плоскости, в которой лежат оптиче-



Преобразователь поляризации светового излучения. 1 – двусосный кристалл, 2 – комбинированный фазовый элемент; 3, 4 и 7 – первый, второй и третий фазовые элементы $\lambda/4$ соответственно (ФЭ1, ФЭ2 и ФЭ3); 5 – градиентный фазовый элемент, 6 – электрооптический элемент, 8 – экран.

ские оси двусного кристалла с конической рефракцией, одной из осей анизотропии ФЭ1 и ФЭ2, входящих в КФЭ, и границе раздела между ними, которая совпадает с диаметром кольца конической рефракции.

Пусть на вход оптической системы (см. рисунок) поступает неполяризованный световой пучок. В результате конической рефракции на выходе двусного кристалла с конической рефракцией световой пучок приобретает кольцевое сечение с соответствующим распределением плоскости поляризации (на рисунке стрелками показаны ориентации плоскости поляризации в четырех точках кольца конической рефракции). Таким образом, на выходе двусного кристалла с конической рефракцией мы имеем по кольцу конической рефракции изменение ориентации плоскости поляризации в диапазоне $\pm 90^\circ$ от вертикали. Поэтому дальнейшее рассмотрение работы радиального поляризатора светового излучения проведем на примере светового излучения, соответствующего двум элементарным произвольным участкам кольца конической рефракции, обладающим ориентацией плоскостей поляризаций $\pm \delta_0$.

После двусного кристалла с конической рефракцией излучение с плоскостью поляризации, ориентированной под углом $\pm \delta_0$, падает на ФЭ1 и ФЭ2. После двулучепреломления на входных гранях получим две пары ортогональных составляющих, распространяющихся в ФЭ1 и ФЭ2, входящих в КФЭ,

$$\begin{cases} E_{x_5(3)} = E_0 \{ \cos \delta_0 \cos \psi_1 \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)] + \sin \delta_0 \sin \psi_1 \sin [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)] \}, \\ E_{y_5(3)} = E_0 \{ \cos \delta_0 \sin \psi_1 \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)] - \sin \delta_0 \cos \psi_1 \sin [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)] \}, \\ E_{x_5(4)} = E_0 \{ \cos (-\delta_0) \cos \psi_1 \sin [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)] + \sin (-\delta_0) \sin \psi_1 \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)] \}, \\ E_{y_5(4)} = E_0 \{ \cos (-\delta_0) \sin \psi_1 \sin [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)] - \sin (-\delta_0) \cos \psi_1 \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)] \}. \end{cases} \quad (3)$$

Из выражений (3) видно, что при угле $\psi_1 = \pi/4$ ортогональные компоненты электрического вектора световой волны, поляризованные вдоль осей x_5 и y_5 , равны между собой по абсолютной величине, так как в этом случае (3) можно привести к виду

$$\begin{cases} E_{x_5(3)} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi) - \delta_0], \\ E_{y_5(3)} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi) + \delta_0], \\ E_{x_5(4)} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \sin [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi) + (-\delta_0)], \\ E_{y_5(4)} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \sin [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi) - (-\delta_0)]. \end{cases} \quad (3a)$$

$$\begin{cases} E_{x_2(3)} = E_0 \sin \delta_0 \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)], \\ E_{y_2(3)} = E_0 \cos \delta_0 \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)], \\ E_{x_2(4)} = E_0 \sin (-\delta_0) \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)], \\ E_{y_2(4)} = E_0 \cos (-\delta_0) \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)]. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь x_2, y_2 – главные оси координат КФЭ, E_0 – максимальная амплитуда электрического вектора световой волны, ω_0 – круговая частота падающей световой волны, k_0 – волновое число падающей световой волны, t – время существования волны, r – расстояние, пройденное световой волной; φ – постоянная фазовая задержка. При прохождении световой волны через КФЭ между ортогонально поляризованными компонентами электрического вектора E_{x_2} и E_{y_2} в ФЭ1 и ФЭ2 наводится разность фаз, равная соответственно $\pi/2$ и $-\pi/2$. Ортогонально поляризованные компоненты на выходе КФЭ будут иметь вид

$$\begin{cases} E'_{x_2(3)} = E_0 \sin \delta_0 \sin [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)], \\ E'_{y_2(3)} = E_0 \cos \delta_0 \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)], \\ E'_{x_2(4)} = E_0 \sin (-\delta_0) \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)], \\ E'_{y_2(4)} = E_0 \cos (-\delta_0) \sin [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)]. \end{cases} \quad (2)$$

При преломлении поляризованных компонентов на входной грани ГФЭ, оси индикатрисы показателей преломления которого x_5 и y_5 развернуты относительно осей КФЭ на угол ψ_1 , в общем случае будем иметь соответственно две ортогонально поляризованные пары компонентов электрического вектора E_{x_5} и E_{y_5} вида

При прохождении световой волны через ГФЭ между ортогонально поляризованными компонентами электрического вектора E_{x_5} и E_{y_5} наводится разность фаз, равная 2δ , где δ – угол поворота плоскостей поляризации. Ортогонально поляризованные компоненты на выходе ГФЭ с учетом (3a) будут иметь вид

$$\begin{cases} E'_{x_5(3)} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi) - (\delta_0 + \delta)], \\ E'_{y_5(3)} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi) + (\delta_0 + \delta)], \\ E'_{x_5(4)} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \sin [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi) + (-\delta_0 - \delta)], \\ E'_{y_5(4)} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \sin [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi) - (-\delta_0 - \delta)]. \end{cases} \quad (4)$$

При преломлении последних на входной грани ФЭЗ, оси индикатрисы показателей преломления которого x_7 и y_7 развернуты относительно осей ГФЭ 5

на угол ψ_2 , будем иметь в общем случае две ортогонально поляризованные пары компонентов электрического вектора E_{x_7} и E_{y_7} вида

$$\begin{cases} E_{x_{7(3)}} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \{ \cos \psi_2 \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi) + (\delta_0 + \delta)] + \sin \psi_2 \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi) - (\delta_0 + \delta)] \}, \\ E_{y_{7(3)}} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \{ \sin \psi_2 \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi) + (\delta_0 + \delta)] - \cos \psi_2 \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi) - (\delta_0 + \delta)] \}, \\ E_{x_{7(4)}} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \{ \cos \psi_2 \sin [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi) - (-\delta_0 - \delta)] + \sin \psi_2 \sin [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi) + (-\delta_0 - \delta)] \}, \\ E_{y_{7(4)}} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \{ \sin \psi_2 \sin [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi) - (-\delta_0 - \delta)] - \cos \psi_2 \sin [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi) + (-\delta_0 - \delta)] \}. \end{cases} \quad (5)$$

Из выражения (5) видно, что при угле $\psi_2 = \pi/4$ амплитуды ортогональных компонентов описываются гармоническими функциями, имеющими одинаковый период и сдвинутыми друг относительно друга на $\lambda/4$, так как в этом случае они могут быть приведены к виду

$$\begin{cases} E_{x_{7(3)}} = E_0 \cos(\delta_0 + \delta) \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)], \\ E_{y_{7(3)}} = -E_0 \sin(\delta_0 + \delta) \sin [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)], \\ E_{x_{7(4)}} = E_0 \cos(-\delta_0 - \delta) \sin [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)], \\ E_{y_{7(4)}} = E_0 \sin(-\delta_0 - \delta) \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)]. \end{cases} \quad (6)$$

При прохождении световой волны через ФЭЗ между ортогонально поляризованными компонентами электрического вектора E_{x_7} и E_{y_7} наводится разность фаз, равная $\pi/2$. В результате на выходе ФЭЗ происходит синфазное совмещение ортогонально поляризованных компонентов, которые в этом случае будут иметь вид

$$\begin{cases} E'_{x_{7(3)}} = E_0 \cos(\delta_0 + \delta) \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)], \\ E'_{y_{7(3)}} = E_0 \sin(\delta_0 + \delta) \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)], \\ E'_{x_{7(4)}} = E_0 \cos(-\delta_0 - \delta) \sin [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)], \\ E'_{y_{7(4)}} = E_0 \sin(-\delta_0 - \delta) \sin [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)]. \end{cases} \quad (7)$$

Суперпозиция ортогональных компонентов (7) и дает результирующие плоско поляризованные световые волны, углы наклона плоскости поляризации которых к вертикали можно получить из отношения амплитуд ортогонально поляризованных компонентов на выходе ФЭЗ:

$$\begin{aligned} \frac{E_{y_{7(3)}}}{E_{x_{7(3)}}} &= \operatorname{tg}(\delta_0 + \delta), \\ \frac{E_{y_{7(4)}}}{E_{x_{7(4)}}} &= \operatorname{tg}(-\delta_0 - \delta). \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, на выходе ФЭЗ излучение рассматриваемых участков кольца конической рефракции приобретет ориентацию плоскостей поляризации, равную $\pm(\delta_0 + \delta)$, что соответствует, например, радиальной поляризации.

При подаче на ЭОЭ управляющего электрического напряжения $U_{\lambda/2}$ в нем наводится анизотропия показателей преломления, достаточная для наведения в световом пучке перед ФЭЗ дополнительной разности фаз между ортогональными составляющими электрического вектора проходящего излучения, которая равна π . Это обеспечивает поворот плоскостей поляризации всех участков кольца конической рефракции после ФЭЗ на угол 90° , а следовательно, получаем вместо радиальной поляризации азимутальную.

Заключение

Таким образом, за счет аналогового изменения угла ориентации плоскости поляризации излучения по кольцу конической рефракции в разных направлениях (путем комбинированного аналогового вращения произвольно ориентированной плоскости поляризации электрооптическими фазовыми элементами) оптическая система рассмотренного преобразователя радиальной и азимутальной поляризации светового излучения позволяет получить радиальную поляризацию и осуществить управляемое переключение в азимутальную.

Расчеты показывают, что предлагаемый преобразователь радиальной и азимутальной поляризации светового излучения может работать в световых пучках с угловой апертурой порядка 1° . При этом световой фон не превышает 2%, а светопропускание составляет примерно 90%.

Применение данного преобразователя светового излучения в лазерных системах позволяет управ-

лять поляризацией выходного излучения внерезонаторным методом, не оказывая влияния на режим генерации лазера. Это существенно расширяет функциональные возможности выпускаемых промышленностью лазерных установок.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Schafer F.P.* Method and device for polarizing light radiation // Пат. США № 4755027.
 2. *Penney C.M.* Quiescent circle and arc generator // Пат. США № 4636611
-