

А. И. Конойко, С. Н. Жданович

ВНЕРЕЗОНАТОРНЫЙ МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ РАДИАЛЬНОЙ ИЛИ АЗИМУТАЛЬНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В развитии оптических технологий особую роль играют методы повышения эффективности взаимодействия лазерного излучения с различного рода материалами. Так при лазерной резке использование излучения с радиальной поляризацией повышает коэффициент поглощения материалов в два раза по сравнению со случаем использования излучения с круговой поляризацией. При использовании излучения с азимутальной поляризацией коэффициент поглощения имеет ничтожные значения. Преимущества использования лучей с радиальной поляризацией для лазерной резки металла с позиций Френелевского закона поглощения излучения поверхностью иллюстрируют графики приведенные на рисунке 1. На нем представлены зависимости коэффициента поглощения от углов падения для излучения с азимутальной (1), круговой (2) и радиальной (3) поляризациями.

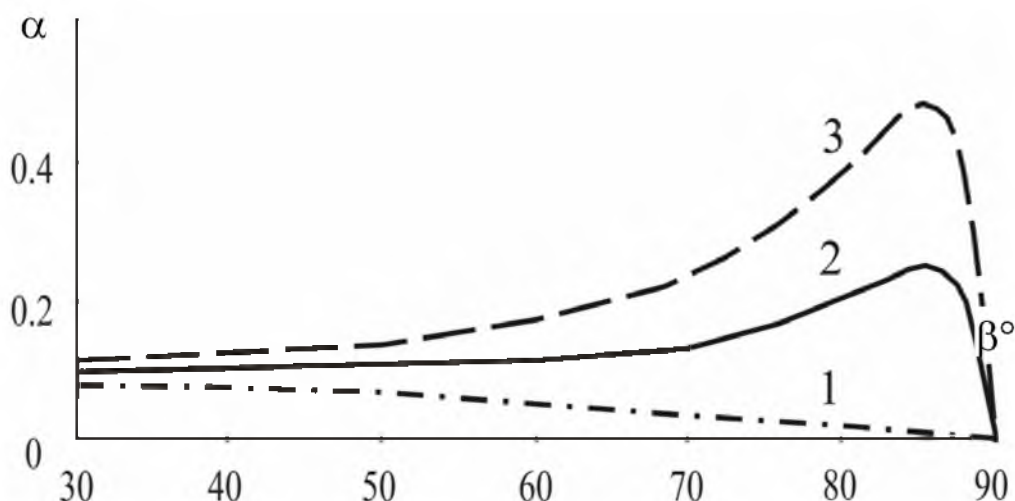


Рис. 1. Зависимость коэффициента поглощения от углов падения для излучения с азимутальной (1), круговой (2) и радиальной (3) поляризациями

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 оптических технологий.

Поэтому представляет интерес рассмотреть вопрос управления радиальной и азимутальной поляризацией лазерных световых пучков на базе электрооптики и конической рефракции за счет аналогового изменения угла ориентации плоскости поляризации излучения по кольцу кониче-

ской рефракции в разных направлениях, на примере преобразователя поляризации светового излучения.

Оптическая схема такого преобразователя поляризации лазерного излучения представлена на рис.2 где: 1 – двуосный кристалл с конической рефракцией; 2 – комбинированный фазовый элемент, состоящий из расположенных рядом в одной плоскости первого 3 и второго 4 фазовых элементов $\lambda/4$; 5 – градиентный фазовый элемент, обеспечивающий непрерывное изменение разности фаз между ортогональными составляющими электрического вектора световой волны по апертуре светового пучка от 0 до π ; 6 – электрооптический элемент; 7 – третий фазовый элемент $\lambda/4$; 8 – экран. Причем, одноименные оси анизотропии первого и второго фазовых элементов $\lambda/4$ комбинированного фазового элемента повернуты друг относительно друга на угол 90° и на угол 45° относительно осей анизотропии градиентного фазового и электрооптического элементов. Третий фазовый элемент $\lambda/4$ обладает осями анизотропии параллельными одноименным осям анизотропии одного из фазовых элементов $\lambda/4$ комбинированного фазового элемента. Плоскость градиента разности фаз между ортогональными составляющими световой волны градиентного фазового элемента параллельна плоскости, в которой лежат оптические оси двуосного кристалла с конической рефракцией, одной из осей анизотропии первого и второго фазового элемента $\lambda/4$ комбинированного фазового элемента и границе раздела между ними, которая совпадает с диаметром кольца конической рефракции.

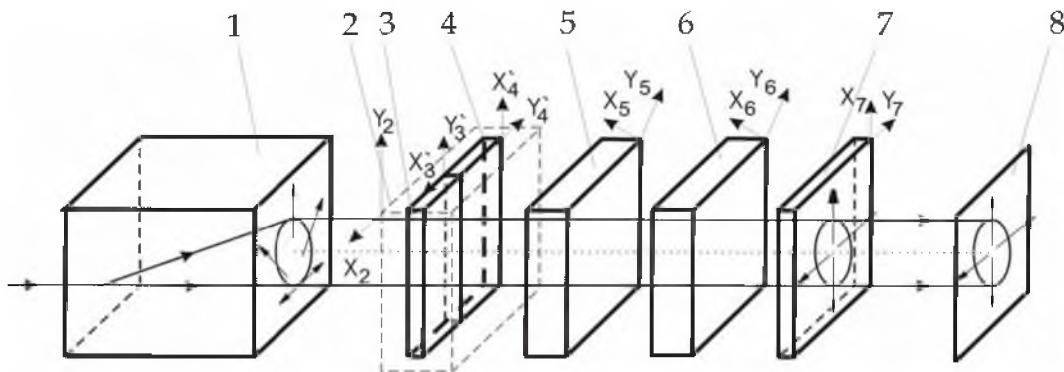


Рис. 2. Преобразователь поляризации светового излучения

Пусть на вход оптической системы, изображенной на рис. поступает неполяризованный световой пучок. В результате конической рефракции на выходе двуосного кристалла с конической рефракцией световой пучок приобретает кольцевое сечение с соответствующим распределением плоскости поляризации (на рис. стрелками показаны ориентации плоскости поляризации в четырех точках кольца конической рефракции). Таким

образом, на выходе двуосного 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 мы проведем на примере светового излучения соответствующего двум элементарным произвольным участкам кольца конической рефракции, обладающих ориентацией плоскостей поляризации $\pm \delta_0$. После двуосного кристалла с конической рефракцией излучение с плоскостью поляризации ориентированной под углом $\pm \delta_0$ падает на первый и второй фазовые элементы $\lambda/4$. После двулучепреломления на входных гранях мы будем иметь две пары ортогональных составляющих распространяющихся в первом и втором фазовых элементах $\lambda/4$ комбинированного фазового элемента

$$\begin{cases} E_{x_{2(3)}} = E_0 \sin \delta_0 \cos[\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)]; \\ E_{y_{2(3)}} = E_0 \cos \delta_0 \cos[\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)]. \end{cases}; \begin{cases} E_{x_{2(4)}} = E_0 \sin(-\delta_0) \cos[\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)]; \\ E_{y_{2(4)}} = E_0 \cos(-\delta_0) \cos[\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)]. \end{cases} \quad (1)$$

где x_2, y_2 – главные оси координат комбинированного фазового элемента; 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 комбинированный фазовый элемент между ортогонально поляризованными компонентами электрического вектора E_{x_2} и E_{y_2} в первом и втором фазовых элементах $\lambda/4$ наводится разность фаз равная, соответственно, $\pi/2$ и $-\pi/2$. Ортогонально поляризованные компоненты на выходе комбинированного фазового элемента будут иметь, соответственно, вид:

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

При преломлении последних на входной грани градиентного фазового элемента, оси индикатрисы показателей преломления которого x_5 и y_5 развернуты относительно осей комбинированного фазового элемента на угол ψ_1 , будем иметь, соответственно, в общем случае две ортогонально поляризованные пары компонент электрического вектора E_{x_5} и E_{y_5} вида

$$\begin{cases} E_{x_{5(3)}} = E_0 \left\{ \cos \delta_0 \cos \psi_1 \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)] + \sin \delta_0 \sin \psi_1 \sin [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)] \right\}; \\ E_{y_{5(3)}} = E_0 \left\{ \cos \delta_0 \sin \psi_1 \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)] - \sin \delta_0 \cos \psi_1 \sin [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)] \right\}. \end{cases} \quad (3)$$

Из выражения (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 выражение (3) имеет, соответственно, вид

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

$$\begin{cases} E_{x_{5(4)}} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \sin [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi) + (-\delta_0)]; \\ E_{y_{5(4)}} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \sin [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi) - (-\delta_0)]. \end{cases}$$

При прохождении световой волны через градиентный фазовый элемент между ортогонально поляризованными компонентами электрического вектора E_{x_5} и E_{y_5} наводится разность фаз равная 2δ , где δ – величина угла необходимого поворота плоскостей поляризаций. Ортогонально поляризованные компоненты на выходе градиентного фазового элемента 5 с учетом (3a) будут иметь вид

$$\begin{cases} E'_{x_{5(3)}} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi) - (\delta_0 + \delta)]; \\ E'_{y_{5(3)}} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi) + (\delta_0 + \delta)]. \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} E'_{x_{5(4)}} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \sin [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi) + (-\delta_0 - \delta)]; \\ E'_{y_{5(4)}} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \sin [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi) - (-\delta_0 - \delta)]. \end{cases}$$

При преломлении последних на входной грани третьего фазового элемента $\lambda/4$, оси индикатрисы показателей преломления которого x_7 и y_7 развернуты относительно осей градиентного фазового элемента 5 на угол

ψ_2 , будем иметь в общем случае две ортогонально поляризованные пары компонент электрического вектора E_{x7} и E_{y7} вида

$$\begin{cases} E_{x7(3)} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \left\{ \cos \psi_2 \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi) + (\delta_0 + \delta)] + \sin \psi_2 \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi) - (\delta_0 + \delta)] \right\}; \\ E_{y7(3)} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \left\{ \sin \psi_2 \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi) + (\delta_0 + \delta)] - \cos \psi_2 \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi) - (\delta_0 + \delta)] \right\}. \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} E_{x7(4)} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \left\{ \cos \psi_2 \sin [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi) - (-\delta_0 - \delta)] + \sin \psi_2 \sin [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi) + (-\delta_0 - \delta)] \right\}; \\ E_{y7(4)} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \left\{ \sin \psi_2 \sin [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi) - (-\delta_0 - \delta)] - \cos \psi_2 \sin [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi) + (-\delta_0 - \delta)] \right\}. \end{cases}$$

Из выражения видно, что при угле $\psi_2 = \pi/4$ амплитуды ортогональных компонент описываются гармоническими функциями, имеющими одинаковый период, и сдвинутыми друг относительно друга на $\lambda/4$, так как в этом случае имеют вид

$$\begin{cases} E_{x7(3)} = E_0 \cos(\delta_0 + \delta) \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)]; \\ E_{y7(3)} = -E_0 \sin(\delta_0 + \delta) \sin [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)]. \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} E_{x7(4)} = E_0 \cos(-\delta_0 - \delta) \sin [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)]; \\ E_{y7(4)} = E_0 \sin(-\delta_0 - \delta) \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)]. \end{cases}$$

При прохождении световой волны через третий фазовый элемент $\lambda/4$ между ортогонально поляризованными компонентами электрического вектора E_{x7} и E_{y7} наводится разность фаз равная $\pi/2$. В результате на выходе третьего фазового элемента $\lambda/4$ происходит синфазное совмещение ортогонально поляризованных компонент, которые будут иметь в этом случае вид

$$\begin{cases} E'_{x7(3)} = E_0 \cos(\delta_0 + \delta) \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)]; \\ E'_{y7(3)} = E_0 \sin(\delta_0 + \delta) \cos [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)]. \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} E'_{x7(4)} = E_0 \cos(-\delta_0 - \delta) \sin [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)]; \\ E'_{y7(4)} = E_0 \sin(-\delta_0 - \delta) \sin [\omega_0 t - (k_0 r + \varphi)]. \end{cases}$$

Суперпозиция ортогональных компонент (7) и дает результирующие плоско поляризованные световые волны, углы наклона плоскости поляризации которых к вертикали можно получить из отношения амплитуд ортогонально поляризованных компонент на выходе третьего фазового элемента $\lambda/4$:

$$E_{y7(3)}/E_{x7(3)} = \operatorname{tg}(\delta_0 + \delta); \quad E_{y7(4)}/E_{x7(4)} = \operatorname{tg}(-\delta_0 - \delta). \quad (8)$$

Таким образом, на выходе третьего фазового элемента $\lambda/4$ излучение рассматриваемых участков кольца конической рефракции приобретет ориентацию плоскостей поляризации равную, соответственно, $\pm(\delta_0 + \delta)$, что соответствует, например, радиальной поляризации.

При подаче на электрооптический элемент управляющего электрического напряжения $U_{\lambda/2}$ в нем наводится анизотропия показателей преломления достаточная для наведения в световом пучке перед третьим фазовым элементом $\lambda/4$ дополнительной разности фаз между ортогональными составляющими электрического вектора проходящего излучения равной π . Это обеспечивает поворот плоскостей поляризации всех участков кольца конической рефракции после третьего фазового элемента $\lambda/4$ на угол 90° , а следовательно мы получаем вместо радиальной поляризации азимутальную.

Таким образом, оптическая система рассмотренного преобразователя радиальной и азимутальной поляризации светового излучения позволяет за счет решения вопроса 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 получить радиальную поляризацию и осуществить управляемое переключение в азимутальную.

Расчеты показывают, что предлагаемый внрезонаторный метод формирования радиальной или азимутальной поляризации светового излучения может работать в световых пучках, обладающих угловой апертурой порядка 1° . При этом величина светового фона не превысит 2%, а светопропускания составит порядка 90%.

Литература

1. Пат. 4755027 США, Int. Cl.⁴ G 02 B 5/30. Method and device for polarizing light radiation / Schafer F.P. (USA).
2. Пат. 4636611 США, Int. Cl.⁴ B 23 K 9/12. Quiescent circle and arc generator / Penney C.M. (USA).