

## АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫЕ УПРАВЛЯЕМЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

© 2011 В.Д. Паранин

Самарский государственный аэрокосмический университет

Поступила в редакцию 11.03.2011

Предложена конструкция и принципы действия амплитудных и амплитудно-фазовых управляемых дифракционных оптических элементов (УДОЭ). Развито теоретическое описание разработанных оптических элементов. Проведено компьютерное исследование оптических и функциональных свойств УДОЭ.

Ключевые слова: управляемый дифракционный оптический элемент, электрооптический эффект, амплитудно-фазовая функция, математическая модель.

### ВВЕДЕНИЕ

Мировой практике известны фазовые управляемые дифракционные оптические элементы (УДОЭ) на основе электрооптического эффекта. Принцип их действия основан на изменении показателя преломления оптической среды и фазовой функции элемента при воздействии управляющего электрического поля электродов. Электроды УДОЭ имеют размеры единицы-десятки микрометров и представляют собой дифракционную решетку, периодическую или аперидическую. Соответственно, изменение фазовой функции оптического излучения, падающего на дифракционную решетку электродов, приводит к изменению его диаграммы направленности. Описанный принцип действия и конструкция фазовых УДОЭ позволяет осуществить модуляцию интенсивности света [1, 2], отклонение оптического излучения [3, 4], коррекцию фазового фронта [5].

Одним из направлений развития класса УДОЭ является создание гибридных элементов, действие которых основано на нескольких функциональных эффектах одновременно. Примером подобных элементов являются УДОЭ на основе многолучевой интерференции и дифракционного рассеяния [6, 7]. Конструкции гибридных УДОЭ позволяют существенно снизить управляющие напряжения и мощности, организовать независимые каналы управления и компенсации.

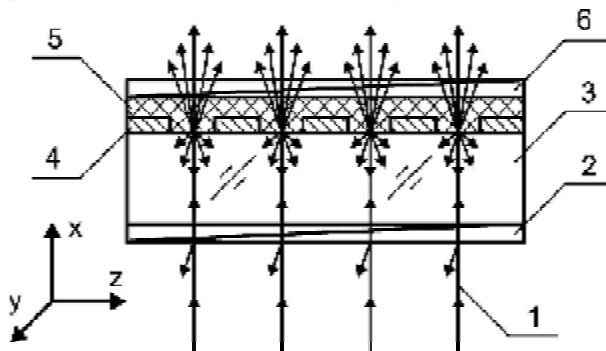
В настоящей работе развивается новый класс амплитудно-фазовых УДОЭ, обладающих сниженными напряжениями по сравнению с известными управляемыми фазовыми элементами.

*Паранин Вячеслав Дмитриевич, аспирант кафедры "Электронные системы и устройства".  
E-mail: vparanin@mail.ru*

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ УДОЭ

Вариант конструкции амплитудно-фазового УДОЭ, работающего в проходящем свете, приведен на рис. 1.

Если световая волна на выходе элемента под действием электрического поля приобретает определенное распределение фазы по сечению, вызывающее дополнительно изменение диаграммы направленности (рассеяние, отклонение света), то можно говорить о гибридном амплитудно-фазовом УДОЭ. Преимуществом подобных элементов будет сниженное управляющее напряжение по сравнению с амплитудными и фазовыми УДОЭ, поскольку в конструкции используются два механизма изменения интенсивности света на выходе - механизм поляризационного изменения и механизм дифракционного рассеяния. Для отнесения УДОЭ к классу амплитудных или амплитудно-фазовых можно воспользоваться неравенством  $|\Delta\varphi(z)| \ll 2\pi$ , где  $\Delta\varphi(z)$  - изменение фазы под действием электрического поля. Если данное неравенство выпол-



**Рис. 1.** Конструкция амплитудно-фазового УДОЭ:

1 – падающее излучение, 2 – поляризатор, 3 – электрооптический материал, 4 – управляющие электроды, 5 – защитный слой, 6 – анализатор

няется, то УДОЭ является амплитудным, если не выполняется – амплитудно-фазовым.

Принцип действия элемента следующий. Параллельный световой пучок 1 проходит через поляризатор 2 и разделяется в электрооптическом кристалле 3 на необыкновенную и обыкновенную волны. Данные волны распространяются в кристалле с различными скоростями, приобретая на выходе кристалла определенную разность фаз. Данная разность фаз определяет интерференцию обыкновенной и необыкновенной волн и интенсивность света на выходе анализатора 6. С помощью управляющих электродов 4, покрытых защитным слоем 5, возможно изменение фаз распространяющихся оптических волн, и, следовательно, интенсивности светового пучка на выходе анализатора 6. Поляризатор и анализатор задают интенсивность света на выходе при отсутствии управляющего электрического поля, а также состояние поляризации выходной световой волны. Так реализуются амплитудные и амплитудно-фазовые УДОЭ.

Для теоретического описания многослойной структуры, приведенной на рис. 1, воспользуемся аппаратом матриц Джонса [8]. В соответствие с ним преобразование световой волны структурой “поляризатор - электрооптический кристалл - анализатор” описывается матрицами (1):

$$\begin{aligned}
 m_1 &= \begin{pmatrix} \cos(a_3) & -\sin(a_3) \\ \sin(a_3) & \cos(a_3) \end{pmatrix}, \\
 m_2 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \\
 m_3 &= \begin{pmatrix} \cos(a_2) & \sin(a_2) \\ -\sin(a_2) & \cos(a_2) \end{pmatrix}, \\
 m_4 &= \begin{pmatrix} \cos(a_2) & -\sin(a_2) \\ \sin(a_2) & \cos(a_2) \end{pmatrix}, \\
 m_5 &= \begin{pmatrix} \exp(j\varphi_y) & 0 \\ 0 & \exp(j\varphi_z) \end{pmatrix}, \\
 m_6 &= \begin{pmatrix} \cos(a_2) & \sin(a_2) \\ -\sin(a_3) & \cos(a_2) \end{pmatrix}, \\
 m_7 &= \begin{pmatrix} \cos(a_1) & -\sin(a_1) \\ \sin(a_1) & \cos(a_1) \end{pmatrix}, \\
 m_8 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix},
 \end{aligned}$$

$$m_9 = \begin{pmatrix} \cos(a_1) & \sin(a_1) \\ -\sin(a_1) & \cos(a_1) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $\varphi_y, \varphi_z$  – фазы  $y$ - и  $z$ -поляризованных световых волн, рад;  $a_1, a_2, a_3$  – углы ориентации осей пропускания поляризатора, электрооптического кристалла, анализатора относительно неподвижной оси  $y$ , град. В приведенных выше формулах отсутствует описание изменения фазы световой волны в защитном слое, поскольку предполагается его однородность.

Амплитуды  $y$ - и  $z$ -поляризованных световых волн  $V_{y2}, V_{z2}$  на выходе структуры “поляризатор – кристалл – анализатор” связаны с амплитудами входящих волн  $V_{y1}, V_{z1}$  выражением (2):

$$\begin{pmatrix} V_{y2} \\ V_{z2} \end{pmatrix} = \prod_{i=1}^9 m_i \cdot \begin{pmatrix} V_{y1} \\ V_{z1} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Для вычисления фаз  $\varphi_y, \varphi_z$  световых волн необходимо определить тип и ориентацию электрооптического кристалла. Проведенный по результатам, полученным в [8-10], теоретический анализ показал, что наибольшей чувствительностью к поперечному межэлектродному электрическому полю обладают кристаллы класса 4mm. Для  $x$ -среза ниобата бария-стронция,  $y$ -ось которого параллельна управляющим электродам изменение показателей преломления  $n_y(z,x), n_z(z,x)$  для  $y$ - и  $z$ -поляризованных волн при наличии поля  $E_z(z,x)$  имеет вид [8]:

$$\begin{aligned}
 n_y(z,x) &= \frac{n_o}{\sqrt{1 + r_{13} n_o^2 E_z(z,x)}}, \\
 n_z(z,x) &= \frac{n_e}{\sqrt{1 + r_{33} n_e^2 E_x(z,x)}}, \quad (3)
 \end{aligned}$$

где  $n_o, n_e$  – показатели преломления для обыкновенной и необыкновенной световых волн при отсутствии электрического поля;  $r_{13}, r_{33}$  – электрооптические коэффициенты, м/В. Выражения для фаз  $\varphi_y, \varphi_z$  в электрооптическом кристалле имеют вид:

$$\begin{aligned}
 \varphi_y(z) &= \frac{2\pi}{\lambda} n_o h_{kr} - \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^{h_{kr}} n_y(z,x) dx, \\
 \varphi_z(z) &= \frac{2\pi}{\lambda} n_e h_{kr} - \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^{h_{kr}} n_z(z,x) dx, \quad (4)
 \end{aligned}$$

где  $h_{kr}$  – толщина электрооптического кристалла, м;  $\lambda$  – длина волны, м.

Входящая в (3) напряженность электрического поля  $E_z(z,x)$ , В/м, определяется путем реше-

ния уравнения электростатики любым из стандартных методов, например, методом конечных разностей [11].

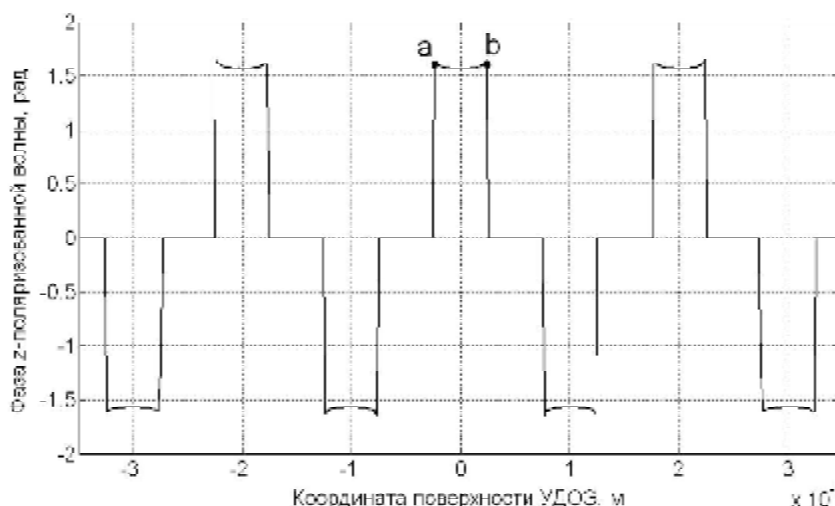
Расчетные фазовые функции для  $y$ - и  $z$ -поляризованных волн для решетки электродов шириной 5 мкм и периодом 10 мкм и распределения потенциала вида  $0 - U - 0 - U$  приведены на рис.2, 3.

Из полученных численных результатов следует, что фазовые функции  $\varphi_y, \varphi_z$  являются периодическими, а их форма профиля в области межэлектродной щели близка к прямоугольной. Увеличение фазовых функций в точках скачка фазы (точки a, b на рис. 2, 3) связано с увеличением напряженности электрического поля на краях электродов, примыкающих к электрооптическому кристаллу. Большее изменение фазы  $\varphi_z$  по сравнению с  $\varphi_y$  при одинаковой величине электрического поля объясняется большей величиной коэффициента  $r_{33}$  по сравнению с  $r_{13}$  (формула (4)).

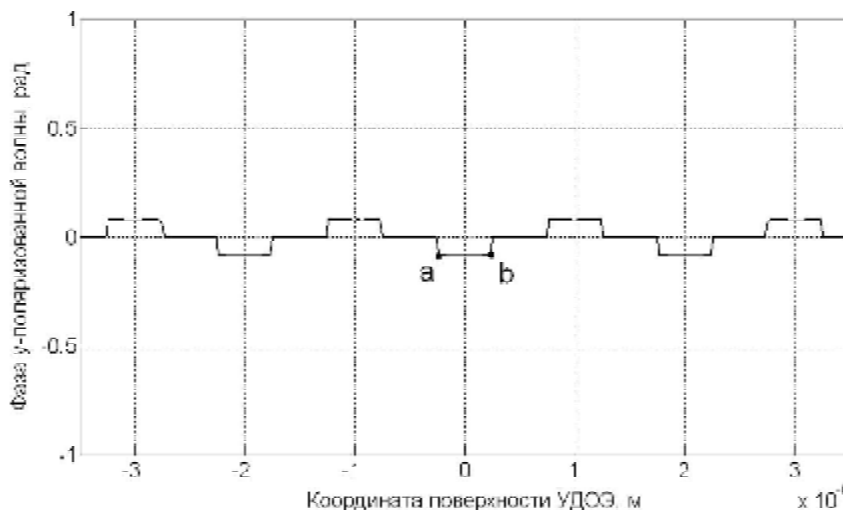
На рис.4 приведено расчетное распределение интенсивности на выходной поверхности УДОЭ.

В соответствии с полученными данными (рис. 4) относительное пропускание УДОЭ снизилось от 1 при  $U = 0$  В до 0,55 – 0,57 при  $U = 40$  В. При этом профиль пропускания также близок к прямоугольному.

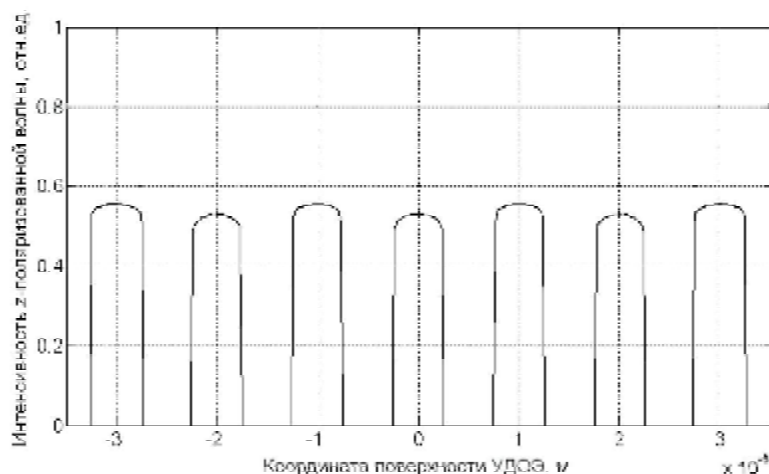
Различное пропускание четных и нечетных межэлектродных щелей, объясняется следующим образом. Для соседних межэлектродных щелей электрическое поле имеет одинаковую величину, но противоположные знаки, т.к. вектора напряженности направлены в противоположные стороны. Поскольку зависимость (3) чувствительна к знаку  $E_z(z,x)$ , то пропускание соседних межэлектродных щелей отличается. Для формирования равномерного пропускания по всей апертуре оптического элемента необходимо использовать несколько уровней управляющего напряжения. Следует также отметить, что для  $z$ -поляризованной волны напряжение в де-



**Рис. 2.** Фазовая функция пропускания  $z$ -поляризованной волны при межэлектродном напряжении  $U = 40$  В



**Рис. 3.** Фазовая функция пропускания  $y$ -поляризованной волны при межэлектродном напряжении  $U = 40$  В



**Рис. 4.** Интенсивность на выходе амплитудного и амплитудно-фазового нормально включенного УДОЭ при межэлектродном напряжении  $U = 40$  В

сятки вольт приводит к существенному изменению фазы, на единицы радиан, что вызывает заметное изменение диаграммы направленности УДОЭ. В этом случае можно вести речь об амплитудно-фазовых УДОЭ, поскольку распределение интенсивности в картинной плоскости определяется двумя механизмами: механизмом поляризационного изменения и механизмом дифракционного рассеяния.

Для  $y$ -поляризованной волны аналогичное межэлектродное напряжение формирует незначительное изменение фазы, в сотые-десятые доли радиан, что практически не влияет на распределение интенсивности в картинной плоскости. В этом случае можно вести речь об амплитудных УДОЭ, на выходе которых обеспечивается равномерное изменение интенсивности в картинной плоскости.

Для моделирования интенсивности в картинной плоскости УДОЭ был выбран случай дифракции Фраунгофера на одномерных структурах [12]. Моделировались амплитудный, фазовый и амплитудно-фазовый УДОЭ. Во всех случаях ширина электродов составляла 5 мкм, период решетки электродов - 10 мкм, расстояние до картинной плоскости - 10 см, распределение потенциалов имело вид  $0 - U - 0 - U$  и т.д. При расчетах дифракционной картины полагалось, что толщина защитного слоя и анализатора мала и распределение интенсивности света на выходе решетки электродов и анализатора одинаково.

При увеличении межэлектродного напряжения  $U$  амплитудного УДОЭ от 0 до 40 В интенсивность в картинной плоскости уменьшается, без изменения вида распределения.

При увеличении межэлектродного напряжения фазового УДОЭ от 0 до 20 В интенсивность в картинной плоскости фазового УДОЭ уменьшается, что сопровождается появлением новых

дифракционных максимумов в области  $z_0 / 160$  мкм и  $z_0 / -160$  мкм. Изменение интенсивности дифракционной картины происходит быстрее, чем в случае амплитудных УДОЭ.

При увеличении межэлектродного напряжения амплитудно-фазового УДОЭ от 0 до 20 В интенсивность в картинной плоскости амплитудно-фазового УДОЭ уменьшается и сопровождается появлением новых дифракционных максимумов в области  $z_0 / 160$  мкм и  $z_0 / -160$  мкм. Изменение вида и интенсивности дифракционной картины происходит быстрее, чем для амплитудных, и фазовых УДОЭ.

На рис. 5 приведено относительное изменение интенсивности нулевого дифракционного максимума по уровню 0,1 для различных УДОЭ.

Согласно полученным данным, наибольшим управляющим напряжением ( $/ 85$  В) обладают амплитудные УДОЭ, наименьшим - амплитудно-фазовые УДОЭ ( $/ 40$  В). По сравнению с амплитудными и фазовыми УДОЭ амплитудно-фазовые элементы обеспечивают большую глубину модуляции.

Для амплитудно-фазовых УДОЭ (кривая 3 на рис. 5) в области межэлектродных напряжений 0 - 40 В - действия дифракционного и поляризационного механизмов совпадают и направлены на снижение интенсивности 0-го максимума. В области 40 - 85 В действия дифракционного и поляризационного механизмов противоположны, однако механизм дифракционного изменения преобладает и обеспечивает увеличение интенсивности 0-го максимума. В области 85 - 100 В механизмы дифракционного и поляризационного изменения интенсивности совпадают и направлены на снижение интенсивности 0-го максимума.

Таким образом, предложенные в работе конструкция и принцип действия гибридных амплитудно-фазовых УДОЭ



**Рис. 5.** Изменение интенсивности нулевого максимума различных УДОЭ: 1 – амплитудный УДОЭ; 2 – фазовый УДОЭ; 3 – амплитудно-фазовый УДОЭ

литудно-фазовых УДОЭ теоретически обладают большей чувствительностью к управляющим электрическим напряжениям по сравнению с известными фазовыми УДОЭ.

Недостатком амплитудно-фазовых УДОЭ является различное пропускание межэлектродных щелей, что компенсируется использованием нескольких уровней управляющего напряжения.

Возможность управления амплитудной и фазовой функциями УДОЭ позволяет реализовать оптические модуляторы и коммутаторы, управляемые спектральными фильтрами с непрерывным и дискретным смещением спектра, адаптивным изменением его ширины.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках аналитической ведомственной целевой программы “Развитие научного потенциала высшей школы”, проект № 10в-Б001-053.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. США № 4281904, 21.06.1979.
2. *Kreymerman G.* Liquid crystal diffractive phase grating as light modulator for projection display // *Optical Engineering*. 2006. Vol.45(11). P.116202-1-116202-7.
3. Пат. США № 5093747, 28.02.1991.
4. Пат. США № 4639091, 27.02.1984.
5. *Yongjun Liu.* Correction for large aberration with phase-only liquid-crystal wavefront corrector // *Optical Engineering*. 2006. Vol.45(12). P.128001-1-128001-5.
6. Пат. РФ № 94002, 22.12.2009.
7. *Матюнин С.А.* Управляемые многокомпонентные интерференционно-дифракционные оптические элементы. Самара: СамНИЦ РАН, 2010. 263 с.
8. *Яриш А.* Оптические волны в кристаллах. М.: Мир, 1987. 616 с.
9. *Katinow I.P.* Linear electro-optic materials: vol.4. CRC Press, 1986. P.253.
10. *Holland W.R.* Linear electro-optic materials handbook of laser science and technology, suppl.2. CRC Press, 1995. P.133.
11. *Самарский А.А.* Введение в теорию разностных схем. М.: Наука, 1971. 552 с.
12. *Ахманов С.А.* Физическая оптика: 2-е изд. М.: Наука, 2004. 656 с.

### TUNABLE DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS OF AMPLITUDE-PHASE TYPE

© 2011 V.D. Pararin

Samara State Aerospace University

The construction and working principles of tunable amplitude diffractive optical elements (TDOE) and tunable amplitude-phase diffractive optical elements are proposed. Theoretical models of developed optical elements are created. Computer modeling of optical and functional properties of TDOE is implemented. Keywords: tunable diffractive optical element, electro-optical effect, amplitude-phase function, mathematical model.

*Vyacheslav Pararin, Post-Graduate Student at the Electronic Systems and Devices Department. E-mail: vpararin@mail.ru.*