

# Детектирование поляризации света с помощью МЕТАЛИНЗЫ

А.Г. Налимов  
Самарский национальный  
исследовательский университет им.  
академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
anton@ipsiras.ru

В.В. Котляр  
Самарский национальный  
исследовательский университет им.  
академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
kotlyar@ipsiras.ru

С.С. Стафеев  
Самарский национальный  
исследовательский университет им.  
академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
stafeev@ipsiras.ru

**Аннотация** — В работе рассмотрен оптический микросенсор состояния поляризации лазерного света, основанный на металлинзе. В отличие от известных датчиков поляризации, основанных на метаповерхностях, которые разный тип поляризации отклоняют под разными углами к оптической оси, рассмотренный датчик поляризации формирует разные картины в фокусе металлинзы для разных состояний поляризации: левая круговая поляризация в фокусе формирует световое кольцо, правая круговая поляризация – круглое фокусное пятно, а линейная поляризация – эллиптическое пятно с двумя боковыми лепестками.

**Ключевые слова** — оптический датчик, поляризация, металлинза.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Создание компактных быстродействующих оптических сенсоров для контроля за поляризацией света является актуальной задачей. Традиционные методы контроля поляризации света, такие как линейные поляризаторы, волновые пластинки, поляризационные модуляторы, как правило не являются компактными и требуют нескольких измерений [1].

К компактным и быстрым оптическим сенсорам поляризации относятся поляризационно-изображающие устройства [2], оптические [3] и плазмонные [4] поляриметры на чипе, и хиральные делители пучка на гироидных фотонных кристаллах [5], на основе метаповерхностей [6]. В данной работе исследуется металлинза, которая состоит из секторных бинарных субволновых решеток в пленке аморфного кремния. У данной металлинзы отсутствуют недостатки, описанные выше: глубина рельефа металлинзы всего 120 нм, металлинза фокусирует излучения на расстоянии, равном длине волны (633 нм), и фотоприемники сосредоточены в области фокусного пятна. Такой сенсор поляризации работает следующим образом: левая круговая поляризация фокусируется в световое кольцо (в центре нулевая интенсивность), правая круговая поляризация формирует круглое фокусное пятно, и линейная поляризация формирует эллиптическое фокусное пятно с двумя боковыми лепестками.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОСНОВАНИЕ

Метаповерхность, представленная в работе, в каждой точке поверхности поворачивает вектор поляризации, падающего на нее лазерного света на угол, равный двойному полярному (азимутальному) углу  $2\varphi$ , и реализует задержку фазы падающего излучения также пропорционально полярному углу. Матрица Джонса, описывающая пропускание такой металлинзы имеет вид:

$$\hat{T}(\varphi) = \exp(i\varphi) \begin{pmatrix} \cos 2\varphi - \sin 2\varphi \\ \sin 2\varphi & \cos 2\varphi \end{pmatrix}, \quad (1)$$

Если метаповерхность (1) освещает свет с левой круговой поляризацией, то свет, прошедший через такую поверхность, будет по-прежнему иметь левую круговую поляризацию:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \hat{T}(\varphi) \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} = \exp(i\varphi) \begin{pmatrix} \cos 2\varphi - \sin 2\varphi \\ \sin 2\varphi & \cos 2\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} = \exp(i3\varphi) \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $E_x$  и  $E_y$  – горизонтальная и вертикальная проекции поперечного вектора напряженности электрического поля. Если сфокусировать световое поле (2) идеальной сферической линзой с высокой числовой апертурой, то в плоскости фокуса сформируется световое кольцо.

Если метаповерхность (1) осветить светом с линейной поляризацией вдоль оси  $y$ , то на выходе сформируется оптический вихрь плюс первого порядка с азимутальной поляризацией второго порядка:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \hat{T}(\varphi) \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \exp(i\varphi) \begin{pmatrix} \cos 2\varphi - \sin 2\varphi \\ \sin 2\varphi & \cos 2\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \exp(i\varphi) \begin{pmatrix} -\sin 2\varphi \\ \cos 2\varphi \end{pmatrix}. \quad (3)$$

То есть, с помощью метаповерхности и фокусирующей линзы с высокой числовой апертурой можно детектировать различные состояния однородной поляризации лазерного пучка. Если на поверхность (1) падает свет с левой круговой поляризацией, то в фокусе сформируется световое кольцо с нулевой интенсивностью в центре. Если на поверхность (1) падает свет с линейной поляризацией, то в фокусе сформируется эллиптическое фокусное пятно с двумя боковыми лепестками. Так же в работе показано, что если на поверхность (1) падает свет с правой круговой поляризацией, то в фокусе сформируется круглое световое пятно с максимумом в центре.

## 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ

На рис. 1 показана рассматриваемая металлинза. Ее параметры: длина волны света  $\lambda = 633$  нм, фокусное

расстояние металлинзы  $f = \lambda$ , материал металлинзы – аморфный кремний (показатель преломления  $n = 4,33 + 0,486i$ ), высота рельефа 120 нм. Металлинза сформирована из секторных бинарных субволновых дифракционных решеток (период 220 нм), ширина канавки которых составляет 110 нм, ширина ступеньки 110 нм. Падающее световое поле ограничено круглой апертурой с радиусом 4 мкм.

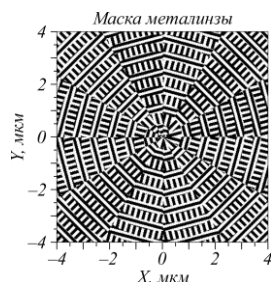


Рис. 1. Вид рассматриваемой металлинзы, размер изображения 8x8

Моделирование проводилось при помощи решения уравнения Максвелла с помощью метода конечных разностей во временной области (FDTD), реализованного в программном пакете FullWave (Rsoft). Сетка разбиения вдоль всех трех координат была взята  $\lambda/30$ . На рис. 2 показаны интенсивности лазерных пучков с тремя видами поляризации – левой круговой (LHCP), правой круговой (RHCP), линейной поляризацией с вектором электрического поля вдоль оси X.

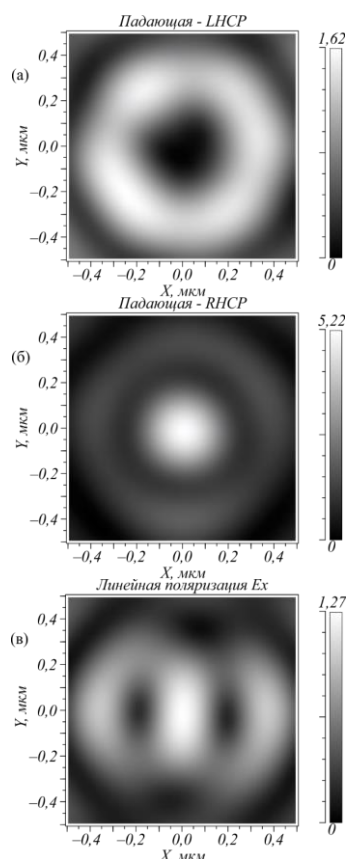


Рис. 2. Распределение интенсивности в фокусе металлинзы (Рис.1) для четырех различных типов поляризации падающего пучка: LHCP (а), RHCP (б), линейная  $E_x$  (в)

Как видно из рис. 2, все четыре поляризации формируют разные фокусные пятна как по форме, так и по амплитуде. Правая круговая поляризация формирует круглое фокусное пятно (рис. 2б) с диаметром по полуспаду интенсивности  $FWHM=0,427\lambda$ . левая круговая поляризация формирует в фокусе металлинзы (рис. 1) световое кольцо с радиусом 0,31 мкм и шириной

кольца  $0,4\lambda$ . При фокусировке линейной поляризации получается эллиптическое фокусное пятно с шириной по полуспаду интенсивности  $FWHM = 0,32\lambda$  вдоль малой оси эллипса и  $FWHM = 0,68\lambda$  вдоль большой оси эллипса.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе теоретически и численно исследовался микродатчик поляризации на основе металлинзы в тонкой пленке кремния с высокой числовой апертурой. Известные аналогичные датчики поляризации на основе металлинз не включают в себя фокусирующую линзу и отклоняют свет с разной поляризацией на разные углы. Это приводит к увеличению габаритов датчика и к необходимости использовать матрицу фотоприемников (CCD камеру). Рассмотренный в работе датчик поляризации имеет размеры всего десятки микрон, фокусирует свет на расстоянии длины волны и основан на другом принципе. Данный датчик не отклоняет свет разной поляризации на разные углы, а формирует в фокусе на оптической оси разные картины дифракции (фокусное круглое пятно, световое кольцо и эллиптическое фокусное пятно с боковыми лепестками). Это позволяет заменить матрицу фотоприемников на один или два одиночных фотоприемника с чувствительной площадкой в несколько сотен нанометров. Рассмотренный в работе датчик поляризации найдет применение в задачах контроля состояния поляризации в биологии, медицине, микроскопии.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Chipman, R.A. Handbook of Optics, chapter Polarimetry / edited by M. Bass. – The McGraw-Hill Companies, Inc, 2010.
- [2] Gruev, V. CCD polarization imaging sensor with aluminum nanowire optical filters / V. Gruev, R. Perkins, T. York // Opt. Express. – 2010. – Vol. 18. – P. 19087–19094.
- [3] Dai, D. Passive technologies for future large-scale photonic integrated circuits on silicon: polarization handling, light nonreciprocity and loss reduction / D. Dai, K. Bauters, J.E. Bowers // Light Sci. Appl. – 2012. – Vol. 1. – P. 1–14.
- [4] Afshinmanesh, F. Measurement of the polarization state of light using an integrated plasmonic polarimeter / F. Afshinmanesh, J.S. White, W. Cai, M. L. Brongersma // Nanophotonics. – 2012. – Vol. 1(2). – P. 0004.
- [5] Turner, M.D. Miniature chiral beamsplitter based on gyroid photonic crystals / M.D. Turner // Nat. Photonics. – 2013. – Vol. 7. – P. 801–805.
- [6] Khorasaninejad, M. Silicon nanofin grating as a miniature chirality-distinguishing beam-splitter / M. Khorasaninejad, K. Crozier // Nat. Commun. – 2014. – Vol. 5. – P. 5386.