

## ФОРМИРОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ДВУМЕРНЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ КАРТИН ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНОВ

Безус Е.А.<sup>1,2</sup>, Морозов А.А.<sup>1,2</sup>, Тукмаков К.Н.<sup>2</sup>, Володкин Б.О.<sup>2</sup>, Досколович Л.Л.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт систем обработки изображений РАН

<sup>2</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет),

### Аннотация

Численно и экспериментально исследовано формирование двумерных интерференционных картин поверхностных плазмон-поляритонов в дифракционной структуре, состоящей из четырёх одномерных дифракционных решёток, выполненных в металлической плёнке. Показано, что переход от линейной к круговой поляризации позволяет уменьшить период формируемой картины в  $\sqrt{2}$  раз при фиксированной длине волны падающего излучения.

**Ключевые слова:** нанофотоника, плазмоника, поверхностный плазмон-поляритон, интерференционная картина, ближнепольная микроскопия.

Поверхностные плазмон-поляритоны (ППП, электромагнитные волны, распространяющиеся в металло-диэлектрических структурах), являются в настоящее время предметом интенсивных исследований. Это обусловлено перспективами их применения в химических и биологических сенсорах, фотовольтаике, микроскопии, устройствах обработки информации в наномасштабе [1, 2]. Важными областями применения PPP являются нанолитография в ближнем поле [3] и оптический захват и манипулирование микро- и наноразмерными объектами [4]. Для указанных областей представляет интерес формирование высокочастотных интерференционных картин PPP. В работах [5, 6] было теоретически и на основе численного моделирования исследовано формирование интерференционных картин плазмонных мод в диэлектрических дифракционных решётках с металлическим слоем. Было показано, что период и вид формируемых интерференционных картин могут быть изменены за счёт изменения параметров падающего излучения (длины волны, угла падения и состояния поляризации). Также было численно [7] и экспериментально [8] исследовано формирование интерференционных картин PPP в области интерференции, ограниченной четырьмя дифракционными решётками, представляющими собой набор щелей в металлической плёнке. Было показано, что вид формируемых картин зависит от направления поляризации падающей линейно-поляризованной волны. При этом период двумерных картин составлял  $\lambda_{spp}/\sqrt{2}$ , где  $\lambda_{spp}$  — длина волны PPP, т.е. в  $\sqrt{2}$  раз превышал период одномерных интерференционных картин PPP.

В настоящей работе рассматривается формирование интерференционных картин PPP с помощью аналогичной структуры. Исследуемая структура, представляющая собой 4 одномерные дифракционные решётки, выполненные в виде прямоугольных щелей в плёнке серебра и ограничивающие квадратную область интерференции, показана на рис. 1. Период решёток, равный 612 нм, был рассчитан из условия возбуждения PPP  $\pm 1$  дифракционными порядками решётки при нормальном падении излучения с длиной волны 632,8 нм. Область интерферен-

ции представляла собой квадрат со стороной 4 или 6 мкм для различных образцов. Ширина отверстия решёток составляла 200 нм. С каждой стороны от области интерференции было изготовлено 10 периодов решётки.

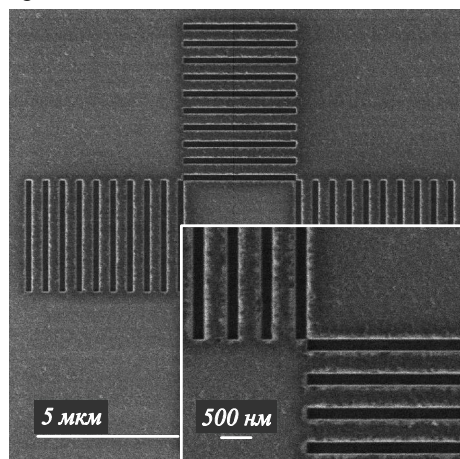


Рис. 1. Геометрия структуры (изображение изготовленного образца, полученное на растровом электронном микроскопе)

Описанные структуры были изготовлены методом прямой записи фокусированным ионным пучком на платформе НАНОФАБ 100. В качестве основы использовалась стеклянная подложка, на которую с помощью магнетронного распыления был нанесён адгезионный подслой хрома толщиной 10 нм и затем слой серебра толщиной 100 нм.

На рис. 2 показаны характерные распределения интенсивности электрического поля интерференционных картин PPP, формируемые в области интерференции над поверхностью металла при линейной (а) и круговой (б) поляризациях падающей со стороны подложки плоской электромагнитной волны, рассчитанные с помощью метода фурье-мод. В случае линейной поляризации вектор напряжённости электрического поля был направлен под углом  $45^\circ$  к щелям решёток. В соответствии с теоретическим анализом, проведённым в работе [6], и с результатами работ [7, 8], при линейной поляризации падающей волны интерференционная картина ориентиро-

вана под углом  $45^\circ$  к щелям решёток, а её период составляет  $\lambda_{spp}/\sqrt{2}$ . В случае, когда падающая волна имеет круговую поляризацию, формируемая картина ориентирована параллельно щелям решёток, а её период равен  $\lambda_{spp}/2$ , т.е. совпадает с периодом одномерных интерференционных картин ППП.

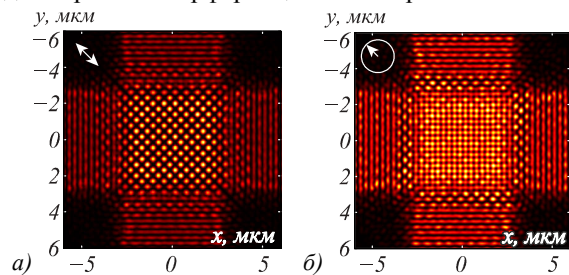


Рис. 2. Расчетные интерференционные картины ППП, формируемые при линейной (а) и круговой (б) поляризациях падающей волны

Для получения экспериментальных изображений (распределений электромагнитного поля формируемых интерференционных картин ППП) использовался сканирующий ближнепольный оптический микроскоп на базе платформы ИНТЕГРА Спектра. Использовался гелий-неоновый лазер с длиной волны 632,8 нм, после него устанавливались поляризатор, а также четвертьволновая пластинка, в том случае, если требовалось получить круговую поляризацию падающего излучения. Перенаправленное зеркалом излучение фокусировалось на образец снизу с помощью линзы. Непосредственно над образцом располагался кантилевер с отверстием диаметром примерно 100 нм. Излучение, прошедшее через отверстие кантилевера, собиралось высокоапертурным микрообъективом (100 $\times$ ) и через зеркало направлялось на камеру. Сигнал, полученный камерой, при каждом положении образца интегрировался, таким образом, получалось значение интенсивности изображения в точке, над которой находился кантилевер.

На рис. 3 показано экспериментальное распределение интенсивности электрического поля в области интерференции, полученное при линейной поляризации падающей волны. Вид картины совпадает с расчётным (рис. 2а), период картины 425 нм близок к теоретическому значению 432 нм. На рис. 4 показаны измеренное (сверху) и расчётное (снизу) распределения интенсивности электрического поля в области интерференции (фрагмент), полученные при круговой поляризации падающей волны. Вид экспериментально измеренного распределения также совпадает с расчётным, а значение периода формируемой картины 301 нм близко к теоретическому значению 306 нм. Отметим, что расхождение между измеренными и теоретическими значениями периода картин может быть вызвано отличием диэлектрической проницаемости металлической плёнки от табличного значения. Неоднородность интерференционных картин (различные значения интенсивности в интерференцион-

ных максимумах) могла быть вызвана деградацией образца (окислением металлической плёнки).

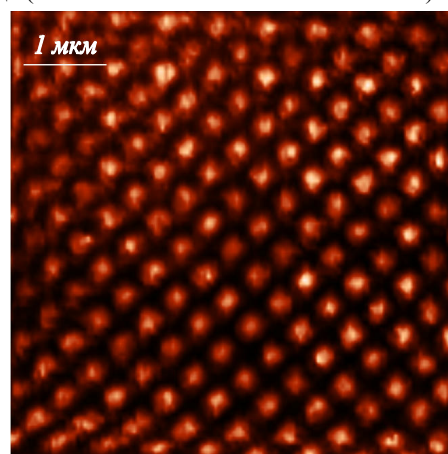


Рис. 3. Интерференционная картина ППП, формируемая при линейной поляризации падающей волны

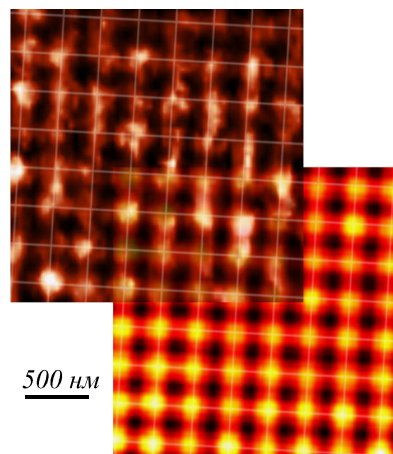


Рис. 4. Интерференционная картина ППП, формируемая при круговой поляризации падающей волны

В заключение, в настоящей работе численно и экспериментально показано, что переход к круговой поляризации падающего излучения позволяет в  $\sqrt{2}$  раза уменьшить период двумерных интерференционных картин ППП при фиксированной длине волны падающего излучения.

Работа выполнена при поддержке гранта фонда «Династия», грантов РФФИ 12-07-00495, 11-07-12036, 10-07-00553, 11-07-00153 и грантов Президента РФ НШ-7414.2010.9, МД-1041.2011.2.

#### Литература (References)

1. **Ozby, E.** Plasmonics: Merging Photonics and Electronics at Nanoscale Dimensions / E. Ozby // Science. – 2006. – Vol. 311. – P. 189-193.
2. **Gramotnev, D.K.** Plasmonics beyond the diffraction limit / D.K. Gramotnev, S.I. Bozhevolnyi // Nat. Photon. – 2010. – Vol. 4. – P. 83-91.
3. **Blaikie, R.J.** Plasmonic Materials for Near-Field Optical Nanolithography / R.J. Blaikie // Applications of Metamaterials. – Edited by F. Capoloni. – CRC Press, 2009. – P. 25-1–25-23.
4. **Grigorenko, A.N.** Nanometric optical tweezers based on nanostructured substrates / A.N. Grigorenko, N.W. Ro-

- berts, M.R. Dickinson, Y. Zhang // Nat. Photon. – 2008. – Vol. 2. – P. 365-370.
5. **Bezus, E.A.** Diffraction gratings for generating varying-period interference patterns of surface plasmons / E.A. Bezus, D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, I.I. Kadomin // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. – 2008. – Vol. 10. – P. 095204-095208.
  6. **Bezus, E.A.** Grating-assisted generation of 2D surface plasmon interference patterns for nanoscale photolithography / E.A. Bezus, L.L. Doskolovich // Opt. Commun. – 2010. – Vol. 283. – P. 2020-2025.
  7. **Liu, Z.-W.** Surface plasmon interference nanolithography / Z.-W. Liu, Q.-H. Wei, X. Zhang // Nano Lett. – 2005. – Vol. 5. – P. 957-961.
  8. **Wang, Q.** High-resolution 2D plasmonic fan-out realized by subwavelength slit arrays / Q. Wang, J. Bu, X. Yuan // Opt. Express. – 2010. – Vol. 18. – P. 2662-2667.

## GENERATION OF HIGH-FREQUENCY 2D SURFACE PLASMON POLARITON INTERFERENCE PATTERNS

*Bezus E.A.<sup>1,2</sup>, Morozov A.A.<sup>1,2</sup>, Tukmakov K.N.<sup>2</sup>, Volodkin B.O.<sup>2</sup>, Doskolovich L.L.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> *Image Processing Systems Institute of the RAS,*

<sup>1,2</sup> *S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (National Research University)*

### Abstract

Generation of 2D surface plasmon polariton interference patterns in a structure consisting of four 1D diffraction gratings milled into a metal film is investigated numerically and experimentally. It is demonstrated that using circularly polarized incident wave instead of linearly polarized one leads to a decrease in the pattern period at fixed wavelength.

**Key words:** nanophotonics, plasmonics, surface plasmon polariton, interference pattern, near-field microscopy.

### Сведения об авторах

**Безус Евгений Анатольевич**, инженер лаборатории дифракционной оптики Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН), м.н.с. НИЛ-35 Самарского государственного аэрокосмического университета (СГАУ). Область научных интересов: нанофотоника, плазмоника, электромагнитная теория дифракции.

E-mail: [evgeni.bezus@gmail.com](mailto:evgeni.bezus@gmail.com).

**Evgeni Anatolievich Bezus**, research engineer at the Diffractive Optics Laboratory of the Image Processing Systems Institute of the RAS (IPSI RAS) and junior researcher at NIL-35 laboratory at Samara State Aerospace University (SSAU). Research interests: nanophotonics, plasmonics, electromagnetic diffraction theory.

**Морозов Андрей Андреевич**, аспирант кафедры технической кибернетики СГАУ. Область научных интересов: дифракционная оптика.

E-mail: [ragefalcon@mail.ru](mailto:ragefalcon@mail.ru).

**Andrey Andreevich Morozov**, postgraduate student at Technical Cybernetics Department at SSAU. Research interests: diffractive optics.

**Тукмаков Константин Николаевич**, инженер кафедры наноинженерии, м.н.с. НОЦ нанотехнологий СГАУ. Область научных интересов: изготовление микро- и наноструктур, технология фокусированных ионных пучков.

E-mail: [tukmakov.k@gmail.com](mailto:tukmakov.k@gmail.com).

**Konstantin Nikolaevich Tukmakov**, engineer at the Nanoengineering Department, junior researcher at Nanotechnology REC at SSAU. Research interests: production of micro- and nanostructures, focused ion beam technology.

**Володкин Борис Олегович**, инженер кафедры наноинженерии, м.н.с. НОЦ нанотехнологий СГАУ. Область научных интересов: изготовление микро- и наноструктур, сканирующая зондовая микроскопия.

E-mail: [boris-volodkin@yandex.ru](mailto:boris-volodkin@yandex.ru).

**Boris Olegovich Volodkin**, engineer at the Nanoengineering Department, junior researcher at Nanotechnology REC at SSAU. Research interests: production of micro- and nanostructures, scanning probe microscopy.

**Досколович Леонид Леонидович**, д.ф.-м.н., профессор, в.н.с. лаборатории дифракционной оптики ИСОИ РАН, профессор кафедры технической кибернетики СГАУ. Область научных интересов: дифракционная оптика, лазерные информационные технологии, нанофотоника.

E-mail: [leonid@smr.ru](mailto:leonid@smr.ru).

**Leonid Leonidovich Doskolovich**, Doctor in Physics & Mathematics, professor, leading researcher at IPSI RAS, professor at SSAU (Technical Cybernetics Department). Research interests: diffractive optics, laser information technologies, nanophotonics.