

ISSN 1561-8323 (print)

ФИЗИКА
PHYSICS

УДК 535.52+535.542+535.8+535.012+681.787

Поступило в редакцию 20.02.2017

Received 20.02.2017

**Член-корреспондент В. Н. Белый¹, академик В. Е. Агабеков², академик Н. С. Казак¹,
С. Н. Курилкина¹, А. Е. Соломянский², В. И. Куликовская²**¹*Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*²*Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь***ФОРМИРОВАНИЕ И СВОЙСТВА НОВЫХ ТИПОВ МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
НАНОСТРУКТУР ДЛЯ СОЗДАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ**

Аннотация. Рассмотрены технологии получения композитных сред, которые могут проявлять свойства метаматериалов: пористых пленок оксида алюминия с системой периодических нанотверстий, заполненных благородными металлами; многослойных металл-диэлектрических (в том числе металл-полимерных) наноструктур; полимерных пленок с внедренными металлическими наночастицами; сетчатых полимерных структур с металлическим заполнением ячеек. Исследованы диэлектрические и резонансные свойства синтезированных структур, установлены особенности возбуждения в них новых типов квазибездифракционных плазмон-поляритонов. Предложены оригинальные методы и устройства для характеристики оптических свойств созданных композитных наноструктур. Показана перспективность использования метаматериалов при создании плоских суперлинз, управления параметрами световых пучков, а также для резонансно-усиленной эванесцентной нанолитографии.

Ключевые слова: метаматериалы, наноструктура, плазмоны, суперлинза, интерферометрия, эллипсометрия**Для цитирования:** Формирование и свойства новых типов металл-диэлектрических наноструктур для создания оптических метаматериалов / В. Н. Белый [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 4. – С. 31–38.**Corresponding Member Vladimir N. Belyi¹, Academician Vladimir E. Agabekov², Academician Nikolai S. Kazak¹,
Svetlana N. Kurilkina¹, Aliaksandr E. Salamianski², Viktoryia I. Kulikouskaya²**¹*B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*²*Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***FORMATION AND PROPERTIES OF NEW TYPES OF METAL-DIELECTRIC NANOSTRUCTURES
FOR CREATION OF OPTICAL METAMATERIALS**

Abstract. New technologies of obtaining composite media were studied, which can reveal the properties of metamaterials: porous aluminum oxide films with a system of periodic nanoholes filled with noble metals; multilayer metal-dielectric (including, metal-polymer) nanostructures; polymer films with implemented metal nanoparticles, fish-net polymer structures with metal filling of cells. Dielectric and resonance properties of synthesized structures were investigated; the peculiarities of excitation of new types of quasi-non-diffracting plasmon-polaritons in them were established. The original methods and devices for characterization of optical properties of created composite nanostructures were proposed. The perspectives were shown how to use metamaterials when creating flat superlenses, to manipulate light beam parameters and also resonance-assisted evanescent nanolithography.

Keywords: metamaterials, nanostructure, plasmons, superlens interferometry, ellipsometry**For citation:** Belyi V. N., Agabekov V. E., Kazak N. S., Kurilkina S. N., Salamianski A. E., Kulikouskaya V. I. Formation and properties of new types of metal-dielectric nanostructures for creation of optical metamaterials. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2017, vol. 61, no. 4, pp. 31–38 (in Russian).

Введение. В настоящее время внимание многих исследователей привлекают оптические метаматериалы (ММ) – композитные среды, обладающие свойствами, зависящими не от их химического состава, а от упорядоченной особым образом микроструктуры, состоящей из совокуп-

ности элементарных ячеек (искусственных «атомов»), размеры которых как и расстояние между ними значительно меньше длины волны света. Настоящая работа посвящена анализу новых металл-диэлектрических (МД) (в том числе металл-полимерных) наноструктур, которые могут проявлять свойства метаматериалов, включая оксид алюминия с порами, заполненными серебром или золотом, и плазмонных композитных металл-диэлектрических структур и разработке методов их характеристики.

Пути создания композитных металл-диэлектрических наноструктур. Одним из видов метаматериалов являются гиперболические ММ, оптические свойства которых описываются продольной и поперечной диэлектрическими проницаемостями, имеющими противоположные знаки [1]. Для изготовления таких ММ, как правило, используют диэлектрические слои, в которые упорядоченно внедряются металлические наностержни. Нами предложен подход, основанный на использовании нанопористого анодного оксида алюминия, периодически расположенные поры которого заполнены благородным металлом. Разработана оригинальная конструкция гиперболического метаматериала¹, предназначенного для работы в широком оптическом диапазоне длин волн, которая состоит из нанопористой алюмооксидной керамики с системой чередующихся nanoотверстий с диаметрами от 30 до 50 нм, заполненных золотом или серебром (рис. 1). Созданы образцы пористого оксида алюминия с нанопорами, заполненными серебром, которые, согласно проведенным теоретическим расчетам, имеют отрицательную продольную диэлектрическую проницаемость в широком спектральном диапазоне, т. е. проявляют свойства, характерные для метаматериалов.

На основе шаблона самоорганизованных наночастиц созданы структуры, проявляющие свойства, характерные для оптических метаматериалов типа «рыбачья сеть» [2]. Такой шаблон представляет собой плотно упакованные полистирольные шарики диаметром 200–1000 нм, в пространство между которыми внедряется металл (золото или серебро), либо чередующиеся нанослои металла и полимера. Варьируя расстояние между шариками в пределах от 15 до 80 нм и их диаметр, получены различные формы упорядоченных структур (рис. 2). По сравнению с методами литографии такой путь создания наноразмерных структур позволяет создавать однородные МД наноструктуры достаточно большой площади (порядка единиц см²) (рис. 2). Как показали теоретические расчеты и результаты экспериментальных исследований [2], данные МД наноструктуры могут обладать одновременно отрицательной диэлектрической и магнитной проницаемостями, т. е. оптическим магнетизмом и отрицательным показателем преломления в видимой и инфракрасной областях спектра.

Представляется перспективным использование для получения сетчатых [3] и слоистых [4; 5] МД наноструктур методов, не требующих вакуумирования и высоких температур, таких как технология Ленгмюра–Блоджетт (ЛБ), послойное осаждение и/или самоорганизация веществ на твердой подложке из их растворов.

Сформированы мультислой ЛБ диоктилсульфосукцината натрия (АОТ) с олигофениленвениленом (PhV) и золотыми наночастицами (размер от 50 до 80 нм) [4]. Изменение фазы светового пучка, прошедшего через пленки

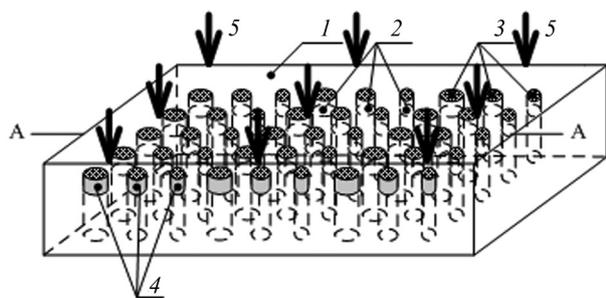


Рис. 1. Конструкция гиперболического метаматериала для оптического спектрального диапазона: 1 – диэлектрическая подложка, 2 – nanoотверстие, 3 – благородный металл, 4 – пора, заполненная металлом (нанопроволока), 5 – электромагнитное излучение

Fig. 1. Design of a hyperbolic metamaterial for the optical spectral range: 1 – dielectric substrate, 2 – nanohole, 3 – noble metal, 4 – pore filled with metal (nanowire), 5 – electromagnetic radiation

¹ Конструкция гиперболического метаматериала для оптического спектрального диапазона: пат. U 10687 Респ. Беларусь; МПК H 01 L 29/06 / Н. И. Мухуров, М. А. Бинхуссаин, М. С. Алшамари, Х. А. Аларифи, И. В. Гасенкова, Н. С. Казак, В. Н. Белый; заявитель Ин-т физики НАН Беларуси (BY), Научно-технический центр им. Короля Абдулазиза (SA). – № u20140450; заявл. 12.12.2014; опублик. 30.06.15 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2015. – № 6.

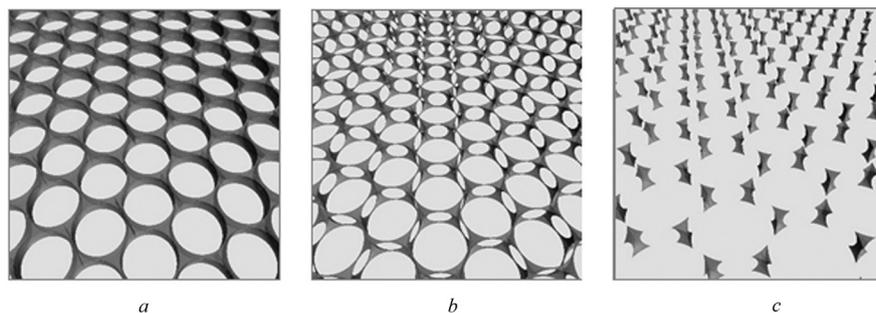


Рис. 2. СЭМ-изображения образцов композитных металл-диэлектрических структур на основе плотно упакованной решетки полистирольных шариков, диаметр которых 670 нм, а расстояние между центрами соседних шариков – 800 нм. Размер поверхности образца 5×5 мм². Металлический слой толщиной 400 нм с удаленными шариками (а); перекрывающиеся полости диаметром 880 нм после дополнительного травления металла: толщина структуры 400 нм (b), 270 нм (c)

Fig. 2. SEM-images of the samples of composite metal-dielectric structures based on a densely packed lattice of 670 nm-diameter polystyrene spheres, the distance between the centers of adjacent spheres is 800 nm. The size of the sample surface is 5×5 mm². Metal layer with the thickness of 400 nm with removed spheres (a). Overlapping cavities with the diameter of 880 nm after addition etching of metal: structure thickness is 400 nm (b) and 270 nm (c)

АОТPhB-Au, обработанные ультрафиолетовым излучением, составляет $0,85^\circ$, что свидетельствует о возможности использования данных покрытий для создания материалов с близкой к нулю диэлектрической проницаемостью [4].

Получены сетчатые пленки карбоксилированной нитроцеллюлозы с порами размером 700–800 нм, глубиной ячеек 650–700 нм и расстояниями между ними 450–490 нм, модифицированными наночастицами серебра [3]. Методом центрифугирования сформированы композиционные покрытия на основе поливинилового спирта (ПВС) с поливинилпирролидоном (ПВП) и наночастицами Au толщиной 1 мк. После частичной термоокислительной деструкции органической матрицы ПВС/ПВП при температуре 250 °C в течение 2 ч толщина покрытия ПВС/ПВП-Au уменьшается до 300 нм. Однородные тонкие металлические пленки можно сформировать также осаждением серебряных наночастиц из растворов на поверхность стекла и кремния, модифицированных полиэтиленмином [5]. При этом расчеты [3] показали, что полученные образцы металл-полимерных слоистых и сетчатых структур могут обладать отрицательной продольной диэлектрической проницаемостью в диапазоне длин волн 3–5 мкм.

Следует отметить, что гиперболические метаматериалы на основе МД структур, сформированы также из чередующихся слоев золотых наночастиц и полупроводниковых квантовых точек теллурида кадмия [6].

Оптические свойства разработанных МД наноструктур. Важную роль для характеристики полученных образцов имеет знание их отклика на воздействие оптического излучения. Одним из подходов к решению данной проблемы является использование теории эффективной среды, в соответствии с которой композитная структура рассматривается как сплошная среда, описываемая эффективными параметрами (диэлектрической проницаемостью, показателем преломления и т. д.), существенно зависящими от геометрических и диэлектрических свойств компонентов. С этой целью широко используемая модель эффективной среды Максвелла–Гарнетта модифицирована [7] для описания эффективной диэлектрической проницаемости структуры, представляющей собой монослой серебряных наночастиц, имеющих произвольную форму, размер и расположенных на стеклянной подложке.

На оптические свойства композитных МД наноструктур оказывает влияние шероховатость поверхностей на границах раздела металл–диэлектрик, что теоретически обосновано введением эффективного показателя преломления диэлектрических слоев [8]. Наличие шероховатостей приводит также к увеличению плотности фотонных состояний в гиперболическом метаматериале [8].

Разработаны основы феноменологической электродинамики для гиперболических метаматериалов с близкой к нулю диэлектрической проницаемостью [9].

Развита теория эффективной среды для метаматериала типа «рыбачья сеть», представляющего собой структуру из чередующихся металлических и диэлектрических нанослоев; при этом в металлических пленках проделаны отверстия, необходимые для возбуждения кольцевых токов [9]. Найдены условия, при которых данная структура обладает экстремальными оптическими характеристиками, в частности, близкой к нулю продольной или поперечной диэлектрической проницаемостью.

Практический интерес представляет проблема возбуждения плазмон-поляритонов в метаматериалах, поскольку именно благодаря плазмонным колебаниям возможно наблюдение наноразмерных объектов при получении изображения с помощью линзы, изготовленной из МД наноструктур.

Нами впервые обнаружен и изучен новый тип плазмонов, локализованных у границы раздела диэлектрика и металла – бesselев мультиплазмон [10], который характеризуется наличием ярко выраженных, симметрично расположенных в приосевой области сверхузких (с размером несколько десятков нанометров) максимумов интенсивности, сохраняющих свою пространственную структуру при удалении от границы раздела воздух–МД наноструктура. Показано, что в отличие от традиционных поверхностных плазмонов бesselев мультиплазмон не связан с распространяющимся волновым процессом, а является стоячей структурой связанных колебаний электромагнитного поля и зарядов среды. Бesselев мультиплазмон перспективен для создания нового вида виртуальных оптических квазибездифракционных зондов для ближнепольной микроскопии [10].

Найдены условия существования на границе воздуха и МД наноструктуры с близкой к нулю диэлектрической проницаемостью квазибездифракционных плазмон-поляритонов нового типа с поперечным распределением амплитуды, описываемым функцией Бесселя. Данный плазмон-поляритон представляет собой цилиндрически симметричную стоячую волну с винтовой фазовой сингулярностью и амплитудой, экспоненциально затухающей в МД наноструктуре.

Кроме того, предсказан и исследован новый тип плазмон-поляритонов – плазмон-поляритонные пучки, интенсивность которых в плоскости распространения (на поверхности металл-диэлектрической структуры) описывается гауссовой функцией, а внутри металл-диэлектрической структуры – экспоненциально уменьшается [10].

Методы и устройства характеристики МД наноструктур. Для характеристики изготовленных образцов нами разработан высокочувствительный интерферометрический метод, обе-

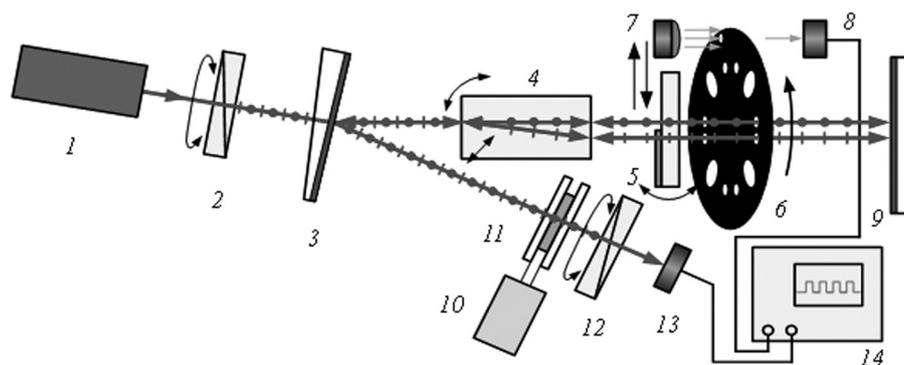


Рис. 3. Оптическая схема экспериментально реализованного интерферометра: 1 – He-Ne лазер; 2 – поляризатор с осью пропускания, ориентированной под углом 45° ; 3 – зеркало с коэффициентом отражения $R = 50\%$, ориентированное под углом $\sim 2^\circ$; 4 – двулучепреломляющий элемент; 5 – образец, состоящий из прозрачной подложки, поверхность которой частично покрыта исследуемой тонкой пленкой; 6 – прерыватель; 7 – диод; 8 – фотодиод схемы синхронизации; 9 – плоское зеркало; 10 – источник питания; 11 – контролируемая LC-линия задержки; 12 – поляризатор с осью пропускания, ориентированной под углом $\pm 45^\circ$; 13 – фотодетектор; 14 – осциллоскоп

Fig. 3. Optical scheme of the experimental interferometer: 1 – He-Ne laser; 2 – polarizer with the axis oriented at an angle of 45° ; 3 – mirror with the reflection coefficient $R = 50\%$ oriented at an angle of $\sim 2^\circ$; 4 – two-beam refracting element; 5 – sample composed of transparent substrate, whose surface is partially covered with a test thin film; 6 – chopper; 7 – diode; 8 – synchronization scheme diode; 9 – flat mirror; 10 – power source; 11 – controlled LC-delay line; 12 – polarizer with the axis oriented an angle of $\pm 45^\circ$; 13 – photodetector; 14 – oscilloscope

спечивающий прямое измерение оптического фазового сдвига в поглощающих слоях МД наноструктур. С этой целью предложен и создан дифференциальный поляризационный интерферометр (рис. 3), который позволяет проводить измерения в широком спектральном диапазоне при произвольных углах падения света на исследуемый материал¹.

Кроме того, разработан высокоэффективный эллипсометрический способ определения толщины, показателя преломления диэлектрической матрицы, объемной концентрации пор, эффективной диэлектрической проницаемости созданных пористых структур.

Предложены метод и устройство, которые позволяют обнаружить у созданных МД структур наличие отрицательного показателя преломления. В основе их действия – различие в направлении поперечного смещения прошедшего через образец луча для материалов с положительным и отрицательным показателями преломления².

Перспективы применения МД наноструктур.

1. *Плоские суперлинзы.* Разработан ряд новых конфигураций плоских линз с субволновым разрешением (суперлинз) на основе полученных МД многослойных наноструктур (рис. 4, а). Данные конфигурации отличаются количеством и толщинами нанослоев металла (Ag, Au) и диэлектрика (SiO₂, TiO₂) и оптимизированы для заданных длин волн в оптическом спектральном диапазоне [11]. Впервые разработаны ближнепольные суперлинзы с системой ввода (призмой полного внутреннего отражения) из алмаза, позволившие достичь разрешения 70 нм в ультрафиолетовой области спектра (на длине волны 365 нм). При этом глубина фокуса равна 40 нм. Высокое разрешение и малая глубина фокуса обуславливают перспективность применения данных ближнепольных суперлинз для нанолитографии. Разработанные ближнепольные суперлинзы обеспечивают не только высокое разрешение, но и существенное (в 30 раз) усиление интенсивности излучения, что представляет интерес при получении изображений слабо видимых объектов, а также при создании сенсоров слабых оптических сигналов [11].

Показано, что плоские линзы на основе МД наноструктур могут использоваться также на расстояниях от их выходной поверхности, в несколько раз превышающих длину световой волны (в дальнем поле). Достоинствами подобных дальнепольных линз являются компактность (толщина линзы без учета размеров подложки, на которую она наносится, порядка нескольких сотен нанометров); независимость действия от смещения светового поля в поперечном направлении;

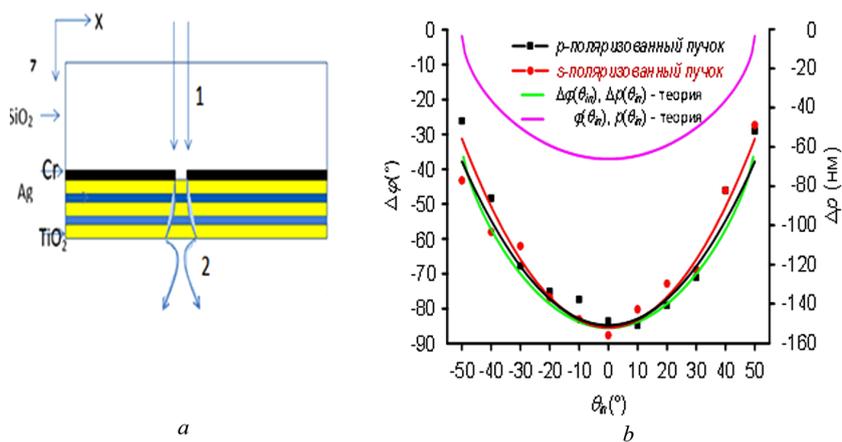


Рис. 4. Новая конструкция плоской суперлинзы на основе гиперболического метаматериала – многослойной металл-диэлектрической структуры (а). Зависимость фазового сдвига Δφ и оптической разности хода Δρ суперлинзы на основе Ag/SiO₂ наноструктуры от угла падения света θ_{in} (b)

Fig. 4. New design of a flat superlens based on hyperbolic metamaterial – multilayered metal-dielectric structure (a). Dependence of the phase shift Δφ and the optical difference of the stroke Δρ of the superlens based on the Ag/SiO₂ nanostructure on the light incidence angle θ_{in} (b)

¹ Differential polarization interferometer: US patent no. US 2016/0231099 A1 / A. V. Agashkov, N. S. Kazak, V. E. Agabekov, M. S. Alshammari, M. Binhussain; publ. date: August, 2016.

² Способ определения оптического метаматериала (варианты): пат. 20458 Респ. Беларусь от 08.06.2016 г. / П. И. Ропот, Н. С. Казак, Мохаммед А. Бинхуссаин, А. П. Ропот; заявители Ин-т физики НАН Беларуси (BY), Научно-технический центр им. Короля Абдулазиза (SA) // Офиц. бюллетень. – 2016. – № 5 (112). – С. 116.

возможность реализации большой площади поверхности линзы (например, $5 \times 5 \text{ см}^2$); большая угловая апертура, которая может приближаться к 90° [11].

Несомненным достоинством предложенных линз является то, что при их изготовлении применяются широко используемые методы формирования слоистых МД наноструктур из материалов Ag, Au, SiO_2 , TiO_2 толщиной порядка 20–40 нм с шероховатостью поверхности не более 2–3 нм. При этом одна конструкция суперлинзы может использоваться для работы как в ближнем, так и в дальнем поле.

Необходимо отметить, что особенности функционирования суперлинзы обусловлены наличием отрицательного показателя преломления МД наноструктуры, из которой она изготовлена, что проявляется в отрицательном значении набега фазы световой волны при прохождении суперлинзы. Экспериментальное доказательство существования отрицательного фазового сдвига в плоских линзах является важной проблемой, которая была решена с помощью разработанного интерференционного метода [12]. Данный метод позволил впервые измерить отрицательный фазовый сдвиг световой волны при прохождении плоской МД линзы (рис. 4, *b*) и тем самым подтвердить наличие отрицательной кривизны ее фазовой характеристики [12]. Также впервые обнаружено, что для падающего на суперлинзу светового поля с радиальной поляризацией реализуется режим фокусирования, а с азимутальной поляризацией – режим каналирования, т. е. формирования узконаправленного нерасходящегося светового пучка [12].

Разработанные плоские линзы могут использоваться для формирования изображений как в ближнем поле с разрешением порядка несколько десятков нанометров, так и в дальнем поле в широком спектральном диапазоне от 300 до 800 нм. Они также перспективны для создания оптических систем с субволновым разрешением, нанолитографии, оптических сенсоров со значительно более высокой чувствительностью, оптоэлектронных устройств с наноразмерными элементами.

Проведенные расчеты спектральных, угловых и пространственных характеристик плоских линз на основе многослойных МД наноструктур [8; 12] показали, что они энергетически наиболее эффективны в ультрафиолетовом и фиолетовом диапазонах длин волн. Кроме того, важной характеристикой плоской линзы является их большая числовая апертура (порядка двух единиц), что обеспечивает высокую разрешающую способность. Фазовые характеристики плоской линзы как в ультрафиолетовом, так и в видимом диапазонах для *p*-поляризованного света имеют вогнутую форму, что и является необходимым условием фокусировки. На рис. 4, *b* представлены результаты прямого измерения угловой зависимости фазового сдвига световой волны, прошедшей через плоскую оптически тонкую двухслойную МД наноструктуру Ag/ SiO_2 (рис. 4, *b*).

При освещении данной МД наноструктуры бесселевым световым пучком нулевого порядка имеет место эффект двойной фокусировки. При этом первый фокус, обусловленный действием линзы, находится на малом (меньше длины световой волны) расстоянии за линзой, а второй фокус наблюдается на большем расстоянии (больше длины волны) и вызван когерентным усилением волн, дифрагированных на входной апертуре линзы. Этот эффект представляет практический интерес, например, для фотолитографии.

2. Резонансно-усиленная нанолитография на основе интерференции эванесцентных волн. В зависимости от режима функционирования ближнепольной плоской линзы, ее разрешающая способность, а также глубина локализации и усиление интенсивности светового поля за линзой достигают максимальной величины. Поэтому линзы перспективны для применения в нанолитографии, в которой используются коллимированные световые пучки с целью достижения плазмонного резонанса. Это позволяет в условиях резонанса возбуждать поверхностные плазмоны и тем самым достигать большого усиления интенсивности в выходной плоскости линзы.

Применение коллимированных световых пучков позволяет исключить использование формирующих апертур на входе линзы. Это обеспечивает хорошее качество интерференционных картин в фоторезисте из-за отсутствия искажения структуры поверхностных плазмонов данными апертурами. Отметим, что призма полного внутреннего отражения, используемая для формирования интерференционной наноструктуры, может использоваться в конфигурациях Отто или Крэтчмана [13] и выбирается из материала с большим показателем преломления, что обеспечивает значительную числовую апертуру устройства и, следовательно, высокое пространственное разрешение.

При работе в ультрафиолетовом диапазоне ($\lambda = 365$ нм) и соответствующем выборе слоистой МД наноструктуры и материала призмы формируемое в фоторезисте поле характеризуется максимальными разрешением 80 нм ($\lambda/4,6$), глубиной решетки – $\lambda/2,6$ и усилением – 28.

Нанолитография на основе интерференции эванесцентных волн позволяет формировать двумерные дифракционные решетки большой площади (несколько см²), которые отличаются высоким оптическим качеством. При использовании многогранных призм возможно также формирование суперпозиций из нескольких повернутых решеток и также круговых решеток (при замене призмы на конус). Такие нанорешетки перспективны для применения в оптоэлектронике и наноплазмонике.

3. *Управление поляризацией световых пучков.* На основе нанопористого оксида алюминия разработано устройство управления поляризацией световых пучков с широким угловым спектром, которое функционирует как четвертьволновая или полуволновая пластинка [14]. При этом переход от одного режима к другому осуществляется путем варьирования ориентации нанопористой пленки, относительно направления падающего светового пучка.

Заключение. Получены композитные металл-диэлектрические (в том числе металл-полимерные) структуры, которые проявляют уникальное свойство – отрицательное преломление. Разработан ряд методик (в том числе основанных на поляризационной интерферометрии) и устройств для исследования оптических свойств МД наноструктур. Созданы плоские суперлинзы на основе металл-диэлектрической слоистой наноструктуры.

Список использованных источников

1. Cai, W. *Optical metamaterials: Fundamentals and Applications* / W. Cai, V. Shalaev. – New York: Springer-Verlag, 2010. – 201 p. doi.org/10.1007/978-1-4419-1151-3
2. Simulation of Negative Refraction Condition for Fishnet Structures Based on Self-Assembled Nanoparticles Templates / S. Kozik [et al.] // Proc. of the 9th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics Metamaterials. – Oxford, 2015. – P. 520–522.
3. Morphology and Optical Properties of Carboxylated Nitrocellulose Honeycomb Films Modified with Silver Nanoparticles / V. I. Kulikouskaya [et al.] // Proc. of the 9th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics Metamaterials. – Oxford, 2015. – P. 586–588.
4. Langmuir–Blodgett films of polystyrene-poly-2-vinylpyridine with silver nanoparticles / A. Salamianski [et al.] // Proc. of the 9th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics Metamaterials. – Oxford, 2015. – P. 574–576.
5. Composite thin film materials on the basis of silver nanostructures on polymer matrix by methods of chemical metallization and self-assembling / E. Skoptsov [et al.] // Applied Physics A. – 2014. – Vol. 117, N 2. – P. 713–718. doi.org/10.1007/s00339-014-8727-2
6. Hyperbolic metamaterials based on quantum-dot plasmon-resonator nanocomposites / S. V. Zhukovsky [et al.] // Optics Express. – 2014. – Vol. 22, N 15. – P. 18290–18298. doi.org/10.1364/oe.22.018290
7. Эффективная диэлектрическая проницаемость композитного материала на основе плазмонных наночастиц произвольной формы / С. Е. Козик [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2015. – Т. 82, № 3. – С. 400–405.
8. Investigation of surface roughness influence on hyperbolic metamaterial performance / S. Kozik [et al.] // Advanced Electromagnetics. – 2014. – Vol. 3, N 2. – P. 6–9. doi.org/10.7716/aem.v3i2.245
9. Features of hyperbolic metamaterials with extremal optical characteristics / S. N. Kurilkina [et al.] // J. Optics. – 2016. – Vol. 18, N 8. – P. 085102. doi.org/10.1088/2040-8978/18/8/085102
10. Kurilkina, S. N. Features of vortex Bessel plasmons generated in metal–dielectric layered structures / S. N. Kurilkina, V. N. Belyi, N. S. Kazak // J. Optics. – 2013. – Vol. 15, N 4. – P. 044017. doi.org/10.1088/2040-8978/15/4/044017
11. Far-field plane lens based on a multilayered metal-dielectric structure / V. Belyi [et al.] // Advanced Electromagnetics. – 2014. – Vol. 3, N 2. – P. 1–5. doi.org/10.7716/aem.v3i2.242
12. Особенности фокусировки света плоской линзой на основе структуры металл–диэлектрик / Н. С. Казак [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2016. – Т. 60, № 3. – С. 43–50.
13. Daghestani, H. N. Theory and Applications of Surface Plasmon Resonance, Resonant Mirror, Resonant Waveguide Grating, and Dual Polarization Interferometry Biosensors / H. N. Daghestani, B. W. Day // Sensors. – 2010. – Vol. 10, N 11. – P. 9630–9646.
14. Преобразование поляризации света с использованием нанопористых пленок оксида алюминия / В. А. Длугович [и др.] // Журн. приклад. спектроскопии. – 2015. – Т. 82, № 5. – С. 766–772.

References

1. Cai W., Shalaev V. *Optical metamaterials: Fundamentals and Applications*. New York, Springer-Verlag, 2010. 201 p. doi.org/10.1007/978-1-4419-1151-3
2. Kozik S., Ravaine S., Belyi V., Kazak N. Simulation of Negative Refraction Condition for Fishnet Structures Based on Self-Assembled Nanoparticles Templates. *Proceedings of the 9th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics Metamaterials*. Oxford, 2015, pp. 520–522.

3. Kulikouskaya V. I., Kurilkina S. N., Binhussein M. A., Agabekov V. E. Morphology and Optical Properties of Carboxylated Nitrocellulose Honeycomb Films Modified with Silver Nanoparticles. *Proceedings of the 9th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics Metamaterials*. Oxford, 2015, pp. 586–588.
4. Salamianski A., Skoptsov E., Agashkov A., Binhussein M. A., Agabekov V. Langmuir–Blodgett films of polystyrene-poly-2-vinylpyridine with silver nanoparticles. *Proceedings of the 9th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics Metamaterials*. Oxford, 2015, pp. 574–576.
5. Skoptsov E., Agabekov V., Binhussein M. A., Egorov D., Ropot P. Composite thin film materials on the basis of silver nanostructures on polymer matrix by methods of chemical metallization and self-assembling. *Applied Physics A*, 2014, vol. 117, no. 2, pp. 713–718. doi.org/10.1007/s00339-014-8727-2
6. Zhukovsky S. V., Ozel T., Mutlugun E., Gaponik N., Eychmüller A., Lavrinenko A. V., Demir H. V., Gaponenko S. V. Hyperbolic metamaterials based on quantum-dot plasmon-resonator nanocomposites. *Optics Express*, 2014, vol. 22, no. 15, pp. 18290–18298. doi.org/10.1364/oe.22.018290
7. Kozik S. E., Skoptsov E. A., Smirnov A. G., Binhussein M. A. Effective Dielectric Constant of Composite Materials Based on Plasmon Nanoparticles of Arbitrary Shape. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2015, vol. 82, no. 3, pp. 409–414. doi.org/10.1007/s10812-015-0121-0
8. Kozik S., Binhussein M., Smirnov A., Khilo N., Agabekov V. Investigation of surface roughness influence on hyperbolic metamaterial performance. *Advanced Electromagnetics*, 2014, vol. 3, no. 2, pp. 6–9. doi.org/10.7716/aem.v3i2.245
9. Kurilkina S. N., Binhussein M. A., Belyi V. N., Kazak N. S. Features of hyperbolic metamaterials with extremal optical characteristics. *Journal of Optics*, 2016, vol. 18, no. 8, pp. 085102. doi.org/10.1088/2040-8978/18/8/085102
10. Kurilkina S. N., Belyi V. N., Kazak N. S. Features of vortex Bessel plasmons generated in metal–dielectric layered structures. *Journal of Optics*, 2013, vol. 15, no. 4, pp. 044017. doi.org/10.1088/2040-8978/15/4/044017
11. Belyi V. N., Binhussein M., Khilo N. A., Kazak N. S. Far-field flat lens based on multilayered metal-dielectric structure. *Advanced Electromagnetics*, 2014, vol. 3, no. 2, pp. 1–5. doi.org/10.7716/aem.v3i2.242
12. Kazak N. S., Agashkov A. V., Khilo N. A., Varanetski A. M. Peculiarities of light focusing with a flat lens based on the metal–dielectric structure. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2016, vol. 60, no. 3, pp. 43–50 (in Russian).
13. Daghestani H. N., Day B. W. Theory and Applications of Surface Plasmon Resonance, Resonant Mirror, Resonant Waveguide Grating, and Dual Polarization Interferometry Biosensors. *Sensors*, 2010, vol. 10, no. 11, pp. 9630–9646. doi.org/10.3390/s101109630
14. Dlugunovich V. A., Zhumar A. Y., Kurilkina S. N., Mukhurov N. I. Transformation of light polarization using nanoporous alumina films. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2015, vol. 82, no. 5, pp. 824–830. doi.org/10.1007/s10812-015-0186-9

Информация об авторах

Белый Владимир Николаевич – член-корреспондент, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий центром. Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси (пр. Независимости, 68, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: v.belyi@dragon.bas-net.by.

Агабеков Владимир Енокович – академик, д-р хим. наук, профессор, директор. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: agabekov@ichnm.basnet.by.

Казак Николай Станиславович – академик, д-р физ.-мат. наук, и. о. директора. Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси (пр. Независимости, 68, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lod@dragon.bas-net.by.

Курилкина Светлана Николаевна – д-р физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт физики НАН Беларуси (пр. Независимости, 68, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: s.kurilkina@ifanbel.bas-net.by.

Соломянский Александр Ефимович – канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: solasy@mail.ru.

Куликовская Виктория Игоревна – канд. хим. наук, заведующая лабораторией. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kulikouskaya@gmail.com.

Information about the authors

Belyi Vladimir Nikolaevich – Corresponding Member, D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department. B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v.belyi@dragon.bas-net.by.

Agabekov Vladimir Enokovich – Academician, D. Sc. (Chemistry), Professor, Director. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skoryna Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: agabekov@ichnm.basnet.by.

Kazak Nikolai Stanislavovich – Academician, D. Sc. (Physics and Mathematics), Acting Director. B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lod@dragon.bas-net.by.

Kurilkina Svetlana Nikolaevna – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Chief researcher. B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: s.kurilkina@ifanbel.bas-net.by.

Salamianski Aliksandr Efimovich – Ph. D. (Chemistry), Senior researcher. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skoryna Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: solasy@mail.ru.

Kulikouskaya Viktoryia Igaraua – Ph. D. (Chemistry), Head of the Laboratory. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skoryna Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kulikouskaya@gmail.com.