Научная сессия Объединенного ученого совета по физическим наукам СО РАН, ИЯФ, 2022-12-21, 16:55

Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН (лаборатории фотоники молекулярных систем, молекулярной спектроскопии и теории нелинейных процессов) и организациясоисполнитель (Национальный университет Ян Мин Цзяодун, Тайвань)

> Удвоение разрешения при управлении пучком света с помощью метаповерхности на основе таммовского плазмон-поляритона

Р.Г. Бикбаев, П.С. Панкин, В.С. Сутормин, М.Н. Крахалев, С.Я. Ветров, Д.Н. Максимов, К.-П. Чэнь, И.В. Тимофеев



зав. лаб. фотоники молекулярных систем ИФ СО РАН д.ф.-м.н, в.н.с. Тимофеев И.В., <u>tiv@iph.krasn.ru</u>

Фотонные кристаллы





Брэгговское отражение Фотонная запрещенная зона Локализованные моды

- 1. Хиральные ТПП
- 2. Поляризационные ССК
- 3. Гибридные ЖК-управляемые ТПП

$$rot \ \vec{E} = -\frac{\partial \vec{H}}{\partial t},$$

$$rot \ \vec{H} = \hat{\varepsilon}(\vec{r}, \vec{E}, \omega) \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$



Ветров, Тимофеев, Шабанов, Локализованные моды в хиральных фотонных структурах // УФН 2020





уравнение Максвелла $\frac{\partial^2}{\partial z^2} E_y + k_0^2 \varepsilon(x) E_y = 0$

Кавокин 2005 Калитеевский 2007 Виноградов УФН 2010 Афиногенов 2013

Металл-диэлектрический нанокомпозит как отражатель



В качестве материалов чередующихся слоев использованы двуокись циркония (ZrO_2) и двуокись кремния (SiO_2) с диэлектрическими проницаемостями ε_a = 4,16 и ε_b = 2,10. Толщины слоев d_a = 50 нм и d_b = 74 нм.

Ветров, Бикбаев, Тимофеев, ЖЭТФ 2013

Перестраиваемый гибридный таммовский плазмон-поляритон



GLASS

EDOT:PSS PVA

Spectrometer

(a)

(b)

(C)

Generator

Monitor

200 nm

Pankin, Vetrov, Timofeev // JOSAB 2017; Pankin, Sutormin, Gunyakov, Zelenov, Tambasov, Masyugin, Volochaev, Baron, Chen, Zyryanov, Vetrov, Timofeev // APL 2021

Хиральное оптическое таммовское состояние



Figure 5. (a) Structure of the CLC combined with metasurfaces. (b) The maximum of the electric field near CLC–metasurface interface. (c) Distribution of normalized electric fields at the resonant and nonresonant wavelengths. Field distribution at the resonant wavelength in x-y plane is shown in the Supplementary Materials.



Figure 2. (**a**,**b**) Schematic of a unit cell of metasurface consisting of an Au-SiO₂-Au structure. The dashed axes of "u" and "v" define the longer and shorter axes of the nanobrick. The "x" axis defines the CLC director at the surface; it is oriented at $\chi = 45^{\circ}$. (**c**) The scanning electron microscopic image (the scale bar is 1.2 µm). The detailed images of the nanobricks are shown in the inset.

РФФИ-МНТ 19-52-52006, с Национальным университетом Чао-Тун, Тайвань Lin, Xu, Bikbaev, Yang, Li, Timofeev, Lee, Chen // Materials 2021



Низкопороговый микролазер на основе связанного состояния в континууме на метаповерхности с решеточным резонансом



Метаповерхность нано-параллелепипедов из нитрида кремния высотой 227 нм с периодом 300 нм, погруженная в диметилсульфоксид, допированный родамином 6G, с гибридным решеточным резонансом на основе квази-связанного состояния в континууме с длиной волны 605 нм (слева). Измеренная зависимость интенсивности и ширины линии фотолюминесценции от энергии импульса накачки, сплошная серая линия получена из решения скоростных уравнений, на вставках – поляризационная диаграмма и изображение в оптическом микроскопе (справа)

Yang J.-H., Huang Z.-T., Maksimov D.N., Pankin P.S., Timofeev I.V. ... Chen K.-P. // Laser & Photonics Reviews, 2021. T. 15. № 10. C. 2100118. (Impact Factor WoS – 13.138)

Фотодетектор на метаповерхности из германия



Figure 1. (a) Schematic of the Ge metasurface photodetector. A Ge metasurface is aligned to Au electrodes. (b) SEM image of the Ge metasurface from a top view.







Figure 6. Measured responsivity of the Ge NAs and the plane Ge film at different wavelengths. The dots are experimental data; the black and red solid lines are fitting curves.

Zhou Z.-X., Ye M.-J., Yu M.-W., Yang J.-H., Su K.-L., Yang C.-C., Lin C.-Y., Babicheva V.E., Timofeev I.V. and Chen K.-P. // ACS Nano, 2022, acsnano.1c11326. (IF WoS/SJR – 15.881/ 16.242, Q1)

Управлении пучком света с помощью метаповерхности на основе таммовского плазмон-поляритона



(a) Схематическое изображение исследуемой структуры. (b,c) Распределение носителей заряда и диэлектрической проницаемости по толщине пленки ITO в зависимости от прикладываемого напряжения

Bikbaev R.G., Maksimov D.N., Chen K.-P. and Timofeev I.V. Double-Resolved Beam Steering by Metagrating-Based Tamm Plasmon Polariton // Materials (Basel), 2022, V. 15, P. 6014. (IF WoS/SJR – 3.623/ 3.682, Q1)

Дискретное управлении пучком света



(a) Спектры отражения исследуемой структуры; (b) зависимость фазы отраженной волны от величины приложенного напряжения; (c) схематическое изображение перестраиваемой фазовой дифракционной решетки; (d) интенсивности дифракционных максимумов при различных значениях периода решетки.

Удвоение разрешения при управлении пучком света



(a) Три типа распределения фазы вдоль метаповерхности; (b) схематическое изображение структуры с произвольным распределением фазы вдоль поверхности; (c) интенсивности дифракционных максимумов.

Заключение

- Оптические таммовские состояния возникают на границе двух сред, обладающих брэгговским либо металлическим отражением, таких как фотонные кристаллы и метаповерхности. Продемонстрирована возможность беззеркального отклонения светового пучка с помощью метаповерхности, сопряженной с многослойным диэлектрическим зеркалом.
- Фазой отраженной световой волны можно управлять, изменяя приложенное к серебряной нанополосе напряжение, за счет изменения диэлектрической проницаемости тонкой подложки из прозрачного проводящего оксида либо жидкого кристалла. Изменение периода решетки приводит к значительному, до 30 градусов, изменению углов первого порядка дифракции, а несимметричное распределение фазы вдоль метаповерхности позволяет добиться удвоения разрешения устройства.



1. Zhou Z.-X., Ye M.-J., Yu M.-W., Yang J.-H., Su K.-L., Yang C.-C., Lin C.-Y., Babicheva V.E., Timofeev I.V. and Chen K.-P. Germanium Metasurfaces with Lattice Kerker Effect in Near-Infrared Photodetectors // ACS Nano, 2022, acsnano.1c11326. (IF WoS/SJR – 15.881/ 16.242, Q1)

2. Bikbaev R.G., Maksimov D.N., Chen K.-P. and Timofeev I.V. Double-Resolved Beam Steering by Metagrating-Based Tamm Plasmon Polariton // Materials (Basel), 2022, V. 15, P. 6014. (IF WoS/SJR – 3.623/ 3.682, Q1)

РНФ-МНТ № 22-42-08003, с Национальным университетом Ян-Мин Чао-Тун, Тайвань, «Метаповерхности на основе топологически устойчивых таммовских плазмонполяритонов для беззеркальных лидаров и интеллектуальных телекоммуникаций»

Отклонение светового луча метаповерхностью (Beam steering)





Park Junghyun 2021 Nature Nanotech - All-solid-state spatial light modulator for LIDAR

4Д-фотоника в пространстве и времени



Theoretical concept behind the frequencygradient metasurfaces. (A) Schematic of a phasegradient metasurface capable of redirecting an incident plane wave toward a new, fixed direction by tilting the optical phase-front. (B) Schematic of a frequency-gradient metasurface that naturally keeps reorienting the optical phase-front as time progresses, facilitating continuous dynamic beam steering. (C) Illustration of the lightmatter interaction between a frequency-comb source and a passive metasurface, in which the metasurface maps each spectral line of the frequency components into a spatial optical mode $[a_n \rightarrow b_n(r)]$, generating a spatiotemporal optical pattern b(r,t). (D) Light generated at different time instants by our designed frequency-gradient metasurface, consisting of 41 cylindrical sources (2N + 1 = 41; N = 20), a separation between sources d = 360 nm, a center wavelength of lo = 720 nm (wo = $2\Box \times 416.66$ THz), and Dw = $2p \times 2D$ 100 GHz.

A. M. Shaltout, K. G. Lagoudakis, J. van de Groep, S. J. Kim, J. Vučković, V. M. Shalaev, and M. L. Brongersma, "Spatiotemporal light control with frequency-gradient metasurfaces," Science 365, 374–377 (2019)