

Пространственное разделение скалярных световых пучков с орбитальным угловым моментом с помощью фазовой метаповерхности

А. Д. Гартман¹⁾, А. С. Устинов, А. С. Шорохов, А. А. Федянин

Физический факультет, МГУ им. М. В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия

Поступила в редакцию 26 августа 2021 г.

После переработки 10 сентября 2021 г.

Принята к публикации 10 сентября 2021 г.

Предложена концепция и оптимизирован дизайн поляризационно-независимой кремниевой метаповерхности на основе Ми-резонансных нанодисков для пространственного разделения скалярных световых пучков с различными значениями орбитального углового момента (ОУМ). Получены геометрические параметры структуры для излучения с длиной волны 810 нм и численно продемонстрировано смещение пучков с разными ОУМ относительно оси оптической системы.

DOI: 10.31857/S1234567821200015

Возрастающий интерес к квантовой фотонике в последние годы стал стимулом для стремительного развития этой области как со стороны фундаментальных исследований, так и со стороны прикладных задач [1]. Было предложено множество различных платформ и подходов, но наиболее практичными из них представляются те, что могут предложить высокий уровень интеграции и миниатюризации на микро- и наномасштабах в рамках фотонного чипа, а также совместимость с методами изготовления современной микроэлектроники [2]. Такие оптические устройства за счет своих уникальных свойств часто превосходят возможности объемных аналогов (среди которых можно отметить классические рефрактивные оптические элементы, такие как линзы, фазовые пластинки и пр.) по управлению неклассическим излучением [3, 4] и открывают широкие перспективы для масштабирования.

Отдельной областью квантовой фотоники, которая представляет особый интерес для задач криптографии и вычислений с неклассическим светом, является исследование электромагнитного излучения с орбитальным угловым моментом (ОУМ) [5] – составляющей частью углового момента светового луча (помимо спинового углового момента), зависящей от распределения поля в каждой точке пространства. В отличие от спинового углового момента, связанного с поляризацией фотона и принимающего значения $\pm\hbar$, ОУМ изменяется в диапазоне от $-\hbar$ до \hbar и предоставляет теоретически большее количество

возможных степеней свободы, что приводит к повышению размерности гильбертова пространства [6]. В свою очередь, было доказано, что повышение размерности не только способствует росту плотности кодирования оптической информации в одном канале [7], но и увеличивает секретность связи, делая ее более устойчивой к внешним воздействиям [8]. Примером излучения с орбитальным угловым моментом являются скалярные световые пучки Лагерра–Гаусса [9], за счет чего они представляют особый интерес для задач квантовой криптографии [10, 11]. Это связано в первую очередь с созданием надежных и защищенных широкополосных каналов связи для передачи и обработки информации [12]. Однако, несмотря на все преимущества работы со светом, обладающим таким большим числом степеней свободы, в настоящий момент существует не так много устройств, реализованных на компактной интегральной платформе.

В связи с этим, актуальным является поиск решений, позволяющих осуществлять управление светом с ОУМ, основанных на новых подходах и принципах. Одной из ключевых задач в этой области является реализация пространственного разделения скалярных световых пучков с различными значениями ОУМ [13, 14]. Этого можно достичь с помощью планарных оптических устройств – метаповерхностей, представляющих собой двумерные массивы резонансных наноструктур, специально спроектированные для создания сложного фазового профиля [15] для эффективной генерации и управления высоко-размерных запутанных квантовых состояний [16].

¹⁾e-mail: gartman@nanolab.phys.msu.ru

За последнее время было показано, что использование метаповерхностей на основе субволновых нанорезонаторов позволяет эффективно управлять как классическим [17–19], так и квантовым излучением [20, 21]. В частности, было продемонстрировано, что используя метаповерхность специального фазового профиля, состоящую из ячеек кремниевых наночастиц, можно проводить измерение и восстановление одно- и многофотонных состояний света, при этом обеспечивая надежную реконструкцию амплитуды, фазы, когерентности и запутанности состояний, закодированных с помощью поляризации исходного излучения [22].

В данной работе предложена идея пространственного разделения скалярных пучков с ОУМ на основе резонансных кремниевых метаповерхностей (КМП) с заданным фазовым профилем. Схематичное изображение принципа пространственного разделения излучения, прошедшего через КМП, представлено на рис. 1. Скалярный пучок с различными значениями

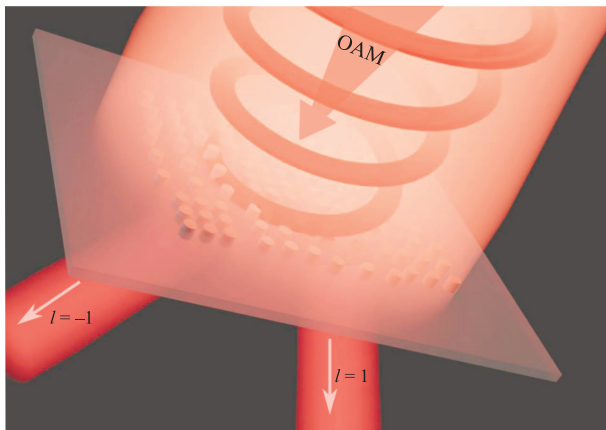


Рис. 1. (Цветной онлайн) Схематичное изображение принципа работы резонансной кремниевой метаповерхности для разделения скалярных пучков с разными значениями ОУМ (ОАМ – *orbital angular momentum*) в пространстве

ОУМ, проходя через КМП, посредством преобразования фазы разделяется в пространстве на две компоненты, соответствующие $l = -1$ и $l = 1$. Как было отмечено выше [23], использование таких оптических структур, как КМП для решения данной задачи обусловлено их компактным размером, простотой изготовления и совместимостью с современной технологией производства микроэлектронной промышленности [24]. В отличие от ранее представленных аналогов [14], предложенная в данной работе КМП со сложным поверхностным профилем также является поляризационно независимой.

Задача пространственного разделения излучения с различными значениями ОУМ имеет классическое решение [25], которое может быть описано аналитически при помощи выражений (1) и (2):

$$\phi_1(x, y) = \frac{2\pi a}{\lambda f} \left[y \arctan\left(\frac{y}{x}\right) - x \ln\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{b}\right) + x \right], \quad (1)$$

$$\phi_2(x, y) = -\frac{2\pi ab}{\lambda f} \exp\left(-\frac{U}{a}\right) \cos\left(\frac{V}{a}\right). \quad (2)$$

Данные уравнения являются следствием решения задачи отображения объекта из плоскости $(x; y)$ в плоскость $(u; v)$ для случая, соответствующего переходу от декартовых координат к логарифмическим полярным (log-pol) координатам: $u = -a \ln(\sqrt{x^2 + y^2}/b)$, $v = a \arctan(y/x)$, где $a = g/2\pi$ (g – поперечный размер преобразованного луча, a параметр b отвечает смещению сформированного изображения в направлении u). Первое преобразование (1) совершает конформное отображение координат $(x; y) \rightarrow (u; v)$, переводя пучок со спиральным фазовым профилем в поперечно вытянутый пучок с линейным градиентом фазы. После прохождения такого пучка через линзу излучение, отвечающее разным значениям ОУМ, будет сфокусировано в разные точки вдоль поперечного направления выходного экрана. Однако, возникающее в результате преобразования координат изменение длины оптического пути означает, что фильтр (1) вносит фазовое искажение в профиль излучения. Для его корректировки и коллимации светового пучка на выходе оптической системы необходимо использовать преобразование (2) (phase corrector). Стоит отметить необходимость совмещения центров падающего пучка и метаповерхности для осуществления корректного преобразования координат. Это нужно для последующего эффективного разделения излучения с разным значением ОУМ в пространстве. Таким образом, система изменения фазы электромагнитного излучения спирального профиля включает в себя два преобразования: первое для преобразования координат, а второе – для коррекции фазовых искажений [26].

Для того, чтобы осуществить разделение скалярных пучков по разным значениям ОУМ в пространстве с помощью КМП, необходимо обеспечить выполнение ряда условий, накладываемых на ее фазовый профиль [27]. Во-первых, необходимо реализовать такую геометрию фазовой маски КМП, чтобы на выбранной (рабочей) длине волны коэффициент пропускания был высоким (наиболее приближен-

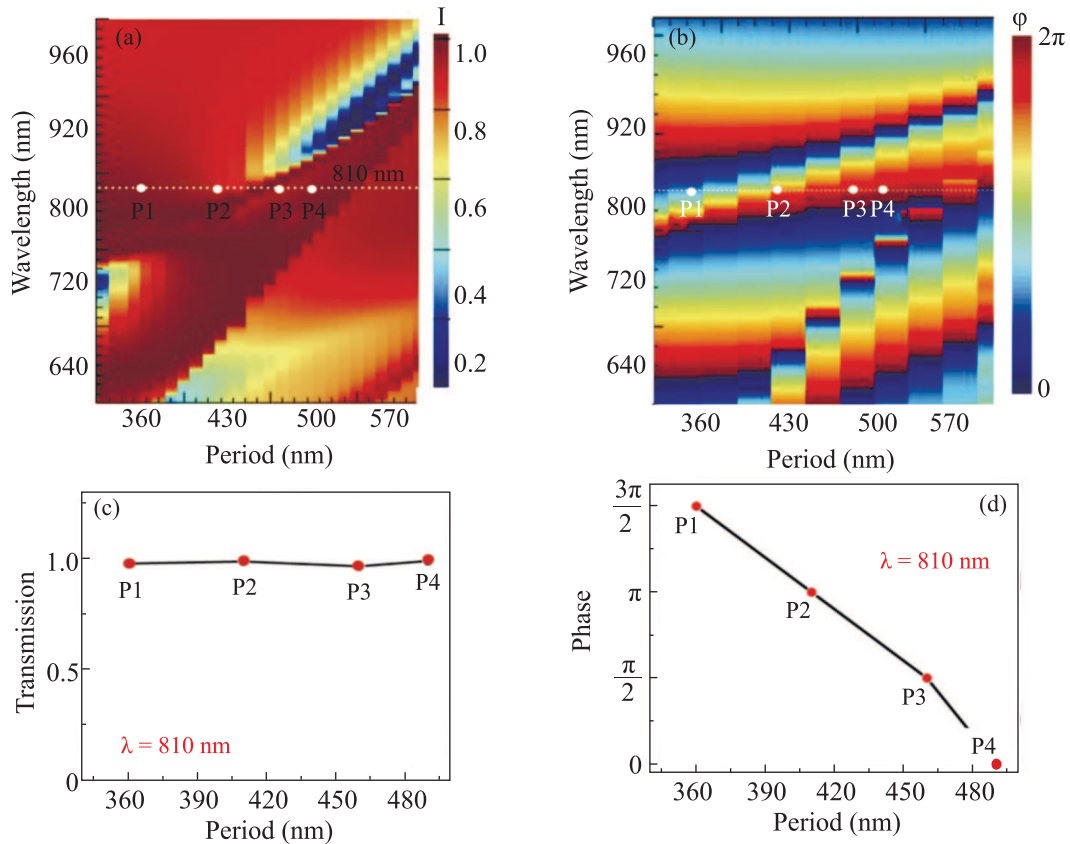


Рис. 2. (Цветной онлайн) (a), (b) – Графики зависимостей коэффициента пропускания и фазы прошедшей волны для ансамбля кремниевых нанодисков высотой $h = 130$ нм и диаметром $d = 210$ нм от длины волны падающего электромагнитного излучения и периода расположения нанорезонаторов; (c), (d) – графики зависимостей коэффициента пропускания и фазового профиля на выделенной длине волны $\lambda = 810$ нм для ансамбля кремниевых нанодисков высотой $h = 130$ нм и диаметром $d = 210$ нм в зависимости от периода их расположения

ным к 1) и не изменялся для всего диапазона вариаций геометрических параметров структуры. Вторых, необходимо обеспечить возможность изменения фазы прошедшего электромагнитного излучения в диапазоне от 0 до 2π радиан. Основываясь на данных требованиях, в программном пакете Lumerical FDTD методом конечных разностей по временной области было проведено численное моделирование зависимостей коэффициента пропускания (рис. 2a) и фазы прошедшей волны (рис. 2b) для кремниевых нанодисков высотой $h = 130$ нм и диаметром $d = 210$ нм. Данный выбор геометрических параметров обусловлен наличием перекрытия электрического и магнитного дипольных резонансов у кремниевых нанодисков в заданном спектральном диапазоне [28–30]. На выбранной длине волны 810 нм были подобраны четыре значения периода кремниевых нанодисков, для которых коэффициент пропускания принимает максимально близкое к единице значение (рис. 2c), а фаза прошедшей волны (рис. 2d) изменя-

ется в диапазоне от 0 до 2π . Выбор длины волны обусловлен тем, что во многих работах квантовое излучение с ОУМ реализуется на базе диодного лазера с длиной волны 405 нм и нелинейного кристалла, например КТР, настроенного в режиме коллинеарной генерации бифотонов [31].

Согласно преобразованию (1) была подобрана фазовая маска для КМП. На рисунке 3а представлена поверхность, заданная преобразованием (1) и отображающая изменение фазового профиля в диапазоне от 0 до 200π радиан. Расчетная область была задана в соответствии с реальными размерами структур и охватывала диапазон 200×200 мкм². Данная поверхность была разбита на равные области – квадраты размером 20×20 мкм², внутри которых было проведено усреднение значений фазы и нормировка по диапазону от 0 до 2π радиан. Каждой такой области было поставлено в соответствие определенное значение периода кремниевых нанодисков [32], полученное ранее и наилучшим образом описываю-

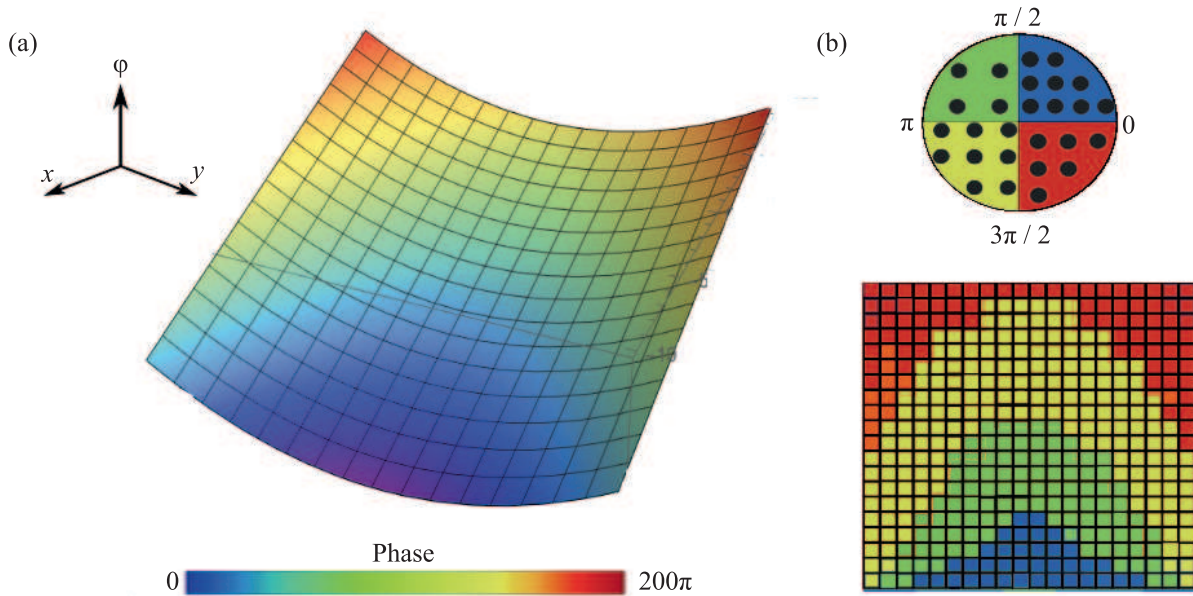


Рис. 3. (Цветной онлайн) (а) – Фазовая поверхность, заданная преобразованием (1) и отображающая изменение фазового профиля в диапазоне от 0 до 200π радиан; (б) – схематичное изображение фазовой маски для КМП, представляющее собой массив квадратов размером $20 \times 20 \text{ мкм}^2$, каждому из которых соответствует определенное значение фазы, отмеченное цветом: синим – значения в диапазоне от 0 до $\pi/2$; зеленым – от $\pi/2$ до π ; желтым – от π до $3\pi/2$; красным – от $3\pi/2$ до 2π

щее изменение фазы данного квадрата поверхности (рис. 3б).

Таким образом, был подобран оптимальный дизайн для КМП, представляющей собой резонансную двумерную структуру, разбитую на квадраты – области выделенной фазы. Каждый такой квадрат состоит из массивов кремниевых нанодисков высотой $h = 130 \text{ нм}$, диаметром $d = 210 \text{ нм}$ и характеризуется значением периода согласно табл. 1.

Таблица 1. Сводная таблица по сопоставлению диапазона изменения фазы и соответствующего ему периода между кремниевыми нанодисками внутри квадратов метаповерхности

$0 - \pi/2$	$\pi/2 - \pi$	$\pi - 3\pi/2$	$3\pi/2 - 2\pi$
360 нм	407 нм	460 нм	493 нм

Предложенная выше концепция резонансной метаповерхности не является единственно возможной, но в силу простоты изготовления данное решение предполагает легкость в экспериментальной реализации.

На рисунке 4а представлена оптическая схема для пространственного разделения скалярных пучков с ОУМ системой, состоящей из КМП, совершающей конформное преобразование координат, и фазокорректирующей поверхности, в роли которой может выступать пространственный модулятор света. Численное моделирование было проведено мето-

дом решения уравнений для дифракции Фраунгофера, реализованного в программном пакете Zemax OpticStudio в модуле физической оптики. Скалярный пучок с ОУМ (ОАМ – *orbital angular momentum*) попадает на кремниевую метаповерхность (*dielectric metasurface*), которая совершает преобразование координат. После на экране (*image plane*) наблюдается пространственное разделение падающего излучения на разные компоненты ОУМ. На рисунке 4б представлен фазовый профиль пучков на входе системы (*input beam*) и соответствующие им изображения в плоскости экрана (*image plane*). Были рассмотрены пучки с ОУМ $l = \pm 1$ и $l = \pm 3$. Стоит отметить, что выбранные значения ОУМ связаны лишь с соображениями наглядности представления результатов, аналогичные результаты могут быть получены и для других значений ОУМ. Наблюдается пространственное разделение скалярных пучков разных знаков относительно центральной оптической оси системы, причем каждое значение l точно локализовано в плоскости $X'Y'$ и смещено по координате Y' относительно нуля по разные стороны в зависимости от знака и модуля ОУМ. Так, например, пучки с положительными значениями ОУМ $l = 1; 3$ смещаются выше оси OX , а пучки с $l = -1; -3$, соответственно, ниже. Смещение равных по модулю компонент l одинаково, но различно по направлению.

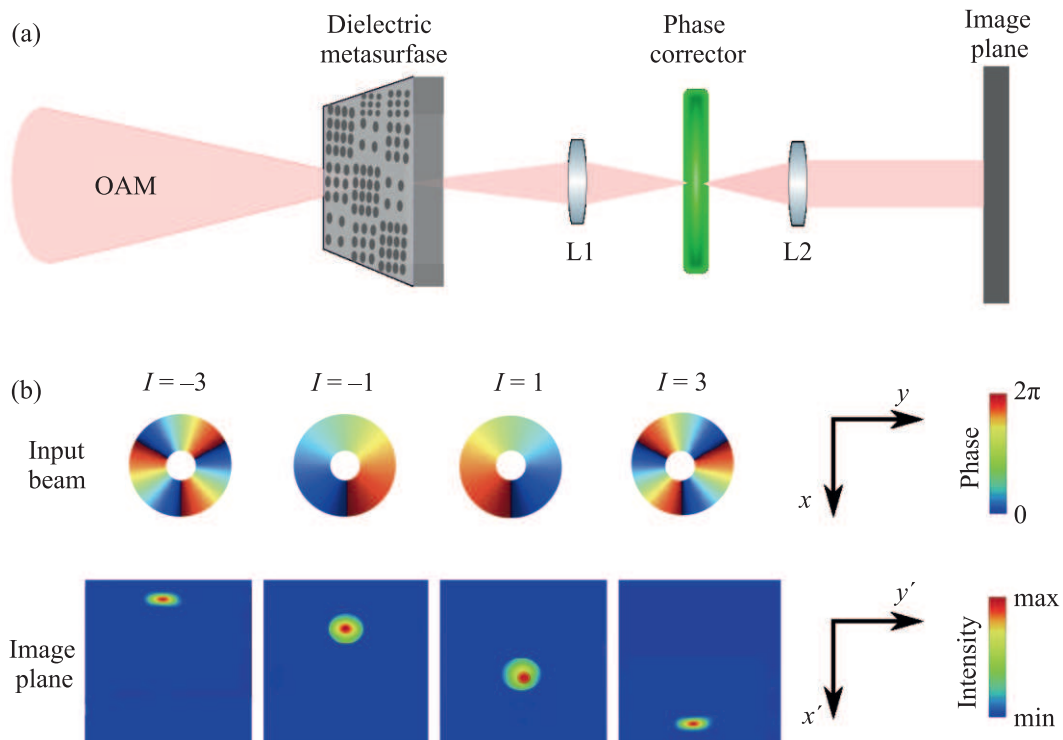


Рис. 4. (Цветной онлайн) (a) – Изображение оптической схемы для разделения скалярных пучков с ОУМ в пространстве; (b) – фазовый профиль пучков на входе системы (input beam) и соответствующие им изображения в плоскости экрана (image plane)

Таким образом, методами численного моделирования были исследованы планарные оптические структуры – резонансные метаповерхности, состоящие из массива кремниевых цилиндрических наночастиц, обеспечивающих высокое пропускание света и полный фазовый контроль. Показано, что использование КМП специально подобранного профиля позволяет эффективно разделять различные компоненты излучения с орбитальным угловым моментом в пространстве. Полученные результаты могут быть использованы в задачах квантовой криптографии для создания компактных устройств анализа неклассического света.

Авторы выражают благодарность С. С. Страупе за конструктивные комментарии и ценные замечания.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проектов # 19-32-90223 (моделирование и оптимизация отклика однородной метаповерхности) и # 20-02-00897 (численная демонстрация разделения пучков в пространстве). Часть исследований выполнена при поддержке Центра квантовых технологий МГУ.

1. S. Slussarenko and G. Pryde, *Appl. Phys. Rev.* **6**, 041303 (2019).
2. J. Wang, F. Sciarrino, A. Laing, and M. Thompson, *Nature Photon.* **14**, 273 (2020).
3. F. Peyskens, C. Chakraborty, M. Muneeb, D. Thourhout, and D. Englund, *Nat. Commun.* **10**, 4435 (2019).
4. A. D. Gartman, M. K. Kroychuk, A. S. Shorokhov, and A. A. Fedyanin, *JETP Lett.* **112**, 693 (2020).
5. L. Allen, M. Beijersbergen, R. Spreeuw, and J. Woerdman, *Phys. Rev.* **45**, 8185 (1992).
6. D. Andrews and M. Babiker, *The Angular Momentum of Light*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK (2012).
7. M. Mirhosseini, O. Magana-Loaiza, M. O’Sullivan, B. Rodenburg, M. Malik, M. Lavery, M. Padgett, D. Gauthier, and R. Boyd, *New J. Phys.* **17**, 033033 (2015).
8. J. O’Brien, A. Furusawa, and J. Vuckovic, *Nature Photon.* **10**, 687 (2009).
9. R. Devlin, A. Ambrosio, N. Rubin, J. Mueller, and F. Capasso, *Science* **17**, 896 (2017).
10. J. Wang, *Photonics Res.* **4**, 251 (2016).

11. K. A. Balygin, V. I. Zaitsev, A. N. Klimov, A. I. Klimov, S. P. Kulik, and S. N. Molotkov, *JETP Lett.* **105**, 606 (2017).
12. X. Wang, Z. Nie, Y. Liang, J. Wang, T. Li, and B. Jia, *Nanophotonics* **7**, 1533 (2018).
13. M. Mirhosseini, M. Malik, Z. Shi, and R. Boyd, *Nat. Commun.* **4**, 2781 (2013).
14. G. Ruffato, P. Capaldo, M. Massari, E. Mafakheri, and F. Romanato, *Opt. Express* **27**, 15750 (2019).
15. S. Pachava, R. Dharmavarapu, A. Vijayakumar, S. Jayakumar, A. Manthalkar, A. Dixit, N. Viswanathan, B. Srinivasan, and S. Bhattacharya, *Opt. Eng.* **4**, 041205 (2019).
16. F. Yue, D. Wen, C. Zhang, B. Gerardot, W. Wang, S. Zhang, and X. Chen, *Adv. Mater.* **29**, 1603838 (2017).
17. A. Kuznetsov, A. Miroshnichenko, M. Brongersma, Y. Kivshar, and B. Lukyanchuk, *Science* **354**, 6314 (2016).
18. N. Yu and F. Capasso, *Nat. Mater.* **13**, 139 (2014).
19. S. Kruk, B. Hopkins, I. Kravchenko, A. Miroshnichenko, D. Neshev, and Y. Kivshar, *APL Photonics* **1**, 030801 (2016).
20. T. Stav, A. Faerman, E. Maguid, D. Oren, V. Kleiner, E. Hasman, and M. Segev, *Science* **361**, 1101 (2018).
21. A. S. Solntsev, G. S. Agarwal, and Y. S. Kivshar, *Nature Photon.* **15**, 327 (2021).
22. K. Wang, G. Titchener, S. Kruk, L. Xu, H. Chung, M. Parry, I. Kravchenko, Y. Chen, A. Solntsev, Y. Kivshar, D. Neshev, and A. Sukhorukov, *Science* **12**, 1104 (2018).
23. H. Hsiao, C. Chu, and D. Tsai, *Small Methods* **1**, 1600064 (2017).
24. E. Maguid, I. Yulevich, M. Yannai, V. Kleiner, M. Brongersma, and E. Hasman, *Light Sci. Appl.* **6**, 31031 (2017).
25. O. Bryngdahl, *J. Opt. Soc. Am.* **64**, 1092 (1974).
26. G. Berkhout, M. Lavery, J. Courtial, M. Beijersbergen, and M. Padgett, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 153601 (2010).
27. K. Chong, I. Staude, A. James, J. Dominguez, S. Liu, S. Campione, G. Subramania, T. Luk, M. Decker, D. Neshev, I. Brener, and Y. Kivshar, *Nano Lett.* **5**, 5369 (2015).
28. E. V. Melik-Gaykazyan, K. L. Koshelev, J. H. Choi, S. S. Kruk, A. A. Fedyanin, and Y. S. Kivshar, *JETP Lett.* **109**, 131 (2019).
29. M. K. Kroychuk, D. F. Yagudin, A. S. Shorokhov, D. A. Smirnova, I. I. Volkovskaya, M. R. Shcherbakov, G. Shvets, Y. S. Kivshar, and A. A. Fedyanin, *Adv. Opt. Mater.* **7**, 1900447 (2019).
30. M. K. Kroychuk, A. S. Shorokhov, D. F. Yagudin, D. A. Shilkin, and A. A. Fedyanin, *Nano Lett.* **20**, 3471 (2020).
31. E. Kovlakov, S. Straupe, and S. Kulik, *Phys. Rev. A* **98**, 060301 (2018).
32. K. Chong, L. Wang, I. Staude, A. James, J. Dominguez, S. Liu, G. Subramania, M. Decker, D. Neshev, I. Brener, and Y. Kivshar, *ACS Photonics* **3**, 514 (2016).