

Металинза для формирования продольно поляризованной фотонной иглы

С.Н. Хонина^{1,2}, С.А. Дегтярев^{1,2}, Д.А. Савельев^{1,2}

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

²Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

Аннотация. В работе предложена металинза на основе субволнового рельефа для формирования продольно поляризованной фотонной иглы. Элемент представляет собой комбинированное устройство, объединяющее в себе две функции: преобразование поляризации и преобразование фазы пучка. Устройство преобразует падающий линейно поляризованный пучок в пучок с радиальной поляризацией. Одновременно падающему пучку придается фаза аксикона. Проведено численное моделирование работы предложенной металинзы с помощью программного пакета Comsol. Моделирование подтвердило эффективность формирования светового распределения с формой, вытянутой вдоль оптической оси и с продольной поляризацией.

1. Введение

Класс оптических метаматериалов субволновой толщины, обладающий возможностями управлять светом называется метаповерхности [1-3]. Их преимущество заключается в меньших размерах, меньшем поглощении, более простом способе изготовления по сравнению с 3D метаматериалами [4]. В работе [3] приведен обзор электромагнитных эффектов, наблюдаемых с использованием диэлектрических метаматериалов: нанорезонаторов с высоким показателем преломления, метаповерхностей, метаматериалов с нулевым индексом и анизотропных метаматериалов. В работе [5] было показано управление излучением в инфракрасном спектре за счет использования чрезвычайно тонкого плазмонического слоя ($\sim \lambda/50$). Сформированные в работе [6] линзы с числовой апертурой $\sim 0,75$ показали эффективность передачи 90% и эффективность фокусировки 40%.

Метаповерхности можно рассматривать как оптические приборы. В частности, в работе [7] рассматривается фокусирующая мета-линза с эффективностью около 90% выступающая аналогом плоской линзы. В работе [8] демонстрируется применение прямоугольных нанотверстий в золотой пленке толщиной 250 нм для управления фазой излучения. В [9] исследуются двумерные линзы, фокусирующие излучение с двумя разными длинами волн. Рассматриваются два кремниевых цилиндра с разным диаметром, обладающими резонансом на длине волны 1550 нм. и 915 нм., соответственно. Эффективность для волны 1550 нм составила 65%.

Метаповерхности с металлическими метачастицами или отверстиями могут использоваться в качестве сенсоров [10-12]. Стоит отметить, что нелинейные свойства метаповерхностей

способствуют увеличению чувствительности сенсоров, сравнение нелинейной схемы детектирования и линейной схемы показано в работе [12].

Также одной из сфер применения метаповерхностей является их использование для определения поляризации излучения [13, 14], где была приведена концепция детектора поляризации как метаповерхности, состоящей из супер ячеек трех типов. В работе [15] была показана возможность использования метаповерхности в качестве преобразователя поляризации излучения: из волны с линейной поляризацией была сформирована волна с круговой поляризацией.

В качестве применений метаповерхностей стоит также упомянуть их использование в качестве оптических диодов [16], голограмм [17,18], для аналоговых вычислений [19]. В работе [20] исследуется использование метаповерхности для генерации оптического вихря для увеличения пропускной способности оптических систем связи. В работе [21] был разработан 2D-поверхностный волноводный соединитель. Рассчитанная эффективность связи в плоском волноводе составляла $\sim 98\%$.

В данной статье предлагается применить металлинзу на основе субволнового рельефа для формирования фотонной иглы с продольной поляризацией. Как правило, для этого фокусируют радиально поляризованный пучок с помощью аксикона [22].

2. Металлинза для формирования продольной компоненты электрического поля

В данной работе предлагается комбинированный элемент для формирования продольно поляризованного вытянутого светового распределения, которое называется в литературе фотонной иглой. Предлагаемый элемент представляет собой существенно субволновой рельеф, комбинирующий в себе поляризационное и фазовое преобразование. Элемент преобразует падающий линейно поляризованный пучок в радиально поляризованный, также элемент придает выходному пучку фазу аксикона, вследствие чего пучок фокусируется.

Бинарная фазировка производится путем расположения в соседних кольцах аксикона субволновых решеток с перпендикулярными штрихами [23]. Числовая апертура выбрана 0.99 (очень близкой к 1, как это было сделано в [22]). Субволновой рельеф предлагается выполнить из кремния, показатель преломления которого равен $4,206 + 0,42174j$ для длины волны 633 нм.

Для численного моделирования дифракции рассматриваемого лазерного излучения используется метод конечных элементов, реализованный в программном пакете Comsol.

На рисунке 1 показаны амплитудное кольцевое распределение входного линейно поляризованного пучка (рисунок 1а), сам элемент (рисунок 1б), распределения амплитуды продольной компоненты электрического поля в продольном и поперечном сечениях (рисунок 1в, г) и графики продольной компоненты в фокальном сечении. Фокальным сечением в данной статье мы называем поперечное сечение расчетной области, в которой наблюдается максимум амплитуды электрического вектора на оптической оси. В проведенном моделировании фокальное сечение расположено на расстоянии $1,12\lambda$ от поверхности металлинзы.

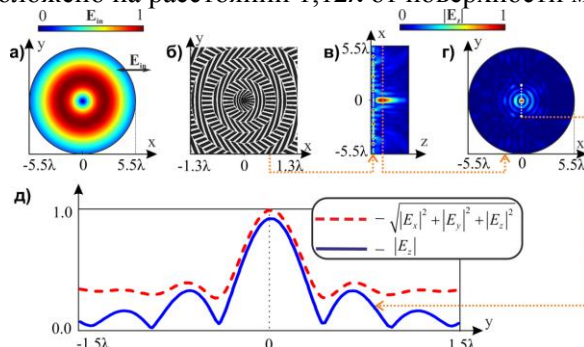


Рисунок 1. Формирование продольно поляризованной фотонной иглы с помощью предложенной металлинзы: (а) входное распределение, (б) вид металлинзы, (в) распределение амплитуды электрического поля в продольном сечении, (г) распределение амплитуды в фокальном сечении, (д) график полной амплитуды (красный пунктир) и продольной компоненты (синий) в фокальном сечении.

Как можно видеть из рисунка 1, моделирование показало, что предложенная металлинза может эффективно формировать продольно поляризованную фотонную иглу. Толщина иглы по полуспаду – $0,51\lambda$, длина – $2,37\lambda$. Фотонная игла формируется сразу после аксикона. Есть основания [22] предположить, что увеличив входную апертуру аксикона, можно увеличить длину иглы.

3. Заключение

В данной работе предложен комбинированный элемент для формирования продольно поляризованного вытянутого светового распределения или фотонной иглы. Моделирование методом конечных элементов показало эффективность работы предложенного элемента.

4. Литература

- [1] Kildishev, A.V. Planar photonics with metasurfaces / A.V. Kildishev, A. Boltasseva, V.M. Shalaev // *Science*. – 2013. – Vol. 339. – P. 1232009.
- [2] Remnev, M.A. Metasurfaces: a new look at Maxwell's equations and new ways to control light. / M.A. Remnev, V.V. Klimov // *Physics-Uspekhi*. – 2018. – Vol. 61(2). – P. 157.
- [3] Jahani, S. All-dielectric metamaterials / S. Jahani, Z. Jacob // *Nature Nanotechnology*. – 2016. – Vol. 11(1). – P. 23-36.
- [4] Yu, Y.F. High-transmission dielectric metasurface with 2π phase control at visible wavelengths / Y.F. Yu, A.Y. Zhu, R. Paniagua-Domínguez, Y.H. Fu, B. Luk'yanchuk, A.I. Kuznetsov // *Laser & Photonics Reviews*. – 2015. – Vol. 9(4). – P. 412-418.
- [5] Ni, X. Broadband light bending with plasmonic nanoantennas / X. Ni, N. K. Emani, A.V. Kildishev, A. Boltasseva, V.M. Shalaev // *Science*. – 2012. – Vol. 335(6067). – P. 427-427.
- [6] Zhan, A. Low-contrast dielectric metasurface optics / A. Zhan, S. Zhan, R. Trivedi, T.K. Fryett, C.M. Dodson, A. Majumdar // *ACS Photonics*. – 2016. – Vol. 3(2). – P. 209-214.
- [7] Lin, B.C. Transmissive focusing meta-surface with nearly 100% efficiency / B.C. Lin, G.M. Wang, T. Cai // *Applied Physics A*. – 2017. – Vol. 123(10). – P. 630.
- [8] Almeida, E. Subwavelength nonlinear phase control and anomalous phase matching in plasmonic metasurfaces / E. Almeida, G. Shalem, Y. Prior // *Nature Communications*. – 2016. – Vol. 7. – P. 10367.
- [9] Arbabi, E. Multiwavelength polarization-insensitive lenses based on dielectric metasurfaces with meta-molecules / E. Arbabi, A. Arbabi, S.M. Kamali, Y. Horie, A. Faraon // *Optica*. – 2016. – Vol. 3(6). – P. 628-633.
- [10] Lee, K.L. Ultrasensitive biosensors using enhanced Fano resonances in capped gold nanoslit arrays / K.L. Lee, J.B. Huang, J.W. Chang, S.H. Wu, P.K. Wei // *Scientific Reports*. – 2015. – Vol. 5. – P. 8547.
- [11] Klimov, V.V. Fano resonances in a photonic crystal covered with a perforated gold film and its application to bio-sensing / V.V. Klimov, A.A. Pavlov, I.V. Treshin, I.V. Zabkov // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2017. – Vol. 50(28). – P. 285101.
- [12] Mesch, M. Nonlinear plasmonic sensing / M. Mesch, B. Metzger, M. Hentschel, H. Giessen // *Nano Letters*. – 2016. – Vol. 16(5). – P. 3155-3159.
- [13] Pors, A. Plasmonic metagratings for simultaneous determination of Stokes parameters / A. Pors, M.G. Nielsen, S.I. Bozhevolnyi // *Optica*. – 2015. – Vol. 2(8). – P. 716-723.
- [14] Wen, D. Metasurface for characterization of the polarization state of light / D. Wen, F. Yue, S. Kumar, Y. Ma, M. Chen, X. Ren, P.E. Kremer, B.D. Gerardot, M.R. Taghizadeh, G.S. Buller, X. Chen // *Optics Express*. – 2015. – Vol. 23(8). – P. 10272-10281.
- [15] Yu, N. A broadband, background-free quarter-wave plate based on plasmonic metasurfaces / N. Yu, F. Aieta, P. Genevet, M.A. Kats, Z. Gaburro, F. Capasso // *Nano Letters*. – 2012. – Vol. 12(12). – P. 6328-6333.
- [16] Treshin, I.V. Optical Tamm state and extraordinary light transmission through a nanoaperture / I.V. Treshin, V.V. Klimov, P.N. Melentiev, V.I. Balykin // *Physical Review A*. – 2013. – Vol. 88(2). – P. 023832.

- [17] Wen, D. Helicity multiplexed broadband metasurface holograms / D. Wen, F. Yue, G. Li, G. Zheng, K. Chan, S. Chen, M. Chen, K.F. Li, P.W.H. Wong, K.W. Cheah, E.Y.B. Pun, S. Zhang, X. Chen // *Nature Communications*. – 2015. – Vol. 6. – P. 8241
- [18] Wang, Q. Broadband metasurface holograms: toward complete phase and amplitude engineering / Q. Wang, X. Zhang, Y. Xu, J. Gu, Y. Li, Z. Tian, R. Singh, S. Zhang, J. Han, W. Zhang // *Scientific Reports*. – 2016. – Vol. 6. – P. 32867.
- [19] Silva, A. Performing mathematical operations with metamaterials / A. Silva, F. Monticone, G. Castaldi, V. Galdi, A. Alù, N. Engheta // *Science*. – 2014. – Vol. 343(6167). – P. 160-163.
- [20] Ma, X. A planar chiral meta-surface for optical vortex generation and focusing / X. Ma, M. Pu, X. Li, C. Huang, Y. Wang, W. Pan, B. Zhao, J. Cui, C. Wang, Z. Zhao, X. Luo // *Scientific Reports*. – 2015. – Vol. 5. – P. 10365.
- [21] Bilal, A. Towards High Coupling Efficiency Integrated 2D Meta-surface Waveguide Coupler for Mid-IR Wavelengths / A. Bilal, U. Younis, K.W. Ang // *Nonlinear Photonics*. – 2018. – P. JTu5A.4.
- [22] Khonina, S.N. Analysis of the formation of a longitudinally polarized optical needle by a lens and axicon under tightly focused conditions / S.N. Khonina, S.A. Degtyarev // *Journal of Optical Technology*. – Vol. 83(4). – P. 197-205.
- [23] Котляр, В.В. Формирование и фокусировка векторного оптического вихря с помощью металлинзы / В.В. Котляр, А.Г. Налимов // *Компьютерная оптика*. – 2017. – Т. 41, № 5. – С. 645-654. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-5-645-654.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 18-37-00056, 18-29-20045-мк, 16-29-11698-офи_м, 18-07-00514, 16-29-09528), государственному заданию 3.3025.2017/4.6 и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение №007-ГЗ/Ч3363/26).

Metalens for creation of the longitudinally polarized photonic needle

S.N. Khonina^{1,2}, D.A. Savelyev^{1,2}, S.A. Degtyarev^{1,2}

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

²Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

Abstract. In this work we propose a metalens based on subwavelength relief that is intended to create the longitudinally polarized photonic needle. The element combines two functions: polarization and phase transformation of incident beam. The element transforms the incident linearly polarized beam into radially polarized beam. Simultaneously, the incident field is provided with axicon phase. The numerical simulation is provided with Comsol software. The simulation verifies the efficient creation of longitudinally polarized photonics needle.