

Металинза для острой фокусировки оптического вихря с круговой поляризацией при освещении светом с линейной поляризацией

А.Г. Налимов^{1,2}, В.В. Котляр^{1,2}

¹ ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151,

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34

Аннотация

Рассчитана трёхуровневая спиральная металинза в плёнке аморфного кремния, рельеф которой состоит из двух субволновых решёток с периодом 220 нм (для длины волны 633 нм) и глубиной 90 нм и 170 нм, которая при освещении светом с линейной поляризацией формирует оптический вихрь с топологическим зарядом 2 и левой круговой поляризацией. Распределение интенсивности в фокусе на расстоянии 633 нм от поверхности металинзы имеет вид круглого субволнового кольца, а продольная проекция вектора Пойнтинга на оптической оси отрицательная (обратный поток энергии). Две субволновые решётки с разной глубиной работают как четвертьволновые пластинки и преобразуют линейную поляризацию в круговую, но с задержкой по фазе на половину длины волны. Такая металинза выполняет функции трёх оптических элементов: четвертьволновой пластинки, спиральной фазовой пластинки и дифракционной микролинзы с высокой числовой апертурой (близкой к единице).

Ключевые слова: оптический вихрь, поляризация, четвертьволновая пластинка, обратный поток, металинза.

Цитирование: Налимов, А.Г. Металинза для острой фокусировки оптического вихря с круговой поляризацией при освещении светом с линейной поляризацией / А.Г. Налимов, В.В. Котляр // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 4. – С. 528-534. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-4-528-534.

Введение

Хорошо известно, что четвертьволновая пластинка из двулучепреломляющего кристалла преобразует линейную поляризацию в круговую. Идея реализовать четвертьволновую пластинку в виде субволновой дифракционной решётки получила своё развитие в начале 2000-х. Впервые поворот поляризации света с помощью субволновой решётки – аналога четвертьволновой пластинки, был экспериментально продемонстрирован в работах [1, 2], где осуществлялось преобразование света круговой поляризации с длиной волны 10,6 мкм в азимутально-поляризованный пучок. Но в этих работах пространственно-вариантная решётка работала в обратном направлении: локально круговую поляризацию преобразовывала в линейную с разным углом направления вектора поляризации. В работе [3] концентрическая металлическая решётка используется для преобразования лазерного излучения с длиной волны 633 нм круговой поляризации в радиально-поляризованный свет. Для её изготовления на поверхность плавленого кварца ($n=1,457$) наносился сначала слой алюминия толщиной 200 нм, а затем слой SiO_2 толщиной 40 нм. Показатель преломления алюминия, измеренный с помощью эллипсометра, оказался равным $n=1,9907+8,518i$ (т.е. отличным от справочного значения $n=1,373+7,618i$). Решётка из концентрических колец (аксикон) с периодом 200 нм и фактором заполнения 0,4 записывалась с помощью электронно-лучевой литографии на слой резиста, а затем переносилась на слой SiO_2 с помощью реактивного ионного травления в среде фтора, на слой алюминия – с помощью реак-

тивного ионного травления в хлоре. Однако полученный пучок в [3] нельзя назвать в строгом смысле радиально поляризованным – у такого пучка значения фазы в точках диаметрально противоположных совпадают, в то время как у «настоящего» радиально поляризованного пучка колебания напряжённости электрического поля в этих точках происходят в противофазе. Для исправления ситуации в [4, 5] был предложен элемент, представляющий собой соединение концентрической металлической решётки с периодом 200 нм, подобной [4], с «вилочковой» голограммой с периодом 1,2 мкм. Элемент был изготовлен в плёнке золота толщиной 150 нм на стеклянной подложке, а его работа была проверена на длинах волн 633 нм и 850 нм. Технология, допускающая промышленное производство четвертьволновых пластинок на основе субволновых решёток, описана в работе [6] – решётки с периодом 360 нм и аспектным соотношением 5,2 для преобразования света с длиной волны 633 нм изготавливались с помощью UV-moulding процесса. В работе [7] рассмотрены субволновые решётки в плёнке золота толщиной 150 нм, преобразующие линейно поляризованный свет в свет с круговой поляризацией для длин волн 488, 532 и 632,8 нм. Такая решётка может быть востребована в создании 3D-дисплеев [8].

Четвертьволновые субволновые решётки имеют преимущество перед полуволновыми субволновыми решётками [9, 10], так как имеют глубину субволнового рельефа в два раза меньшую, что предпочтительнее (при одинаковом периоде решёток) для их изготовления. В [9] впервые была экспериментально

продемонстрирована работа субволновой решётки – аналога полуволновой пластинки. Фактически было рассмотрено три решётки-поляризатора, отличающиеся дизайном. Все поляризаторы были изготовлены в GaAs и предназначались для длины волны 10,6 мкм (длина волны излучения CO₂-лазера). Отметим ещё, что в работе [9] период изготовленной решётки не был постоянным, а изменялся от $d_{\min}=2$ мкм до $d_{\max}=3,05$ мкм. В работе [10] была рассмотрена субволновая решётка, также являющаяся аналогом полуволновой пластинки, но уже для ближнего ИК-диапазона. Такая решётка преобразовывала свет линейной поляризации с длиной волны 1064 нм в радиально поляризованный пучок. Шаблон решётки был записан с помощью электронно-лучевой литографии в резисте ZEP 520A, после чего был перенесён на подложку GaAs (показатель преломления $n=3,478$) с помощью ионного травления.

Металинза, совмещающая полуволновую пластинку и бинарную зонную пластинку, описана в [11]. В [12] описана металинза, совмещающая полуволновую пластинку и спиральную бинарную зонную пластинку. А для аналогичной металинзы, совмещающей четвертьволновую пластинку и бинарную зонную пластинку, возникает проблема. Так как в соседних зонах фокусирующей бинарной пластинки задержка по фазе должна быть равна π , то требуется в соседних зонах разместить разные четвертьволновые пластинки-решётки, чтобы обе преобразовывали линейную поляризацию в круговую, но со взаимной задержкой по фазе на π . Это можно сделать, если у решёток будет разная глубина канавок. Таким образом, получается не бинарная металинза, а трёхуровневая. Это недостаток металинзы, но её достоинство в том, что в одном оптическом элементе совмещены три элемента: четвертьволновая пластинка, спиральная фазовая пластинка и фокусирующая дифракционная линза. Ранее авторы уже рассчитывали аналогичную металинзу для формирования в фокусе обратного потока энергии [13], которая требовала освещения светом с круговой поляризацией. Но для этого нужна четвертьволновая пластинка. Металинза, описанная в данной работе, сама работает как четвертьволновая пластинка, то есть не требует падения на неё света с круговой поляризацией. Таким образом, целью данной работы являлась разработка металинзы, которая при освещении её светом с линейной поляризацией формирует на выходе оптический вихрь с топологическим зарядом 2 и круговой поляризацией (левой или правой). Оптический вихрь с левой или правой круговой поляризацией обладает орбитальным угловым моментом, и поток энергии такого пучка распространяется по спирали вокруг оптической оси [14].

1. Преобразование линейной поляризации в круговую с помощью субволновой решётки

Рассмотрим вначале преобразование света с линейной поляризацией в круговую. На рис. 1 показана схема рассматриваемой задачи.

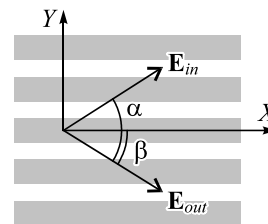


Рис. 1. Схема преобразования поляризации с помощью бинарной субволновой решётки

Плоская волна с линейной поляризацией E_{in} падает нормально на субволновую дифракционную решётку, расположенную вдоль оси X . Угол наклона электрического вектора падающего поля к линиям решётки α . Высота субволновой решётки h , период $T=0,22$ мкм, ширина ступеньки равна ширине канавки ($T/2$). Показатель преломления решёток $n=4,35+0,486i$ (аморфный кремний), $\lambda=633$ нм, показатель преломления подложки $n=1,5$. Такой субволновый рельеф преобразует поляризацию падающего света за счёт разного показателя преломления, для проекций волны, падающей вдоль и поперёк линий решётки. Более подробно это описано в [15]. Моделирование проводилось FDTD-методом с помощью программы FullWAVE (RSoft), сетка при моделировании по всем трём координатам была равна $\lambda/30$, размер решёток – 8×8 мкм, монитор – 4×4 мкм отстоит от решёток на 0,6 мкм. В общем случае вектор E_{out} прошедшего через решётку поля во времени описывает эллипс с диаметрами D_{\max} и D_{\min} . В частном случае поляризация на выходе будет строго круговой, когда $D_{\max}=D_{\min}$.

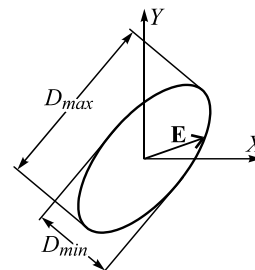


Рис. 2. Электрический вектор волны, прошедший через субволновую решётку на рис. 1

Для оценки степени эллиптичности поляризации введём параметр $J=D_{\min}/D_{\max}$. Соответственно, при $J=0$ поляризация строго линейная, при $J=1$ поляризация является круговой, при остальных средних значениях – эллиптическая. На рис. 3 показан график зависимости степени эллиптичности поляризации J от высоты микрорельефа при угле падения $\alpha=40^\circ$ с шагом высоты 10 нм.

Из рис. 3 видно, что для угла наклона решёток $\alpha=40^\circ$ поляризация становится максимально приближена к круговой при $h=0,09$ мкм. При этой высоте $J=0,948$. Следующей величиной высоты рельефа, при которой поляризация приближается к круговой со значением $J=0,64$, является высота $h=0,17$ мкм. Фаза компоненты E_x отличается между высотами $h=0,17$ мкм и $h=0,09$ мкм на величину $0,991\lambda$. Данное

значение получено при моделировании расположения монитора, отстоящего от высоты края рельефа на 0,6 мкм, то есть координата монитора $Z_{мон} = h + 0,6$ мкм. Разница в фазе компоненты E_y при тех же высотах $h = 0,09$ мкм и $h = 0,17$ мкм составляет $-0,053\lambda$, то есть с данным изменением высоты рельефа поляризация не только приобретает эллиптичность, но и меняет свое вращение с правой на левую.

Теоретически угол выходного вектора должен быть повернут на $\alpha = 45^\circ$ для того, чтобы можно было создать круговую поляризацию при определённой высоте h , для чего α так же должно быть равно 45° . При выбранном периоде решётки с помощью моделирования можно уточнить значение α .

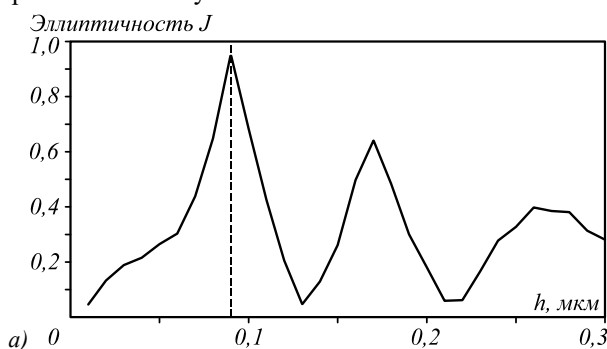


Рис. 3. Зависимость эллиптичности поляризации (а) и фазы компонент E_x и E_y (б) от высоты микрорельефа h

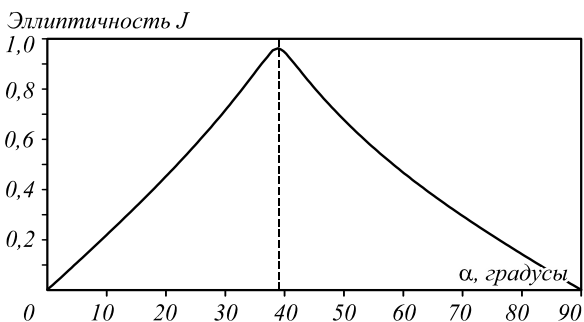


Рис. 4. Зависимость эллиптичности поляризации от угла α падения вектора электрического поля к линиям решётки при периоде решётки $T = 0,22$ мкм

Например, если изменить период решёток с $T = 0,22$ мкм на $T = 0,18$ мкм, то зависимость, показанная на рис. 4, изменится, что проиллюстрировано на рис. 6.

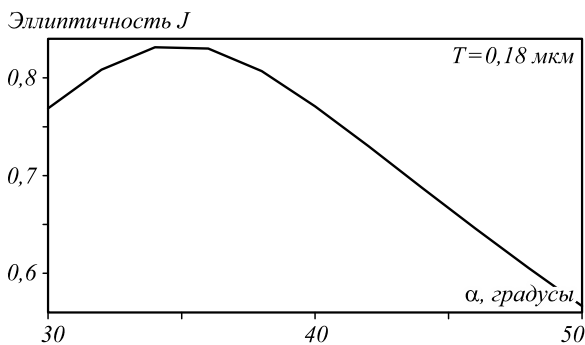


Рис. 6. Зависимость эллиптичности поляризации от угла α падения вектора электрического поля к линиям решётки при периоде $T = 0,18$ мкм

Из рис. 4 видно: чтобы получить наибольшее приближение поляризации прошедшего поля к круговой, угол α должен быть равен 39° . При этом $J = 0,963$, поляризация на выходе – правая круговая. Если повернуть решётки по отношению к вектору на противоположный угол $\alpha = -39^\circ$, то поляризация будет левая круговая.

На рис. 5 представлена зависимость эллиптичности поляризации от периода решёток. Изначально при моделировании период был равен 0,22 мкм, и видно, что при этом периоде поляризация максимально приближена к круговой. Это объясняется тем, что наклон линий 39° и высота подобраны под данный период решёток.

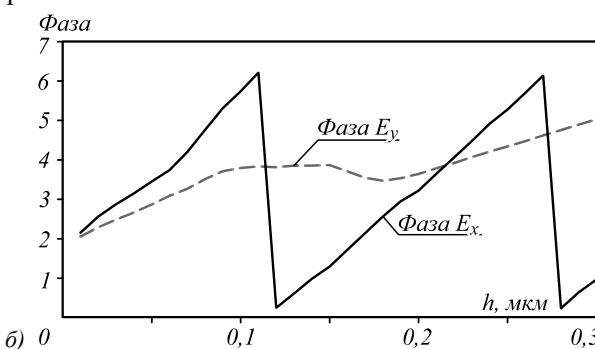


Рис. 5. Зависимость эллиптичности поляризации от периода линий T

Из рис. 6 видно, что эллиптичность в максимуме достигает значения $J = 0,83$ при угле наклона решёток $\alpha = 35^\circ$. При этом оптимальной высотой рельефа станет уже $h = 0,1$ мкм, для неё значение эллиптичности составит $J = 0,962$.

2. Металинза на основе дифракционных решёток, эквивалентных четвертьволновым пластинкам

Из рис. 3 видно, что с помощью данных дифракционных решёток, работающих как четвертьволновая пластинка со свойством двулучепреломления, можно рассчитать металинзу, фокусирующую свет в кольцо, причём на оптической оси будет область с обратным потоком интенсивности S_z . Для того чтобы его получить, достаточно остро сфокусировать свет с круговой поляризацией и фазовым вихрем порядка $m = 2$. Круговую поляризацию можно получить из линейной при помощи дифракционных решёток с наклоном ли-

ний $\alpha = 39^\circ$ и высотой $h = 0,09$ мкм. Однако для фокусировки необходимо получить поле с той же круговой поляризацией, но отличающееся по фазе на π . Такое поле в некотором приближении можно получить с помощью решеток с тем же наклоном линий и высотой $h = 0,17$ мкм, но при этом угол следует взять отрицательным $\alpha = -39^\circ$, так как с изменением высоты рельефа с $0,09$ мкм до $0,17$ мкм направление круговой поляризации изменяется на противоположное. Фазовый вихрь $m = 2$ можно получить за счёт использования спиральной зонной пластинки вместо обычной. Таким образом, внешний вид такой металинзы представлен на рис. 7.

На рис. 8 приведён результат моделирования фокусировки света данной металинзой при падающей плоской волне с линейной поляризацией $E_x = 1, E_y = E_z = 0$.

Заключение

В работе с помощью FDTD-метода проведено строгое моделирование прохождения падающей плоской волны с линейной поляризацией и длиной волны 633 нм через кусок (8×8 мкм) бинарной субволновой решётки

из аморфного кремния на подложке из плавленного кварца. Период решётки не изменялся и был равен 220 нм (110 нм канавка и 110 нм возвышенность). Варьировались только глубина рельефа и угол наклона штрихов решётки по отношению к вектору электрического поля падающей волны.

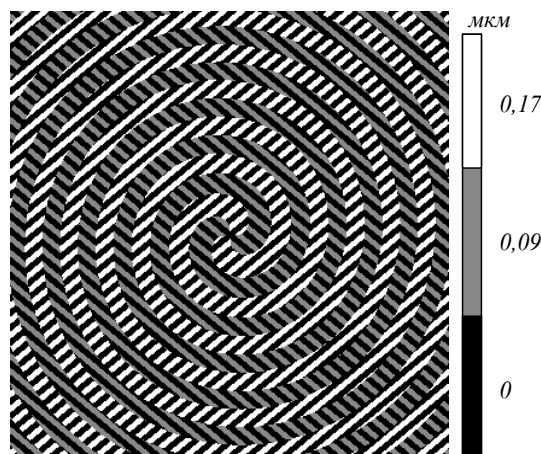


Рис. 7. Внешний вид трёхуровневой металинзы

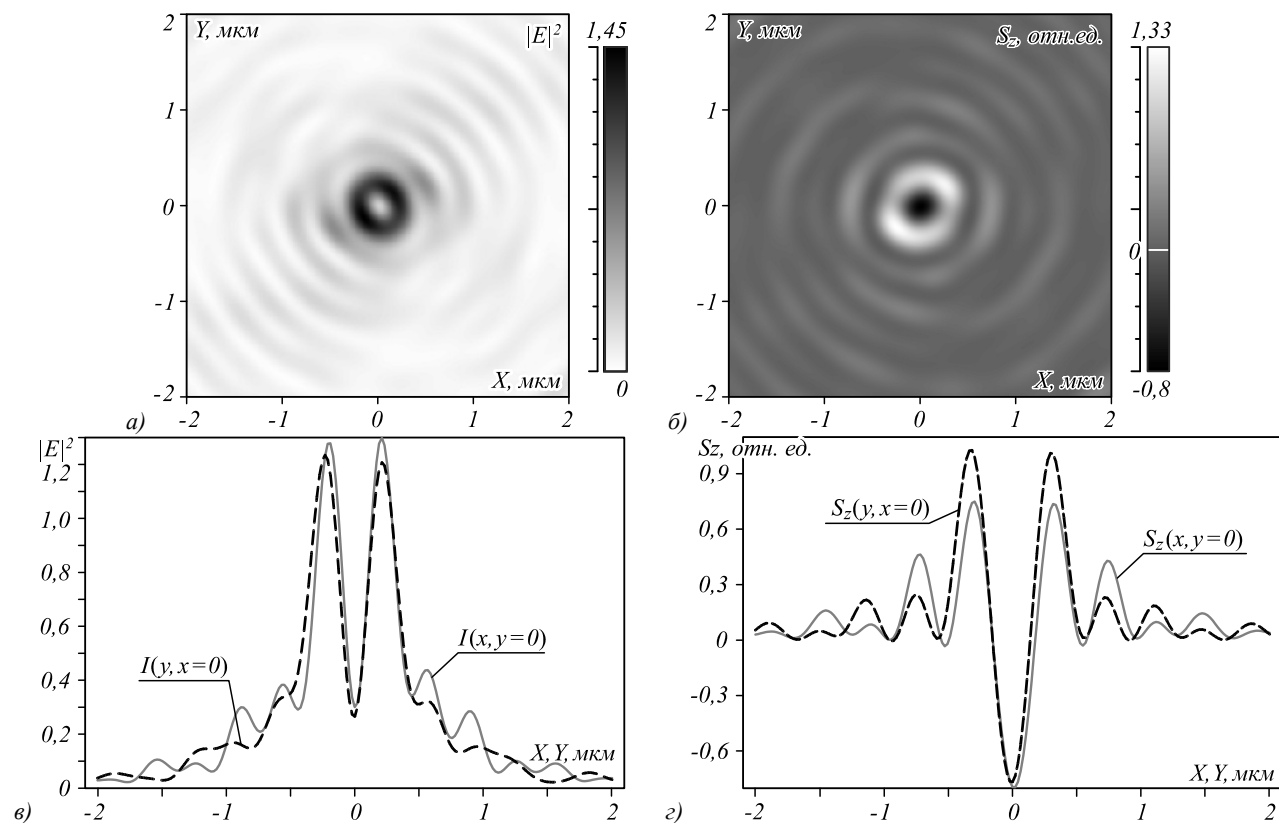


Рис. 8. Интенсивность $|E|^2$ (а) и проекция S_z (б) и их сечения вдоль осей X и Y (в, г) соответственно

Показано, что при угле между направлением штрихов решётки и вектором линейной поляризации 39° и глубине решётки 90 нм прошедший решётку свет имеет правую круговую поляризацию, а при глубине решётки 170 нм – левую круговую поляризацию. Если угол между штрихами решётки и вектором поляризации падающей волны -39° , то наоборот: при глубине решётки 90 нм на выходе будет свет с левой

круговой поляризацией, а при глубине 170 нм – с правой круговой поляризацией. Также рассчитана трёхуровневая спиральная металинза в плёнке аморфного кремния с числовой апертурой, близкой к единице, и с фокусным расстоянием, равным длине волны освещающего света. Металинза выполняет функции трёх оптических элементов: четвертьволновой пластинки, спиральной фазовой пластинки второ-

го порядка и дифракционной микролинзы. При освещении металинзы плоской волной с линейной поляризацией после металинзы формируется оптический вихрь с топологическим зарядом $m=2$ и левой круговой поляризацией. В фокальной плоскости металинзы формируется распределение интенсивности в виде почти круглого субволнового кольца, а на оптической оси формируется обратный поток энергии (осевая компонента вектора Пойнтинга отрицательная).

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-29-20003) в части «Преобразование линейной поляризации в круговую с помощью субволновой решётки» и Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение 007-ГЗ/Ч3363/26) в части «Металинза на основе дифракционных решёток, эквивалентных четвертьволновым пластинкам».

Литература

1. **Bomzon, Z.** Radially and azimuthally polarized beams generated by space-variant dielectric subwavelength gratings / Z. Bomzon, G. Biener, V. Kleiner, E. Hasman // *Optics Letters*. – 2002. – Vol. 27, Issue 5. – P. 285-287.
2. **Bomzon, Z.** Pancharatnam–Berry phase in space-variant polarization-state manipulations with subwavelength gratings / Z. Bomzon, V. Kleiner, E. Hasman // *Optics Letters*. – 2001. – Vol. 26, Issue 18. – P. 1424-1426.
3. **Ghadyani, Z.** Concentric ring metal grating for generating radially polarized light / Z. Ghadyani, I. Vartiainen, I. Harder, W. Iff, A. Berger, N. Lindlein, M. Kuittinen // *Applied Optics*. – 2011. – Vol. 50, Issue 16. – P. 2451-2457.
4. **Lin, J.** Nanostructured holograms for broadband manipulation of vector beams / J. Lin, P. Genevet, M.A. Kats, N. Antoniou, F. Capasso // *Nano Letters*. – 2013. – Vol. 13, Issue 9. – P. 4269-4274.
5. **Genevet, P.** Holographic optical metasurfaces: a review of current progress / P. Genevet, F. Capasso // *Reports on Progress in Physics*. – 2015. – Vol. 78, Issue 2. – 024401.
6. **Päivänranta, B.** Low-cost fabrication of form-birefringent quarter-wave plates / B. Päivänranta, N. Passilly, J. Pietarinen, P. Laakkonen, M. Kuittinen, J. Tervo // *Optics Express*. – 2008. – Vol. 16, Issue 21. – P. 16334-16342.
7. **Lin, M.-Y.** Design and fabrication of birefringent nano-grating structure for circularly polarized light emission / M.-Y. Lin, T.-H. Tsai, Y.L. Kang, Y.-C. Chen, Y.-H. Huang, Y.-J. Chen, X. Fang, H.Y. Lin, W.-K. Choi, L.A. Wang, C.-C. Wu, S.-C. Lee // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22, Issue 7. – P. 7388-7398.
8. **Lin, M.-Y.** Design and fabrication of nano-structure for three-dimensional display application / M.-Y. Lin, T.-H. Tsai, L.-J. Hsiao, W.-C. Tu, S.-H. Wu, L.A. Wang, S.-C. Lee, H.Y. Lin // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2016. – Vol. 28, Issue 8. – P. 884-886.
9. **Levy, U.** Engineering space-variant inhomogeneous media for polarization control / U. Levy, C.-H. Tsai, L. Pang, Y. Fainman // *Optics Letters*. – 2004. – Vol. 29, Issue 15. – P. 1718-1720.
10. **Lerman, G.M.** Generation of a radially polarized light beam using space-variant subwavelength gratings at 1064 nm / G.M. Lerman, U. Levy // *Optics Letters*. – 2008. – Vol. 33, Issue 23. – P. 2782-2784.
11. **Kotlyar, V.V.** Thin high numerical aperture metalens / V.V. Kotlyar, A.G. Nalimov, S.S. Stafeev, Changyu Hu, L. O'Faolain, M.V. Kotlyar, D. Gibson, S. Song // *Optics Express*. – 2017. – Vol. 25, Issue 7. – P. 8158-8167. – DOI: 10.1364/OE.25.008158.
12. **Kotlyar, V.V.** Subwavelength grating-based metalens for focusing of laser light / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, A.G. Nalimov, L. O'Faolain // *Applied Physics Letters*. – 2019. – Vol. 114, Issue 14. – 141107. – DOI: 10.1063/1.5092760.
13. **Kotlyar, V.V.** Single metalens for generating polarization and phase singularities leading to a reverse flow of energy / V.V. Kotlyar, A.G. Nalimov, S.S. Stafeev, L. O'Faolain // *Journal of Optics*. – 2019. – Vol. 21, Issue 5. – 055004. – DOI: 10.1088/2040-8986/ab14c8.
14. **Kotlyar, V.V.** Energy density and energy flux in the focus of an optical vortex: reverse flux of light energy / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, A.G. Nalimov // *Optics Letters*. – 2018. – Vol. 43, Issue 12. – P. 2921-2924. – DOI: 10.1364/OL.43.002921.
15. **Levy, U.** Engineering space-variant inhomogeneous media for polarization control / U. Levy, C.H. Tsai, L. Pang, Y. Fainman // *Optics Letters*. – 2004. – Vol. 29, Issue 15. – P. 1718-1720.

Сведения об авторах

Налимов Антон Геннадьевич, 1980 года рождения, окончил Самарский государственный аэрокосмический университет в феврале 2003 года по специальности «Физика». Поступил в очную аспирантуру СГАУ по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» в 2003 году, окончил её по специальности 01.04.05 «Оптика» в 2006 году. Работает на кафедре технической кибернетики в Самарском университете в должности доцента, в ИСОИ РАН – филиале ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в должности научного сотрудника. Кандидат физико-математических наук, соавтор 130 работ и 3 патентов. E-mail: anton@smr.ru.

Котляр Виктор Викторович, 1957 года рождения, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией лазерных измерений ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН и по совместительству профессор кафедры технической кибернетики Самарского университета. В 1979 году окончил физический факультет Куйбышевского государственного университета, в 1988 году защитил кандидатскую диссертацию в Саратовском государственном университете, а в 1992 году – докторскую диссертацию в Центральном конструкторском бюро Уникального приборостроения РАН (г. Москва). Область научных интересов: нанофотоника, дифракционная компьютерная оптика. Публикации: 300 научных трудов, 5 монографий, 7 авторских свидетельств.

ГРПТИ: 29.31.15

Поступила в редакцию 24 мая 2019 г. Окончательный вариант – 20 июня 2019 г.

Sharp focus of a circularly polarized optical vortex at the output of a metalens illuminated by linearly polarized light

A.G. Nalimov^{1,2}, V.V. Kotlyar^{1,2}¹IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Molodogvardeyskaya 151, 443001, Samara, Russia,²Samara National Research University, Moskovskoye Shosse 34, 443086, Samara, Russia

Abstract

A three-level spiral metalens in an amorphous silicon film is designed. The metalens relief consists of two subwavelength gratings with a 220-nm period (for 633 nm wavelength) and depths of 90 and 170 nm. The metalens forms a left-hand circular polarized optical vortex with topological charge 2 when illuminated by a linearly polarized plane wave. The intensity distribution at a distance of 633 nm is in the form of a subwavelength circle, whereas the longitudinal projection of the Poynting vector has negative values on the optical axis, meaning that a backward energy flow occurs. Two subwavelength gratings with different depth act as quarter-wave plates, transforming linearly polarized light into circularly polarized light with a phase delay of $\lambda/2$. This metalens combines functionalities of three optical elements: a quarter-wave plate, a spiral phase plate, and a high-NA diffraction metalens (NA close to unity).

Keywords: optical vortex, polarization, quarter-wave plate, backward energy flow, metalens.

Citation: Nalimov AG, Kotlyar VV. Sharp focus of a circularly polarized optical vortex at the output of a metalens illuminated by linearly polarized light. *Computer Optics* 2019; 43(4): 528-534. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-4-528-534.

Acknowledgement: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research under project No. 18-29-20003 (“Linear-to-circular polarization conversion using a subwavelength grating”), the RF Ministry of Science and Higher Education under the government project of the FSRC “Crystallography and Photonics”, RAS (“A metalens based on diffraction gratings serving as quarter-wave plates”).

References

- [1] Bomzon Z, Biener G, Kleiner V, Hasman E. Radially and azimuthally polarized beams generated by space-variant dielectric subwavelength gratings. *Opt Lett* 2002; 27(5): 285-287.
- [2] Bomzon Z, Kleiner V, Hasman E. Pancharatnam–Berry phase in space-variant polarization-state manipulations with subwavelength gratings. *Opt Lett* 2001; 26(18): 1424-1426.
- [3] Ghadyani Z, Vartiainen I, Harder I, Iff W, Berger A, Lindlein N, Kuittinen M. Concentric ring metal grating for generating radially polarized light. *Appl Opt* 2011; 50(16): 2451-2457.
- [4] Lin J, Genevet P, Kats MA, Antoniou N, Capasso F. Nanostructured holograms for broadband manipulation of vector beams. *Nano Lett* 2013; 13(9): 4269-4274.
- [5] Genevet P, Capasso E. Holographic optical metasurfaces: a review of current progress. *Rep Prog Phys* 2015; 78(2): 024401.
- [6] Päivänranta B, Passilly N, Pietarinen J, Laakkonen P, Kuittinen M, Tervo J. Low-cost fabrication of form-birefringent quarter-wave plates. *Opt Express* 2008; 16(21): 16334-16342.
- [7] Lin M-Y, Tsai T-H, Kang YL, Chen Y-C, Huang Y-H, Chen Y-J, Fang X, Lin HY, Choi W-K, Wang LA, Wu C-C, Lee S-C. Design and fabrication of birefringent nano-grating structure for circularly polarized light emission. *Opt Express* 2014; 22(7): 7388-7398.
- [8] Lin M-Y, Tsai T-H, Hsiao L-J, Tu W-C, Wu S-H, Wang LA, Lee S-C, Lin HY. Design and fabrication of nano-structure for three-dimensional display application. *IEEE Photonics Technol Lett* 2016; 28(8): 884-886.
- [9] Levy U, Tsai C-H, Pang L, Fainman Y. Engineering space-variant inhomogeneous media for polarization control. *Opt Lett* 2004; 29(15): 1718-1720.
- [10] Lerman GM, Levy U. Generation of a radially polarized light beam using space-variant subwavelength gratings at 1064 nm. *Opt Lett* 2008; 33(23): 2782-2784.
- [11] Kotlyar VV, Nalimov AG, Stafeev SS, Hu Changyu, O’Faolain L, Kotlyar MV, Gibson D, Song S. Thin high numerical aperture metalens. *Opt Express* 2017; 25(7): 8158-8167. DOI: 10.1364/OE.25.008158.
- [12] Kotlyar VV, Stafeev SS, Nalimov AG, O’Faolain L. Subwavelength grating-based metalens for focusing of laser light. *Appl Phys Lett* 2019; 114(14): 141107. DOI: 10.1063/1.5092760.
- [13] Kotlyar VV, Stafeev SS, Nalimov AG, O’Faolain L. Single metalens for generating polarization and phase singularities leading to a reverse flow of energy. *J Opt* 2019; 21(5): 055004. DOI: 10.1088/2040-8986/ab14c8.
- [14] Kotlyar VV, Kovalev AA, Nalimov AG. Energy density and energy flux in the focus of an optical vortex: reverse flux of light energy. *Opt Lett* 2018; 43(12): 2921-2924. DOI: 10.1364/OL.43.002921.
- [15] Levy U, Tsai CH, Pang L, Fainman Y. Engineering space-variant inhomogeneous media for polarization control. *Opt Lett* 2004; 29(15): 1718-1720.

Author's information

Anton Gennadyevich Nalimov (b. 1980), graduated from Samara State Aerospace University in February, 2003. Entered in postgraduate study in 2003 on speciality 05.13.18 “Mathematical Modeling and Program Complexes”, finished it in 2006 with speciality 01.04.05 “Optics”. A.G. Nalimov works on Technical Cybernetics department in Samara National Research University as an associate professor, works as a scientist in the Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Candidate in Physics and Mathematics, coauthor of 130 papers and 3 inventions. E-mail: anton@smr.ru.

Victor Victorovich Kotlyar is the head of a laboratory at IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS and a professor of Computer Science department at Samara National Research University. He graduated from Kuibyshev State University (1979), received his Candidate's and Doctor's Degrees in Physics & Mathematics from Saratov State University (1988) and Moscow Central Design Institute of Unique Instrumentation of the RAS (1992). He is a co-author of 300 scientific papers, 5 books and 7 inventions. His current research interests include diffractive optics, gradient optics, nanophotonics, and optical vortices.

Received May 24, 2019. The final version – June 20, 2019.
