



Cork Institute of Technology
SWORD - South West Open Research
Deposit

Articles

Cappa Centre

2018-11-01

Effects of fabrication errors on the focusing performance of a sector metalens

S. S. Stafeev

*Samara National Research University and RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics”
RAS, Molodogvardeyskaya 151, 443001, Samara, Russia*

A. G. Nalimov

*Samara National Research University and RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics”
RAS, Molodogvardeyskaya 151, 443001, Samara, Russia*

Liam O’Faolain

CAPPA Cork Institute of Technology, Cork, Ireland

M. V. Kotlyar

Samara National Research University, 34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Samara, Russia

Follow this and additional works at: <https://sword.cit.ie/cappaart>

 Part of the [Electromagnetics and Photonics Commons](#), [Optics Commons](#), [Other Physical Sciences and Mathematics Commons](#), and the [Plasma and Beam Physics Commons](#)

Recommended Citation

S. S. Stafeev, A. G. Nalimov, L. O’Faolain, M. V. Kotlyar, “Effects of fabrication errors on the focusing performance of a sector metalens”, *Computer Optics*, 42:6 (2018), 970–976

This Article is brought to you for free and open access by the Cappa Centre at SWORD - South West Open Research Deposit. It has been accepted for inclusion in Articles by an authorized administrator of SWORD - South West Open Research Deposit. For more information, please contact sword@cit.ie.

ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЕКТОРНОЙ МЕТАЛИНЗЫ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ФОКУСИРОВКИ

С.С. Стафеев^{1,2}, А.Г. Налимов^{1,2}, Л. О'Фаолейн³, М.В. Котляр²
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,

³ Технологический институт г. Корка, г. Корк, Ирландия

Аннотация

В статье показано, что 16-секторная металинза, преобразующая линейно-поляризованный свет в азимутально-поляризованный вихрь, при освещении её светом с линейной поляризацией формирует субволновое фокусное пятно с размерами по полуспаду интенсивности вдоль обеих осей, равными 0,75 от длины волны фокусируемого света. Было показано, что результаты фокусировки металинзой чувствительны к отклонению фактического рельефа от расчётного. В частности, изменение высоты рельефа приводит к отсутствию обратного потока энергии в фокусном пятне при освещении металинзы светом с круговой поляризацией.

Ключевые слова: металинза, метаповерхность, субволновая фокусировка, FDTD-метод, сканирующий ближнепольный микроскоп, обратный поток энергии.

Цитирование: Стафеев, С.С. Влияние погрешностей изготовления секторной металинзы на результаты фокусировки / С.С. Стафеев, А.Г. Налимов, Л. О'Фаолейн, М.В. Котляр // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 6. – С. 970-976. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-6-970-976.

Введение

Значительное количество научных работ в настоящее время посвящено исследованию метаповерхностей – тонких оптических элементов, позволяющих одновременно управлять амплитудой, фазой и поляризацией проходящего через них излучения [1]. С помощью элементов, основанных на метаповерхностях, можно фокусировать свет в кольцо [2], отрезок [3] или пятно [4–9].

Ранее нами исследовались металинзы, спроектированные на основе использования субволновых решёток [10]. Такие субволновые решётки анизотропны – ТЕ- и ТМ-поляризованные волны, проходящие через них, будут приобретать разный набег фазы. На основе такого эффекта можно создавать аналоги классических полуволновых пластинок, поворачивающих направление поляризации. Ориентация такой волновой пластинки будет определяться направлением рельефа решётки. Так как рельеф дифракционного элемента можно направлять в любую сторону, то на основе субволновых решёток можно создавать элементы, преобразующие линейно-поляризованный пучок в пучок с пространственно неоднородным направлением поляризации – изменяющимся в различных точках в поперечном сечении пучка.

В нашей ранней работе [11] был предложен четырёхсекторный элемент, поворачивающий поляризацию падающего на него линейно-поляризованного света на углы 45° , -45° , 135° и -135° . Исследуемая в работе [12] металинза совмещала в себе обычную зонную пластинку Френеля и четырёхсекторный радиальный поляризатор из работы [11]. Недостатком работ [11, 12] являлось в том числе то, что поляризация излучения, прошедшего элемент, не меняется непрерывно (ограничена четырьмя направлениями по количеству зон). Численному исследованию влияния количества секторов на результаты фокусировки посвящена работа [13].

Данная статья является продолжением исследований авторов [13, 14]. В ней изучается влияние технологических погрешностей при изготовлении металинзы на результаты фокусировки. Показано, что 16-секторная металинза, преобразующая линейно-поляризованный свет в азимутально-поляризованный вихрь, при освещении её светом с линейной поляризацией формирует субволновое фокусное пятно с размерами по полуспаду интенсивности, равными $\text{FWHM}_x = \text{FWHM}_y = 0,75\lambda$. Также было показано, что результаты фокусировки металинзой крайне чувствительны к отклонению фактического рельефа от расчётного. В частности, изменение высоты рельефа приводит к отсутствию формирования обратного потока энергии в фокусном пятне при освещении металинзы светом с круговой поляризацией.

Изготовление металинзы

Ранее в работе [13] численно исследовалась фокусировка света 16-секторной металинзой (шаблон представлен на рис. 1а).

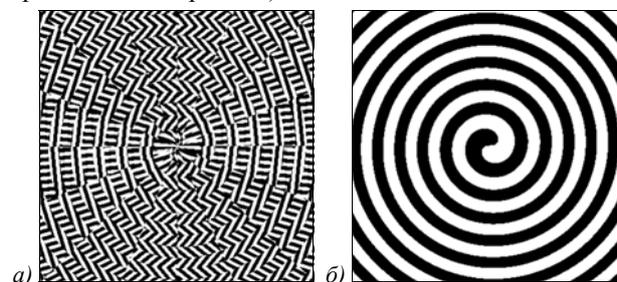


Рис. 1. Шаблон 16-секторной металинзы (а) и шаблон бинарной спиральной зонной пластинки с топологическим зарядом 1 (б)

Такая металинза представляла из себя соединение спиральной зонной пластинки с топологическим зарядом $m=1$ (рис. 1б) и секторной субволновой решётки (период – 220 нм, глубина рельефа – 120 нм,

длина волны освещающего излучения $\lambda = 633$ нм). В [13] исследовалось влияние количества секторов на результаты фокусировки, и было показано, что металинза, освещаемая плоской волной с линейной поляризацией (рис. 1), формирует фокусное пятно с размерами меньше скалярного дифракционного предела: $FWHM_x = 0,435\lambda$ и $FWHM_y = 0,457\lambda$ (рис. 2).

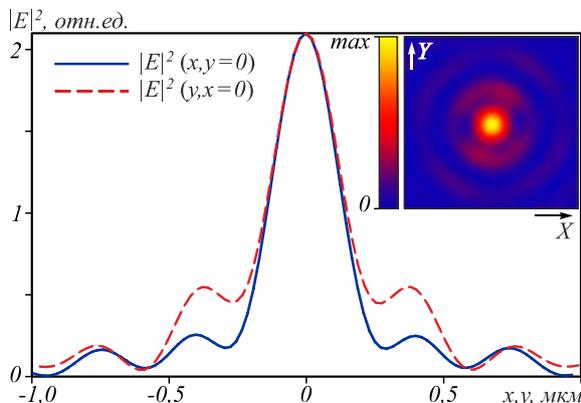


Рис. 2. Распределение интенсивности на расстоянии 600 нм (вставка) и сечения интенсивности вдоль осей x и y . Входная поляризация линейна и направлена вдоль оси y

В последующей работе [14] было отмечено, что при освещении металинзы (рис. 1а) светом с круговой поляризацией можно наблюдать отрицательные составляющие проекции вектора Пойнтинга на оптическую ось, сопоставимые по абсолютной величине с положительными значениями.

Металинза с рельефом, изображенным на рис. 3, была изготовлена средствами электронной литографии.

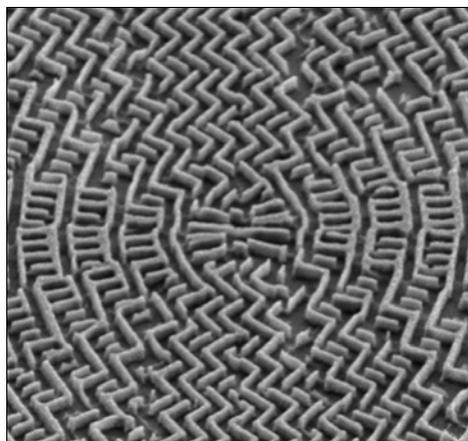


Рис. 3. Изображение изготовленной спиральной металинзы, полученное с помощью электронного микроскопа

Плѐнка аморфного кремния (a-Si, показатель преломления $n = 4,35 + i0,486$) толщиной 130 нм была нанесена на прозрачную пирексную подложку ($n = 1,5$) и покрыта 320 нм слоем резиста ПММА, который запекался при температуре 180 $^{\circ}\text{C}$. Толщина резиста в 320 нм была подобрана оптимальным образом. Чтобы избежать формирования заряда, поверхность образца была покрыта слоем золота толщиной 15 нм. Бинарный шаблон был перенесѐн на резист с помощью электронного луча с напряжением 30 кВ.

Для проявления образца использовался раствор воды и изопропанола в соотношении 3:7. Трансформирование шаблона с резиста на аморфный кремний было осуществлено с помощью реактивного ионного травления с использованием газов CHF_3 и SF_6 . Аспектное отношение травления скоростей материала и фотомаски считалось равным 1:2,5. Изображение металинзы, полученное с помощью электронного микроскопа, показано на рис. 3.

Рельеф изготовленного элемента, измеренный с помощью атомно-силового микроскопа Solver Pro (NT-MDT), показан на рис. 4.

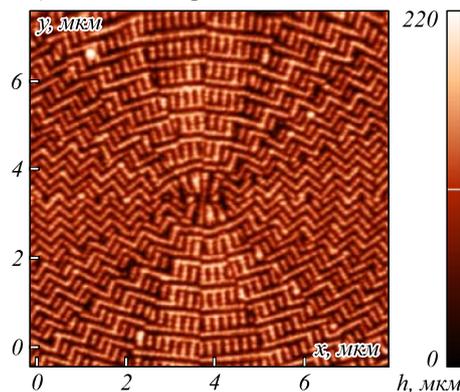


Рис. 4. Рельеф элемента, измеренный с помощью атомно-силового микроскопа SolverPro

Из рис. 4 видно, что имеет место перетрав рельефа. Высота рельефа равна 220 нм, вместо расчѐтных 120 нм.

Эксперимент

С помощью сканирующего ближнепольного микроскопа (СБМ) изучалась фокусировка изготовленной металинзой. Схема эксперимента показана на рис. 5.

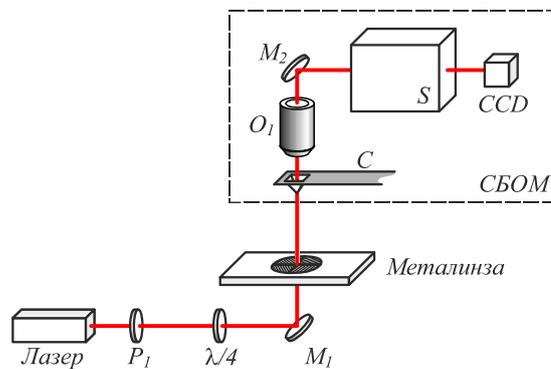


Рис. 5. Схема эксперимента. P_1 – поляризатор, M_1, M_2 – зеркала, C – кантилевер, O_1 – 100 \times объектив, S – спектрометр

В эксперименте использовался лазер, излучающий линейно-поляризованный свет с длиной волны 633 нм. При необходимости получения круговой поляризации свет преобразовывался с помощью четвертьволновой пластинки в свет с круговой поляризацией, после чего попадал на элемент. Полная ширина пучка выбиралась равной ширине элемента – около 30 мкм. Прошедшее через линзу излучение улавливается с помощью полоого пирамидального металлического кантилевера C с отверстием у вершины 100 нм. Прошедший через от-

верстие кантилевера свет фокусируется с помощью 100-кратного объектива O_1 и проходит через спектрометр S (Solar II, Nanofinder 30) для фильтрации irrelevantного излучения, прежде чем будет зарегистрирован CCD-камерой (Andor, DV401-BV).

Было проведено две серии экспериментов с фокусировкой линейно-поляризованного света и света с круговой поляризацией. На рис. 6 показаны результаты фокусировки, полученные при освещении металлинзы светом с линейной поляризацией. Фокусное расстояние оказалось равным примерно 450 нм.

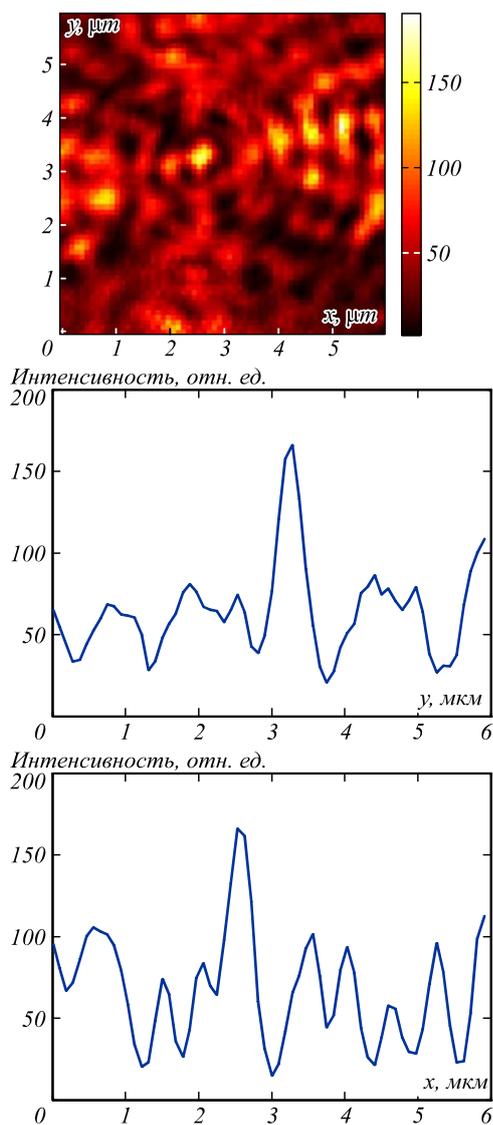


Рис. 6. Распределение интенсивности в фокусе при освещении металлинзы светом с линейной поляризацией

Размеры фокусного пятна на рис. 6 были равны $\text{FWHM}_x = \text{FWHM}_y = 0,75\lambda$. Напомним, что численное моделирование [13] показало, что размеры фокусного пятна должны быть равны $\text{FWHM}_x = 0,435\lambda$ и $\text{FWHM}_y = 0,457\lambda$. То есть измеренные экспериментально диаметры пятна значительно превышают расчётные.

На рис. 7 показано распределение интенсивности при освещении металлинзы светом с круговой поляризацией. Ранее [14] было показано, что в этом случае в

фокусе должен наблюдаться обратный поток энергии. Распределение интенсивности в этом случае должно иметь вид кольца.

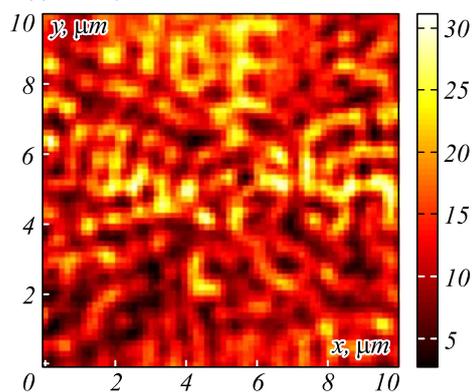


Рис. 7. Распределение интенсивности в фокусе при освещении металлинзы светом с круговой поляризацией

Из рис. 7 видно, что ярко выраженного фокуса не наблюдается – размеры боковых лепестков сопоставимы с размерами первого кольца фокуса.

Моделирование изготовленной линзы

Чтобы разобраться в причинах, по которым экспериментально не удалось наблюдать те же результаты, что и в работах [13, 14], была проведена серия моделирований методом FDTD, реализованным в программном обеспечении FullWave. Параметры моделирования были следующими: длина волны фокусируемого излучения $\lambda = 633$ нм, размеры расчётной области $8 \times 8 \times 2$ мкм, размер шага сетки $\lambda/30$ по всем трём координатам. Показатель преломления материала металлинзы $n = 4,352 + 0,486i$ (аморфный кремний). По результатам моделирования фактическое фокусное расстояние оказалось равным $z = 0,433$ мкм. Металлинза освещалась светом с круговой поляризацией.

В первом моделировании была исследована фокусировка света, прошедшего через реальный профиль изготовленного элемента, показанный на рис. 4. Результаты фокусировки показаны на рис. 8, 9. На рис. 8 показано распределение интенсивности в плоскости фокуса, а на рис. 9 – распределение продольной составляющей вектора Пойнтинга S_z .

Из рис. 8 и 9 видно, что выраженного фокуса для изготовленного элемента и не должно наблюдаться – боковые пики сопоставимы с центральным (рис. 8), а обратного потока нет (рис. 9). Наблюдается соответствие с экспериментом (рис. 7).

Моделирование модифицированной линзой (ограниченный свержу рельеф)

Основная проблема рельефа – чрезмерная высота и слабое разрешение в области частых коротких ступенек (они сливаются). В следующем моделировании рельеф элемента был ограничен сверху по высоте до 120 нм от нижней границы рельефа. Результаты моделирования приведены на рис. 10–12.

Из рис. 10–12 видно, что в фокусе возникает обратный поток энергии, а распределение интенсивности становится похоже на кольцевое.

Моделирование модифицированной линзой (ограниченный сверху и снизу рельеф)

В третьем моделировании рельеф, помимо уменьшения по высоте до 120 нм, был дополнительно ограничен – рельеф был ограничен не только по нижнему, но и по верхнему уровню (рис. 13).

Результаты фокусировки в таком случае показаны на рис. 14–16.

На рис. 16 виден обратный поток в центре изображения. Обратное значение достигает $-0,21$ отн. ед. (рис. 16), при этом максимальное значение S_z в положительном направлении на всём поле обзора монитора было равно $0,36$ отн. ед. (наблюдается в другом сечении).

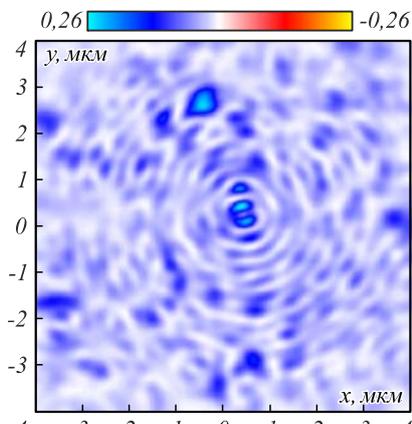


Рис. 8. Распределение интенсивности $|E^2|$ на расстоянии $0,433$ мкм от поверхности металлинзы (рис. 3)

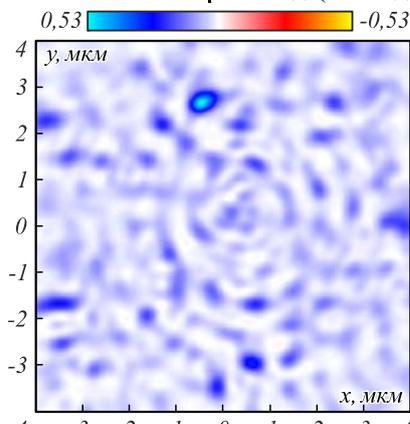


Рис. 9. Распределение проекции вектора Пойнтинга на оптическую ось S_z

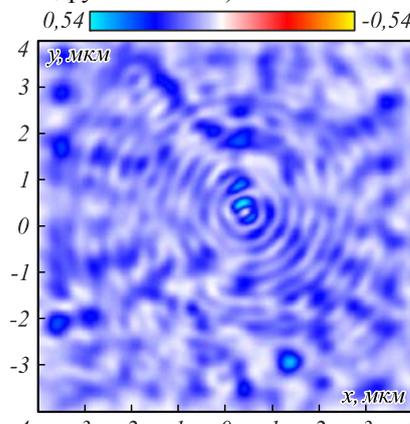


Рис. 10. Распределение интенсивности $|E^2|$ на расстоянии $0,433$ мкм от поверхности металлинзы

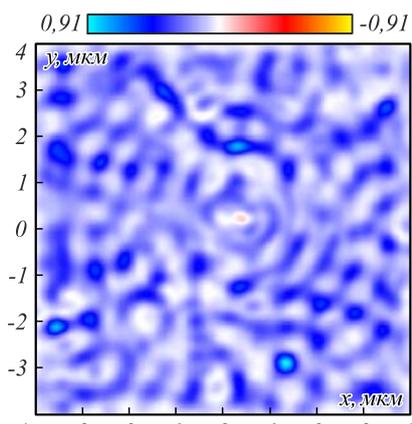


Рис. 11. Распределение проекции вектора Пойнтинга на оптическую ось S_z

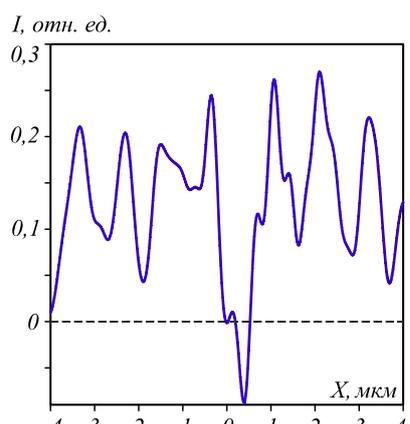


Рис. 12. Сечение S_z через фокусное пятно вдоль оси x

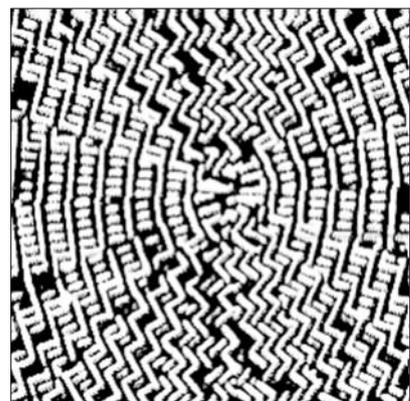


Рис. 13. Модифицированный рельеф металлинзы, используемый в моделировании

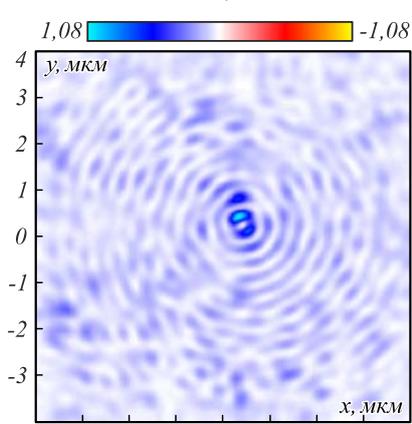


Рис. 14. Распределение интенсивности $|E^2|$ на расстоянии $0,433$ мкм от поверхности металлинзы

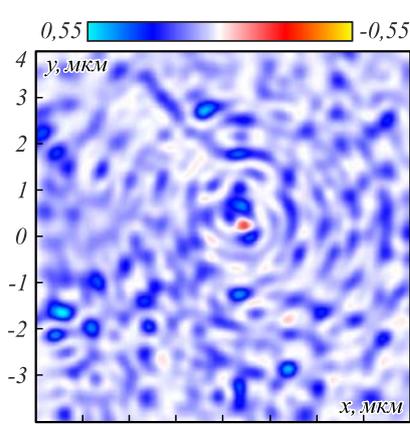


Рис. 15. Распределение проекции вектора Пойнтинга на оптическую ось S_z

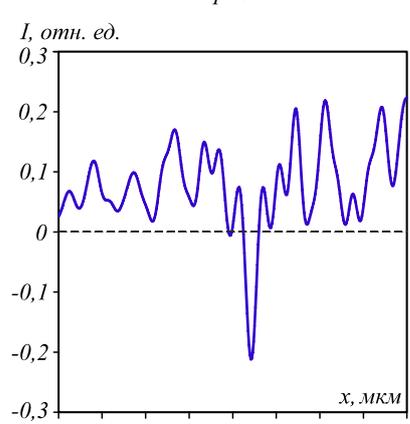


Рис. 16. Сечение S_z через фокусное пятно вдоль оси x

Заключение

В статье показано, что 16-секторная металинза, преобразующая линейно-поляризованный свет в азимутально-поляризованный вихрь, при освещении её светом с линейной поляризацией формирует субволновое фокусное пятно с размерами по полуспаду интенсивности, равными $\text{FWHM}_x = \text{FWHM}_y = 0,75\lambda$. Было показано, что результаты фокусировки металинзой крайне чувствительны к отклонению фактического рельефа от расчётного. В частности, изменение высоты рельефа приводит к отсутствию обратного потока энергии в фокусном пятне при освещении металинзы светом с круговой поляризацией.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 18-19-00595).

Литература

1. **Yu, N.** Flat optics with designer metasurfaces / N. Yu, F. Capasso // *Nature Materials*. – 2014. – Vol. 13, Issue 2. – P. 139-150. – DOI: 10.1038/nmat3839.
2. **Lan, L.** Three dimensional subwavelength focus by a near-field plate lens / L. Lan, W. Jiang, Y. Ma // *Applied Physics Letters*. – 2013. – Vol. 102, Issue 23. – P. 231119. – DOI: 10.1063/1.4810004.
3. **Verslegers, L.** Planar lenses based on nanoscale slit arrays in a metallic film / L. Verslegers, P.B. Catrysse, Z. Yu, J.S. White, E.S. Barnard, M.L. Brongersma, S. Fan // *Nano Letters*. – 2009. – Vol. 9, Issue 1. – P. 235-238. – DOI: 10.1021/nl802830y.
4. **Aieta, F.** Aberration-free ultrathin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces / F. Aieta, P. Genevet, M.A. Kats, N. Yu, R. Blanchard, Z. Gaburro, F. Capasso // *Nano Letters*. – 2012. – Vol. 12, Issue 9. – P. 4932-4936. – DOI: 10.1021/nl302516v.
5. **Arbabi, A.** Subwavelength-thick lenses with high numerical apertures and large efficiency based on high-contrast transmitarrays / A. Arbabi, Y. Horie, A.J. Ball, M. Bagheri, A. Faraon // *Nature Communications*. – 2015. – Vol. 6. – P. 7069. – DOI: 10.1038/ncomms8069.
6. **Arbabi, A.** Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission / A. Arbabi, Y. Horie, M. Bagheri, A. Faraon // *Nature Nanotechnology*. – 2015. – Vol. 10, Issue 11. – P. 937-943. – DOI: 10.1038/nnano.2015.186.
7. **Ni, X.** Ultra-thin, planar, Babinet-inverted plasmonic metalenses / X. Ni, S. Ishii, A.V. Kildishev, V.M. Shalaev // *Light: Science & Applications*. – 2013. – Vol. 2, Issue 4. – e72. – DOI: 10.1038/lsa.2013.28.
8. **West, P.R.** All-dielectric subwavelength metasurface focusing lens / P.R. West, J.L. Stewart, A.V. Kildishev, V.M. Shalaev, V.V. Shkunov, F. Strohkendl, Y.A. Zakharenkov, R.K. Dodds, R. Byren // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22, Issue 21. – P. 26212-26221. – DOI: 10.1364/OE.22.026212.
9. **Lin, D.** Dielectric gradient metasurface optical elements / D. Lin, P. Fan, E. Hasman, M.L. Brongersma // *Science*. – 2014. – Vol. 345, Issue 6194. – P. 298-302. – DOI: 10.1126/science.1253213.
10. **Stafeev, S.S.** Subwavelength gratings for polarization conversion and focusing of laser light / S.S. Stafeev, V.V. Kotlyar, A.G. Nalimov, M.V. Kotlyar, L. O'Faolain // *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*. – 2017. – Vol. 27. – P. 32-41. – DOI: 10.1016/j.photonics.2017.09.001.
11. **Stafeev, S.S.** Tight focus of light using micropolarizer and microlens / S.S. Stafeev, L. O'Faolain, V.V. Kotlyar, A.G. Nalimov // *Applied Optics*. – 2015. – Vol. 54, Issue 14. – P. 4388-4394. – DOI: 10.1364/AO.54.004388.
12. **Kotlyar, V.V.** Thin high numerical aperture metalens / V.V. Kotlyar, A.G. Nalimov, S.S. Stafeev, C. 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.
13. **Nalimov, A.G.** Design of a sector-variant high-numerical-aperture micrometalens / A.G. Nalimov, V.V. Kotlyar // *Optik*. – 2018. – Vol. 159. – P. 9-13. – DOI: 10.1016/j.ijleo.2018.01.046.
14. **Котляр, В.В.** Формирование и фокусировка векторного оптического вихря с помощью металинзы / 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.

Сведения об авторах

Стафеев Сергей Сергеевич, 1985 года рождения. В 2009 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ по специальности «Прикладная математика и физика». Кандидат физико-математических наук с 2012 года. Научный сотрудник лаборатории лазерных измерений Института систем обработки изображений РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, разностное решение уравнений Максвелла, оптика ближнего поля. E-mail: sergey.stafeev@gmail.com. ORCID: 0000-0002-7008-8007

Информацию об авторе **Налимов Антон Геннадьевич** см. стр. 938 этого номера.

О'Фаолейн Лиам (Уильям Веллан-Куртин) 1979 года рождения, из Ирландии. В 2000 году окончил физический факультет Университета города Корк. С 2001 года начал работать в группе микрофотоники Школы физики и астрономии Университета города Сэнт-Эндрюс (Шотландия) как аспирант по созданию полупроводниковых лазеров. В 2005 году защитил диссертацию и получил степень доктора философии. Область научных интересов: электронная литография для создания фотонных кристаллов. В настоящее время он является координатором европейской платформы по наноструктурированию ePIXnet. Соавтор 53 научных статей с высоким индексом цитирования. E-mail: jww1@st-andrews.ac.uk.

Котляр Мария Викторовна, 1979 года рождения, доктор философии, научный сотрудник лаборатории НИЛ-35 Самарского национального исследовательского университета. В 2001 году окончила физический факультет Самар-

ского государственного университета, в 2005 году защитила диссертацию в университете Сент-Эндрюса (Великобритания). Область научных интересов: нанофотоника. В Scopus 25 публикаций. E-mail: ichteos@km.ru.

ГРПТИ: 29.31.01

Поступила в редакцию 7 сентября 2018 г. Окончательный вариант – 1 ноября 2018 г.

EFFECTS OF FABRICATION ERRORS ON THE FOCUSING PERFORMANCE OF A SECTOR METALENS

S.S. Stafeev^{1,2}, A.G. Nalimov^{1,2}, L. O'Faolain³, M.V. Kotlyar²

¹ IPISI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, 443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya 151,

² Samara National Research University, 443086, Russia, Samara, Moskovskoye Shosse 34,

³ Cork Institute of Technology, Cork, Ireland

Abstract

Using e-beam lithography, a 16-sector spiral metalens was fabricated in an amorphous silicon, capable of converting linearly polarized incident light into an azimuthally polarized optical vortex. When illuminated by a 633-nm linearly polarized laser beam, the metalens generated a near-surface subwavelength focal spot equal to 0.75 of the incident wavelength at full-width of half-maximum intensity. The focusing performance of the spiral metalens was numerically shown to be sensitive to the deviation of the factual microrelief from the calculated height. For the designed microrelief height, a circularly polarized incident beam was focused into a bright ring with a reverse energy flow occurring at its center. For the microrelief height other than the designed one, the energy backflow effect did not occur.

Keywords: metalens, metasurface, subwavelength focusing, FDTD-method, SNOM, energy backflow.

Citation: Stafeev SS, Nalimov AG, O'Faolain L, Kotlyar MV. Effects of fabrication errors on the focusing performance of a sector metalens. *Computer Optics* 2018; 42(6): 970-976. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-6-970-976.

Acknowledgments: The work was funded by the Russian Science Foundation (project #18-19-00595).

References

- [1] Yu N, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces. *Nat Mater* 2014; 13(2): 139-150. DOI: 10.1038/nmat3839.
- [2] Lan L, Jiang W, Ma Y. Three dimensional subwavelength focus by a near-field plate lens. *Appl Phys Lett* 2013; 102(23): 231119. DOI: 10.1063/1.4810004.
- [3] Verslegers L, Catrysse PB, Yu Z, White JS, Barnard ES, Brongersma ML, Fan S. Planar lenses based on nanoscale slit arrays in a metallic film. *Nano Lett* 2009; 9(1): 235-238. DOI: 10.1021/nl802830y.
- [4] Aieta F, Genevet P, Kats MA, Yu N, Blanchard R, Gaburro Z, Capasso F. Aberration-free ultrathin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces. *Nano Lett* 2012; 12(9): 4932-4936. DOI: 10.1021/nl302516v.
- [5] Arbabi A, Horie Y, Ball AJ, Bagheri M, Faraon A. Subwavelength-thick lenses with high numerical apertures and large efficiency based on high-contrast transmitarrays. *Nat Commun* 2015; 6: 7069. DOI: 10.1038/ncomms8069.
- [6] Arbabi A, Horie Y, Bagheri M, Faraon A. Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission. *Nat Nanotechnol* 2015; 10(11): 937-943. DOI: 10.1038/nnano.2015.186.
- [7] Ni X, Ishii S, Kildishev A V, Shalaev VM. Ultra-thin, planar, Babinet-inverted plasmonic metalenses. *Light Sci Appl* 2013; 2(4): e72. DOI: 10.1038/lsa.2013.28.
- [8] West PR, Stewart JL, Kildishev A V, Shalaev VM, Shkunov V V, Strohkendl F, Zakharenkov YA, Dodds RK, Byren R. All-dielectric subwavelength metasurface focusing lens. *Opt Express* 2014; 22(21): 26212-26221. DOI: 10.1364/OE.22.026212.
- [9] Lin D, Fan P, Hasman E, Brongersma ML. Dielectric gradient metasurface optical elements. *Science* 2014; 345(6194): 298-302. DOI: 10.1126/science.1253213.
- [10] Stafeev SS, Kotlyar VV, Nalimov AG, Kotlyar MV, O'Faolain L. Subwavelength gratings for polarization conversion and focusing of laser light. *Photonics and Nanostuctures – Fundamentals and Applications* 2017; 27: 32-41. DOI: 10.1016/j.photonics.2017.09.001.
- [11] Stafeev SS, O'Faolain L, Kotlyar VV, Nalimov AG. Tight focus of light using micropolarizer and microlens. *Appl Opt* 2015; 54(14): 4388-4394. DOI: 10.1364/AO.54.004388.
- [12] Kotlyar VV, Nalimov AG, Stafeev SS, Hu C, 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.
- [13] Nalimov AG, Kotlyar VV. Design of a sector-variant high-numerical-aperture micrometalens. *Optik* 2018; 159: 9-13. DOI: 10.1016/j.ijleo.2018.01.046.
- [14] Kotlyar VV, Nalimov AG. A vector optical vortex generated and focused using a metalens [In Russian]. *Computer Optics* 2017; 41(5): 645-654. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-5-645-654.

Author's information

Sergey S. Stafeev (b. 1985) received Master's degree in Applied Mathematics and Physics in Samara State Aerospace University (2009). He received his PhD in 2012. He is researcher of Laser Measurements laboratory at the Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Scientific interests: diffractive optics, FDTD method, near-field optics. E-mail: sergey.stafeev@gmail.com. ORCID: 0000-0002-7008-8007.

The information about author **Anton Gennadyevich Nalimov** you can find on page 940 of this issue.

Liam O'Faolain (William Whelan-Curtin) is from Cork Institute of Technology (Republic of Ireland) and studied for a degree in Physics at University College Cork. He joined the Microphontonic Research Group of School of Physics and Astronomy of SUPA, School of Physics and Astronomy of the University of St. Andrews (Scotland) in October 2001 to begin a PhD on Modelocked Semiconductor Lasers. He received the PhD degree in Physics in 2005. His other interests are electron beam lithography for photonic crystals. He also keeps records of the groups Fabrication Processes. He is now working as a PostDoc coordinating the ePIXnet Nanostructuring Platform. He is the author and coauthor of 53 scientific papers with high citation index. E-mail: jww1@st-andrews.ac.uk.

Maria V. Kotlyar born in 1979, Ph.D., a researcher at the Laboratory 35 Samara National Research University. In 2001 she graduated from Physic department of Samara State University, in 2005 defended her thesis at the University of St. Andrews (UK). Research interests: nanophotonics. In the Scopus she has 25 publications. E-mail: ichteos@km.ru.

Received September 7, 2018. The final version – November 1, 2018.
