

Высокоапертурная металинза для формирования обратного потока энергии

В.В. Котляр^{1,2}, С.С. Стафеев^{1,2}, Л. О'Фаолейн³, М.В. Котляр³

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 Национальный Институт Тиндаля,
Корк, T12R5CP, Ирландия

Аннотация

По технологии электронной литографии и ионного травления в тонкой плёнке аморфного кремния толщиной 130 нм изготовлена вихревая металинза диаметром 30 мкм с фокусным расстоянием, равным длине волны 633 нм, состоящая из 16 секторов субволновых бинарных решёток с периодом 220 нм. Уникальность такой металинзы в том, что при освещении её светом с левой круговой поляризацией формируется вихревой пучок с топологическим зарядом 2 и левой круговой поляризацией, а при освещении её светом с линейной поляризацией формируется векторный цилиндрический пучок второго порядка. Вблизи фокуса на оптической оси в обоих случаях (и для линейной, и для круговой поляризации) будет формироваться обратный поток энергии. Измеренные с помощью сканирующего ближнепольного оптического микроскопа распределения поперечной интенсивности вблизи фокуса металинзы качественно согласуются с распределениями интенсивности, рассчитанными FDTD-методом. Это подтверждает, что в фокусе такой металинзы имеет место обратный поток энергии. Металинза, формирующая обратный поток вблизи фокуса, изготовлена и исследована впервые.

Ключевые слова: металинза, субволновая решётка, обратный поток энергии.

Цитирование: Котляр, В.В. Высокоапертурная металинза для формирования обратного потока энергии / В.В. Котляр, С.С. Стафеев, Л. О'Фаолейн, М.В. Котляр // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 5. – С. 691-698. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-742.

Citation: Kotlyar VV, Stafeyev SS, O'Faolain L, Kotlyar MV. High numerical aperture metalens for the formation of energy backflow. Computer Optics 2020; 44(5): 691-698. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-742.

Введение

Требование к уменьшению оптических элементов привело в последнее время к активному изучению элементов на основе метаповерхностей – сверхтонких оптических элементов, позволяющих одновременно управлять амплитудой, фазой и поляризацией падающего на них излучения. Наиболее востребованные оптические элементы – линзы были созданы на основе метаповерхностей в исследованиях [1–6]. В этих работах металинзы для получения желаемых характеристик света использовали оптические антенны. Например, в работе [2] использовались антенны в виде цилиндров с эллиптическим основанием, а в работе [4] – L-образные антенны. Другой способ управления характеристиками светового поля – использование субволновых решёток. Субволновая решётка анизотропна – прошедшие через нее волны с ТЕ- и ТМ-поляризациями будут обладать различными амплитудами и фазами. На основе этого эффекта можно создавать аналоги классических поляризаторов и волновых пластинок [7]. В частности, ранее нами исследовались металинзы на основе субволновых решёток, предназначенные для острой фокусировки лазерного

света. В работе [8] 16-секторная металинза преобразовывала падающий на неё линейно-поляризованный свет в азимутально-поляризованный оптический вихрь и фокусировала его в субволновое фокусное пятно с размерами меньше дифракционного предела. Получение фокусных пятен с размерами меньше дифракционного предела не единственный интересный эффект, который можно обнаружить в остром фокусе. В остром фокусе можно формировать световые тоннели [9, 10], цепочки фокусов [11, 12], фокусы с плоской вершиной [13, 14]. Ранее нами теоретически было показано, что при фокусировке света со специально подобранной поляризацией и фазой в фокусе удастся сформировать области, в которых направление вектора Пойнтинга противоположно направлению распространения света [15–17].

В данной работе создана и исследуется металинза, предназначенная для формирования обратного потока энергии в остром фокусе. Металинза совмещает в себе спиральную зонную пластинку Френеля с фокусным расстоянием 633 нм и 16-секторный поляризатор на основе бинарных субволновых решёток с периодом 220 нм и глубиной 130 нм и сформирована в тонкой плёнке аморфного кремния на прозрачной под-

ложке. Секторный поляризатор преобразует линейно-поляризованный Гауссов пучок в цилиндрический векторный пучок второго порядка, Гауссов пучок с правой круговой поляризацией преобразует в оптический вихрь с топологическим зарядом $m = -2$ и правой круговой поляризацией, а пучок с левой круговой поляризацией – в оптический вихрь с топологическим зарядом $m = +2$ и левой круговой поляризацией. Изготовленная металлинза обладает следующей особенностью: любой входной пучок с однородной поляризацией (линейной, правой круговой или левой круговой) после прохождения металлинзы будет формировать вблизи фокуса на оптической оси обратный поток энергии (осевая проекция вектора Пойнтинга будет отрицательная).

Изготовление металлинзы

На рис. 1а показан шаблон исследуемой металлинзы. Подробное описание расчёта такой металлинзы дано в [18]. Металлинза соединяет в себе секторную волновую пластинку со спиральной зонной пластинкой Френеля с фокусным расстоянием $f = \lambda = 633$ нм (числовая апертура $NA \sim 1$). Волновая пластинка преобразует поляризацию падающего на неё излучения в соответствии с матрицей Джонса вида

$$R(\phi) = \begin{pmatrix} \cos 2\phi & -\sin 2\phi \\ \sin 2\phi & \cos 2\phi \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где ϕ – это полярный угол в плоскости металлинзы.

В [18] было показано, что металлинза (1) преобразует линейно-поляризованную плоскую волну в цилиндрический векторный пучок второго порядка, плоскую волну с правой круговой поляризацией – в оптический вихрь с топологическим зарядом $m = -2$ и правой круговой поляризацией, а плоскую волну с левой круговой поляризацией – в оптический вихрь с топологическим зарядом $m = +2$ и левой круговой поляризацией.

Для изготовления металлинзы плёнка 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 слоем резиста ПММА толщиной 320 нм. Резист запекался при температуре 180 °С. 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 перенесён на резист с помощью электронного луча при напряжении в трубке 30 кВ. Для проявления образца использовался раствор воды и изопропанола в соотношении 3:7.

Перенос шаблона (рис. 1а) с резиста на аморфный кремний был осуществлён с помощью реактивного ионного травления с использованием газов CHF_3 и SF_6 . Аспектное отношение травления скоростей материала и резиста считалось равным 1:2,5. Изображе-

ние металлинзы, полученное с помощью электронного микроскопа, показано на рис. 1б. На рис. 1в показан увеличенный фрагмент металлинзы. Диаметр металлинзы – 30 мкм, период бинарных субволновых решёток равен 220 нм (110 нм – ширина впадин и 110 нм – ширина выступов). Глубина рельефа металлинзы совпадает с толщиной плёнки аморфного кремния и равна 130 нм. Локальные субволновые решётки заполняют 16 секторов, то есть линза поворачивает поляризацию падающего на нее света на 16 разных углов. Задержка по фазе на π между соседними зонами спиральной линзы Френеля в металлинзе на рис. 1 обеспечивается тем, что субволновые решётки в соседних зонах формируют вектора поляризации, направленные в противоположенные стороны. Поэтому угол между штрихами субволновых решёток в соседних зонах линзы Френеля равен 90 градусов. Рисунок рельефа такой металлинзы по углу похож на «шеврон», а по радиусу похож на «зигзаги».

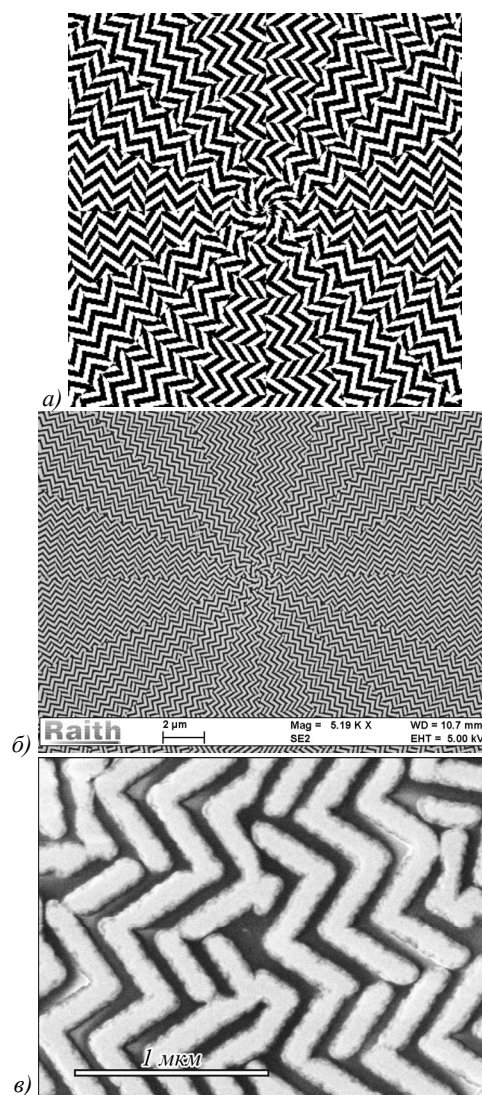


Рис. 1. Шаблон исследуемой металлинзы (а), СЭМ изображение изготовленной металлинзы (б), увеличенный фрагмент (в)

Моделирование методом конечных разностей во временной области (FDTD-метод)

Моделирование методом FDTD, реализованным в программе FullWave, показало, что металинза формирует обратный поток при освещении её светом любой поляризации: линейной, круговой правой и круговой левой. На рис. 2–4 показано распределение в фокусе (на расстоянии от металинзы 400 нм) интенсивности $I=I_x+I_y+I_z$ (рассчитывалась, как сумма квадратов амплитуд всех трёх составляющих вектора напряжённости электрического поля, усреднённых по времени в течение одного периода), продольной компоненты вектора Пойнтинга S_z и поперечной составляющей интенсивности I_x+I_y соответственно. Из рис. 2 видно, что интенсивность в фокусе имеет вид кольца (круговая поляризация) или двух максимумов (линейная поляризация). В центре кольца интенсивность ненулевая – это особенно хорошо видно по поперечной составляющей интенсивности (рис. 4). Стоит также отметить, что в отличие от металинз с непрерывным

изменением рельефа [19] секторная металинза формирует кольцо более симметричного вида – в работе [19], где численно исследуется металинза с непрерывным изменением рельефа, сечения в фокусной плоскости вдоль различных осей отличались даже по количеству боковых пиков. Из рис. 3 видно, что во всех случаях в центре картины поток энергии имеет максимальное по модулю отрицательное значение. Рис. 4 приведён для сравнения с экспериментом, так как металлический пирамидальный кантилевер, которым измеряется поле вблизи фокуса, регистрирует поперечную интенсивность света [20]. Из рис. 4 видно, что во всех случаях на оптической оси (в центре картины) интенсивность ненулевая. На рис. 5 показано распределение тех же характеристик светового поля (полная интенсивность, поперечная интенсивность и продольная проекция вектора Пойнтинга), но вдоль оси распространения z для света с правой круговой поляризацией (в силу симметрии в данном случае распределения в плоскостях XZ и YZ примерно одинаковые).

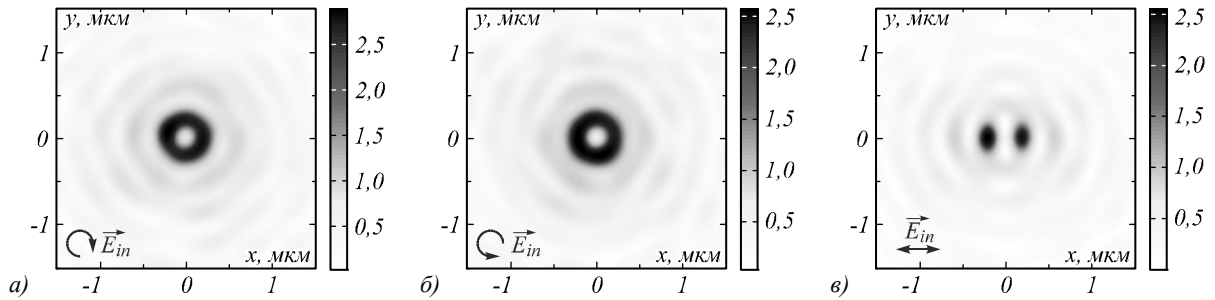


Рис. 2. Распределение (негатив) интенсивности $I=I_x+I_y+I_z$ в плоскости фокуса металинзы (рис. 1а) для падающего света с правой круговой (а), левой круговой (б) и линейной поляризацией (в)

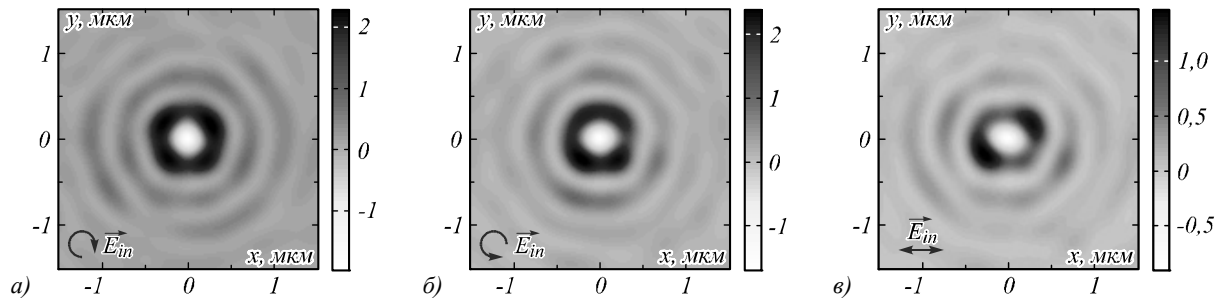


Рис. 3. Распределение (негатив) продольной компоненты вектора Пойнтинга S_z в плоскости фокуса металинзы (рис. 1а) для падающего света с правой круговой (а), левой круговой (б) и линейной поляризацией (в)

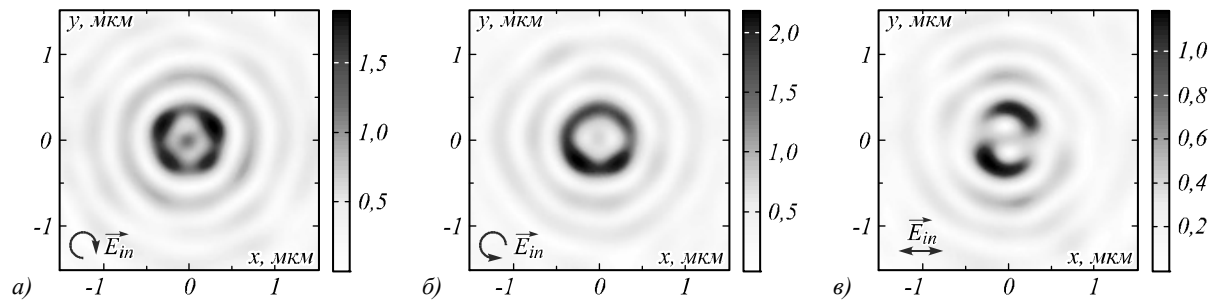


Рис. 4. Распределение (негатив) поперечной интенсивности I_x+I_y в плоскости фокуса металинзы (рис. 1а) для падающего света с правой круговой (а), левой круговой (б) и линейной поляризацией (в)

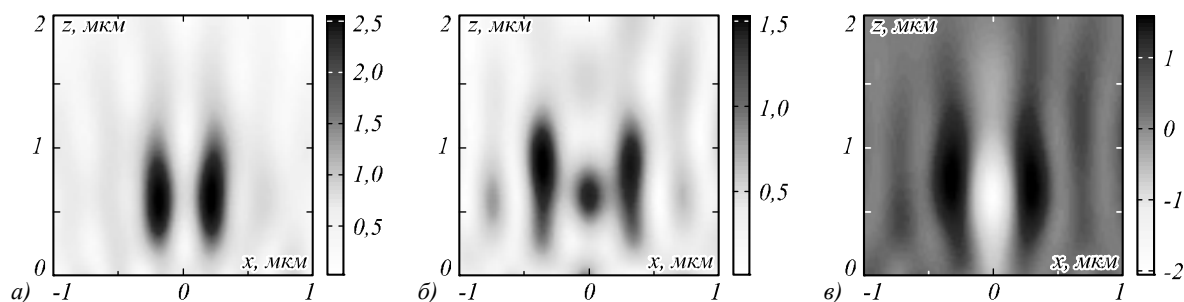


Рис. 5. Распределение (негатив) суммарной интенсивности (а), поперечной составляющей интенсивности (б) и продольной компоненты (в) вектора Пойнтинга вдоль оптической оси вблизи фокуса металлинзы (рис. 1а) для падающего света с правой круговой поляризацией

Из рис. 5 видно, что интенсивность (рис. 5а) и продольная составляющая вектора Пойнтинга (рис. 5в) в поперечной плоскости (XY) всегда имеют вид кольца. У полной интенсивности на оптической оси (рис. 5а) имеет место чередование нулевых и ненулевых значений. Продольная компонента вектора Пойнтинга на оси всегда имеет отрицательные значения (рис. 5в). У поперечной составляющей интенсивности (рис. 5б) наблюдается другой характер распре-

деления в поперечных плоскостях: происходит чередование световых колец и пиков интенсивности.

На рис. 6 показана фокусировка света с линейной поляризацией в плоскостях XZ и YZ. Из рис. 6а и рис. 6б видно, что распределение интенсивности имеет вид асимметричного кольца. Аналогичная асимметрия, хотя и в меньшей степени, наблюдается и для проекции вектора Пойнтинга.

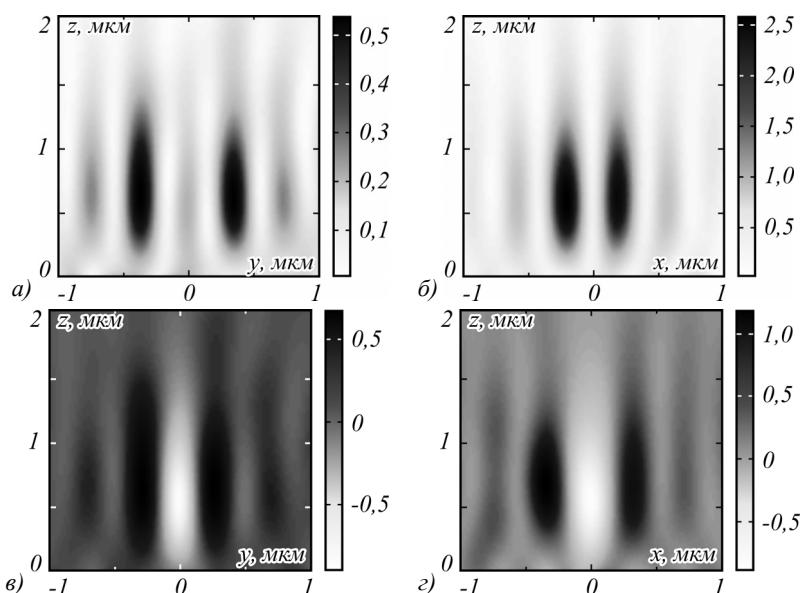


Рис. 6. Распределение (негатив) интенсивности вдоль оптической оси для металлинзы (рис. 1а) в плоскостях YZ (а) и XZ (б) и продольная проекция вектора Пойнтинга в плоскостях YZ (в) и XZ (з) при фокусировке света с линейной поляризацией вдоль оси X

Эксперимент

С помощью сканирующего ближнепольного оптического микроскопа (СБОМ) изучалась фокусировка лазерного света с помощью созданной металлинзы (рис. 1б). Схема эксперимента показана на рис. 7. В эксперименте использовался лазер, излучающий линейно-поляризованный свет с длиной волны 633 нм, пучок дополнительно чистился с помощью пинхола PH. Четвертьволновая пластинка преобразовывала линейную поляризацию в круговую. Две линзы L₁ и L₂ с фокусными расстояниями 150 мм и 10 мм фокусировали освещающий пучок, так чтобы диаметр

пучка был примерно равен диаметру металлинзы (30 мкм). Прошедшее через линзу излучение попадало в отверстие на вершине диаметром 100 нм полого пирамидального металлического кантилевера С. Прошедший через отверстие кантилевера свет фокусировался с помощью 100-кратного объектива O₁ и проходил через спектрометр S (Solar TII, Nanofinder 30) для фильтрации irrelevantного излучения, прежде чем оно зарегистрировалось CCD-камерой (Andor, DV401-BV).

Эксперимент показал, что при освещении металлинзы (рис. 1б) светом с круговой поляризацией на расстоянии 0,4–0,5 мкм формируется поперечное

распределение интенсивности в форме кольца диаметром около 800 нм (рис. 8а). При удалении от металинзы (на расстоянии 0,6–0,7 мкм) в центре кольцевого распределения интенсивности появляется локальный максимум с диаметром FWHM=0,6λ (рис. 8б), а на расстоянии 0,8–0,9 мкм снова формируется кольцевое распределение интенсивности (рис. 8в). По этому чередованию пиков и колец можно сделать вывод о соответствии распределения, полученного на СБОМ, распределению поперечной составляющей интенсивности в моделировании (рис. 5б).

На рис. 9 для удобства показаны рядом интенсивность, измеренная СБОМ (рис. 9а, в), и поперечная интенсивность, рассчитанная FDTD-методом (рис. 9б, г).

Из сравнения рис. 9а и рис. 9б видно, что диаметр кольца в эксперименте (FWHM=0,81 мкм) превышает диаметр кольца интенсивности, полученного при моделировании (FWHM=0,66 мкм). Это связано с тем, что в эксперименте диаметр металинзы (30 мкм)

был немного больше, чем диаметр падающего на неё сфокусированного Гауссова пучка с круговой поляризацией.

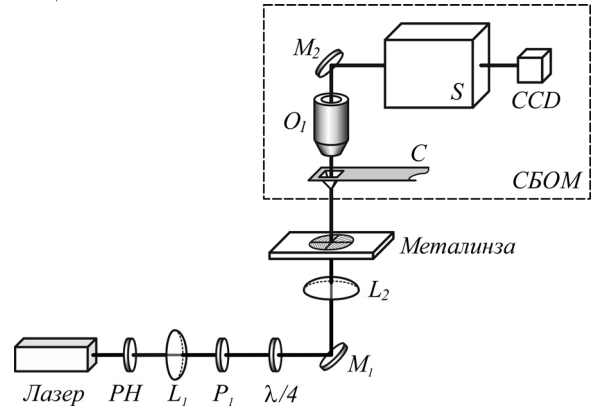


Рис. 7. Схема эксперимента. P₁ – поляризатор, L₁, L₂ – линзы, PH – пинхол, M₁, M₂ – зеркала, C – кантилевер, O₁ – 100× объектив, S – спектрометр

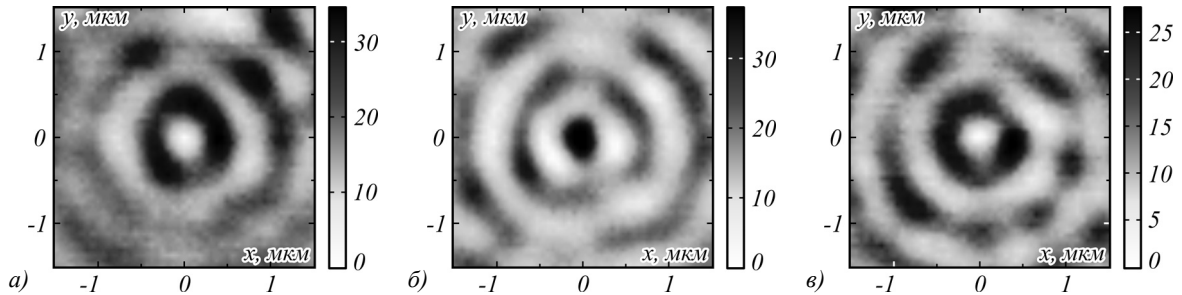


Рис. 8. Распределение (негатив) поперечной интенсивности измеренной на расстояниях 0,4 мкм (фокус) (а), 0,6 мкм (б) и 0,8 мкм (в) при освещении металинзы (рис. 1б) светом с круговой поляризацией

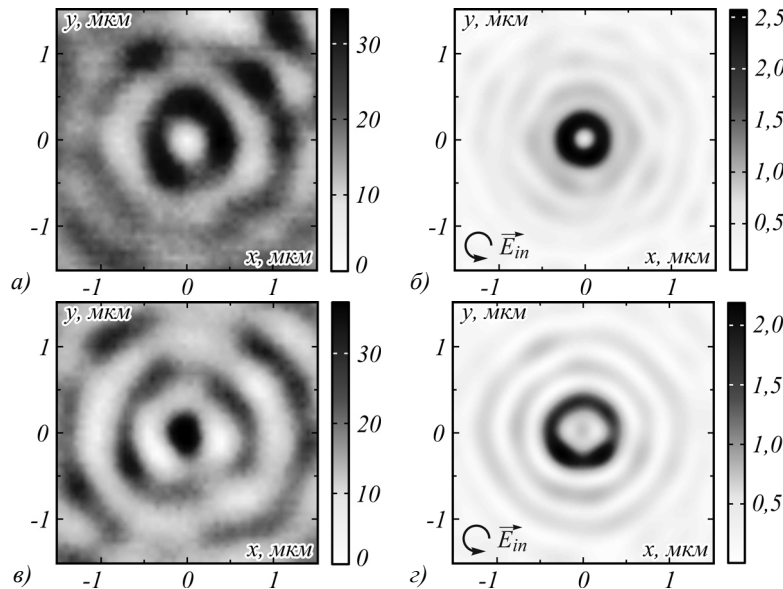


Рис. 9. Измеренные СБОМ (а, в) и рассчитанные FDTD-методом (б, г) распределения (негатив) поперечной интенсивности $I_x + I_y$ для металинзы (рис. 1) на расстоянии от неё: 0,4 мкм (фокус) (а, б) и 0,6 мкм (в, г). Металинза освещалась сфокусированным Гауссовым пучком с левой круговой поляризацией

При сравнении экспериментальных картин распределения интенсивности в фокусе металинзы (рис. 9а, в) и рассчитанных (рис. 9б, г) видно их качественное согласие. Но видно и их различие. Это раз-

личие (расчёта и эксперимента) объясняется рядом ошибок в эксперименте:

- 1) технологические ошибки при изготовлении металинзы (рис. 1б);

- 2) ошибка при формировании заданного диаметра освещающего металинзу пучка;
- 3) ошибка в измерении точного расстояния до поверхности металинзы (ошибка около 100 нм);
- 4) ошибка при измерении интенсивности с помощью кантилевера, который своим присутствием возмущает световое поле.

Качественное согласие эксперимента и расчёта на рис. 9 косвенно доказывает, что вблизи фокуса металинзы имеет место обратный поток энергии. Прямое измерение обратного потока в фокусе металинзы с помощью кантилевера невозможно, так как кантилевер не измеряет поток энергии, а измеряет поперечную интенсивность [20]. Прямое измерение обратного потока в фокусе микрообъектива с числовой апертурой 0,95 было сделано в [21].

Рассмотрим теперь фокусировку света с линейной поляризацией. Распределение интенсивности в фокусе (на расстоянии 0,4 мкм от металинзы), измеренное на СБОМ для данного случая, приведено на рис. 10а.

Из рис. 10 видно, что наблюдается распределение интенсивности в виде двух пиков (расстояние между пиками интенсивности на рис. 10а равно 0,87 мкм), при этом в центре интенсивность ненулевая. Для более детального сравнения на рис. 11 показаны сечения поперечной интенсивности на расстоянии 0,4 мкм от металинзы (рис. 1) вдоль оси Y, измеренные на СБОМ (рис. 10а) и рассчитанные FDTD-методом (рис. 10б). Из сравнения данных эксперимента и расчёта на рис. 10 и 11 видно их качественное согласие. Различие между теорией и экспериментом объясняется тем, что измерение интенсивности с помощью кантилевера вносит некоторое возмущение в измеряемое световое поле. Качественное совпадение распределений поперечной интенсивности, измеренной в эксперименте и рассчитанной FDTD-методом, косвенно доказывает, что при освещении металинзы (рис. 1) светом с линейной поляризацией в фокусе металинзы вблизи оптической оси имеет место обратный поток энергии.

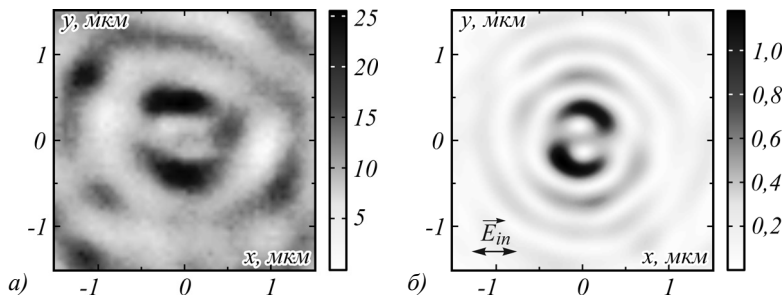


Рис. 10. Поперечные распределения (негатив) интенсивности в фокусе металинзы (рис. 1) на расстоянии 0,4 мкм от её поверхности, измеренные на СБОМ (а) и рассчитанные FDTD-методом (б). Металинза освещалась сфокусированным Гауссовым пучком с линейной поляризацией, направленной вдоль оси X

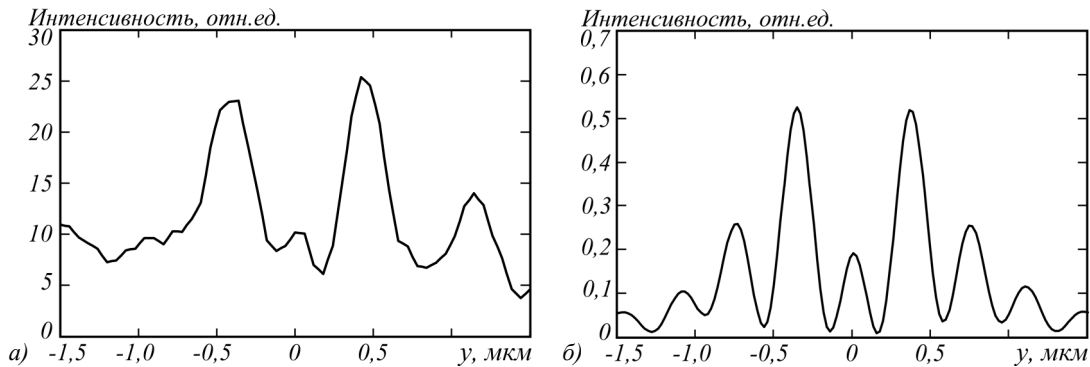


Рис. 11. Сечение поперечной интенсивности (негатив) в фокусе вдоль оси Y, измеренное на СБОМ (рис. 10 а) (а) и рассчитанное FDTD-методом (рис. 10 б) (б)

Заключение

В данной работе исследовалась высокоапертурная металинза, созданная по технологии электронной литографии и ионного травления в тонкой плёнке аморфного кремния и предназначенная для формирования обратного потока энергии в остром фокусе. Такая металинза создана и исследуется впервые. Её особенность в том, что любой входной пучок с однородной поляризацией (линейной, правой круговой

или левой круговой) после прохождения металинзы формирует вблизи фокуса на оптической оси обратный поток энергии. Металинза имеет диаметр 30 мкм и совмещает в себе спиральную зонную пластинку Френеля с фокусным расстоянием, равным длине волны света 633 нм (в эксперименте фокус находился на расстоянии около 400 нм), и 16-секторный поляризатор на основе бинарных субволновых решёток с периодом 220 нм в тонкой плёнке аморфного кремния. Секторный поляризатор преобразует свет с линейной

поляризацией в цилиндрический векторный пучок второго порядка, а свет с правой (левой) круговой поляризацией в оптический вихрь с топологическим зарядом $m = -2$ ($m = 2$) и правой (левой) круговой поляризацией.

Измерения интенсивности вблизи поверхности металинзы были сделаны с помощью СБОМ с полым пирамидальным кантилевером с отверстием в вершине диаметром около 100 нм. Экспериментально было показано, что при освещении металинзы светом с круговой поляризацией в фокусе наблюдается кольцо, а при фокусировке света линейной поляризации – два пика интенсивности. Экспериментальные картины интенсивности качественно согласуются с картинами поперечной интенсивности, рассчитанными FDTD-методом. Это соответствие измеренной и рассчитанной поперечной интенсивности в фокусе позволяет утверждать, что изготовленная металинза «работает» правильно и в фокусе такой металинзы и для линейной, и для круговой поляризации должен формироваться обратный поток энергии.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в частях «Введение» и «Заключение», Российского научного фонда (проект № 18-19-00595) в части «Эксперимент», Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ (№ 18-29-20003) в части «Моделирование» и гранта Марии Кюри (№ 749143) в части «Изготовление металинзы».

Литература

1. **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.
2. **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. – 7069.
3. **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.
4. **Ni, X.** Ultra-thin, planar, Babinet-inverted plasmonic metalenses / X. Ni, S. Ishii, A.V. Kildishev, V.M. Shalaev // *Light Science and Applications*. – 2013. – Vol. 2, Issue 4. – e72.
5. **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.
6. **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.
7. **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*. – 2017. – Vol. 27. – P. 32-41. – DOI: 10.1016/j.photonics.2017.09.001.
8. **Kotlyar, V.** Subwavelength grating-based spiral metalens for tight focusing of laser light / 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.
9. **Yu, Y.** Engineering of multi-segmented light tunnel and flat-top focus with designed axial lengths and gaps / Y. Yu, H. Huang, M. Zhou, Q. Zhan // *Optics Communications*. – 2018. – Vol. 407. – P. 398-401.
10. **Zheng, C.** Characterization of the focusing performance of axial line-focused spiral zone plates / C. Zheng, S. Su, H. Zang, Z. Ji, Y. Tian, S. Chen, K. Mu, L. Wei, Q. Fan, C. Wang, X. Zhu, C. Xie, L. Cao, E. Liang // *Applied Optics*. – 2018. – Vol. 57, Issue 14. – P. 3802-3807.
11. **Lin, J.** Generation of longitudinally polarized optical chain by 4π focusing system / J. Lin, R. Chen, P. Jin, M. Cada, Y. Ma // *Optics Communications*. – 2015. – Vol. 340. – P. 69-73.
12. **Yu, Y.** Generation of uniform three-dimensional optical chain with controllable characteristics / Y. Yu, Q. Zhan // *Journal of Optics*. – 2015. – Vol. 17, Issue 10. – 105606.
13. **Wang, X.** Generation of equilateral-polygon-like flat-top focus by tightly focusing radially polarized beams superposed with off-axis vortex arrays / X. Wang, B. Zhu, Y. Dong, S. Wang, Z. Zhu, F. Bo, X. Li // *Optics Express*. – 2017. – Vol. 25, Issue 22. – P. 26844-26852.
14. **Chen, H.** Demonstration of flat-top focusing under radial polarization illumination / H. Chen, S. Tripathi, K.C. Toussaint // *Optics Letters*. – 2014. – Vol. 39, Issue 4. – P. 834-837.
15. **Kotlyar, V.V.** Reverse and toroidal flux of light fields with both phase and polarization higher-order singularities in the sharp focus area / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, A.A. Kovalev // *Optics Express*. – 2019. – Vol. 27, Issue 12. – P. 16689-16702. – DOI: 10.1364/OE.27.016689.
16. **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.
17. **Stafeev, S.S.** The non-vortex inverse propagation of energy in a tightly focused high-order cylindrical vector beam / S.S. Stafeev, V.V. Kotlyar, A.G. Nalimov, E.S. Kozlova // *IEEE Photonics Journal*. – 2019. – Vol. 11, Issue 4. – 2921669. – DOI: 10.1109/JPHOT.2019.2921669.
18. **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.
19. **Degtyarev, S.** Metasurfaces with continuous ridges for inverse energy flux generation / S. Degtyarev, D. Savelyev, S. Khonina, N. Kazanskiy // *Optics Express*. – 2019. – Vol. 27, Issue 11. – P. 15129-15135. – DOI: 10.1364/OE.27.015129.
20. **Kotlyar, V.V.** Analysis of the shape of a subwavelength focal spot for the linear polarized light / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, Y. Liu, L. O'Faolain, A.A. Kovalev // *Applied Optics*. – 2013. – Vol. 52, Issue 3. – P. 330-339. – DOI: 10.1364/AO.52.000330.
21. **Kotlyar, V.V.** Mechanism of formation of an inverse energy flow in a sharp focus / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, A.G. Nalimov, A.A. Kovalev, A.P. Porfirev // *Physical Review A*. – 2020. – Vol. 101, Issue 3. – 033811. – DOI: 10.1103/PhysRevA.101.033811.

Сведения об авторах

Сведения об авторах **Котляр Виктор Викторович** и **Стафеев Сергей Сергеевич** – см. стр. 690 этого номера.

О’Фаолейн Лиам (Уильям Веллан-Куртин) 1979 года рождения, занимает позицию лектора в Технологическом Институте города Корк (Ирландия). 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 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 окончила с отличием физический факультет Самарского государственного университета в 2001 году. Получила степень доктора философии в Университете Сент-Эндрюса, Шотландия, в 2005 году. Занимала три постдокторские должности в Университете Сент-Эндрюса, занимаясь вопросами поляризационных ротаторов, синих светодиодов и элементов дифракционной оптики. Затем сделала перерыв в карьере, чтобы растить своих детей. Переехав в Ирландию, выиграла стипендию имени Марии Склодовской–Кюри и начала работать в качестве научного сотрудника в Технологическом институте Корка с 2019 года. E-mail: Maria.Kotlyar@cit.ie.

ГРНТИ: 29.31.01

Поступила в редакцию 21 апреля 2020 г. Окончательный вариант – 29 июня 2020 г.

High numerical aperture metalens to generate an energy backflow

V.V. Kotlyar^{1,2}, S.S. Stafeev^{1,2}, L. O'Faolain³, M.V. Kotlyar³

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

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

³ Tyndall National Institute, Cork T12R5CP, Ireland

Abstract

Using electronic beam lithography and reactive ion beam etching, a metalens is manufactured in a thin layer of amorphous silicon of a 130-nm depth, a 30- μm diameter, and a 633-nm focal length (equal to the illumination wavelength). The metalens is composed of 16 sectorized subwavelength binary gratings with a 220-nm period. The uniqueness of this metalens is that when illuminated by left-handed circularly polarized light, it is capable of generating a left-handed circularly polarized vortex beam with a topological charge of 2, generating a second-order cylindrical vector beam when illuminated by linearly polarized light. Both for linear and circular incident polarization, an energy backflow is found to be generated in the vicinity of the tight focus. Transverse intensity distributions measured with a scanning near-field optical microscope near the focus of the metalens are in qualitative agreement with the intensity distributions calculated by the FDTD method. This confirms that a backward energy flow takes place at the focus of the metalens. A metalens generating an energy backflow near its focus is fabricated and characterized for the first time.

Keywords: metalens, subwavelength grating, energy backflow.

Citation: Kotlyar VV, Stafeev SS, O'Faolain L, Kotlyar MV. High numerical aperture metalens for the formation of energy backflow. *Computer Optics* 2020; 44(5): 691-698. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-742.

Acknowledgements: This work was financially supported by the RF Ministry of Science and Higher Education within a government project of FSRC «Crystallography and Photonics» RAS ("Introduction" and "Conclusions"), the Russian Science Foundation under project No. 18-19-00595 ("Experiment"), the Russian Foundation for Basic Research under project No. 18-29-2003 ("Numerical simulation"), and the Maria Sklodovske-Curie TERRIFIC grant (#749143) ("Manufacturing of the metalens").

References

- [1] 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.
 - [2] 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.
 - [3] 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.
 - [4] Ni X, Ishii S, Kildishev A V., Shalaev VM. Ultra-thin, planar, Babinet-inverted plasmonic metalenses. *Light Sci Appl* 2013; 2(4): e72.
 - [5] West PR, Stewart JL, Kildishev AV, Shalaev VM, Shkunov VV, Strohkendl F, Zakharenkov YA, Dodds RK, Byren R. All-dielectric subwavelength metasurface focusing lens. *Opt Express* 2014; 22(21): 26212-26221.
 - [6] Lin D, Fan P, Hasman E, Brongersma ML. Dielectric gradient metasurface optical elements. *Science* 2014; 345(6194): 298-302.
 - [7] Stafeev SS, Kotlyar VV., Nalimov AG, Kotlyar MV, O'Faolain L. Subwavelength gratings for polarization conversion and focusing of laser light. *Photonics Nanostruct* 2017; 27: 32-41. DOI: 10.1016/j.photonics.2017.09.001.
 - [8] Kotlyar V, Stafeev SS, Nalimov AG, O'Faolain L. Subwavelength grating-based spiral metalens for tight focusing of laser light. *Appl Phys Lett* 2019; 114(14): 141107. DOI: 10.1063/1.5092760.
 - [9] Yu Y, Huang H, Zhou M, Zhan Q. Engineering of multi-segmented light tunnel and flat-top focus with designed axial lengths and gaps. *Opt Commun* 2018; 407: 398-401.
 - [10] Zheng C, Su S, Zang H, Ji Z, Tian Y, Chen S, Mu K, Wei L, Fan Q, Wang C, Zhu X, Xie C, Cao L, Liang E. Characterization of the focusing performance of axial line-focused spiral zone plates. *Appl Opt* 2018; 57(14): 3802-3807.
 - [11] Lin J, Chen R, Jin P, Cada M, Ma Y. Generation of longitudinally polarized optical chain by 4π focusing system. *Opt Commun* 2015; 340: 69-73.
 - [12] Yu Y, Zhan Q. Generation of uniform three-dimensional optical chain with controllable characteristics. *J Opt* 2015; 17(10): 105606.
 - [13] Wang X, Zhu B, Dong Y, Wang S, Zhu Z, Bo F, Li X. Generation of equilateral-polygon-like flat-top focus by tightly focusing radially polarized beams superposed with off-axis vortex arrays. *Opt Express* 2017; 25(22): 26844- 26852.
 - [14] Chen H, Tripathi S, Toussaint KC. Demonstration of flat-top focusing under radial polarization illumination. *Opt Lett* 2014; 39(4): 834-837.
 - [15] Kotlyar VV, Stafeev SS, Kovalev AA. Reverse and toroidal flux of light fields with both phase and polarization higher-order singularities in the sharp focus area. *Opt Express* 2019; 27(12): 16689-16702. DOI: 10.1364/OE.27.016689.
-

- [16] 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.
- [17] Stafeev SS, Kotlyar VV, Nalimov AG, Kozlova ES. The non-vortex inverse propagation of energy in a tightly focused high-order cylindrical vector beam. *IEEE Photonics J* 2019; 11(4): 2921669. DOI: 10.1109/JPHOT.2019.2921669.
- [18] Kotlyar VV, Nalimov AG, Stafeev SS, 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.
- [19] Degtyarev S, Savelyev D, Khonina S, Kazanskiy N. Metasurfaces with continuous ridges for inverse energy flux generation. *Opt Express* 2019; 27(11): 15129-15135. DOI: 10.1364/OE.27.015129.
- [20] Kotlyar VV, Stafeev SS, Liu Y, O'Faolain L, Kovalev AA. Analysis of the shape of a subwavelength focal spot for the linear polarized light. *Appl Opt* 2013; 52(3): 330-339. DOI: 10.1364/AO.52.000330.
- Kotlyar VV, Stafeev SS, Nalimov AG, Kovalev AA, Porfiriev AP. Mechanism of formation of an inverse energy flow in a sharp focus. *Phys Rev A* 2020; 101(3): 033811. DOI: 10.1103/PhysRevA.101.033811.

Authors' information

Victor Victorovich Kotlyar is a head of Laboratory at the Image Processing Systems Institute (Samara) of the Russian Academy of Sciences – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS and professor of Computer Science department at Samara National Research University. He received his MS, PhD and DrSc degrees in Physics and Mathematics from Samara State University (1979), Saratov State University (1988) and Moscow Central Design Institute of Unique Instrumentation, the Russian Academy of Sciences (1992). He is SPIE- and OSA-member. He is coauthor of 300 scientific papers, 5 books and 7 inventions. His current interests are diffractive optics, gradient optics, nanophotonics, and optical vortices. E-mail: kotlyar@smr.ru.

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. ORCID: 0000-0002-7008-8007. E-mail: sergey.stafeev@gmail.com.

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 Microphonic 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 graduated from Samara State University, Russia with a first-class honours diploma in Physics in 2001. She obtained her Ph.D. from the University of St. Andrews, Scotland in 2005. She held three postdoctoral positions at the University of St. Andrews working on polarization rotators, blue light emitting diodes and diffractive optics elements. Then she took a career break to raise her children. On moving to Ireland, she won a Marie Skłodowska-Curie fellowship and started working in CAPPA in April 2018. She currently works as a postdoctoral researcher at the Cork Institute of Technology. E-mail: Maria.Kotlyar@cit.ie.

Received April 21, 2020. The final version – June 29, 2020.
