

Управление ближнепольной фокусировкой мезоразмерной бинарной фазовой пластинки в поле оптического излучения с круговой поляризацией

Ю.Э. Гейнц¹, О.В. Минин^{2,3}, Е.К. Панина¹, И.В. Минин^{2,3}

¹ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,
634055, Россия, г. Томск, площадь Академика Зуева, д. 1,

² Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
630108, Россия, г. Новосибирск, Плеханового, д. 10,

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, Ленина, д. 30

Аннотация

Бинарные зонные пластики Френеля являются одними из наиболее часто используемых фокусирующих элементов плоскостных оптических схем в микро- и нанопотонике. При уменьшении диаметра и фокального расстояния зонных пластин до мезоволновых размеров на параметры области фокусировки начинают существенно влиять особенности конструктивного дизайна зонных пластин (материал, толщина, глубина рельефа). Путём численного ФЕМ-моделирования прохождения оптической волны через бинарную фазовую зонную пластину исследована пространственная структура формирующегося в ближнем поле фокуса. Показано, что существует диапазон оптимальной глубины травления канавок пластинки, а также толщин подложки, при которых реализуется наилучшая фокусировка падающей оптической волны в плане максимальной интенсивности поля и минимального размера фокального пятна. Кроме того, предложен концепт суперфокусирующей бинарной фазовой зонной пластинки с иммерсионным слоем в форме усечённого конуса из материала зонной пластинки, что позволило численно реализовать фокусировку циркулярно поляризованного излучения света в субдифракционное пятно с полушириной порядка $\lambda/2n$ (n – показатель преломления зонной пластинки).

Ключевые слова: бинарная зонная пластинка, ближнепольная фокусировка, численное моделирование.

Цитирование: Гейнц, Ю.Э. Управление ближнепольной фокусировкой мезоразмерной бинарной фазовой пластинки в поле оптического излучения с круговой поляризацией / Ю.Э. Гейнц, О.В. Минин, Е.К. Панина, И.В. Минин // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45, № 4. – С. 512-519. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-878.

Citation: Geints YE, Minin OV, Panina EK, Minin IV. Controlling near-field focusing of a mesoscale binary phase plate in an optical radiation field with circular polarization. Computer Optics 2021; 45(4): 512-519. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-878.

Введение

В связи с миниатюризацией элементов фотоники при стремлении увеличить разрешение фокусирующих устройств вплоть до субдифракционного, в последние годы отмечается повышение интереса к исследованию дифракционных оптических элементов в виде зонных пластинок Френеля (ЗП) с высокой числовой апертурой $NA \sim 1$. Такие дифракционные элементы фокусируют падающий свет вблизи своей теневой поверхности в области ближнего оптического поля, где, помимо уходящего излучения, присутствуют также и поверхностные затухающие (эванесцентные) волны. Конструктивная интерференция уходящих и эванесцентных волн может привести к формированию сингулярностей оптической фазы и возникновению так называемых суперосцилляций поля [1], что способно уменьшить диаметр фокусного пятна ниже дифракционного предела [2]. Преодоление ди-

фракционного предела линз также актуально в оптической литографии [3], оптической микроманипуляции и оптических системах памяти [4, 5]. Отметим, что преодоление трёхмерного дифракционного предела становится возможным для дифракционных элементов, выполненных на криволинейной поверхности [6], однако практическая реализация таких фокусирующих схем усложнена.

Экспериментальные исследования фазовых зонных пластинок на подложке из плавленого кварца с различной числовой апертурой от 0,7 до 0,9, изготовленных с использованием литографии с электронно-лучевым сканированием и технологии мокрого хромирования, были описаны в [7]. Для ЗП с числовой апертурой $NA=0,7$ на длине волны 400 нм измеренное разрешение составило около 300 нм. В [8] получено фокальное пятно шириной $0,33\lambda$ (λ – длина волны падающего излучения), а в работе [9] численно показана возможность фокусировки в фокальное пят-

но диаметром $0,52\lambda$ с помощью простой фазовой ЗП. В [10, 11] численно и экспериментально было показано, что линейно-поляризованное излучение с длиной волны $\lambda = 633$ нм может быть сфокусировано с помощью френелевской ЗП с субволновым фокусным расстоянием 0,5 мкм. Экспериментально наблюдалось эллиптическое фокусное пятно с наименьшей шириной 0,63 λ . В [12, 13] теоретически и экспериментально впервые было показано, что для зонной пластины с высокой числовой апертурой и фокусным расстоянием, меньшим длины волны, достигается разрешение около трети длины волны для линейно-поляризованного излучения, при этом реальный и расчётный (геометрооптический) фокус не совпадают.

Необходимо отметить, что, когда свет фокусируется с помощью ЗП с высокой числовой апертурой, структура и симметрия фокального пятна существенно зависят от состояния поляризации падающей волны [14, 15, 16]. Например, остро сфокусированный пучок с линейной поляризацией создает эллиптическое фокусное пятно [12, 17], а использование радиально-поляризованного света позволяет получить фокальное пятно с размерами меньшими, чем при фокусировке линейно-поляризованного света [18].

Следует отметить, что, поскольку структура периферийной части зонной пластинки с коротким фокусом приближается к виду бинарного аксикона, особенно, указанные выше, справедливы и для аксиконов [19–21].

В то же время для ряда практических приложений бывает важно получить в фокальной плоскости осесимметричное распределение интенсивности поля, не зависящее от плоскости поляризации освещающей оптической волны. В этом случае целесообразно использовать излучение с круговой поляризацией, когда в формировании области фокусировки равноправно участвуют обе ортогональные компоненты поля. Но следует учитывать, что, исходя из принципа неопределённости Гейзенберга, можно утверждать, что пространственное разрешение ЗП, облучаемой излучением с круговой поляризацией, всегда ожидается хуже, чем в случае использования линейной или радиальной поляризации. Поэтому разработка методов получения высокого разрешения в случае круговой поляризации представляется актуальным.

Тенденция развития фокусирующих элементов микрофотоники в направлении плоскостной плёночной геометрии (2D-фотоника [22]), востребованных в разнообразных современных схемах оптической микрофлюидики и «лаборатория-на-чипе» устройствах [23, 24], выдвигает на первый план исследования по оптимальному конструктивному дизайну плоскостных линзовых метаструктур. Основные требования к таким зонным оптическим концентраторам – это максимально резкий и интенсивный фокус при минимально возможном вертикальном рельефе зон. По причине миниатюрных размеров для этих целей чаще

всего используются бинарные зонные пластинки Френеля, которые выполняются в виде системы концентрических канавок прямоугольного сечения, вытравленных в тонкой диэлектрической или металлической плёнке [25, 26].

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования бинарных фазовых френелевских ЗП мезоволнового размера и большим апертурным углом ($NA \sim 1$) с целью оптимизации их фокусирующих характеристик. В процессе моделирования основное внимание было уделено изучению влияния глубины микрорельефа зон и толщины плёночной подложки на параметры фокуса ЗП. Как удалось установить, наиболее резкая фокусировка оптической волны вблизи ЗП достигается при глубине микрорельефа соседних френелевских зон, изменяющейся в диапазоне от четверти волны до полуволны внутри фазовой ступеньки. Для повышения пространственного разрешения области фокуса предложен оригинальный дизайн перевёрнутой фазовой ЗП с коническим иммерсионным слоем (ИЗП), что позволило реализовать фокусировку света в пятно с полушириной существенно ниже дифракционного предела.

Фокусировка излучения ЗП на базе диэлектрической пластинки

Рассмотрим следующую геометрию задачи (рис. 1а). Моделируемая фазовая зонная пластинка Френеля представляет собой диэлектрический цилиндр кругового сечения толщиной D , в котором нарезаны (вытравлены) концентрические канавки прямоугольного профиля глубиной d_e . Диэлектрическая матрица считается непоглощающей в оптическом диапазоне волн, её показатель преломления обозначен как n_1 , а сама пластинка находится в воздухе с показателем преломления $n_0 = 1$. Со стороны подложки ЗП освещается циркулярно поляризованным излучением с плоским волновым фронтом с длиной волны λ .

Радиусы зон пластинки Френеля r_q вычисляются по известной формуле (см., например, [12, 27]):

$$r_q = \sqrt{q f_d \lambda + (q \lambda / 2)^2}, \quad q = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

что обеспечивает сдвиг фазы волны в π радиан на границах соседних зон. Здесь f_d – расчётный фокус ЗП. Для определённости, в дальнейшем будем рассматривать ЗП с большой числовой апертурой $NA = n_0 [1 + (f_d / r_N)^2]^{-1/2} \sim 1$, состоящей из пяти зон и с $f_d = \lambda$, в поле монохроматической волны с $\lambda = 500$ нм. Заметим, что ранее амплитудные и фазовые бинарные ЗП Френеля с фокусным расстоянием меньше длины волны излучения или равной использовались для повышения дифракционной эффективности субволновой фокусировки вплоть до $\lambda / 3$ [6, 12].

Электродинамическая задача о дифракции оптической волны на диэлектрической структуре моделировалась в рамках численного решения волнового

уравнения для векторов поля в осесимметричной пространственной геометрии с помощью метода конечных элементов (FEM), реализованного в компьютерном пакете COMSOL Multiphysics (ver. 5.2a). Оптическая волна, освещающая микроструктуру, имела начальную амплитуду 1 В/м и распространялась в направлении волнового вектора \mathbf{k} по нормали к плоскости ЗП. Сеточная дискретизация расчётной области производилась FEM-решателем автоматически при заданном максимальном размере треугольного сеточного элемента $\lambda / (25 \times n_1)$. Как отмечено выше, ЗП располагалась в воздухе и окружалась системой идеально поглощающих цилиндрических слоёв (PML) для реализации условий свободного излучения на внешних границах расчётного домена.

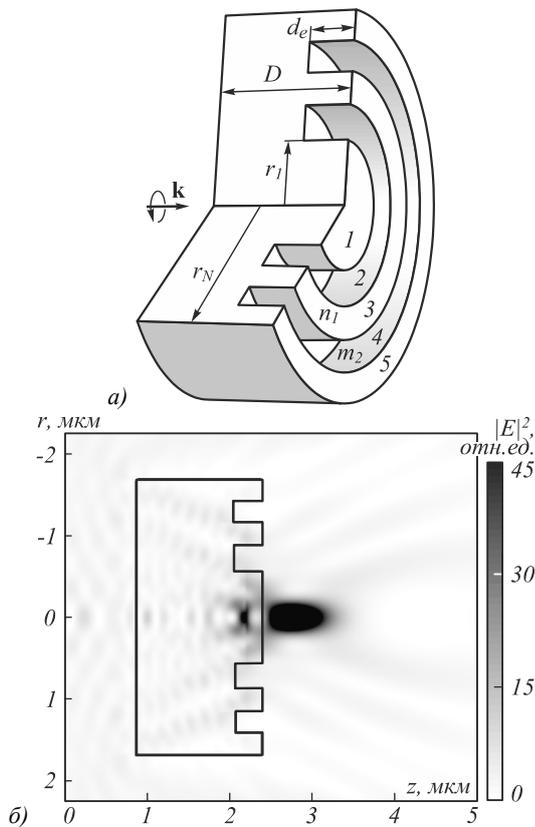


Рис. 1. COMSOL-модель пятизонной фазовой пластинки (пронумерованы красными цифрами) толщиной D , глубиной канавок d_e , вырезанных в диэлектрике с показателем преломления n_1 (а); пространственный профиль интенсивности оптического поля $|E|^2$ при освещении кварцевой ЗП излучением с круговой поляризацией со стороны подложки (б)

Для примера на рис. 1б показано двумерное пространственное распределение квадрата нормированного электрического поля $|E|^2$ (интенсивности) вблизи 5-зонной фазовой пластинки, изготовленной из плавленого кварца (SiO_2) с $n_1 = 1,5$ и имеющей следующие размерные параметры: $D = 1,5$ мкм, $d_e = 300$ нм, $f_d = 500$ нм, что соответствует числовой апертуре $NA = 0,8$. Поперечный и продольный профили интенсивности показаны на рис. 2а и рис. 2б соответственно.

Как видно, область фокусировки мезоволновой ЗП имеет высокую пиковую интенсивность $I_m \equiv \max\{|E|^2\} = 45,9$ и достаточно компактные пространственные размеры: глубину фокуса $DOF = 587$ нм, т.е. порядка $1,2\lambda$, и субволновую поперечную полуширину $w = 301$ нм, что составляет $\sim 0,6\lambda$. Реальное фокусное расстояние ЗП f равняется $0,574$ нм, т.е. несколько больше расчётного значения $f_d = \lambda$.

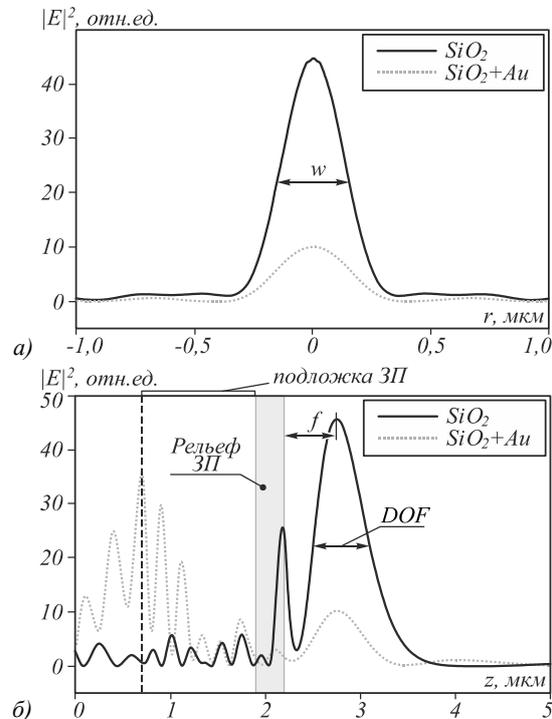


Рис. 2. Поперечный (а) и продольный (б) профили интенсивности оптического поля при освещении фазовой (сплошные кривые) и амплитудной ЗП (пунктирные кривые) циркулярно поляризованным излучением

Этот факт хорошо известен и связан с тем, что для фазовой ЗП характерно не гашение, а утилизация чётных (нечётных) π -смещённых зон. Таким образом, оптическое поле от них приходит в зону фокуса в фазе с полем от нечётных (чётных) зон. Очевидно, оптимальный фазовый сдвиг $\delta\phi$ соседних зон должен составлять как раз π , что достигается определённым выбором глубины канавки [29]. Тогда, с учётом возможного заполнения канавок буферным материалом, имеем выражение для определения требуемой глубины канавки d_e^* фазовой ЗП:

$$d_e^* = \lambda \left[2(n_1 - \text{Re}\{m_2\}) \right]^{-1}. \quad (2)$$

Рассуждая аналогичным образом, получим, что оптимальная фокусировка будет наблюдаться также для всех глубин канавок пластинки с $d_{ep}^* = (2p - 1)d_e^*$, где $p = 1, 2, \dots$ – целые числа. Следует отметить: несмотря на то, что выражения (1) и (2) получены из геометрикооптических соображений и не учитывают волновую природу дифракции света, которая особенно ярко проявляется при масштабах рассеивателей,

сравнимых с длиной волны излучения, эти выражения хорошо работают даже для субволновых значений фокусного расстояния [12].

Зависимость параметров области фокуса показана на рис. 3а, б для ЗП, изготовленной из кристаллического оксида титана (TiO₂) и имеющей показатель преломления $n_1 = 2,71$ на длине волны 500 нм [30]. По оси абсцисс на данном рисунке отложен дополнительный фазовый сдвиг волны $\Delta\phi_e = \pi d_e/d_e^*$ соседних зон, возникающий за счёт наличия фазовой ступеньки.

Как видно из рис. 3, выражение (2) достаточно точно предсказывает положение двух главных максимумов в функциональной зависимости $I_m(\Delta\phi_e)$, которые наблюдаются вблизи значений фазового сдвига $\Delta\phi_e = \pi$ и 3π , и провала при $\Delta\phi_e = 2\pi$. При этом пиковые значения фокальной интенсивности обеих ЗП примерно в три раза выше аналогичной величины, реализующейся при использовании амплитудной ЗП, когда чётные зоны диэлектрической матрицы TiO₂ закрыты золотым напылением. Значения рассматриваемых параметров фокуса такой амплитудной ЗП отмечены на рисунках штриховыми линиями соответствующих цветов.

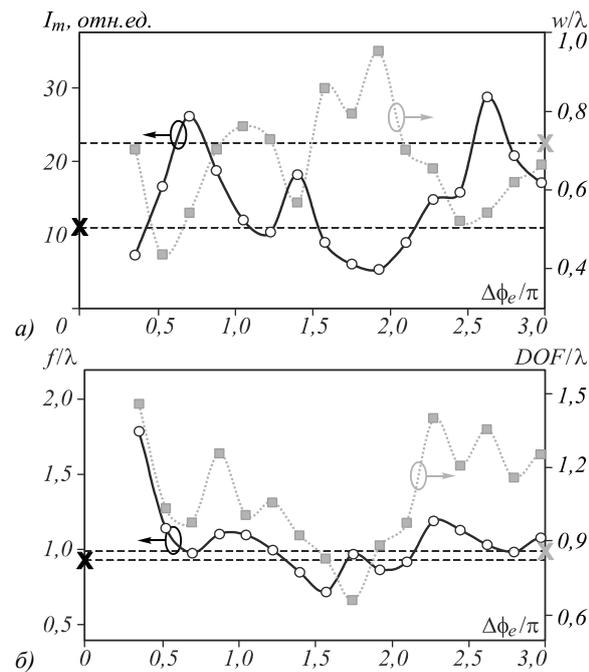


Рис. 3. Зависимость параметров фокуса ЗП от фазового сдвига ступенек $\Delta\phi_e$: пиковая интенсивность I_m и поперечная полуширина w (а), фокусное расстояние f и глубина фокуса DOF (б). Штриховыми черными и серыми линиями показаны соответствующие значения для амплитудной ЗП с золотым напылением

Что касается масштабных параметров пятна фокусировки мезоволновых фазовых ЗП, то в целом их поведение с изменением фазового сдвига $\Delta\phi_e$ укладывается в рамки векторной дифракционной теории субволновых фазовых ЗП, представленной, например, в [27, 31]. Так, поперечный размер фокуса w (рис. 3а) принимает минимальные значения $w < \lambda/2$ в области

фазовых сдвигов, соответствующих главным максимумам интенсивности, и резко повышается практически до уровня $w = \lambda$ в диапазоне величин $\Delta\phi_e \approx 2\pi$, дающих деструктивную интерференцию поля соседних фазовых зон пластинки. Эта величина меньше теоретического предела пространственного разрешения амплитудной ЗП [32], радиусы зон которой рассчитывались в параксиальном приближении (без учёта квадратичного члена в (1)): $w^* = 2\pi n_1^2/r_N$, который для рассматриваемой геометрии составляет: $w^* \approx 0,6\lambda$.

Кроме того, из рис. 3б следует, что реально наблюдаемый фокус пластинки f сначала располагается дальше, чем его расчётное значение f_d , и становится близким к нему только при $\Delta\phi_e \geq \pi$, демонстрируя осцилляции около уровня $f = \lambda$. Характер зависимости глубины фокуса DOF , определённого по половинной интенсивности, от фазового сдвига ступенек (рис. 3б) повторяет аналогичное поведение фокусного расстояния. Значения DOF варьируют примерно от полутора длин волн до полуволны в рассматриваемом диапазоне изменения глубины канавок пластинки d_e .

Важно отметить, что при слишком мелком рельефе ступенек пластинки $d_e \ll \lambda/2n_1$ аномальная удалённость и протяжённость фокуса связана не столько с наличием фазовых зон, сколько с ближнепольной фокусировкой оптической волны самой цилиндрической диэлектрической матрицей. Зонная структура начинает «работать» только при $\Delta\phi_e > \pi/2$. Немонотонный характер зависимости параметров ЗП от глубины травления указывает на проявление структурных резонансов, которые могут возбуждаться внутри ЗП и модифицировать пространственную структуру ближнего поля рассеяния. Очевидно, что сама цилиндрическая подложка пластинки может быть рассмотрена как мезоразмерная резонансная полость типа плоскопараллельного резонатора Фабри–Перо, который поддерживает множество собственных электромагнитных мод с длинами волн $\lambda_j = 2D/j$, где j – целые числа.

Действительно, как следует из рис. 4, при изменении толщины подложки D интенсивность в области фокуса демонстрирует эквидистантные экстремумы. Максимумы фокальной интенсивности расположены вблизи значений толщины, кратной $\lambda_1/2 = \lambda n_1/2$, а минимумы смещены на четверть волны. Наличие рельефа на поверхности диэлектрической пластинки в виде цилиндрических канавок приводит к усложнению структуры собственных колебаний подложки. Важно, что положение фокуса ЗП f при изменении толщины подложки варьирует достаточно слабо, в пределах 20% около расчётной величины f_d , а само фокальное пятно остается субволновым, $w \approx \lambda/2$.

Фокусировка излучения фазовой ЗП с иммерсионным слоем

Подложка ЗП может быть использована в качестве иммерсионной среды, как и в обычной ближнеполе-

вой микроскопии, для повышения пространственного разрешения области фокусировки [33]. Для этого зонную пластинку необходимо развернуть так, чтобы излучением освещалась поверхность с микрорельефом, а фокусировка поля проходила через более плотную среду подложки. Однако, как показано в [34, 35], такая схема фокусировки не приводит к существенным изменениям поперечного размера фокального пятна, а главным образом удлиняет фокальное расстояние f и повышает протяжённость (глубину резкости) фокуса.

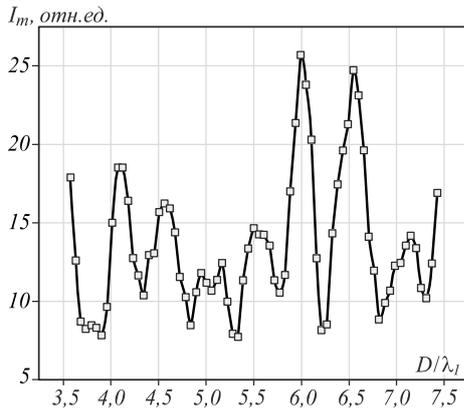


Рис. 4. Интенсивность I_m в фокусе фазовой ЗП (TiO_2 , $d_e = 100$ нм) в зависимости от толщины подложки D

Вместе с тем ситуация становится качественно иной, если несколько изменить дизайн ЗП, как показано на рис. 5а. Здесь в качестве подложки используется усечённый конус, а сам микрорельеф ЗП рассчитывается по заданному фокусному расстоянию f для длины волны падающего излучения с учётом показателя преломления подложки: $\lambda_1 = \lambda / n_1$. При условии $f \approx D_h$, где D_h – высота конуса, фокус такой иммерсионной ЗП (ИЗП) будет расположен прямо на верхней грани структуры. В данной конфигурации ИЗП эффективно концентрирует как лучи, приходящие на ось симметрии под большим углом дифракции, так и затухающие волны вблизи теневой поверхности ЗП в фокусе.

Это видно на примере расчёта двумерного распределения интенсивности ближнего поля для перевёрнутой кварцевой ИЗП с конической подложкой, показанного на рис. 5б. При этом формируется два фокуса, дальний из которых расположен на границе «подложка–воздух» и имеет наибольшую интенсивность. Сравнение поперечной полуширины фокального пятна w , производимой ИЗП с радиусом наверху $R_h = 980$ нм, обычной ЗП и кварцевой сферой с таким же диаметром (3,2 мкм) соответственно, и показано на рис. 6. Эти результаты однозначно указывают на преимущество предлагаемого дизайна ИЗП. Как и ожидалось, размер фокуса ИЗП приблизительно в n_1 раз меньше, чем у стандартной ЗП и составляет субдифракционную величину: $w \approx \lambda / 2,5$.

Свободным параметром рассматриваемой иммерсионной ЗП, позволяющим оптимизировать её свойства, является радиус верхнего основания коническо-

го навершия R_h , задающий угол наклона боковой поверхности конуса. Как показывает наше моделирование, его значение ключевым образом влияет на качество фокусировки ЗП. Зависимость интенсивности и полуширины фокуса ИЗП от отношения радиусов верхнего и нижнего оснований навершия $\xi = R_h / r_N$ представлена на рис. 6. Видно, что в определённом диапазоне значений данного параметра, примерно от $\xi = 0,55$ до 0,65 (выделен штриховкой на рисунках), реализуется субдифракционный размер фокального пятна и одновременно высокая фокальная интенсивность.

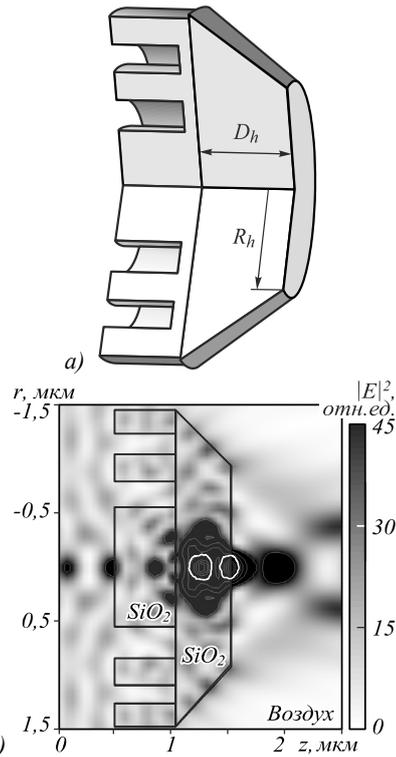


Рис. 5. Конструктивная схема ИЗП с коническим навершием (а); двумерное распределение интенсивности $|E|^2$ поля вблизи кварцевой ИЗП (б). Освещение структуры, как и на рис. 1а, осуществляется слева

Анализ векторного распределения усреднённой по времени плотности потока энергии (вектора Пойнтинга) $\mathbf{P} = (c / 8\pi) \mathbf{E} \times \mathbf{H}$ (\mathbf{E} и \mathbf{H} – электрический и магнитный вектора поля соответственно; c – скорость света) показал, что существует глобальное движение энергии, которое организуется при определённом наклоне боковой стенки конуса, когда вследствие полного внутреннего отражения внутри навершия формируется резонансная полость. Основные потери энергии из этого специфического резонатора реализуются вблизи оптической оси пластинки, где за счёт встречного взаимодействия проходящего и циркулирующего энергопотоков появляются локальные зоны резкой смены направления движения оптической энергии, где происходит зарождение оптических вихрей. Один из этих вихрей локализован вблизи верхней грани зонной структуры, что способствует суперлокализации поля в области внешнего фокуса [36, 37].

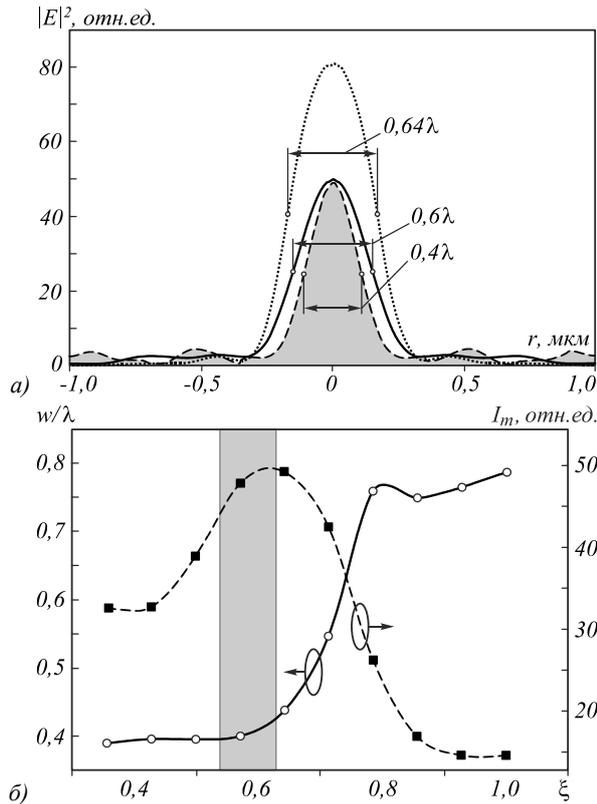


Рис. 6. Сравнение поперечной полуширины фокального пятна w , производимой ИЗП, обычной ЗП и кварцевой сферой с таким же радиусом ($r_N = 1,6$ мкм) (а); полуширина w и интенсивность I_m фокуса кварцевой ИЗП в зависимости от относительной ширины наверхия ξ (б)

Следует подчеркнуть, что во всех схемах фокусировки с использованием иммерсионного слоя выигрыш по пространственному разрешению растёт пропорционально отношению показателей преломления иммерсионной среды и среды, где реализуется фокусировка поля. Так, в случае, рассмотренном на рис. 6, когда использовалась кварцевая ЗП с кварцевым же «навершием» и $n_1 = 1,5$, размер фокального пятна получился в полтора раза меньше, чем для «классической» ЗП в воздухе. Если в качестве материала пластинки выбрать оптически более плотный материал, например, кремний (Si) с $n_1 = 4,29$ на длине волны 500 нм [30] (поглощение излучения можно не учитывать в силу малости суммарной толщины структуры), то можно достичь ещё большей локализации оптического поля.

Действительно, проведённое нами параметрическое исследование позволило определить оптимальную конфигурацию иммерсионной зонной пластинки из кремния с расчётным фокусным расстоянием $f_a = 500$ нм: радиус внешней зоны $r_N = 687$ нм, глубина рельефа $d_e = 60$ нм, высота иммерсионного кремниевого конуса $D_h = 400$ нм. В таком конструктиве ИЗП при реальном фокусном расстоянии $f = D_h$ ($NA = 3,7$) даёт фокусировку излучения на своей выходной грани в пятно с полушириной $w = 0,072$ нм, т.е. порядка $\lambda/7$. Эта величина меньше дифракционного предела Рэлея с учётом иммерсионной среды [2]:

$w^* = 0,61\lambda / n_1 \sin \alpha \approx \lambda / 5,84$, где α – угол между оптической осью и волновым вектором. При этом существенно, поскольку облучающая волна является циркулярно поляризованной, то фокальное пятно представляет собой круг.

Заключение

Таким образом, с помощью численной ФЕМ-методики проведено моделирование прохождения оптической волны через бинарную фазовую зонную пластинку Френеля с размерами порядка нескольких длин волн излучения и изучена пространственная структура области фокуса. Показано, что глубина травления канавок пластинки, а также толщина подложки существенным образом влияют на интенсивность и масштабные параметры пятна фокусировки. Наилучшая фокусировка реализуется при глубине травления, соответствующей фазовому набегу соседних зон пластинки, в диапазоне от $\pi/2$ до π . Существенного улучшения параметров фокуса и сокращения размеров фокального пятна ниже дифракционного предела можно достичь при использовании ЗП в комбинации с иммерсионным слоем в форме усечённого конуса. Отметим, что в силу масштабируемости уравнений Максвелла полученные результаты могут быть расширены на другие диапазоны, в том числе СВЧ и терагерцовый [38].

В то же время заметим, что для ЗП с высокой числовой апертурой эффективность фокусировки излучения может несколько снижаться из-за эффекта геометрического экранирования зон [39].

К возможным сферам практического применения рассмотренного конструктива мезоволновых фазовых ЗП можно отнести устройства оптофлюидики, в которых ЗП используются в качестве рентабельных и компактных средств для направления и передачи света на сенсоры [23], элементы микроскопии и рентген-литографии высокого разрешения [25, 40, 41], прецизионное оптическое манипулирование микро- и нанообъектами [42, 43], металлинзы [44], микроскопию [45, 46].

Вклад авторов

Ю.Э. Гейнц – создание COMSOL-модели и написание черновика статьи, Е.К. Панина – численное моделирование, И.В. Минин и О.В. Минин – инициирование работы и идея концепции ИЗП, Ю.Э. Гейнц, И.В. Минин и О.В. Минин – обсуждение результатов, редактирование статьи.

Благодарности

Работа частично выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ИОА СО РАН в части моделирования мезоволновой ЗП и частично в рамках Программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.

Литература

1. **Berry, M.V.** Evanescent and real waves in quantum billiards and Gaussian beams / M.V. Berry // *Journal of Physics A: Mathematical and General*. – 1994. – Vol. 27. – P. L391-L398. – DOI: 10.1088/0305-4470/27/11/008.
2. **Chen, G.** Superoscillation: from physics to optical applications / G. Chen, Z.-Q. Wen, C.-W. Qiu // *Light: Science & Applications*. – 2019. – Vol. 8. – 56. – DOI: 10.1038/s41377-019-0163-9.
3. **Lim, C.S.** Microlens array fabrication by laser interference lithography for super-resolution surface nanopatterning / C.S. Lim, M.H. Hong, Y. Lin, Q. Xie, B.S. Luk'yanchuk, A. Senthil Kumar, M. Rahman // *Applied Physics Letters*. – 2006. – Vol. 89, Issue 19. – 191125. – DOI: 10.1063/1.2374809.
4. **Terris, B.D.** Near-field optical data storage / B.D. Terris, H.J. Mamin, D. Rugar // *Applied Physics Letters*. – 1996. – Vol. 68. – P. 141-143. – DOI: 10.1063/1.112341.
5. **Minin, I.V.** Recent trends in optical manipulation inspired by mesoscale photonics and diffraction optics / I.V. Minin, O.V. Minin // *Journal of Biomedical Photonics & Engineering*. – 2020. – Vol. 6, Issue 2. – 020301 (8 p.). – DOI: 10.18287/JBPE20.06.020301.
6. **Minin, I.V.** 3D diffractive lenses to overcome the 3D Abbe subwavelength diffraction limit / I.V. Minin, O.V. Minin // *Chinese Optics Letters*. – 2014. – Vol. 12, Issue 6. – 060014. – DOI: 10.3788/COL201412.060014.
7. **Menon, R.** Experimental characterization of focusing by high-numerical-aperture zone plates / R. Menon, D. Gil, H.I. Smith // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2006. – Vol. 23, Issue 3. – P. 567-571. – DOI: 10.1364/JOSAA.23.000567.
8. **Fu, Y.** Plasmonic microzone plate: Superfocusing at visible regime / Y. Fu, W. Zhou, L.E.N. Lim, C.L. Du, X.G. Luo // *Applied Physics Letters*. – 2007. – Vol. 91. – 061124. – DOI: 10.1063/1.2769942.
9. **Mote, R.G.** Near-field properties of zone plates in visible regime – New insights / R.G. Mote, S.F. Yu, B.K. Ng, W. Zhou, S.P. Lau // *Optics Express*. – 2008. – Vol. 16, Issue 13. – P. 9554-9564. – DOI: 10.1364/OE.16.009554.
10. **Mote, R.G.** Experimental demonstration of near-field focusing of a phase micro-Fresnel zone plate (FZP) under linearly polarized illumination / R.G. Mote, S.F. Yu, A. Kumar, W. Zhou, X.F. Li // *Applied Physics B*. – 2011. – Vol. 102, Issue 1. – P. 95-100. – DOI: 10.1007/s00340-010-4210-8.
11. **Mote, R.G.** Subwavelength focusing behavior of high numerical aperture phase Fresnel zone plates under various polarization states / R.G. Mote, S.F. Yu, W. Zhou, X.F. Li // *Applied Physics Letters*. – 2009. – Vol. 95. – 191113. – DOI: 10.1063/1.3263728.
12. **Minin, I.V.** Investigation of the resolution of phase correcting Fresnel lenses with small values of F/D and subwavelength focus / I.V. Minin, O.V. Minin, N. Gagnon, A. Petosa // *Computer Optics*. – 2006. – Vol. 30. – P. 65-68.
13. **Minin, I.V.** Experimental verification 3D subwavelength resolution beyond the diffraction limit with zone plate in millimeter wave / I.V. Minin, O.V. Minin // *Microwave and Optical Technology Letters*. – 2014. – Vol. 56, Issue 10. – P. 2436-2439. – DOI: 10.1002/mop.28614.
14. **Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light** / M. Born, E. Wolf. – Oxford: Pergamon Press, 1959. – 829 p.
15. **Kakichashvili, Sh.D.** Zone plate with an anisotropy profile / Sh.D. Kakichashvili, Z.V. Wardosanidze // *Pis'ma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*. – 1989. – Vol. 15. – P. 41-44.
16. **Dorn, R.** The focus of light – linear polarization breaks the rotational symmetry of the focal spot / R. Dorn, S. Quabis, G. Leuchs // *Journal of Modern Optics*. – 2003. – Vol. 50, Issue 12. – P. 1917-1926. – DOI: 10.1080/09500340308235246.
17. **Richards, B.** Electromagnetic diffraction in optical systems. II. Structure of the image field in an aplanatic system / B. Richards, E. Wolf // *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical Physical Engineering Sciences*. – 1959. – Vol. 253, Issue 1274. – P. 358-379. – DOI: 10.1098/rspa.1959.0200.
18. **Dorn, R.** Sharper focus for a radially polarized light beam / R. Dorn, S. Quabis, G. Leuchs // *Physical Review Letters*. – 2003. – Vol. 91, Issue 23. – 233901. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.91.233901.
19. **Khonina, S.N.** Diffraction at binary microaxicons in the near field / S.N. Khonina, D.A. Savelyev, I.A. Pustovoi, P.G. Serafimovich // *Journal of Optical Technology*. – 2012. Vol. 79, Issue 10. – P. 626-631. – DOI: 10.1364/JOT.79.000626.
20. **Минин, И.В.** Сканирующие свойства дифракционного элемента, формирующего аксиально-симметричный дифракционно ограниченный волновой пучок / И.В. Минин, О.В. Минин // *Компьютерная оптика*. – 2004. – Вып. 26. – С. 65-67.
21. **Khonina, S.N.** Experimental demonstration of the generation of the longitudinal E-field component on the optical axis with high-numerical-aperture binary axicons illuminated by linearly and circularly polarized beams / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, S.V. Alferov, D.A. Savelyev, J. Laukkanen, J. Turunen // *Journal of Optics*. – 2013. – Vol. 15. – 085704. – DOI: 10.1088/2040-8978/15/8/085704.
22. **Chen, W.T.** Flat optics with dispersion-engineered metasurfaces / W.T. Chen, A.Y. Zhu, F. Capasso // *Nature Reviews Materials*. – 2020. – Vol. 5. – P. 604-620. – DOI: 10.1038/s41578-020-0203-3.
23. **Wu, J.** The application of Fresnel zone plate based projection in optofluidic microscopy / J. Wu, X. Cui, L.M. Lee, C. Yang // *Optics Express*. – 2008. – Vol. 16, Issue 2. – P. 15595-15602. – DOI: 10.1364/OE.16.015595.
24. **Xie, W.** On-chip multiwavelength achromatic thin flat lens / W. Xie, J. Yang, D. Chen, J. Huang, X. Jiang // *Optics Communications*. – 2021. – Vol. 484. – 126645. – DOI: 10.1016/j.optcom.2020.126645.
25. **Pang, S.** Fluorescence microscopy imaging with a Fresnel zone plate array based optofluidic microscope / S. Pang, C. Han, L.M. Lee, C. Yang // *Lab on a Chip*. – 2011. – Issue 21. – P. 3698-3702. – DOI: 10.1039/C1LC20654K.
26. **StoutGrandy, S.M.** Investigation of low profile Fresnel zone plate antennas / S.M. StoutGrandy, A. Petosa, I.V. Minin, O.V. Minin, J.S. Wight // *Microwave and Optical Technology Letters*. – 2008. – Vol. 50, Issue 8. – P. 2039-2043. – DOI: 10.1002/mop.23593.
27. **Zhang, Y.** Diffraction theory of high numerical aperture subwavelength circular binary phase Fresnel zone plate / Y. Zhang, H. An, D. Zhang, G. Cui, X. Ruan // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22, Issue 22. – P. 27425-27436. – DOI: 10.1364/OE.22.027425.
28. **Johnson, P.B.** Optical constants of the noble metals / P.B. Johnson, R.W. Christy // *Physical Review B*. – 1972. – Vol. 6, Issue 12. – P. 4370-4379. – DOI: 10.1103/PhysRevB.6.4370.
29. **Jones, A.R.** The focal properties of phase zone plates / A.R. Jones // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 1969. – Vol. 2. – P. 1789-1791. – DOI: 10.1088/0022-3727/2/12/124.
30. **Green, M.A.** Self-consistent optical parameters of intrinsic silicon at 300K including temperature coefficients / M.A. Green // *Solar Energy Materials & Solar Cells*. – 2008. – Vol. 92, Issue 11. – P. 1305-1310. – DOI: 10.1016/j.solmat.2008.06.009.
31. **Zhang, Y.** Analysis of nearfield subwavelength focusing of hybrid amplitude-phase Fresnel zone plates under radially polarized illumination / Y. Zhang, C. Zheng, Y. Zhuang,

- X. Ruan // Journal of Optics. – 2014. – Vol. 16, Issue 1. – 015703. – DOI: 10.1088/20408978/16/1/015703.
32. **Barrett, H.H.** Fresnel zone plate imaging of gamma rays: Theory / H.H. Barrett, F.A. Horrigan // Applied Optics. – 1973. – Vol. 12, Issue 11. – P. 2686-2702. – DOI: 10.1364/AO.12.002686.
 33. **Brunner, R.** Diffraction-based solid immersion lens / R. Brunner, M. Burkhardt, A. Pesch, O. Sandfuchs // Journal of the Optical Society of America A. – 2004. – Vol. 21, Issue 7. – P. 1186-1191. – DOI: 10.1364/JOSAA.21.001186.
 34. **Zhang, Y.** Solid immersion Fresnel zone plate in digital holography & 3-D imaging meeting / Y. Zhang, X. Qian, X. Ruan, H. Zhu // OSA Technical Digest (Optical Society of America). – 2015. – paper DW2A.15. – DOI: 10.1364/DH.2015.DW2A.15.
 35. **Suyama, T.** The focusing characteristics on the binary phase sub-wavelength Fresnel zone plate / T. Suyama // International Journal of Physics. – 2019. – Vol. 7, Issue 3. – P. 86-90. – DOI: 10.12691/ijp-7-3-3.
 36. **Geints, Yu.E.** Photonic jets from resonantly-excited transparent dielectric microspheres / Yu.E. Geints, A.A. Zemlyanov, E.K. Panina // Journal of the Optical Society of America B. – 2012. – Vol. 29, Issue 4. – P. 758-762. – DOI: 10.1364/JOSAB.29.000758.
 37. **Minin, I.V.** Photonic lenses with whispering gallery waves at Janus particles [Electronical Resource] / I.V. Minin, O.V. Minin, Y. Cao, B. Yan, Z. Wang, B. Luk'yanchuk // ArXiv: 2012.09489. – 2020. – URL: <https://arxiv.org/abs/2012.09489> (request date 04.02.2021).
 38. **Minin, I.V.** Millimeter wave binary photon sieve Fresnel zone plate: FDTD analysis / I.V. Minin, O.V. Minin // Progress in Electromagnetics Research Letters. – 2013. – Vol. 43. – P. 149-154. – DOI: 10.2528/PIERL13091614.
 39. **Minin, I.V.** Shadowing effect in curvilinear diffractive lens antennas / I.V. Minin, O.V. Minin // 2005 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings. – 2005. – Vol. 4. – 3 p. – DOI: 10.1109/APMC.2005.1606853.
 40. **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.
 41. **Lee, S.Y.** Hard X-ray microbeam lithography using a Fresnel zone plate with a long focal length / S.Y. Lee, I.H. Cho, J.M. Kim, H.C. Kang, D.Y. Noh // Journal of Synchrotron Radiations. – 2011. – Vol. 18. – P. 143-147. – DOI: 10.1107/S0909049510044535.
 42. **Bouloumis, T.D.** From far-field to near-field micro- and nanoparticle optical trapping / T.D. Bouloumis, S.N. Chormaic // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10, Issue 4. – P. 1375. – DOI: 10.3390/app10041375.
 43. **Minin, I.V.** Optical manipulation of micro- and nanoobjects based on structured mesoscale particles: a brief review / I.V. Minin, O.V. Minin, Yu.E. Geints, E.K. Panina, A. Karabchevsky // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2020. – Vol. 33, Issue 5. – P. 404-469. – DOI: 10.1134/S1024856020050115.
 44. **Pacheco-Peña, V.** Zoned fishnet lens antenna with optimal reference phase for side lobe reduction / V. Pacheco-Peña, M. Navarro-Cia, B. Orazbayev, I.V. Minin, O.V. Minin, M. Beruete // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2015. – Vol. 63, Issue 8. – P. 3710-3714. – DOI: 10.1109/TAP.2015.2432855.
 45. **Minin, I.V.** Concept of near-field millimeter-wave imaging system with a spatial resolution beyond the Abbe barrier / I.V. Minin, O.V. Minin // Proceedings of the China-Japan Joint Microwave Conference. – 2008. – P. 509-512. – DOI: 10.1109/CJMW.2008.4772481.
 46. **Schonbrun, E.** Scanning microscopy using a short-focal-length Fresnel zone plate / E. Schonbrun, W.N. Ye, K.B. Crozier // Optics Letters. – 2009. – Vol. 34, Issue 14. – P. 2228-2230. – DOI: 10.1364/OL.34.002228.

Сведения об авторах

Гейнц Юрий Эльмарович, 1963 года рождения, в 1986 году окончил Томский государственный университет по специальности «Оптические приборы и системы», работает главным научным сотрудником в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, доктор физико-математических наук. Область научных интересов: компьютерная оптика, нанофотоника, нелинейная оптика волновых процессов. E-mail: ygeints@iao.ru.

Минин Игорь Владиленович, 1960 года рождения, в 1982 году окончил Новосибирский государственный университет по специальности «Физик», работает главным научным сотрудником в Сибирском государственном университете геосистем и технологий, доктор технических наук, чл.-корр. Метрологической академии России. Автор и соавтор более 300 научных трудов (в том числе 10 монографий, включая изданные за рубежом), более 100 изобретений и патентов РФ. Область научных интересов: компьютерная оптика, нано- и мезоразмерная фотоника, оптика ближнего поля. E-mail: prof.minin@gmail.com.

Панина Екатерина Константиновна, 1968 года рождения, в 1991 году окончила Томский государственный университет по специальности «Оптические приборы и системы», работает ведущим научным сотрудником в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, доктор физико-математических наук. Область научных интересов: нелинейная оптика волновых процессов, нанофотоника. E-mail: pek@iao.ru.

Минин Олег Владиленович, 1960 года рождения, в 1982 году окончил Новосибирский государственный университет по специальности «Физик», работает главным научным сотрудником в Сибирском государственном университете геосистем и технологий, доктор технических наук, чл.-корр. Метрологической академии России. Автор и соавтор более 300 научных трудов (в том числе 10 монографий, включая изданные за рубежом), более 100 изобретений и патентов РФ. Область научных интересов: компьютерная оптика, нано- и мезоразмерная фотоника, оптика ближнего поля. E-mail: oleg.minin@ngs.ru.

ГРНТИ: 29.31.29

Поступила в редакцию 10 февраля 2021 г. Окончательный вариант – 10 мая 2021 г.

Controlling near-field focusing of a mesoscale binary phase plate in an optical radiation field with circular polarization

Y.E. Geints¹, O.V. Minin^{2,3}, E.K. Panina¹, I.V. Minin^{2,3}

¹ V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 634055, Tomsk, Russia, Academician Zuev Square, 1,

² Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Novosibirsk, Russia, Plakhotny, 10,

³ Tomsk Polytechnic University, 634050, Tomsk, Russia, Lenina, 30

Abstract

Binary Fresnel zone plates (ZP) are one of the most frequently used focusing elements of in-plane optical schemes in micro- and nanophotonics. With a decrease in the diameter and focal distance of the ZP to meso-wavelength sizes, the parameters of the focusing region begin to be significantly influenced by features of the ZP design (material, thickness, relief depth). The spatial structure of the focal spot formed in the near-field is investigated by the numerical finite elements (FEM) simulations of the transmission of a plane optical wave through a mesoscale binary phase ZP. We show that there is a range of optimal etching depths of the ZP ridges and optimal thicknesses of the plate substrate, at which the best focusing of the incident optical wave is realized in terms of the maximum field intensity and the minimum size of the focal spot. In addition, a concept of a super-focusing binary phase ZP with an immersion layer in the form of a truncated cone fabricated of ZP material is proposed, which makes it possible to focus the circularly polarized light wave into a subdiffraction region with a half-width of about $\lambda/2n$ (n is the ZP refractive index).

Keywords: Fresnel zone plates, near-field focusing, subdiffraction focusing.

Citation: Geints YE, Minin OV, Panina EK, Minin IV. Controlling near-field focusing of a mesoscale binary phase plate in an optical radiation field with circular polarization. *Computer Optics* 2021; 45(4): 512-519. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-878.

Acknowledgements: This work was partially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences) in terms of modeling the meso-wavelength ZP and partially was carried out within the framework of the Tomsk Polytechnic University Competitiveness Enhancement Program.

References

- [1] Berry MV. Evanescent and real waves in quantum billiards and Gaussian beams. *J Phys Math Gen* 1994; 27: L391-L398. DOI: 10.1088/0305-4470/27/11/008.
 - [2] Chen G, Wen ZQ, Qiu CW. Superoscillation: from physics to optical applications. *Light Sci App* 2019; 8: 56. DOI 10.1038/s41377-019-0163-9.
 - [3] Lim CS, Hong MH, Lin Y, Xie Q, Luk'yanchuk BS, Senthil Kumar A, Rahman M. Microlens array fabrication by laser interference lithography for super-resolution surface nanopatterning. *App Phys Lett* 2006; 89(19): 191125. DOI: 10.1063/1.2374809.
 - [4] Terris BD, Mamin HJ, Rugar D. Near-field optical data storage. *Appl Phys Lett* 1996; 68: 141-143. DOI 10.1063/1.112341.
 - [5] Minin IV, Minin OV. Recent trends in optical manipulation inspired by mesoscale photonics and diffraction optics. *Journal of Biomedical Photonics & Engineering* 2020; 6(2): 020301. DOI: 10.18287/JBPE20.06.020301.
 - [6] Minin IV, Minin OV. 3D diffractive lenses to overcome the 3D Abbe subwavelength diffraction limit. *Chin Opt Lett* 2014; 12(6): 060014. DOI: 10.3788/COL201412.060014.
 - [7] Menon R, Gil D, Smith HI. Experimental characterization of focusing by high-numerical-aperture zone plates. *J Opt Soc Am A* 2006; 23(3): 567-571. DOI: 10.1364/JOSAA.23.000567.
 - [8] Fu Y, Zhou W, Lim LEN, Du CL, Luo XG. Plasmonic microzone plate: Superfocusing at visible regime. *Appl Phys Lett* 2007; 91: 061124. DOI: 10.1063/1.2769942.
 - [9] Mote RG, Yu SF, Ng BK, Zhou W, Lau SP. Near-field properties of zone plates in visible regime – New insights. *Opt Express* 2008; 16(13): 9554-9564. DOI: 10.1364/OE.16.009554.
 - [10] Mote RG, Yu SF, Kumar A, Zhou W, Li XF. Experimental demonstration of near-field focusing of a phase micro-Fresnel zone plate (FZP) under linearly polarized illumination. *Appl Phys B* 2011; 102(1): 95-100. DOI: 10.1007/s00340-010-4210-8.
 - [11] Mote RG, Yu SF, Zhou W, Li XF. Subwavelength focusing behavior of high numerical aperture phase Fresnel zone plates under various polarization states. *Appl Phys Lett* 2009; 95: 191113. DOI: 10.1063/1.3263728.
 - [12] Minin IV, Minin OV, Gagnon N, Petosa A. Investigation of the resolution of phase correcting Fresnel lenses with small values of F/D and subwavelength focus. *Computer Optics* 2006; 30: 65-68.
 - [13] Minin IV, Minin OV. Experimental verification 3D sub-wavelength resolution beyond the diffraction limit with zone plate in millimeter wave. *Microw Opt Technol Lett* 2014; 56(10): 2436-2439. DOI: 10.1002/mop.28614.
 - [14] Born M, Wolf E. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light. Oxford: Pergamon Press; 1959.
-

- [15] Kakichashvili ShD, Wardosanidze ZV. Zone plate with an anisotropy profile. *Pis'ma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki* 1989; 15: 41-44.
- [16] Dorn R, Quabis S, Leuchs G. The focus of light—linear polarization breaks the rotational symmetry of the focal spot. *J Mod Opt* 2003; 50(12): 1917-1926. DOI: 10.1080/09500340308235246.
- [17] Richards B, Wolf E. Electromagnetic diffraction in optical systems. II. Structure of the image field in an aplanatic system. *Proc Math Phys Eng Sci* 1959; 253(1274): 358-379. DOI: 10.1098/rspa.1959.0200.
- [18] Dorn R, Quabis S, Leuchs G. Sharper focus for a radially polarized light beam. *Phys Rev Lett* 2003; 91(23): 233901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.91.233901.
- [19] Khonina SN, Savelyev DA, Pustovoi IA, Serafimovich PG. Diffraction at binary microaxicons in the near field. *J Opt Technol* 2012; 79(10): 626-631. DOI: 10.1364/JOT.79.000626.
- [20] Minin IV, Minin OV. Scanning properties of a diffractive element forming an axially symmetric diffraction limited wave beam [In Russian]. *Computer Optics* 2004; 26: 65-67.
- [21] Khonina SN, Karpeev SV, Alferov SV, Savelyev DA, Laukkanen J, Turunen J. Experimental demonstration of the generation of the longitudinal E-field component on the optical axis with high-numerical-aperture binary axicons illuminated by linearly and circularly polarized beams. *J Opt* 2013; 15: 085704. DOI: 10.1088/2040-8978/15/8/085704.
- [22] Chen WT, Zhu AY, Capasso F. Flat optics with dispersion-engineered metasurfaces. *Nat Rev Mater* 2020; 5: 604-620. DOI: 10.1038/s41578-020-0203-3.
- [23] Wu J, Cui X, Lee LM, Yang C. The application of Fresnel zone plate based projection in optofluidic microscopy. *Opt Express* 2008; 16(2): 15595-15602. DOI: 10.1364/OE.16.015595.
- [24] Xie W, Yang J, Chen D, Huang J, Jiang X. On-chip multi-wavelength achromatic thin flat lens. *Opt Commun* 2021; 484: 126645. DOI: 10.1016/j.optcom.2020.126645.
- [25] Pang S, Han C, Lee LM, Yang C. Fluorescence microscopy imaging with a Fresnel zone plate array based optofluidic microscope. *Lab on a Chip* 2011; 21: 3698-3702. DOI: 10.1039/C1LC20654K.
- [26] StoutGrandy SM, Petosa A, Minin IV, Minin OV, Wight S. Investigation of low profile Fresnel zone plate antennas. *Microw Opt Technol Lett* 2008; 50(8): 2039-2043. DOI: 10.1002/mop.23593.
- [27] Zhang Y, An H, Zhang D, Cui G, Ruan X. Diffraction theory of high numerical aperture subwavelength circular binary phase Fresnel zone plate. *Opt Express* 2014; 22(22): 27425-27436. DOI: 10.1364/OE.22.027425.
- [28] Johnson PB, Christy RW. Optical constants of the noble metals. *Phys Rev B* 1972; 6(12): 4370-4379. DOI: 10.1103/PhysRevB.6.4370.
- [29] Jones AR. The focal properties of phase zone plates. *J Phys D* 1969; 2: 1789-1791. DOI 10.1088/0022-3727/2/12/124
- [30] Green MA. Self-consistent optical parameters of intrinsic silicon at 300K including temperature coefficients. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2008; 92(11): 1305-1310. DOI: 10.1016/j.solmat.2008.06.009.
- [31] Zhang Y, Zheng C, Zhuang Y, Ruan X. Analysis of near-field subwavelength focusing of hybrid amplitude-phase Fresnel zone plates under radially polarized illumination. *J Opt* 2014; 16(1): 015703. DOI: 10.1088/20408978/16/1/015703.
- [32] Barrett HH, Horrigan FA. Fresnel zone plate imaging of gamma rays: Theory. *Appl Opt* 1973; 12(11): 2686-2702. DOI: 10.1364/AO.12.002686.
- [33] Brunner R, Burkhardt M, Pesch A, Sandfuchs O. Diffraction-based solid immersion lens. *J Opt Soc Am A* 2004; 21(7): 1186-1191. DOI: 10.1364/JOSAA.21.001186.
- [34] Zhang Y, Qian X, Ruan X, Zhu H. Solid immersion Fresnel zone plate in Digital Holography & 3-D Imaging Meeting. OSA Technical Digest (Optical Society of America) 2015: DW2A.15. DOI: 10.1364/DH.2015.DW2A.15.
- [35] Suyama T. The focusing characteristics on the binary phase sub-wavelength Fresnel zone plate. *Int J Phys* 2019; 7(3): 86-90. DOI: 10.12691/ijp-7-3-3.
- [36] Geints YuE, Zemlyanov AA, Panina EK. Photonic jets from resonantly-excited transparent dielectric microspheres. *J Opt Soc Am B* 2012; 29(4): 758-762. DOI: 10.1364/JOSAB.29.000758.
- [37] Minin IV, Minin OV, Cao Y, Yan B, Wang Z, Luk'yanchuk B. Photonic lenses with whispering gallery waves at Janus particles. Source: <https://arxiv.org/abs/2012.09489>.
- [38] Minin IV, Minin OV. Millimeter wave binary photon sieve Fresnel zone plate: FDTD analysis. *Prog Electromagn Res Lett* 2013; 43: 149-154. DOI: 10.2528/PIERL13091614.
- [39] Minin IV, Minin OV. Shadowing effect in curvilinear diffractive lens antennas. *Proc Asia-Pacific Microwave Conference* 2005; 4: 1-3. DOI: 10.1109/APMC.2005.1606853.
- [40] 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.
- [41] Lee SY, Cho IH, Kim JM, Kang HC, Noh DY. Hard X-ray microbeam lithography using a Fresnel zone plate with a long focal length. *J Synchrotron Radiat* 2011; 18: 143-147. DOI: 10.1107/S0909049510044535.
- [42] Bouloumis TD, Chormaic SN. From far-field to near-field micro- and nanoparticle optical trapping. *Appl Sci* 2020; 10(4): 1375. DOI: 10.3390/app10041375.
- [43] Minin IV, Minin OV, Geints YuE, Panina EK, Karabchevsky A. Optical manipulation of micro- and nanoobjects based on structured mesoscale particles: a brief review. *Atmospheric and Oceanic Optics* 2020; 33(5): 404-469. DOI: 10.1134/S1024856020050115.
- [44] Pacheco-Peña V, Navarro-Cía M, Orazbayev B, Minin IV, Minin OV, Beruete M. Zoned fishnet lens antenna with optimal reference phase for side lobe reduction. *IEEE Trans Antennas Propag* 2015; 63(8): 3710-3714. DOI: 10.1109/TAP.2015.2432855.
- [45] Minin IV, Minin OV. Concept of near-field millimeter-wave imaging system with a spatial resolution beyond the Abbe barrier. *Proc China-Japan Joint Microwave Conference* 2008: 509-512. DOI: 10.1109/CJMW.2008.4772481.
- [46] Schonbrun E, Ye WN, Crozier KB. Scanning microscopy using a short-focal-length Fresnel zone plate. *Opt Lett* 2009; 34(14): 2228-2230. DOI: 10.1364/OL.34.002228.

Authors' information

Yuri El'marovich Geints (b. 1963), graduated from Tomsk State University in 1986 with a degree of "Optical Devices and Systems", works as a Chief Researcher at the V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Doctor

of Physical and Mathematical Sciences. Research interests: computer optics, nanophotonics, nonlinear optics of wave processes. E-mail: vgoints@iao.ru.

Igor Vladilenovich Minin (b. 1960), graduated from Novosibirsk State University with a degree of “Physicist” in 1982, works as a Chief Researcher at the Siberian State University of Geosystems and Technologies, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member. Metrological Academy of Russia. Author and co-author of over 300 scientific papers (including 10 monographs, including those published abroad), over 100 inventions and patents of the Russian Federation. Research interests: computer optics, nano- and mesoscale photonics, near-field optics. E-mail: prof.minin@gmail.com.

Ekaterina Konstantinovna Panina (b. 1968), graduated from Tomsk State University in 1991 with a degree of “Optical Devices and Systems”, works as a Leading Researcher at the V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Doctor of Physical and Mathematical Sciences. Research interests: nanophotonics, nonlinear optics of wave processes. E-mail: pek@iao.ru.

Oleg Vladilenovich Minin (b. 1960), graduated from Novosibirsk State University with a degree of “Physicist” in 1982, works as a Chief Researcher at the Siberian State University of Geosystems and Technologies, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member. Metrological Academy of Russia. Author and co-author of over 300 scientific papers (including 10 monographs, including those published abroad), over 100 inventions and patents of the Russian Federation. Research interests: computer optics, nano- and mesoscale photonics, near-field optics. E-mail: oleg.minin@ngs.ru.

Received February 10, 2021. The final version – May 10, 2021.
