

АДАПТИВНАЯ И ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОПТИКА

УДК 535.4

Оптимальная фокусировка света мезоволновыми фазовыми пластинками Френеля со ступенчатым профилем зон

Ю.Э. Гейнц, Е.К. Панина *

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 11.04.2022 г.;
после доработки 17.05.2022 г.;
принята к печати 15.06.2022 г.

Представлены результаты численного моделирования фокусировки оптического излучения на зонных пластинках (ЗП) Френеля мезоволнового размера, имеющих двуслойный профиль фазовых выступов. Показано, что размерные параметры и интенсивность пятна фокусировки чувствительны к типу конструктивного дизайна ЗП. Путем изменения высоты ступеней, а также соотношения между размером граней пластины удается значительно улучшить характеристики поля в области фокуса за счет сглаживания профиля фазы волны, формируемого отдельными слоями. Проведено сравнение со случаем традиционной бинарной ЗП.

Ключевые слова: ближнепольная фокусировка света, зонная пластинка Френеля, мезоволновой рассеиватель, дифракционный предел; near-field light focusing, Fresnel zone plates, mesowavelength scatterer, diffraction limit.

Введение

Зонная пластинка (ЗП) Френеля является одним из элементов планарной дифракционной оптики, традиционно используемых для фокусировки падающего излучения. Фокусирующая способность ЗП зависит от ряда конструктивных факторов: от глубины травления, количества фазовых зон, а также их профиля. Совершенствование технологий изготовления ЗП позволяет расширять область их практического применения. Уже сейчас ЗП широко используются, например, в оптической литографии, а также в плоскостных оптических схемах в микро- и нанопотонике [1–3]. В простейшем случае ЗП представляет собой систему чередующихся концентрических колец с нарезанными канавками прямоуглольного профиля. Это так называемая бинарная ЗП, которая производит скачкообразный и равномерный фазовый сдвиг оптической волны от каждой зоны. Подобный дизайн наиболее прост в изготовлении, но область фокуса таких бинарных ЗП, как правило, имеет боковые максимумы интенсивности, которые существенно ухудшают качество фокусировки. Киноформные дифракционные элементы [4], в частности многослойные ЗП [5, 6], позволяют частично устранить паразитные вторичные и боковые зоны фокусировки и существенно повысить яркость в основном фокусе [7]. Благодаря плавному (по па-

раболическому закону) изменению фазового сдвига в пределах одной зоны Френеля и резкому скачку на ее границе удается получить более резкую фокусировку излучения.

В настоящее время развитие фокусирующих элементов микрофотоники идет в направлении плоскостной пленочной геометрии [8], востребованной в разнообразных современных схемах оптической микрофлюидики и lab-on-chip устройствах [9]. Это выдвигает на первый план исследования по оптимальному конструктивному дизайну миниатюрных плоскостных фокусирующих оптических элементов, дающих максимально резкий и интенсивный фокус при минимальной толщине. И поэтому исследования особенностей фокусировки оптического поля мезоволновыми ЗП Френеля, т.е. пластинками с размерами порядка длины волны оптического излучения и с большой числовой апертурой (порядка единицы), остаются актуальными [10].

Необходимо отметить, что, когда свет фокусируется с помощью мезоволновых ЗП, на пространственную структуру области фокуса существенно влияет конструкция самой пластинки. Именно благодаря этому становится возможным оптимально группировать формирующиеся в каждой зоне ЗП вторичные источники поля, обеспечивая их конструктивную интерференцию в заданной области пространства (фокусе). Изменение профиля нарезки зон (наклонный, ступенчатый) позволяет обеспечить специфический профиль фазы и улучшить пространственную структуру фокуса, делая его более интенсивным и локализованным в пространстве. В связи

* Юрий Эльмарович Гейнц (ygeints@iao.ru); Екатерина Константиновна Панина (pek@iao.ru).

с этим несомненный интерес представляет моделирование процесса распространения света через мезоволновую ЗП определенного дизайна и исследование пространственной структуры фокуса.

Настоящая работа продолжает исследования [11–13] по управлению ближнепольной фокусировкой монохроматического оптического излучения с помощью мезоразмерной фазовой пластинки с большим апертурным углом. Представлены результаты численного моделирования ближнепольной пространственной структуры оптического поля с целью оптимизации параметров ЗП для получения максимально интенсивных фокусов. Рассмотрены ЗП двухслойной структуры, имеющие ступенчатый профиль концентрических зон и представляющие собой простейший вариант киноформной линзы. Показано, что интенсивность и размерные параметры фокуса подобных ЗП чувствительны к соотношению ширины и высоты слоев. При этом для каждого значения расчетного фокуса ЗП можно выбрать оптимальную структуру ступеней зон, обеспечивающую наилучшую фокусировку светового поля.

Методика численного моделирования

Задача о дифракции оптической волны на диэлектрической структуре, представляющей собой фазовую пластинку Френеля в поле монохроматического оптического излучения, моделировалась с помощью метода конечных разностей во временной области (FDTD), реализованной в коммерческом программном пакете Lumerical FDTD. В рамках этой методики проводится численное решение системы дифференциальных уравнений Максвелла для электромагнитного поля оптической волны, распространяющейся в оптически неоднородной среде. Высокая устойчивость численной схемы обеспечивается специальным типом пространственно-временной дискретизации расчетной области с использованием сцепленных «ячеек Йи» (Yee cells) [14], когда проекции векторов электрического и магнитного полей на декартовы оси специальным образом разнесены в пространстве. Для реализации условий свободного излучения на внешних границах расчетного домена ЗП располагалась в воздухе и окружалась системой идеально поглощающих слоев (PML). Максимальный пространственный шаг адаптивной анизотропной численной сетки составлял 5 нм при временном шаге не более 0,1 фс, что соответствовало приблизительно 25 ячейкам временной сетки на одну длину волны. Оптическая линейно поляризованная вдоль оси x волна распространялась в направлении волнового вектора \mathbf{k} по нормали к плоскости ЗП и имела начальную амплитуду $E_0 = 1$ В/м.

Моделируемая фазовая ЗП представляла собой диэлектрический цилиндр кругового сечения, в котором вырезаны концентрические канавки глубиной h (рис. 1). Особенность рассматриваемой задачи – конфигурация ЗП, а именно профиль нарезки кон-

центрических зон. В отличие от [13] профиль канавок был не прямоугольным, они были нарезаны в форме двух ступенчатых слоев с сечениями оснований a и b . В наших расчетах варьировались как толщина верхней грани ЗП путем изменения отношения a/b , так и высота ступенек через отношение c/h . Подобная конструкция ЗП способствует сглаживанию фазы волны при дифракции на зонных выступах, что призвано улучшить пространственную локализацию фокуса. При $a = b$ реализуется случай классической фазовой ЗП Френеля с прямоугольным профилем нарезки зон (бинарная пластинка). Заметим, что используемая здесь конфигурация ЗП отличается от классического способа перехода от непрерывного рельефа фазы к ступенчатому, когда изменение ширины ступеньки затрагивает одновременно нечетную и четную соседние зоны. Однако такой вариант ступенчатого рельефа имеет больше степеней свободы (высота/ширина отдельных ступенек) и существенно сложнее для анализа.

Считалось, что ЗП изготовлена из не поглощающего в оптическом диапазоне длин волн вещества с показателем преломления $n_1 = 1,5$ и находится в воздухе с показателем преломления $n_0 = 1$. Для определенности рассматривалась пятизонная ($N = 5$) пластинка Френеля. Со стороны подложки ЗП освещается линейно поляризованным излучением, плоским волновым фронтом и $\lambda = 1,315$ мкм, соответствующей длине волны излучения в ближней ИК-области технологических диодных лазеров. В настоящее время подобные лазеры с диодной накачкой являются технологическим стандартом в оптоэлектронике, телекоммуникациях и т.д.

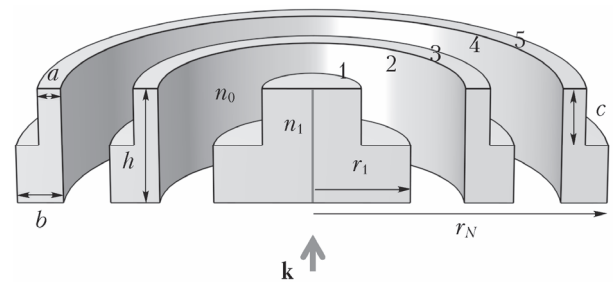


Рис. 1. Модель пятизонной (зоны пронумерованы цифрами) диэлектрической фазовой пластинки с показателем преломления n_1 . ЗП освещается плоской световой волной со стороны подложки в направлении вектора \mathbf{k}

Радиусы зон пластинки Френеля вычисляются по известной формуле $r_q = \sqrt{qf_d\lambda + (q\lambda/2)^2}$ (см., например, [15, 16], где $q = 1, 2, \dots, N$ – номера зон, в пределах которых происходит сдвиг фазы электромагнитной волны в π радиан; f_d – расчетный фокус). Рассматривались пластинки с двумя значениями фокуса: $f_d = \lambda$ и 2λ . При этом всегда выполнялось условие $r_N/f_d > 1$, где r_N – радиус внешней зоны пластинки, что давало числовую апертуру

исследуемых ЗП $NA = n_0 [1 + (f_d/r_N)^2]^{-1/2} \sim 1$. Кроме того, из соображений оптимальной фазировки кольцевых зон пластинки глубина ее рельефа $h = \lambda/2(n_1 - n_0)$ [12], что для рассматриваемых параметров материала ЗП соответствует $h = \lambda$.

Результаты численных расчетов

Серия графиков на рис. 2 иллюстрирует результаты численных расчетов максимальной нормированной интенсивности электрического поля $V_{\max} = \max\{|\mathbf{E}|/E_0\}^2$ и положение наблюдаемого фокуса ЗП f_0 . Значение расчетного фокуса ЗП $f_d = \lambda$ (a, ϑ) и 2λ (β, z) соответственно. Напомним, что высота ступеней концентрических зон задается отношением параметров c/h . Рассмотрено три тестовых варианта: $c/h = 0,3; 0,5; 0,7$ при изменении отношения верхней и нижней граней кольцевых зон (a/b).

Как видно из рис. 2, a, β , при уменьшении ширины верхнего слоя кольцевых зон (параметр a/b) происходит сначала улучшение фокусировки поля по сравнению с бинарным дизайном ЗП, при кото-

ром $a/b = 1$. Затем при соотношении размеров слоев в диапазоне значений $a/b \approx 0,4 \div 0,7$ реализуются пиковые значения фокальной интенсивности ступенчатой ЗП в зависимости от высоты нарезанных ступенек (параметр c/h). Важно отметить, что выбором дизайна слоев фазовых зон возможно существенно повысить фокальную интенсивность. В частности, для пластинки с $f_d = \lambda$, как следует из рис. 2, a , может быть достигнуто повышение интенсивности в фокусе до 30% при изменении соотношения c/h с 0,3 до 0,7, что соответствует формированию более сглаженного, близкого к параболическому градиента фазы оптической волны при прохождении зоны пластинки. При этом для более длиннофокусной ЗП (рис. 2, β) соотношение высот зонных слоев не оказывает существенного влияния ни на характер зависимости интенсивности в фокусе, ни на ее значение в максимуме, который реализуется при $a/b \approx 0,55$ и $c/h = 0,7$.

Положение наблюдаемого фокуса ЗП f_0 для случая короткой фокусировки $f_d = \lambda$ (рис. 2, ϑ) в целом находится ближе, чем его расчетная величина f_d . С ростом отношения a/b сначала происходит удаление фокуса от поверхности пластинки,

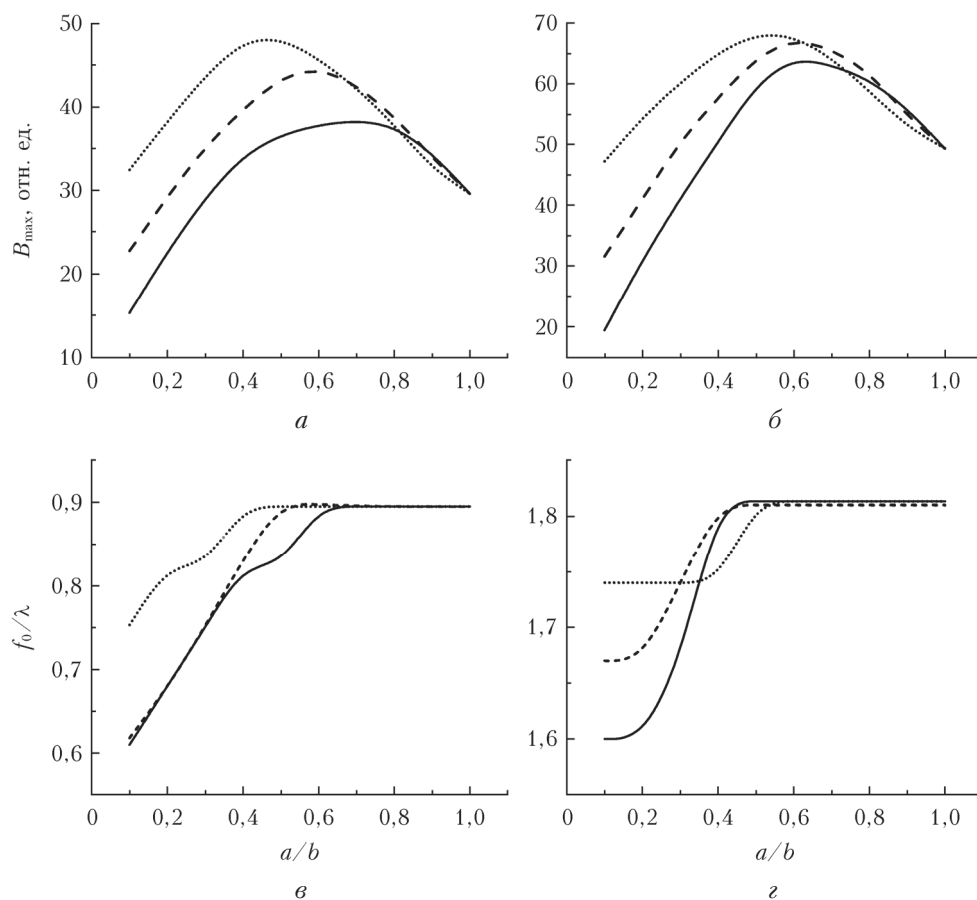


Рис. 2. Зависимость фокальных параметров двуслойной ЗП: a, β – пиковой интенсивности V_{\max} ; ϑ, z – положения наблюдаемого фокуса f_0 , от соотношения ширины слоев зон a/b при различных высотах слоев: $c/h = 0,3$ (сплошная кривая); $0,5$ (штриховая кривая) и $0,7$ (пунктир) для двух значений расчетного фокуса: $f_d = \lambda$ (a, ϑ) и 2λ (β, z)

а затем при $a/b = 0,5$ он стабилизируется на расстоянии $f_0 \approx 0,9\lambda$. Аналогичное поведение f_0 наблюдается и для случая $f_d = 2\lambda$ с небольшим отличием в абсолютных величинах смещения фокуса фазовой пластинки относительно его ожидаемой позиции.

Рис. 3 иллюстрирует распределение нормированной интенсивности электрического поля $V = (|E|/E_0)^2$ вблизи фазовой пластинки с различным дизайном слоев. В первом случае (рис. 3, а, в), профилем концентрических зон пластинки представляет собой ступень высотой $h/2$ ($c = h/2$) при соотношении граней ЗП $a/b = 0,5$. Во втором случае (рис. 3, б, г) канавки ЗП имеют прямоугольный профиль нарезки, $a/b = 1$. Моделирование, как

и ранее, проведено для двух значений расчетного фокуса.

Как следует из рис. 3, визуально область фокусировки мезоволновой ЗП представляет собой локализованное пятно с достаточно ограниченными пространственными размерами. Продольное распределение интенсивности в фокальной области сглажено, однако в поперечном направлении поле вблизи ЗП характеризуется наличием явно выраженных вторичных боковых максимумов. При этом ЗП со ступенчатым профилем кольцевых зон формируют более интенсивные фокальные области за счет сглаженного профиля фазы волны, а количество вторичных боковых максимумов уменьшается.

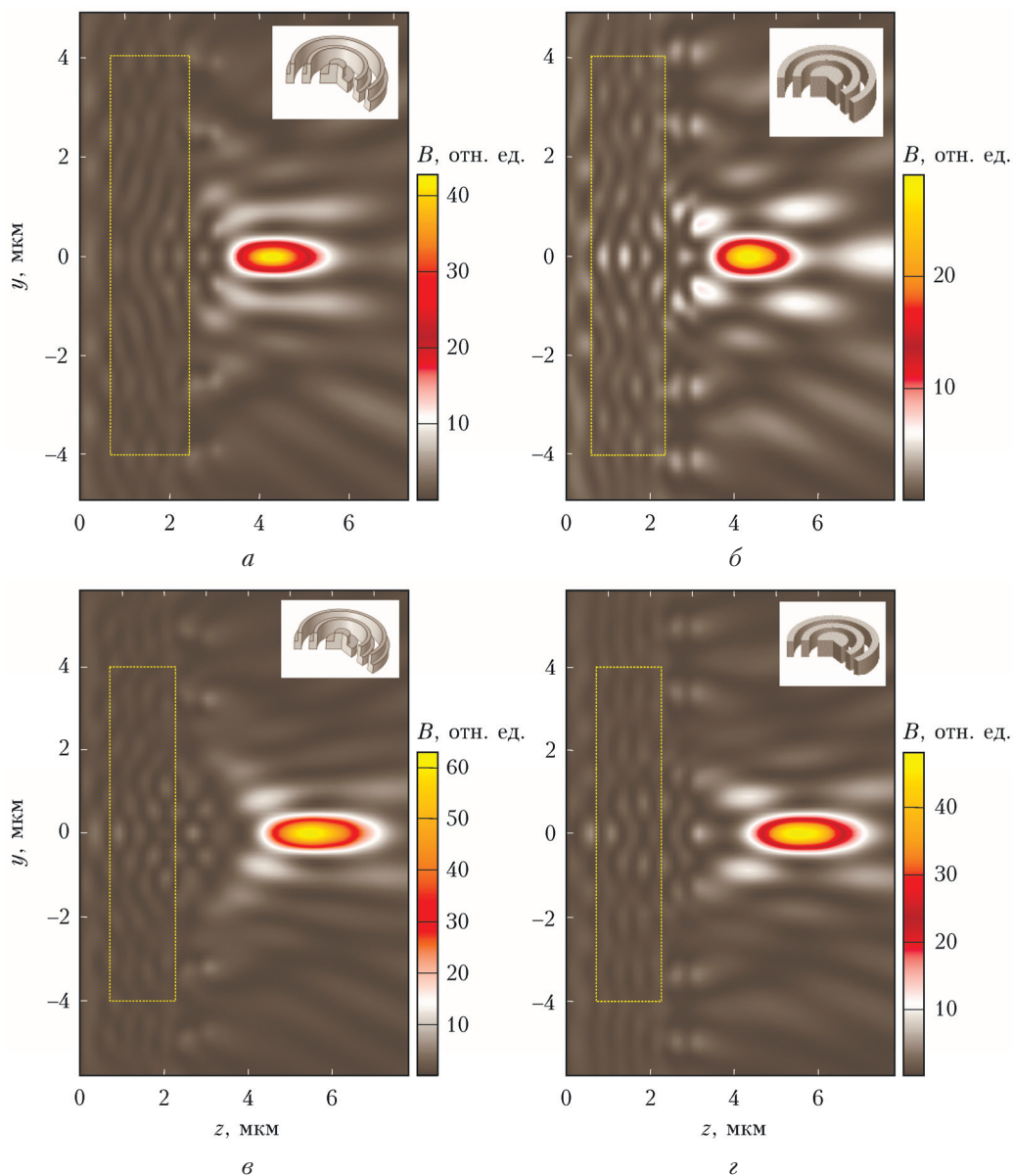


Рис. 3. Распределения нормированной интенсивности оптического поля V в плоскости $y-z$ при фокусировке плоской волны пятizonной фазовой ЗП со ступенчатым (а, в) и прямоугольным (б, г) профилями кольцевых зон. Расчетный фокус $f_d = \lambda$ (а, б) и 2λ (в, г), границы ЗП показаны прямоугольником (цвет. рисунок см. <http://iao.ru/ru/content/vol.35-2022/iss.08>)

В случае более длинного фокуса $f_d = 2\lambda$ (рис. 3, в, з) увеличивается отрыв фокального пятна от поверхности ЗП и структура фокальной области становится более равномерной в продольном и поперечном направлениях.

Для количественного исследования и сравнения области фокуса от различных конструктивных типов ЗП отдельно рассмотрим продольный w_z и поперечные w_x и w_y размеры фокальной перетяжки (рис. 4). Отметим, что эти параметры определялись в точке фокуса на уровне половины максимума интенсивности поля ($B_{\max}/2$).

Как показали наши расчеты, в направлении плоскости поляризации (вдоль оси x) пространственный размер фокуса w_x изменяется незначительно при варьировании формы слоев ЗП и практически не зависит от f_d , находясь вблизи дифракционного предела: $w_x = (0,567 \div 0,569)\lambda$. Однако поперек поляризации волны (рис. 4, а, б) наблюдается тенденция к уменьшению размера фокуса w_y в некотором диапазоне значений параметра a/b . При изменении a/b от 0,3 до 0,7 ширина фокальной области принимает минимальные субдифракционные значения $w_x \approx 0,411\lambda$ для короткой и $w_x \approx 0,47\lambda$ для длинной фокусировок. Другими словами, профиль нарезки фазовых выступов ЗП позволяет значительно уменьшить поперечный размер формируемого фокуса.

Интересно, что зависимость w_y от высоты слоев фазовых зон c/h не прослеживается.

Продольный размер w_z фокальной области ЗП (рис. 4, в, з) также чувствителен к дизайну ЗП и характеризуется наличием ярко выраженного максимума в зависимости $w_z(a/b)$ для близкого фокуса и более сглаженной зависимостью для большего значения расчетного фокуса. В среднем w_z составляет значения порядка длины волны излучения и тем больше, чем меньше высота верхнего слоя фазовой ступеньки (отношение c/h).

В заключение приведем итоговые данные по оптимизации фокусировки оптического излучения рассмотренными двуслойными фазовыми ЗП Френеля. Эти результаты удобно представить в виде поверхностей оптимизации фокальной интенсивности B_{\max} при одновременном варьировании размерных параметров формы фазовых выступов (рис. 5). Хорошо видно, что при увеличении фокального расстояния пластинки геометрическая форма фазовых выступов, обеспечивающая падение не более чем 15% от уровня максимально достижимой интенсивности, изменяется, переходя от несимметричного многоугольника с преобладанием нижнего слоя в каждой зоне ($a/b < 0,5$ и $c/h > 0,5$) к практически симметричной ступеньке, имеющей равные ширины и равные высоты слоев.

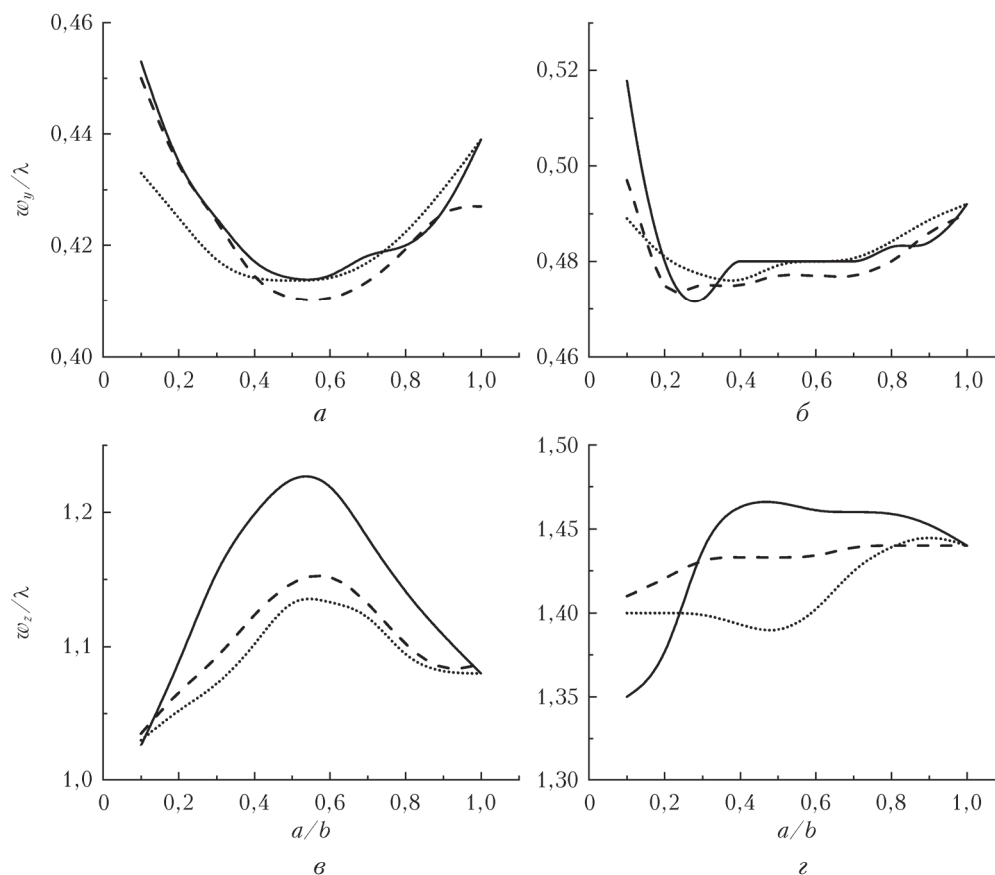


Рис. 4. Зависимость: а, б — поперечного w_y , в, з — продольного w_z размеров фокальной области двуслойной ЗП для $f_d = \lambda$ (а, в) и 2λ (б, з) от соотношения высот слоев: $c/h = 0,3$ (сплошная кривая); $0,5$ (штриховая кривая) и $0,7$ (пунктир) (цв. рисунок см. <http://iao.ru/ru/content/vol.35-2022/iss.08>)

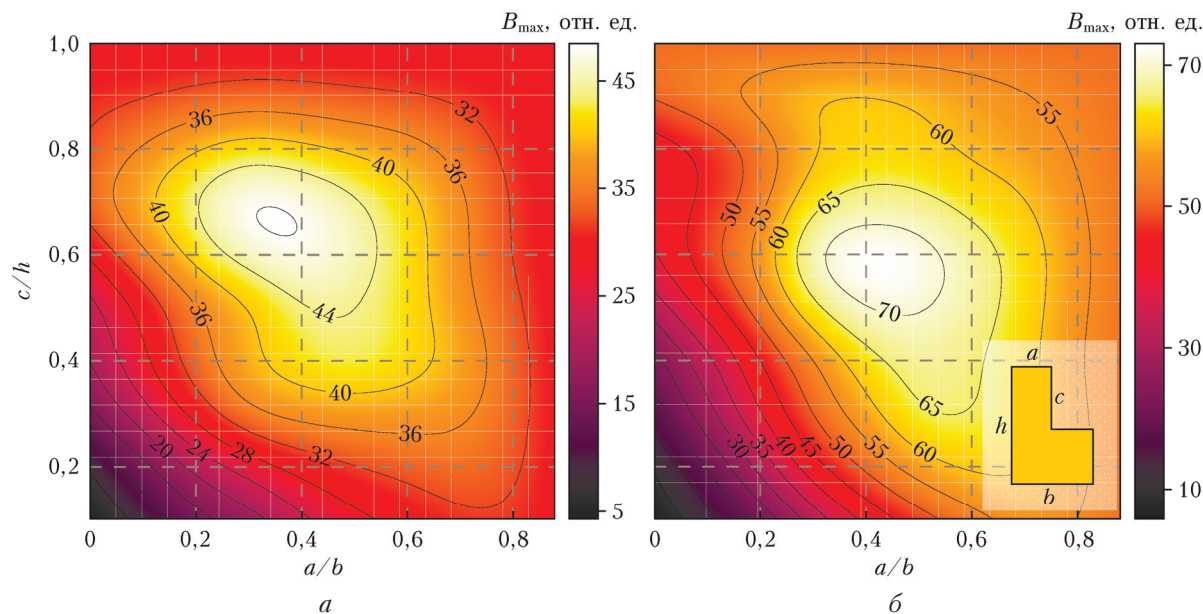


Рис. 5. Поверхности оптимизации фокальной интенсивности ЗП с $f_d = \lambda$ (а) и 2λ (б) при изменении параметров формы фазовых выступов (цвет. рисунок см. <http://iao.ru/ru/content/vol.35-2022/iss.08>)

Заключение

В работе представлены результаты численного моделирования фокусировки оптической волны через фазовую ЗП с мезоволновыми размерами и большим апертурным углом ($f_d \sim \lambda$). Рассмотрен киноформный двухслойный профиль фазовых выступов пластинки. Изучена пространственная структура области фокуса и показано, что интенсивность и размерные параметры пятна фокусировки чувствительны к типу конструктивного дизайна ЗП. Установлено, что в целом ЗП Френеля со ступенчатым профилем зон формируют более сглаженную структуру фокуса по сравнению с бинарной ЗП при одновременном увеличении его интенсивности. Это является следствием более эффективной фокусировки излучения ступенчатой пластинкой за счет сглаженного профиля фазы волны, формируемого отдельными слоями. Путем соответствующего подбора дизайна зон фазовой пластинки, а именно изменением высоты ступеней или соотношения между размером граней пластины, удастся значительно улучшить характеристики поля вблизи ЗП. Так, максимально острый фокус с субдифракционным размером достигается при равной ширине слоев пластинки и соотношении их высот $\sim 3:1$.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

Список литературы

1. Chen W.T., Zhu A.Y., Capasso F. Flat optics with dispersion-engineered metasurfaces // *Nat. Rev. Mater.* 2020. V. 5. P. 604–620. DOI: 10.1038/s41578-020-0203-3.
2. Lim C.S., Hong M.H., Lin Y., Xie Q., Luk'yanchuk B.S., Kumar A.S., Rahman M. Microlens array fabrication by laser interference lithography for super-resolution surface nanopatterning // *Appl. Phys. Lett.* 2006. V. 89. P. 191125. DOI: 10.1063/1.2374809.
3. Wu J., Cui X., Lee L.M., Yang C. The application of Fresnel zone plate based projection in optofluidic microscopy // *Opt. Express*. 2008. V. 16. P. 15595–15602.
4. Фишман А.И. Фазовые оптические элементы – киноформы // *Соросовский обр. журн.* 1999. № 12. С. 76–83.
5. Di Fabrizio E., Romanato F., Gentili M., Cabrini S., Kaulich B., Susini J., Barrett R. High-efficiency multilevel zone plates for keV X-rays // *Nature*. 1999. V. 401. P. 895–898. DOI: 10.1038/44791.
6. Niu L.-G., Wang D., Jiang T., Wu S.-Z., Li A.-W., Song J.-F. High fill-factor multilevel Fresnel zone plate arrays by femtosecond laser direct writing // *Opt. Commun.* 2011. V. 284, iss. 3. P. 777–781. DOI: 10.1016/j.optcom.2010.09.066.
7. Котляр В.В., Налимов А.Г., Шанина М.И., Соifer В.А., О'Фаолайн Л. Зонная пластинка на мембране для жесткого рентгеновского излучения // *Компьютерная оптика*. 2011. Т. 35, № 1. С. 36–41.
8. Chen W.T., Zhu A.Y., Capasso F. Flat optics with dispersion-engineered metasurfaces // *Nat. Rev. Mater.* 2020. V. 5. P. 604–620. DOI: 10.1038/s41578-020-0203-3.
9. Xie W., Yang J., Chen D., Huang J., Jiang X., He J. On-chip multiwavelength achromatic thin flat lens // *Opt. Commun.* 2021. V. 484. 126645. DOI: 10.1016/j.optcom.2020.126645.
10. Kotlyar V.V., Stafeev S.S., Nalimov A.G., Kotlyar M.V., O'Faolain L., Kozlova E.S. Tight focusing of laser light using a chromium Fresnel zone plate // *Opt. Express*. 2017. V. 25. P. 19662–19671. DOI: 10.1364/OE.25.019662.
11. Geints Y.E., Minin O.V., Panina E.K., Minin I.V. Controlling near-field focusing of a mesoscale binary phase plate in an optical radiation field with circular polarization // *Comp. Opt.* 2021. V. 45, N 4. P. 512–519. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-878.
12. Geints Yu.E., Panina E.K., Minin I.V., Minin O.V. Study of focusing parameters of wavelength-scale binary phase Fresnel zone plate // *J. Opt.* 2021. V. 23, N 6. 065101 (9 pp). DOI: 10.1088/2040-8986/abf891.
13. Гейнц Ю.Э., Панина Е.К., Минин О.В., Минин И.В. Фокусировка света бинарной зонной пластинкой Френеля с различными конструктивными особенностями //

- Оптика атмосф. и океана. 2021. Т. 34, № 7. С. 507–514; *Geints Yu.E., Panina E.K., Minin I.V., Minin O.V.* Light focusing by a binary Fresnel zone plate with various design features // *Atmos. Ocean. Opt.* 2021. V. 34, N 6. P. 724–731.
14. *Taflove A., Hagness S.* Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain method. Boston: Artech House Pub, 2000. 852 p.
15. *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. V. 22. P. 27425–27436.
16. *Minin I.V., Minin O.V., Gagnon N., Petosa A.* Investigation of the resolution of phase correcting Fresnel lenses with small values of F/D and subwavelength focus // *Comp. Opt.* 2006. V. 30. P. 65–68.

Yu.E. Geints, E.K. Panina. **Optimal light focusing by a Fresnel mesowavelength phase plate with stepped zone profile.**

The results of numerical simulation of the optical radiation focusing by Fresnel zone plates (ZP) with the wavelength-scale (mesowavelength) dimensions and a two-layer profile of phase ridges are presented. We show that the dimensions and intensity of the focusing area are sensitive to the type of ZP design. By changing the phase step shape (height and width of plate faces) it is possible to significantly improve the characteristics of the light field in the focusing region due to smoothing the wave phase profile after passing through individual ZP layers. A comparison is made with the case of a conventional binary ZP.