

СРАВНИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АМПЛИТУДНОЙ И ФАЗОВОЙ ЗОННЫХ ПЛАСТИНОК

Е.С. Козлова^{1,2}, В.В. Котляр^{1,2}, А.Г. Налимов^{1,2}¹ Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия,² Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

Аннотация

В работе с помощью FDTD-метода проведено сравнительное моделирование острой фокусировки лазерного света с помощью бинарных фазовой и амплитудных (тонкие металлические плёнки толщиной 20–30 нм) зонных пластинок Френеля. Вблизи колец зонной пластинки из серебра обнаружены субволновые локальные максимумы, интенсивность которых сравнима с интенсивностью в фокусе и которые объясняются возбуждением плазмонов.

Ключевые слова: амплитудная зонная пластинка, фазовая зонная пластинка, частотная дисперсия, острая фокусировка, FDTD-метод.

Цитирование: Козлова, Е.С. Сравнительное моделирование амплитудной и фазовой зонных пластинок / Е.С. Козлова, В.В. Котляр, А.Г. Налимов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 5. – С. 687–693. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-687-693.

Введение

Френелевская зонная пластинка (ЗП) известна в оптике много лет (смотри избранные статьи по ЗП [1]). Однако строгий анализ фазовых и амплитудных ЗП с короткими фокусными расстояниями, формирующих субволновые фокусные пятна в видимой и инфракрасной области спектра, стал проводиться относительно недавно. В [2] с помощью численного моделирования показано, что серебряная ЗП толщиной $h=300$ нм с фокусным расстоянием $f=0,5$ мкм (длина волны $\lambda=633$ нм) формирует субволновое фокусное пятно с диаметром по полупаду интенсивности (Full Width of Half Maximum) $\text{FWHM}=0,39\lambda$. В аналогичной статье [3] на основе численного расчёта сравнивали рабочие характеристики ЗП из серебра, золота, алюминия и вольфрама. Показано, что максимальную интенсивность в фокусе имеет серебряная ЗП (дифракционная эффективность составляет 40%), а минимальный диаметр пятна наблюдается у ЗП из вольфрама ($\text{FWHM}=0,52\lambda$). В [4] численно показано, что многослойная ЗП из 5 слоёв кварца и серебра толщиной по 30 нм увеличивает интенсивность фокуса в 10 раз по сравнению с ЗП из одного слоя. Увеличение интенсивности фокуса объясняется вкладом плазмонных мод. Остальные параметры ЗП в [4] такие же, как в [2, 3]. В [5–7] разрабатываются приближённые теории амплитудных и фазовых ЗП, предсказания которых сравниваются со строгим численным моделированием. В [8] теоретически исследуется эффект затенения в фазовой ЗП. Показано, что для ЗП с коротким фокусом ($\text{NA}>0,7$) из-за эффекта затенения интенсивность в фокусе уменьшается в 2 раза. Заметим, что дифракционная эффективность фазовой ЗП с фокусом, равным длине волны $f=\lambda$, равна 46% [3].

В предыдущих работах авторов [9–13] численно и экспериментально исследовалась бинарная ЗП диаметром 14 мкм, с фокусным расстоянием $f=\lambda=532$ нм, которая фокусировала линейно-поляризованный и радиально-поляризованный лазерный свет в субволновое фокусное пятно. Минимальный размер фокусного пятна, достигнутый экспериментально, был равен $(0,35 \times 0,38)\lambda$ [13].

В данной работе с помощью FDTD-метода (Finite Difference Time Domain method) исследуются бинарные амплитудные зонные пластинки Френеля из серебра с толщиной 20 нм и хрома с толщиной 30 нм. В предыдущих работах такие ультратонкие ЗП не исследовались. Показано, что учёт дисперсии материала (кварца, серебра и хрома) в рамках модели Селмейера и Друде–Лоренца приводит к изменению параметров фокусного пятна не больше, чем на 6%. Размеры фокусных пятен для фазовой и амплитудной ЗП почти одинаковые (все пятна имеют субволновый размер от 0,41 до 0,47 от длины волны), отличие только в меньшей (в 3 раза) максимальной интенсивности в фокусе. Важно отметить, что фазовую ЗП изготовить труднее, чем амплитудную, из-за разницы в аспектном отношении (в 30 раз больше). У фокусного пятна ЗП из хрома обнаружено почти полное отсутствие первых боковых лепестков, что увеличивает отношение сигнал/шум в микроскопии. Также обнаружены вблизи колец ЗП из серебра локальные максимумы, интенсивность которых сравнима с интенсивностью в фокусе и которые объясняются возбуждением поверхностных плазмон-поляритонов.

Амплитудная зонная пластинка

Рассмотрим фазовую ЗП, выполненную из кварцевого стекла и обладающую восемью зонами (рис. 1).

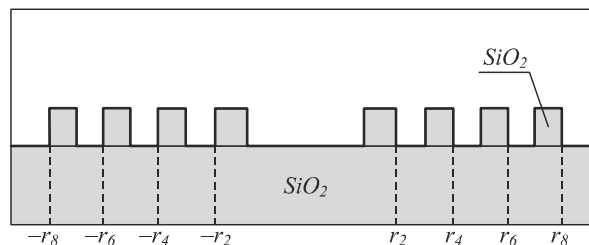


Рис. 1. Фазовая ЗП

Радиус зон легко рассчитать по стандартной формуле:

$$r_m = \sqrt{m\lambda f + m^2 \lambda^2 / 4}, \quad (1)$$

где r_m – радиус m -й зоны, мкм; λ – длина волны, нм; f – фокусное расстояние.

Высота рельефа рассчитывается по формуле:

$$h = \lambda/2(n-1), \quad (2)$$

где n – коэффициент преломления материала.

Построим пластинку с восемью зонами для фокусировки излучения с длиной волны $\lambda = 532$ нм со следующими характеристиками: $f = 532$ нм, $h = 532$ нм, $m = 8$ (для расчёта h использовался коэффициент преломления $n = 1,5$). В табл. 1 приведены радиусы зон, рассчитанные по формуле (1).

Табл. 1. Радиусы зон

| | | | | |
|------------|------|------|------|------|
| m | 1 | 2 | 3 | 4 |
| r_m , нм | 595 | 921 | 1219 | 1505 |
| m | 5 | 6 | 7 | 8 |
| r_m , нм | 1784 | 2060 | 2334 | 2606 |

Данную ЗП будем считать эталоном для сравнения. Проведём моделирование процесса фокусировки линейно-поляризованного света (направление поляризации вдоль оси y) с длиной волны 532 нм через описанную выше ЗП. Моделирование проводилось с помощью коммерческого пакета FullWAVE, реализующего FDTD-метод, с учётом и без учёта частотной дисперсии ($n = 1,5$). Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты для кварцевого стекла описывалась с помощью модели Селмейера (табл. 2) [14]:

$$\tilde{\epsilon}(\lambda) = \epsilon_\infty + \sum_m \frac{\Delta\epsilon_m \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_m^2 - i\lambda\eta_m}, \quad (3)$$

где λ – длина волны; $\epsilon_\infty(x, z)$ – диэлектрическая проницаемость на высоких частотах; $\Delta\epsilon_m(x, z)$ – величина резонанса; $\lambda_m(x, z)$ – резонансная длина волны; $\eta_m(x, z)$ – коэффициент демпфирования.

Табл. 2. Параметры модели Селмейера для кварцевого стекла

| m | $\Delta\epsilon_m$, МКМ | λ_m , МКМ | η_m , МКМ |
|-----------------------|--------------------------|-------------------|----------------|
| 1 | 0,69616630 | 0,068404300 | 0 |
| 2 | 0,40794260 | 0,11624140 | 0 |
| 3 | 0,89747940 | 9,8961610 | 0 |
| $\epsilon_\infty = 1$ | | | |

Учёт дисперсии материала производится потому, что моделирование дифракции монохроматической волны FDTD-методом фактически состоит в моделировании дифракции импульса с прямоугольной огибающей с длиной в несколько десятков длин волн. Для центральной длины волны 532 нм это соответствует импульсу длительностью в несколько десятков фемтосекунд. В ходе анализа результатов здесь и далее проводилось усреднение рассчитанной интенсивности поля по 20 периодам излучения.

Для моделирования использовались следующие параметры сетки: $h_x = \lambda/30$ нм, $h_y = \lambda/30$ нм, $h_z = \lambda/30$ нм, $h_\tau = 10$ – шаги дискретизации по пространству и времени. Данные шаги обеспечивают сходимость численного метода, а дальнейшее уменьшение шага не приводит к существенным изменениям (СКО менее 0,001 %). Результаты моделирования представлены на рис. 2 и в табл. 5.

На рис. 2 приведено распределение интенсивности в фокусе вдоль направлений, перпендикулярных направлению распространения света. Разная ширина фокусного пятна по разным декартовым осям (рис. 2а и рис. 2б) объясняется линейной поляризацией фокусируемого пучка. Этот эффект хорошо известен и объяснён теоретически, например, в [15]. В направлении поляризации (ось y) в формировании фокуса вносят вклад и поперечная, и продольная составляющие напряжённости электрического поля, а в поперечном направлении (ось x) вклад вносит только поперечная составляющая напряжённости электрического поля.

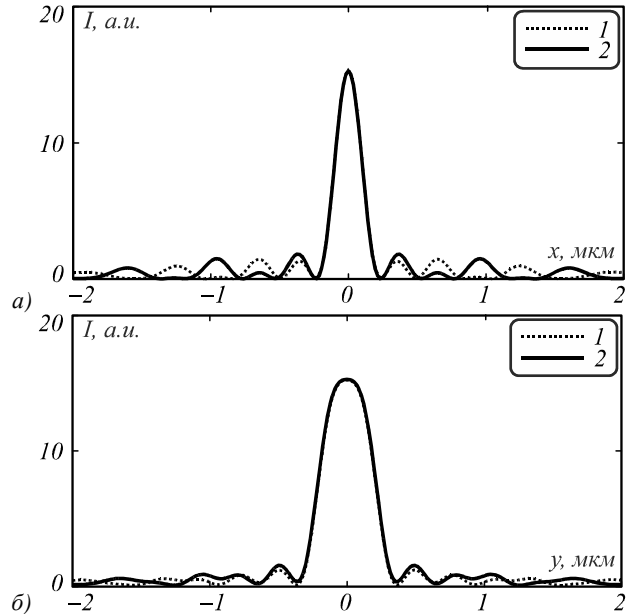


Рис. 2. Распределение интенсивности в фокусе для фазовой ЗП вдоль x (а) и y (б) для случаев без учёта (линия 1) и с учётом (линия 2) частотной дисперсии

Из рис. 2 видно, что распределение интенсивности в фокусе, полученное с помощью моделирования FDTD-методами с учётом и без учёта дисперсии, практически совпадают. СКО составило 7,5 % (такая цифра обусловлена расхождениями в лепестках).

Амплитудная зонная пластинка из серебра

Рассмотрим амплитудную ЗП, полученную путём структурирования плёнки металла, напылённой на кварцевую подложку (рис. 3).

Проведём моделирование процесса фокусировки линейно-поляризованного света с длиной волны 532 нм через амплитудную ЗП с помощью коммерческого пакета FullWAVE с учётом и без учёта частотной дисперсии. Для учёта зависимости диэлектрической проницаемости металлов воспользуемся моделью Друде–Лоренца [16]:

$$\tilde{\epsilon}(x, z, \omega) = \epsilon_\infty(x, z) + \frac{\omega_p^2}{-2i\omega\nu - \omega^2} + \sum_m \frac{A_m \omega_m^2}{-\omega^2 - 2i\omega\delta_m + \omega_m^2}, \quad (4)$$

где ω – частота; ω_p – плазменная частота; ν – частота столкновений, A_m – амплитуда резонанса, δ_m – коэффициент демпфирования, ω_m – резонансная частота.

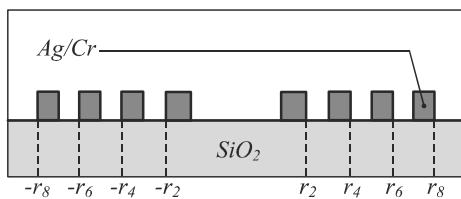


Рис. 3. Амплитудная ЗП

Изначально было промоделировано распространение света через ЗП с рельефом из серебра ($n = 2,66 + 4,16i$) и высотой рельефа 20 нанометров. Параметры модели Друде для серебра: $\omega_p = 41,94605$, $\nu = 0,243097$. Параметры модели Лоренца для серебра приведены в табл. 3.

Табл. 3. Параметры модели Лоренца для серебра

| m | $A_m, \text{Гц}$ | $\delta_m, \text{Гц}$ | $\omega_m, \text{Гц}$ |
|-----|------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 7,924697 | 19,68071 | 4,132646 |
| 2 | 0,501327 | 2,289161 | 22,6941 |
| 3 | 0,013329 | 0,329194 | 41,45307 |
| 4 | 0,826552 | 4,639097 | 46,001 |
| 5 | 1,113336 | 12,25 | 102,759 |

Для моделирования использовались следующие параметры сетки: $h_x = \lambda/30$ нм, $h_y = \lambda/30$ нм, $h_z = \lambda/30$ нм, $h_\tau = 10$ – шаги дискретизации по пространству и времени.

На рис. 4. приведено распределение интенсивности в фокусе вдоль направлений, перпендикулярных направлению распространения света.

Из рис. 4 видно, что распределение интенсивности в фокусе, полученное с помощью моделирования FDTD-методами с учётом и без учёта дисперсии, практически совпадают. СКО составило 1,75 %.

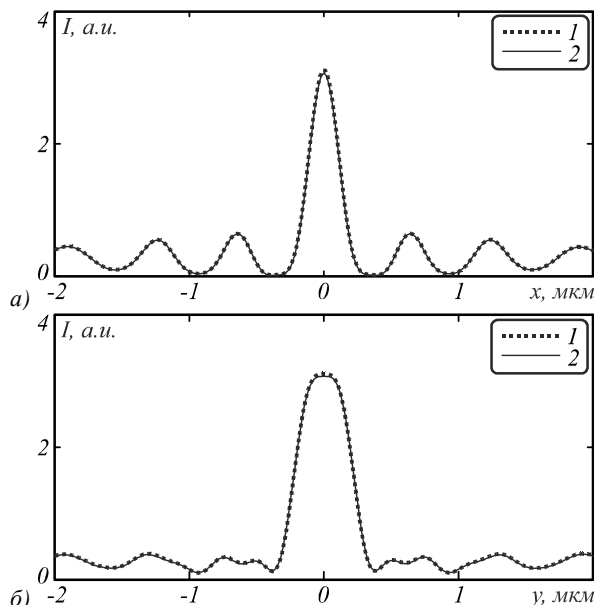


Рис. 4. Распределение интенсивности в фокусе для фазовой ЗП вдоль x (а) и y (б) для случаев без учёта (линия 1) и с учётом (линия 2) частотной дисперсии

Амплитудная зонная пластинка из хрома

Теперь рассмотрим ЗП с рельефом из хрома ($n = 0,143 + 3,05i$) и высотой рельефа 30 нм. Проведём моделирование процесса фокусировки линейно-поляризованного света с длиной волны 532 нм через амплитудную ЗП с помощью коммерческого пакета FullWAVE с учётом и без учёта частотной дисперсии. Для учёта зависимости диэлектрической проницаемости металлов воспользуемся моделью Друде–Лоренца (4). Параметры модели Друде для хрома: $\omega_p = 22,31521$, $\nu = 0,238032$. Параметры модели Лоренца для хрома приведены в табл. 4.

Табл. 4. Параметры модели Лоренца для хрома

| m | $A_m, \text{Гц}$ | $\delta_m, \text{Гц}$ | $\omega_m, \text{Гц}$ |
|-----|------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 1191,853 | 16,07984 | 0,612807 |
| 2 | 58,79069 | 6,609194 | 2,750032 |
| 3 | 34,21399 | 13,55265 | 9,977106 |
| 1 | 1,238159 | 6,761129 | 44,44113 |

Для моделирования использовались следующие параметры сетки: $h_x = \lambda/30$ нм, $h_y = \lambda/30$ нм, $h_z = \lambda/30$ нм, $h_\tau = 10$ – шаги дискретизации по пространству и времени.

На рис. 5 приведено распределение интенсивности в фокусе вдоль направлений, перпендикулярных направлению распространения света.

Из рис. 5 видно, что распределение интенсивности в фокусе, полученное с помощью моделирования FDTD-методами с учётом и без учёта дисперсии, практически совпадают. СКО составило 4,5 % (такая цифра обусловлена расхождениями в центре фокусного пятна). Видно также (рис. 5а), что рядом с фокусным пятном вдоль оси x почти отсутствуют первые боковые лепестки. При сканировании таким фокусным пятном вдоль оси x , например, в конфокальном микроскопе, увеличивается отношение сигнал/шум при обнаружении микро- и нанообъектов.

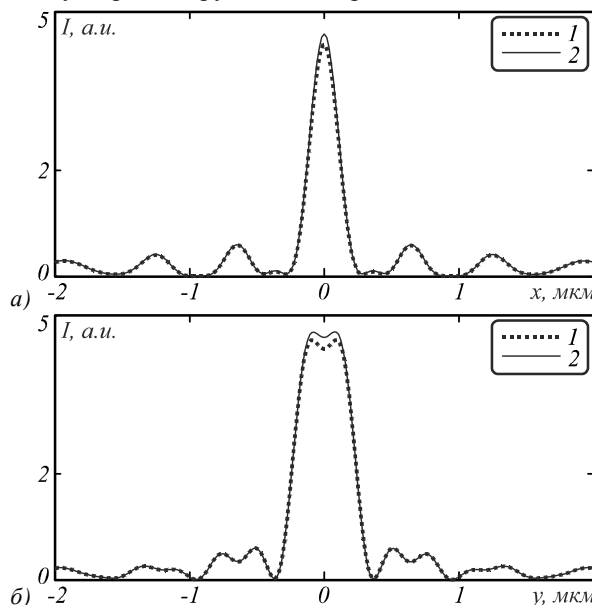


Рис. 5. Распределение интенсивности в фокусе для фазовой ЗП вдоль x (а) и y (б) для случаев без учёта (линия 1) и с учётом (линия 2) частотной дисперсии

В табл. 5-6 приведены характеристики фокусных пятен, формируемых моделируемыми ЗП. Во второй колонке таблицы указан «реальный фокус», соответствующий максимуму интенсивности на оптической оси. Можно видеть, что расстояние до максимума интенсивности на оптической оси отличается от геометрического фокусного расстояния $f = 532$ нм.

Табл. 5. Результаты моделирования без учёта дисперсии

| Мат-л | f , нм | FWHM _x , λ | FWHM _y , λ | I_{max} , а.е. |
|------------------|----------|-------------------------------|-------------------------------|------------------|
| SiO ₂ | 500 | 0,41 λ | 0,79 λ | 15,22 |
| Ag | 700 | 0,47 λ | 0,84 λ | 3,11 |
| Cr | 600 | 0,46 λ | 0,87 λ | 4,39 |

На рис. 6 представлены картины дифракции линейно-поляризованного лазерного излучения на всех вышепредставленных ЗП, полученные с учётом частотной дисперсии.

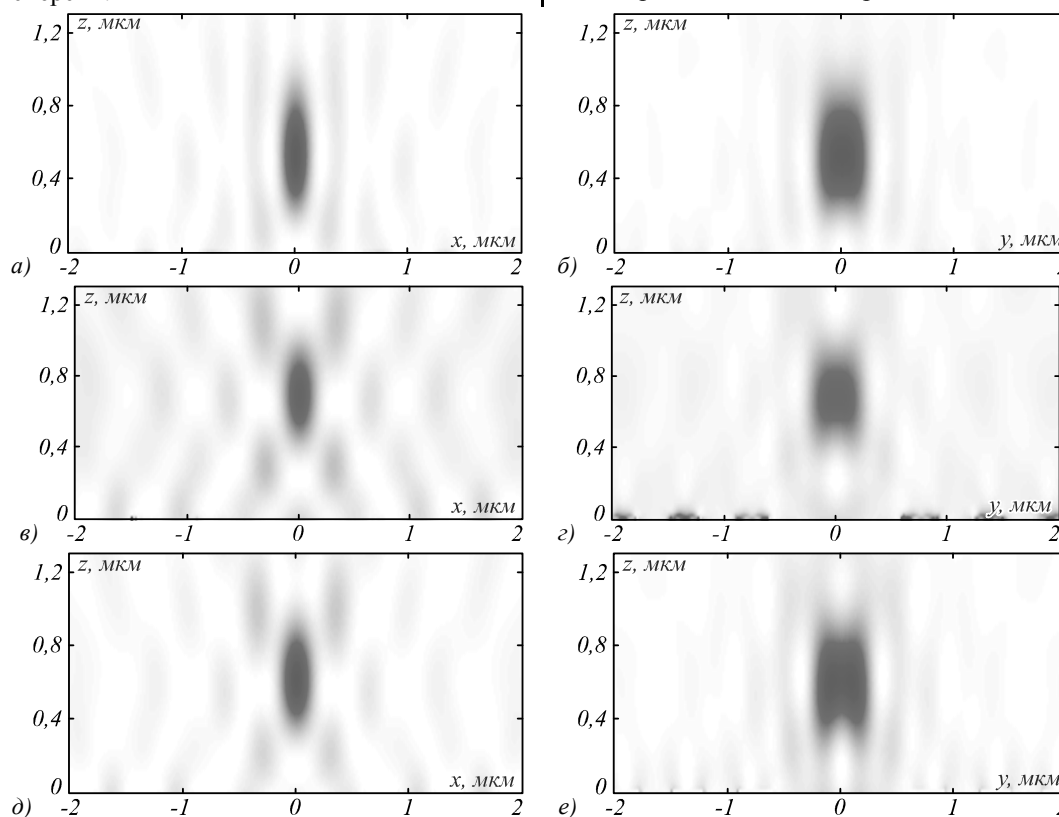


Рис. 6. Распределение интенсивности в плоскостях ZX и ZY для фазовой (а) и (б), амплитудных из серебра (в) и (г) и из хрома (д) и (е) ЗП

На рис. 6г видны локальные максимумы интенсивности вблизи участков плёнки серебра вдоль оси Y (рис. 6г). Вдоль оси X подобные локальные максимумы практически отсутствуют (рис. 6в). На рис. 7 показано распределение интенсивности вблизи ЗП из серебра вдоль оси Y. Наличие таких субволновых локальных максимумов интенсивности объясняется возбуждением плазмонных мод в ультратонких полосках серебра. Этот эффект для ультратонких полосок серебра (наноантенны) известен [17], но у ЗП он ранее не упоминался. Видно, что величина интенсивности этих поверхностных плазмон-поляритонов такая же (3,6 условных единиц), как интенсивность в фокусе (3,2 условных единиц).

Табл. 6. Результаты моделирования с учётом дисперсии

| Мат-л | f , нм | FWHM _x , λ | FWHM _y , λ | I_{max} , а.е. |
|------------------|----------|-------------------------------|-------------------------------|------------------|
| SiO ₂ | 500 | 0,41 λ | 0,80 λ | 15,35 |
| Ag | 700 | 0,48 λ | 0,85 λ | 3,07 |
| Cr | 600 | 0,45 λ | 0,87 λ | 4,58 |

Из рис. 3–5 и табл. 5–6 видно, что фазовая ЗП и амплитудная ЗП из хрома формируют достаточно похожие по геометрическим размерам фокусные пятна. При этом интенсивность в фокусе для амплитудной ЗП падает всего в 3,4 раза. Точно изготовить амплитудную ЗП проще, чем фазовую ЗП. В следующей статье мы планируем детально сравнить экспериментальные результаты по субволновой фокусировке лазерного излучения, полученные с помощью изготовленных ЗП из хрома и серебра с указанными выше характеристиками, с приведёнными здесь расчётными данными.

Заключение

В работе с помощью FDTD-метода проведено сравнительное моделирование острой фокусировки лазерного света с помощью бинарных фазовой и амплитудных ЗП, состоящих из колец металла высотой 20–30 нм, находящихся на прозрачной подложке из кварца. Показано, что учёт дисперсии материала (кварца, серебра и хрома) приводит к изменению параметров фокусного пятна не больше, чем на 6% (рис. 3–5). Размеры фокусных пятен для фазовой и амплитудной ЗП почти одинаковые, отличие только в меньшей (в 3 раза) максимальной интенсивности в фокусе (табл. 5, 6). При этом фазовую ЗП изготовить труднее, чем амплитудную,

из-за разницы в аспектном отношении (в 30 раз больше). У фокусного пятна ЗП из хрома обнаружено почти полное отсутствие первых боковых лепестков (рис. 5а), что увеличивает отношение сигнал/шум в микроскопии. Также обнаружены вблизи колец ЗП из серебра локальные субволновые максимумы, интенсивность которых сравнима с интенсивностью в фокусе и которые объясняются возбуждением плазмонных мод в ультратонких полосках серебра (рис. 7).

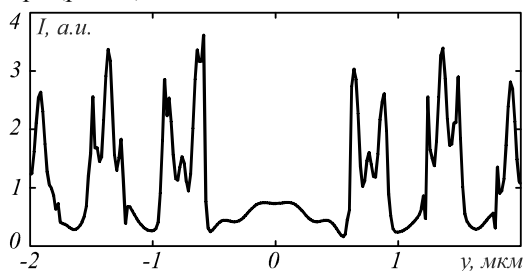


Рис. 7. Распределение интенсивности вблизи ЗП из серебра вдоль оси Y

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-3970.2014.9) и молодого кандидата наук (МК.-4816.2014.2), а также грантов РФФИ (14-07-31092, 14-07-97039, 14-29-07133, 14-07-31218, 15-07-01174).

Литература

1. **Ojeda-Castaneda, J** Selected Papers on Zone Plates / J. Ojeda-Castaneda, C.C. Gomez-Reino // SPIE Milestone Series. – 1996. – Vol. MS198.
2. **Fu, Y.** Plasmonic microzone plate: superfocusing at visible regime / Y. Fu, W. Zhou, L. Lim, C. Du, X. Luo // Applied Physics Letters. – 2007. – Vol. 91. – P. 061124.
3. **Mote, R.** Near-field focusing properties of zone plates in visible regime-New insight / R. Mote, S. Yu, B. Ng, W. Zhou, S. Lau // Optics Express. – 2008. – Vol. 16(13). – P. 9554-9564.
4. **Kim, H.** High efficient optical focusing of a zone plate composed of metal/dielectric multilayer / H. Kim, H. Ko, M. Cheng // Optics Express. – 2009. – Vol. 17(5). – P. 3078-3083.
5. **Carretero, L.** Near-field electromagnetic analysis of perfect black Fresnel zone plates using radial polarization / L. Carretero, M. Perez-Molina, S. Blaya, P. Acebal, A. Fimia, R. Mardrigal, A. Murciano // Journal of Lightwave Technology. – 2011. – Vol. 29(17). – P. 2585-2591.
6. **Carretero, L.** Vectorial diffraction analysis of near-field focusing of perfect black Fresnel zone plates under various polarization states / L. Carretero, M. Perez-Molina, P. Gonzalez, S. Blaya, A. Fimia, R. Mardrigal, A. Murciano // Journal of Lightwave Technology. – 2011. – Vol. 29(6). – P. 822-829.
7. **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(22). – P. 27425-27436.
8. **Zhang, Y.** Effect of the shadowing in high-numerical-aperture binary phase Fresnel zone plate / Y. Zhang, C. Zheng, Y. Zhuang // Optics Communication. – 2014. – Vol. 317. – P. 88-92.
9. **Стафеев, С.С.** Сравнительное моделирование двумя методами острой фокусировки зонной пластинкой /

- С.С. Стафеев, В.В. Котляр // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 3. – С. 305-310.
10. **Стафеев, С.С.** Субволновая фокусировка с помощью зонной пластинки Френеля с фокусным расстоянием 532 нм / С.С. Стафеев, Л. О'Фаолейн, М.И. Шанина, В.В. Котляр, В.А. Соيفер // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 4. – С. 460-461.
11. **Stafeev, S.S.** Subwavelength focusing of laser light by microoptics / S.S. Stafeev, V.V. Kotlyar, L. O'Faolain // Journal of Modern Optics. – 2013. – Vol. 60, Issue 13. – P. 1050-1059.
12. **Стафеев, С.С.** Острая фокусировка смешанного линейно-радикально-поляризованного света бинарной микролинзой / С.С. Стафеев, Л. О'Фаолейн, М.И. Шанина, А.Г. Налимов, В.В. Котляр // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 606-613.
13. **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(14). – P. 4388-4394.
14. **Couairon, A.** Filamentation and damage in fused silica induced by tightly focused femtosecond laser pulses / A. Couairon, L. Sudrie, M. Franco, B. Prade, A. Mysyrowicz // Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics. – 2005. – Vol. 71(12). – P. 125435-125441.
15. **Kotlyar, V.V.** Analysis of the shape of a subwavelength focal spot for the linearly polarized light / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, Y. Lin, L. O'Faolain, A.A. Kovalev // Applied Optics. – 2013. – Vol. 52, Issue 3. – P. 330-339.
16. **Vial, A.** A new model of dispersion for metals leading to a more accurate modeling of plasmonic structures using the FDTD method / A. Vial, T. Laroche, M. Dridi, L. Le Cunff // Applied Physics A. – 2011. – Vol. 103, Issue 3. – P. 849-853.
17. **Barnard, E.S.** Imaging the hidden modes of ultrathin plasmonic strip antennas by cathodoluminescence / E.S. Barnard, T. Coenen, E.J.R. Vesseur, A. Polman, M.L. Brongersma // Nano Letters. – 2011. – Vol. 11. – P. 4265-4269.

References

- [1] Ojeda-Castaneda J, Gomez-Reino CC. Selected Papers on Zone Plates. SPIE Milestone Series 1996; MS198.
- [2] Fu Y, Zhou W, Lim L, Du C, Luo X. Plasmonic microzone plate: superfocusing at visible regime. Appl Phys Lett 2007; 91: 061124.
- [3] Mote R, Yu S, Ng B, Zhou W, Lau S. Near-field focusing properties of zone plates in visible regime new insight. Opt Express 2008; 16(13): 9554-64.
- [4] Kim H, Ko H, Cheng M. High efficient optical focusing of a zone plate composed of metal/dielectric multilayer. Opt Express 2009; 17(5): 3078-83.
- [5] Carretero L, Perez-Molina M, Blaya S, Acebal P, Fimia A, Mardrigal R, Murciano A. Near-field electromagnetic analysis of perfect black Fresnel zone plates using radial polarization. Journal of Lightwave Technology 2011; 29(17): 2585-91.
- [6] Carretero L, Perez-Molina M, Gonzalez P, Blaya S, Fimia A, Mardrigal R, Murciano A. Vectorial diffraction analysis of near-field focusing of perfect black Fresnel zone plates under various polarization states. Journal of Lightwave Technology 2011; 29(6): 822-9.
- [7] 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): 27425-36.
- [8] Zhang Y, Zheng C, Zhuang Y. Effect of the shadowing in high-numerical-aperture binary phase Fresnel zone plate. Opt Commun 2014; 317: 88-92.

- [9] Stafeev SS, Kotlyar VV. Comparative Modeling TWO Methods of Sharp Focusing with Zone Plate Using. *Computer Optics* 2011; 35(3): 305-10.
- [10] Stafeev SS, O'Faolain L, Shanina MI, Kotlyar VV, Soifer VA. Subwavelength Focusing using Fresnel Zone Plate with Focal Length of 532 nm. *Computer Optics* 2011; 35(4): 460-1.
- [11] Stafeev SS, Kotlyar, VV, O'Faolain L. Subwavelength focusing of laser light by microoptics. *J Mod Opt* 2013; 60(13): 1050-9.
- [12] Stafeev SS, O'Faolain L, Shanina MI, Nalimov AG, Kotlyar VV Sharp Focusing of a Mixture of Radially and Linearly Polarized Beams Using Binary Microlens. *Computer Optics* 2014; 38(4): 606-13.
- [13] Stafeev SS, O'Faolain L, Kotlyar VV, Nalimov AG. Tight focus of light using micropolarizer and microlens. *Appl Opt* 2015; 54(14): 4388-94.
- [14] Couairon A, Sudrie L, Franco M, Prade B, Mysyrowicz A. Filamentation and damage in fused silica induced by tightly focused femtosecond laser pulses *Phys Rev B* 2005; 71(12): 125435-41.
- [15] Kotlyar VV, Stafeev SS, Lin Y, O'Faolain L, Kovalev AA. Analysis of the shape of a subwavelength focal spot for the linearly polarized light. *Appl Opt* 2013; 52 (3): 330-9.
- [16] Vial A, Laroche T, Dridi M, Le Cunff L. A new model of dispersion for metals leading to a more accurate modeling of plasmonic structures using the FDTD method. *Applied Physics A* 2011; 103(3): 849-53.
- [17] Barnard ES, Coenen T, Vesseur EJR, Polman A, Brongersma ML. Imaging the hidden modes of ultrathin plasmonic strip antennas by cathodoluminescence. *Nano Lett* 2011; 11: 4265-9.

COMPARATIVE MODELING OF AMPLITUDE AND PHASE ZONE PLATES

E.S. Kozlova^{1,2}, *V.V. Kotlyar*^{1,2}, *A.G. Nalimov*^{1,2}

¹*Image Processing Systems Institute,*

Russian Academy of Sciences, Samara, Russia,

²*Samara State Aerospace University, Samara, Russia*

Abstract

In this paper using FDTD-method, we conduct a comparative modeling of a sharp focus of the laser light by using binary-phase and binary-amplitude Fresnel zone plates, with the latter being fabricated as thin metal films of 20-30-nm thickness. Subwavelength local maximums are found near the rings of the silver zone plates, with their intensity being comparable with the intensity in the focus. They can be explained by the excitation of surface plasmons.

Keywords: amplitude zone plate, phase zone plate, frequency dispersion, sharp focus, FDTD method.

Citation: Kozlova ES, Kotlyar VV, Nalimov AG. Comparative modeling of amplitude and phase zone plates. *Computer Optics* 2015; 39(5): 687-93. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-687-693.

Acknowledgements: The work was partially funded by the Russian Federation Ministry of Education and Science, Russian Science Foundation, Presidential grants for support of leading scientific schools and Russian Foundation of Basic Research Grants.

Сведения об авторах

Козлова Елена Сергеевна, 1989 года рождения. В 2011 году окончила Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ по специальности «Прикладные математика и информатика». Кандидат физико-математических наук с 2014 года. Научный сотрудник лаборатории лазерных измерений Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН). Область научных интересов: дифракционная оптика, численные методы.

E-mail: kozlova.elena.s@gmail.com.

Elena Sergeevna Kozlova, (b. 1985) received her Master's degree in Applied Mathematics and Informatics in Samara State Aerospace University (2011). She received her Candidate of Phys & Math degree from SSAU in 2014. She is a researcher at the Laser Measurements laboratory of the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS). Current research interests: diffractive optics, FDTD method, near-field optics.

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

Victor Victorovich Kotlyar is the head of the Laser Measurements laboratory at the Image Processing Systems Institute (Samara) of the Russian Academy of Sciences and a Professor of Computer Science sub-department at Samara State Aerospace University. He graduated from Kuibyshev State University (1979), received his Candidate and DrSc degrees in Phys & Math from Saratov State University (1988) and Moscow Central Design Institute of Unique Instru-

mentation of the RAS (1992). He is SPIE- and OSA-member. He is a co-author of 300 scientific papers, 5 books and 7 inventions. His current research interests are in diffractive optics, gradient optics, nanophotonics, optical vortices.

Налимов Антон Геннадьевич, 1980 года рождения, окончил Самарский государственный аэрокосмический университет в феврале 2003 года по специальности «Физика». Поступил в очную аспирантуру СГАУ по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» в 2003 году, окончил её по специальности 01.04.05 «Оптика» в 2006 году. Работает на кафедре технической кибернетики СГАУ в должности доцента, в Институте систем обработки изображений РАН в должности научного сотрудника. Кандидат физико-математических наук, соавтор 78 работ и 3 патентов.

Anton Gennadyevich Nalimov (b. 1980), graduated from Samara State Aerospace University (SSAU) in 2003. He received his Candidate of Phys & Math degree from SSAU in 2006. Currently, he works as an associate professor at SSAU's Technical Cybernetics sub-department and a researcher at the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences. He has coauthored 78 research papers and 3 inventions.

*Поступила в редакцию 5 ноября 2015 г.
Окончательный вариант – 18 ноября 2015 г.*