

Моделирование плазмонной линзы в тонких металлических пленках золота и серебра

Е.С. Козлова^{1,2}, В.В. Котляр^{1,2}

¹Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

²Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34а, Самара, Россия, 443086

Аннотация

С помощью FDTD-метода показано, что плазмонная линза с непрерывным рельефом в виде кольцевой диафрагмы диаметром 5 мкм и толщиной 350 нм и дискообразного углубления с диаметром 1,6 мкм в тонкой серебряной пленке толщиной 100 нм, позволяет сфокусировать на расстоянии 580 нм радиально поляризованный гауссов пучок с длиной волны 633 нм в пятно с шириной по полуспаду интенсивности 0,38 от длины волны и максимальной интенсивностью в 5,157 раз больше интенсивности падающего излучения.

Ключевые слова

Плазмонная линза, поверхностный плазмон-поляритон, фокусировка, FDTD-метод

1. Введение

В настоящее время большое количество работ посвящено фокусировке электромагнитного излучения плазмонными линзами, которые позволяют возбуждать и фокусировать поверхностные плазмон-поляритоны. Плазмонные линзы, фокусирующие затухающие волны вблизи своей поверхности, часто имеют достаточно простую структуру в виде набора концентрических колец и/или канавок [1-3]. Показано, что такие линзы позволяют фокусировать излучение с шириной по полуспаду интенсивности 0,32-0,38 от длины волны. В данной работе также исследуется плазмонная линза для фокусировки излучения.

2. Моделирование

В данной работе была исследована плазмонная линза с непрерывным рельефом в тонких пленках (высотой 200 и 100 нм) золота и серебра. Линза представляла собой круговую диафрагму с диаметром $D_2 = 5$ мкм и толщиной 350 нм и дискообразное углубление в центре, глубиной 80 нм. Исследование проводилось путем численного моделирования процесса фокусировки радиально поляризованного гауссова пучка с длиной волны $\lambda = 633$ нм. Радиус гауссова пучка для обеих компонент E_x и E_y был выбран таким образом, чтобы его максимальная интенсивность приходилась на диафрагму. В процессе моделирования варьировалась высота пленки: 200 нм и 100 нм, а также диаметр центрального углубления D_1 : 1 мкм, 1,6 мкм, 2 мкм. На рис. 1 показаны результаты моделирования.

Из рис. 1 видно, что для обоих металлов толстая пленка дает более высокую интенсивность вблизи элемента. Однако, этим излучением достаточно сложно воспользоваться при решении практических задач. В связи с этим оптимизация дизайна проводилась для получения максимальной интенсивности на некотором расстоянии от линзы. В этом случае, наиболее приемлемой оказалась толщина пленки в 100 нм. Сравнивая результаты для тонкой пленки можно видеть, что в обоих случаях лучшим оказался дизайн с диаметром углубления $D_1 = 1,6$ мкм, при этом интенсивность в фокусе плазмонной линзы из серебра в 2 раза выше, чем интенсивность в фокусе плазмонной линзы из золота. В то же время ширина фокального пятна по полуспаду интенсивности для обеих линз практически одинакова и равна $\text{FWHM} = 0,38\lambda$.

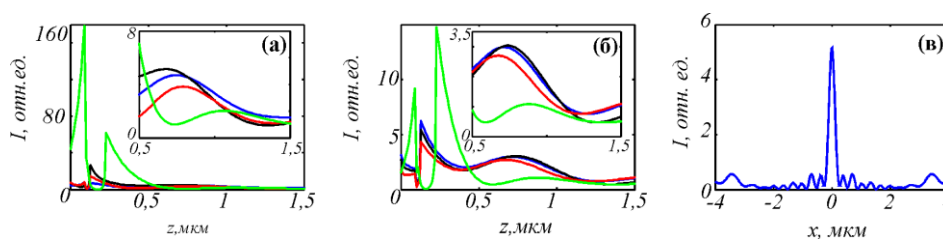


Рисунок 1: Сечение интенсивности вдоль оптической оси для серебряной (а) и золотой (б) плазмонных линз: с толщиной пленки 100 нм и $D1 = 1$ мкм (красная линия), $D1 = 1,6$ мкм (черная линия), $D1 = 2$ мкм (синяя линия), а также толщиной пленки 200 нм и $D1 = 1$ мкм (зеленая линия); двумерное распределение в фокусе серебряной линзы с $D1 = 1,6$ мкм

3. Заключение

С помощью моделирования FDTD-методом исследована плазмонная линза с непрерывным рельефом в тонких пленках (высотой 200 и 100 нм) золота и серебра. Линза представляла собой круговую диафрагму с диаметром 5 мкм и толщиной 350 нм и дискообразное углубление в центре, глубиной 80 нм. Радиально поляризованный пучок с длиной волны $\lambda = 633$ нм использовался в качестве входящего излучения. Показано, что серебряная плазмонная линза лучше фокусирует излучение, чем золотая: при практически одинаковых геометрических размерах пятна, интенсивность в фокусе серебряной плазмонной линзы в 2 раза больше. Показано, что плазмонная линза, изготовленная в серебряной пленке толщиной 100 нм, с диаметром центрального углубления 1,6 мкм позволяет сфокусировать на расстоянии 580 нм излучение в пятно с $\text{FWHM} = 0,38\lambda$ и максимальной интенсивностью в 5,157 раз больше интенсивности падающего излучения. Предложенная линза может применяться для формирования оптических пинцетов и ловушек [4].

4. Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ (грант № 18-29-20003) в части моделирования серебряной плазмонной линзы, Российского научного фонда (грант № 18-19-00595) в части золотой плазмонной линзы и Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в частях «Введение» и «Заключение».

5. Литература

- [1] Chang, K.-H. Three-Dimensional Resolvable Plasmonic Concentric Compound Lens: Approaching the Axial Resolution from Microscale to Nanoscale / K.-H. Chang, Y.-C. Chen, W.-H. Chang, P.-T. Lee // ACS Photonics. – 2018. – Vol. 5(3). – P. 834-843. DOI: 10.1021/acsp Photonics.7b01003.
- [2] Zhu, Y. Robustly Efficient Superfocusing of Immersion Plasmonic Lenses Based on Coupled Nanoslits / Y. Zhu, W. Yuan, Y. Yu, P. Wang // Plasmonics. – 2016. – Vol. 11. – P. 1543-1548. DOI: 10.1007/s11468-016-0208-3.
- [3] Chang, K.-H. Efficient modulation of subwavelength focusing via metaaperture-based plasmonic lens for multifunction applications / K.-H. Chang, Y.-C. Chen, W.-H. Chang, P.-T. Lee // Sci. Rep. – 2018. – Vol. 8. – P. 13648. DOI: 10.1038/s41598-018-31860-1.
- [4] Pan, Y.-L. Optical-trapping of particles in air using parabolic reflectors and a hollow laser beam / Y.-L. Pan, A. Kalume, I.C.D. Lenton, T.A. Nieminen, A.B. Stilgoe, H. Rubinsztein-Dunlop, L.A. Beresnev, Ch. Wang, J.L. Santarpia // Opt. Express. – 2019. – Vol. 27(23). – P. 33061-33069. DOI: 10.1364/OE.27.033061.