

Моделирование плазмонов на поверхности нано-кольца

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 лазерный пучок с длиной волны 633 нм и круговой поляризацией формирует на поверхности серебряного нано-кольца шириной 260 нм поверхностный плазмон-поляритон с шириной по полуспаду интенсивности $0,25\lambda$, а максимальная интенсивность составила 1,873 отн. ед.

1. Введение

Сегодня много внимания уделяется оптическому феномену возбуждения плазмон-поляритонов, которые распространяются вдоль границы металл-диэлектрик и возникают в связи с коллективной осцилляцией свободных электронов [1]. Плазмоны, благодаря их особым свойствам, имеют большую сферу применения в различных областях науки: физике, химии, биологии, материаловедении и т.д. [2,3]. Так в [4] показано, что высокие интенсивности плазмонных полей при катализе являются мощным средством для обеспечения более высоких скоростей реакций и/или лучшей селективности. Феномен поверхностного плазмон-поляритона позволяет увеличить чувствительность химических и биологических сенсоров [5]. Оптические компоненты на основе плазмонных эффектов считаются идеальным выбором для изготовления наноинтегрированных оптических схем [6]. Применение поверхностных плазмон-поляритонов позволяет использовать субволновую оптику в микроскопии и литографии за пределами дифракционного предела [7,8].

Как можно видеть из приведенного обзора, поверхностные плазмон-поляритоны имеют большое количество разных приложений. Одним из них может быть оптический захват и манипуляция микрочастицами [9-11]. В наших предыдущих работах исследовался процесс формирования поверхностного плазмона на серебряных нано-полоске и нано-кольце при освещении их лазерным излучением с длиной волны 532 нм [12]. В данной работе мы повторили аналогичное исследование, но для входящего излучения с длиной волны 633 нм.

2. Формирование поверхностного плазмона на нано-полоске

В работе [12] было показано, что на поверхности нано-полоски или нано-кольца возможно формирование резонансного плазмона. Для этого необходимо подобрать соответствующую ширину полоски. Однако, его недостаток заключается в том, что максимальная интенсивность формируется на краях, а пики находятся очень близко к друг другу. Использование такого поля в целях захвата и манипулирования частицами проблематично. В то же время можно формировать и центральный плазмон-поляритон, пик которого расположен в центральной

части. Не смотря на то, что интенсивность центрального плазмона значительно ниже интенсивности резонансного плазмона, использование единичного представляется более удобным.

Чтобы определить подходящую ширину нано-кольца был исследован эффект формирования центральных и резонансных плазмонов на тонкой (толщина 20 нм) серебряной полоске, размещенной в воздухе. В ходе моделирования ширина полоски менялась с шагом 10 нм, чтобы получить кривую зависимости интенсивности формируемых плазмонов от ширины нано-полоски. В качестве начального излучения рассматривалось ТМ-поляризованное излучение с длиной волны 633 нм.

Моделирование проводилось с помощью $(FD)^2TD$ -метода, реализованного в пакете FullWAVE, на следующих параметрах: шаг дискретизации по пространству - 2 нм, шаг дискретизации по псевдо-времени ($\tau = ct$, c - скорость света, t - время) - 1 нм. На рис. 1 приведен график зависимости интенсивности излучения на расстоянии 4 нм от нано-полоски.

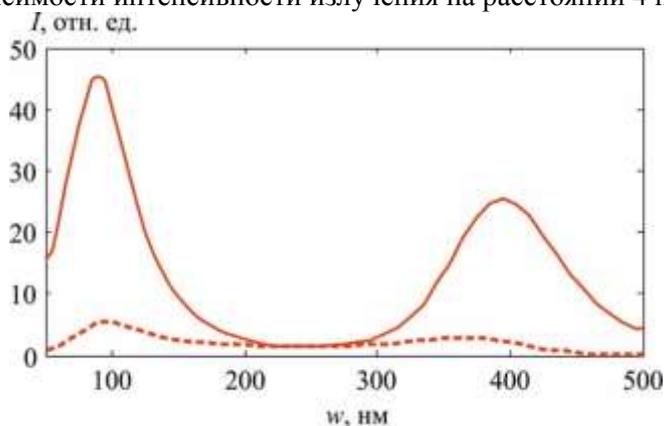


Рисунок 1. Зависимость максимальной интенсивности граничного (непрерывная линия) и центрального (пунктирная линия) поверхностного плазмон-поляритона от ширины нано-полоски для падающего излучения с длиной волны 633 нм.

Анализируя данные на рис. 1, можно заметить, что в некоторых точках графики максимальной интенсивности плазмона и интенсивности в центре нано-полоски совпадают. Именно при такой ширине нано-полоски должен ожидать хорошо сформированный центральный плазмон-поляритон с минимальными боковыми лепестками. В других же точках граничные плазмоны имеют большую интенсивность и достигают максимума на резонансной ширине нано-полоски. Исходя из полученных данных нами для дальнейшего исследования были выбраны следующие значения для ширины нано-кольца: 220 и 260 нм.

3. Формирование поверхностного плазмона на нано-кольце

В предыдущем разделе нами был определен интервал для ширины нанокольца, при котором ожидается хорошо сформированный центральный плазмон. В статье [12] также показано, что разность показателе преломления среды и подложки, на которой в тонкой пленке серебра изготовлено нано-кольцо, при формировании центрального плазмона вносит флуктуации. В связи с этим, в данной работе аналогично предыдущим исследованиям предлагается рассматривать в качестве среды воду с показателем преломления $n_{H_2O} = 1,38$.

Рассмотрим распространение лазерного излучения с несущей длиной волны 633 нм, нормального падающего на серебряное нано-кольцо на кварцевой подложке, расположенное в воде. Чтобы удовлетворить условиям возбуждения плазмонных волн нами была выбрана радиальная поляризация. Схема численного эксперимента представлена на рис. 2, где h - высота, w_r - ширина, а D_{in} - внутренний диаметр нано-кольца. Свет показан красными стрелками и распространяется вдоль оси Z. Моделирование проводилось в пакете FullWAVE, реализующем $(FD)^2TD$ -метод. Здесь и далее использовались следующие параметры

моделирования: шаги дискретизации по пространству - 8 нм, шаг дискретизации по времени - 2 нм.

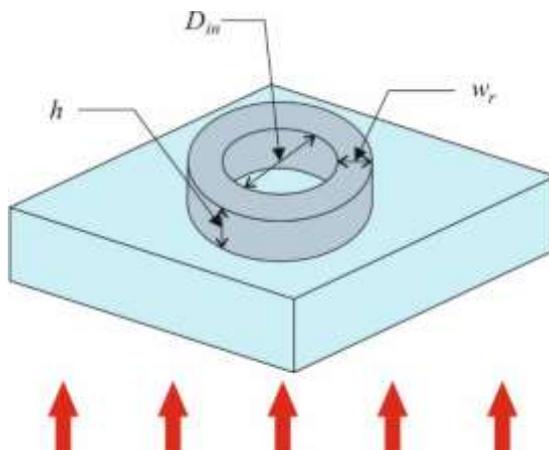


Рисунок 2. Схема численного моделирования.

Для задания радиальной поляризации входное поле рассчитывалось в пакете MATLAB и задавалось в FullWAVE из файла. Для расчета использовалась следующая формула:

$$\begin{cases} E_x = \frac{2\sqrt{2} \cdot x}{\delta} e^{-\frac{x^2+y^2}{\delta^2}}; \\ E_y = \frac{2\sqrt{2} \cdot y}{\delta} e^{-\frac{x^2+y^2}{\delta^2}}, \end{cases} \quad (1)$$

где E_x и E_y - компоненты электрического поля, а δ - ширина Гауссова пучка.

Радиус Гауссова пучка для обоих компонент E_x и E_y был выбран равным 0,5 мкм, а максимальная интенсивность нормирована. Внутренний диаметр нано-кольца D_{in} также был выбран таким, чтобы обеспечить падение области максимальной интенсивности входного излучения на центр нано-кольца. На рис. 3-4 представлены результаты моделирования.

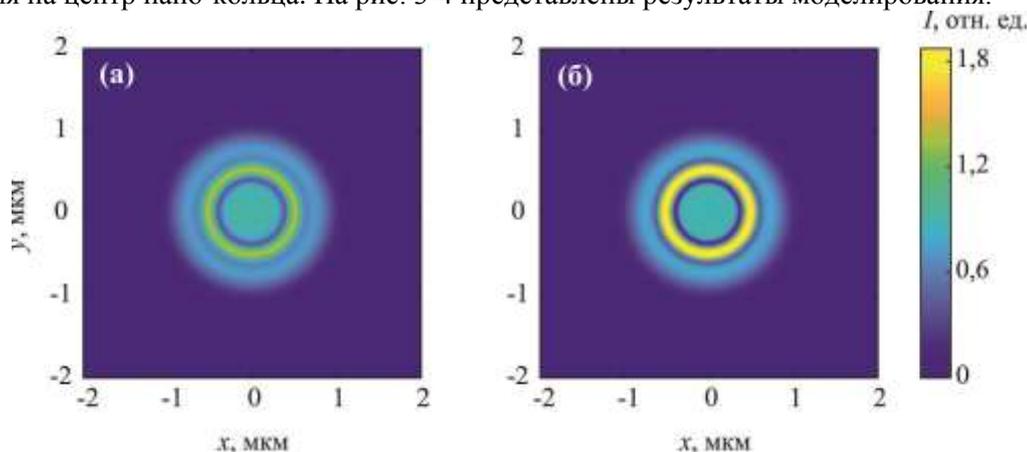


Рисунок 3. Распределение интенсивности на поверхности нано-кольца толщиной 220 нм (а) и 260 нм (б).

Из рис. 3 видно, что на поверхности формируется центральный плазмон поляритон. Максимальная интенсивность плазмона на поверхности кольца шириной 260 нм составила 1,873 отн. ед. и при этом она выше максимальной интенсивности плазмона на поверхности более узкого кольца, которая составила 1,364 отн. ед.

Из рис. 4 видно, что ширина плазмонов по полуспаду интенсивности составила $FWHM = 158,4$ нм для широкого кольца и $FWHM = 186,8$ нм для узкого. Из результатов моделирования видно, что нано-кольцо позволяет сформировать узкий плазмон-поляритон на

своей поверхности, толщина которого совпадает с толщиной аналогичного плазмона, формируемого излучением с длиной 532 нм [12].

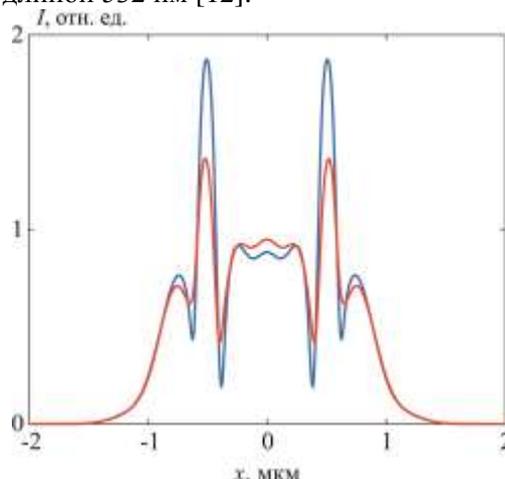


Рисунок 4. Двумерное распределение интенсивности на поверхности нано-кольца толщиной 220 нм (красная линия) и 260 нм (синяя линия).

4. Заключение

В данной работе с помощью FDTD-метода проведено исследование формирования поверхностных плазмонов на поверхности нано-полосок и нано-колец. Показано, что нано-кольцо шириной 260 нм при освещении световым пучком с длиной волны $\lambda = 633$ нм и круговой поляризацией формирует поверхностный плазмон-поляритон с шириной по полуспаду интенсивности $0,25\lambda$, которая меньше чем ширина аналогичного плазмона, сформированного пучком с длиной волны 532 нм ($\text{FWHM} = 0,29 \lambda$) [12].

5. Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-07-01380) и Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

6. Литература

- [1] Zheng, L. Experimental Demonstration of Surface Plasmon Polaritons Reflection and Transmission Effects / L. Zheng, U. Zywietz, A. Evlyukhin, B. Roth, L. Overmeyer, C. Reinhardt // *Sensors*. – 2019. – Vol. 19. – P. 4633.
- [2] Fafin, A. Surface Plasmon Resonances and Local Field Enhancement in Aluminum Nanoparticles Embedded in Silicon Nitride / A. Fafin, S. Camelio, F. Pailloux, D. Babonneau // *J. Phys. Chem. C*. – 2019. – Vol. 123. – P. 13908-13917.
- [3] Ueno, K. Control of plasmon dephasing time using stacked nanogap gold structures for strong near-field enhancement / K. Ueno, J. Yanga, Q. Suna, D. Aoyoa, H. Yua, T. Oshikiria, A. Kuboc, Ya. Matsuo, Q. Gongb, H. Misawa // *Applied Materials Today*. – 2019. – Vol. 14. – P. 159-165.
- [4] Gellé, A. Applications of Plasmon-Enhanced Nanocatalysis to Organic Transformations / A. Gellé, T. Jin, L. de la Garza, G.D. Price, L.V. Besteiro, A. Moores // *Chemical Reviews*. – 2020. – ASAP.
- [5] Chenb, F. Fe₃O₄@PDA immune probe-based signal amplification in surface plasmon resonance (SPR) biosensing of human cardiac troponin I / F. Chenb, Q. Wua, D. Songa, X. Wang, P. Maa, Y. Suna // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. – 2019. – Vol. 177. – P. 105-111.
- [6] Sistani, M. Nanoscale aluminum plasmonic waveguide with monolithically integrated germanium detector / M. Sistani, M.G. Bartmann, N.A. Güsken, R.F. Oulton, H. Keshmiri, M.S.

- Seifner, S. Barth, N. Fukata, M.A. Luong, M.I. den Hertog, A. Lugstein // *Appl. Phys. Lett.* – 2019. – Vol. 115. – P. 161107.
- [7] Minn, K. Enhanced subwavelength coupling and nano-focusing with optical fiber-plasmonic hybrid probe / K. Minn, H.W.H. Lee, and Zh. Zhang // *Opt. Express.* – 2019. – Vol. 27. – P. 38098-38108.
- [8] Kim, E.S. Surface plasmon-assisted nano-lithography with a perfect contact aluminum mask of a hexagonal dot array / E.S. Kim, Y.M. Kim, K.C. Choi // *Plasmonics.* – 2016. – Vol. 11. – P. 1-6.
- [9] Chenga, Sh. Optical manipulation of microparticles with the momentum flux transverse to the optical axis / Sh. Chenga, T. Xiab, M. Liua, Sh. Xua, Sh. Gaoa, G. Zhange, Sh. Taob // *Optics and Laser Technology.* – 2019. – Vol. 113. – P. 266-272.
- [10] Paiè, P. Particle Manipulation by Optical Forces in Microfluidic Devices / P. Paiè, T. Zandrini, R.M. Vázquez, R. Osellame, F. Bragheri // *Micromachines.* – 2018. – Vol. 9. – P. 200.
- [11] Porfirev, A.P. Optical trapping and moving of microparticles using asymmetrical Bessel-Gaussian beams / A.P. Porfirev, A.A. Kovalev, V.V. Kotlyar // *Computer Optics.* – 2016. – Vol. 40(2). – P. 152-157. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-152-157.
- [12] Kozlova, E.S. Tight focusing of laser light using a surface plasmon polariton in a silver nano-strip and nano-ring on silica glass / E.S. Kozlova, V.V. Kotlyar // *Computer Optics.* – 2016. – Vol. 40(5). – P. 629-634. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-5-629-634.

Simulation of plasmons on metal nano-ring

E.S.Kozlova^{1,2}, V.V.Kotlyar^{1,2}

¹Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

²Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. Using the FDTD method, it is shown that a laser beam with a wavelength of 633 nm and circular polarization forms on the silver nano-ring with a width of 260 nm a surface plasmon polariton with a full width at half maximum of 0.25λ and the maximum intensity of 1.873 a. u.