

Моделирование фокусировки излучения диэлектрическим микроцилиндром с металлическим напылением и щелью на теневой стороне

А.А. Савельева^{1,2}, Е.С. Козлова^{1,2}

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

²Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

Аннотация. В данной работе с помощью программного пакета FullWAVE было проведено численное моделирование фокусировки ТМ-поляризованного лазерного излучения с длиной волны 633 нм. Показано, что диэлектрический цилиндр из полиэстера радиусом $R=2,1749\lambda$, покрытый на теневой стороне серебряной пленкой 90 нм с отверстием диаметром 100 нм, позволяет получить фокус с максимальной интенсивностью в 1,37 раз больше (10,61 отн.ед.), чем обычный диэлектрический цилиндр (7,73 отн. ед.).

1. Введение

Явление острой фокусировки света активно изучается в современной нанофотонике [1,2]. Одним из способов его достижения является формирование наноджетов – сверх узких световых пятен, распространяющихся на несколько длин волн [3-5]. В качестве фокусирующего элемента могут выступать микроцилиндры [6,7], микросферы [8,9], микродиски [10] и другие наноэлементы [11]. В работе [6] с использованием метода конечных элементов, реализованного в COMSOL Multiphysics, исследуется фокусировка ТЕ-поляризованного света с длиной волны $\lambda=532$ нм на круглом цилиндре из полиэстера радиуса $2,1749\lambda$ и с золотой оболочкой в 10 нм. Показано наличие узкого наноджета с максимальной интенсивностью в 6 раз превышающей интенсивность падающего излучения, а ширина и глубина наноджета по полуспаду интенсивности составили $0,39\lambda$ и $0,72\lambda$, соответственно. Приводятся выводы того, что металлическая оболочка увеличивает длину наноджета. В статье [8] описаны результаты численного моделирования фокусировки плоско поляризованного излучения с длиной волны $\lambda=600$ нм микросферами из кварцевого стекла. В работе показано, что использование отверстия на теневой стороне микросферы позволяет уменьшить геометрические размеры фокусного пятна и увеличить его максимальную интенсивность. Так при фокусировке микросферой радиусом $3,5\lambda$ и щелью диаметром $\lambda/15$ можно получить фокусное пятно с геометрическими размерами по полуспаду интенсивности $0,2\lambda$ и $0,14\lambda$ и максимальной интенсивностью в 112 отн.ед., в то время как аналогичная микросфера без щели дает пятно с геометрическими размерами по полуспаду интенсивности $0,35\lambda$ и $0,74\lambda$ и максимальной интенсивностью в 61,1 отн.ед. В [10] теоретически и экспериментально изучается фокусировка излучения лазерного излучения микродисками из кварцевого стекла и нитрида кремния. Экспериментальные данные

хорошо согласуются с результатами моделирования методом конечных разностей во временной области (FDTD-методом).

Стоит отметить, что сверхмалые фокусные пятна имеют широкий спектр применения в различных областях, в том числе в микроскопии со сверхвысоким разрешением [12,13], в нанолитографии [14], при создании оптических датчиков [15].

В данной работе с помощью численного моделирования исследуется фокусировка света на цилиндрах из полиэстера с серебряными оболочками на их теневой части. В серебряной оболочке на оптической оси предполагается отверстие для возможности пропускания света. Отверстие на теневой части цилиндра не изменяется и составляет 100 нм, в то время как толщина серебряной оболочки варьируется для получения максимальной интенсивности при фокусировке излучения. В качестве падающего излучения рассматривается ТМ-поляризованный пучок с длиной волны 633 нм. Численные эксперименты проводились в программном пакете FullWAVE, реализующем FDTD-метод. В работе проведен сравнительный анализ полученных результатов и выявлена оптимальная толщина серебряной пленки.

2. Результаты моделирования

Рассмотрим процесс фокусировки ТМ-поляризованного электромагнитного излучения с длиной волны 633 нм, которое падает на круглый диэлектрический цилиндр с серебряной оболочкой на теневой стороне. В качестве материала для цилиндра использовался полиэстер с показателем преломления $n_d = 1,59$. Показатель преломления серебряной оболочки равен $n_m = 0,14368 + 3,8065j$. Схема численного эксперимента представлена на рисунке 1.

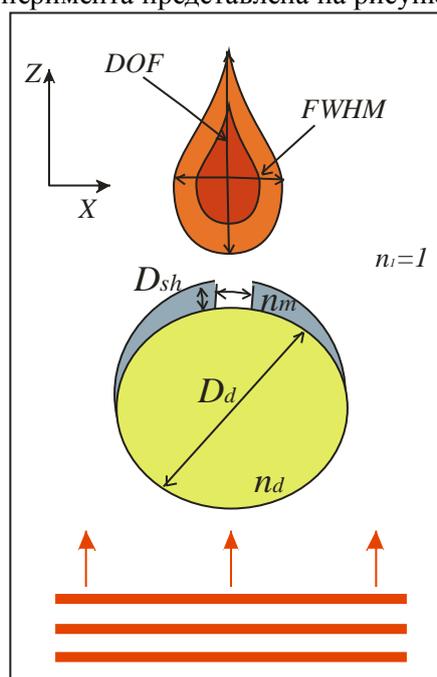


Рисунок 1. Схема численного моделирования.

Проведем моделирование фокусировки излучения диэлектрическим цилиндром из полиэстера ($n_d = 1,59$) с серебряным напылением ($n_m = 0,14368 + 3,8065j$) на теневой стороне, в котором имеется щель диаметром 100 нм. Дизайн цилиндра представлен на рисунке 1. Для численного моделирования использовался программный пакет FullWAVE, в основе которого лежит FDTD-метод. Здесь и далее используются следующие параметры моделирования: шаги дискретизации по пространству 5 нм, шаги дискретизации по времени 3 нс (используется псевдо-время ct , где c - скорость света в вакууме, t - время). В ходе расчетов были зафиксированы диаметр диэлектрического цилиндра, равный $2,1749\lambda$ ($\lambda=633\text{нм}$), и размер отверстия в оболочке на теневой поверхности 100 нм. Варьировался параметр толщины серебряной оболочки от 10 до 120 нм с шагом 10 нм. В ходе анализа полученных результатов

оценивалась максимальная интенсивность I_{max} формируемого поля. Результаты моделирования представлены в таблице 1.

Таблица 1. Зависимость параметров фокусного пятна от диаметра отверстия на теневой стороне цилиндра.

D_m , нм	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
I_{max} , отн.ед.	6,61	7,22	9,73	10,61	9,88	9,09	8,17	7,38	6,32	5,30	3,90	4,87

Из таблицы 1 видно, что наилучшие результаты показал диэлектрический цилиндр с серебряной пленкой на теневой стороне толщиной 90 нм. С его помощью удалось сформировать наноджет максимальной интенсивностью 10,61 отн. ед. Для сравнения было проведено моделирование обычного микроцилиндра без серебряного напыления. Максимальная интенсивность составила в фокусе 7,73 отн. ед. Результаты моделирования для обоих цилиндров представлены на рисунках 2 и 3.

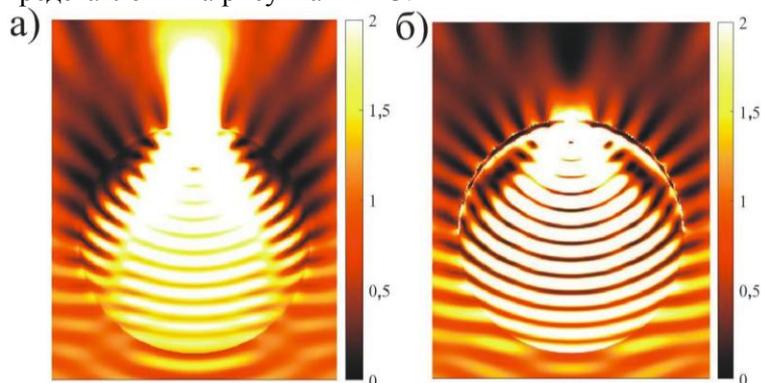


Рисунок 2. Распределение интенсивности для а) простого диэлектрического цилиндра из полиэстера и б) цилиндра из полиэстера с серебряной пленкой на теневой стороне толщиной 90 нм и отверстием в пленке 100 нм.

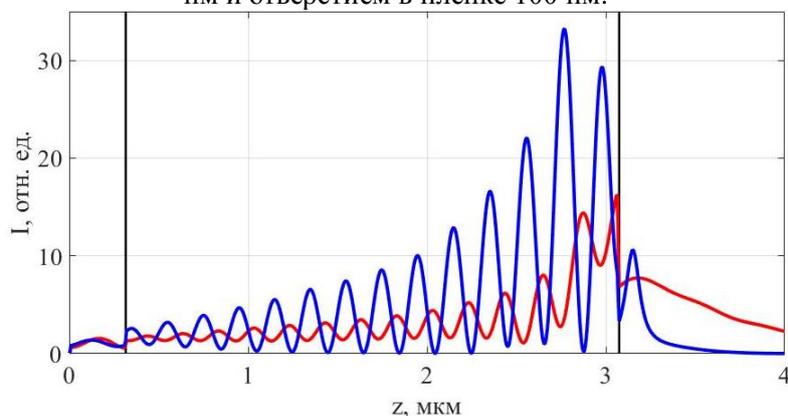


Рисунок 3. Результаты моделирования для простого диэлектрического цилиндра (красная линия) и для цилиндра с серебряным напылением на теневой стороне толщиной 90 нм и отверстием в пленке 100 нм (синяя линия).

Исходя из данных результатов, можно заметить, что при использовании цилиндра с металлическим напылением на теневой стороне и отверстием диаметра 100 нм удалось сформировать наноджет с максимальной интенсивностью в 1,37 раза больше, чем при использовании обычного диэлектрического цилиндра из полиэстера.

3. Заключение

В данной работе проведено исследование фокусировки ТМ-поляризованного электромагнитного излучения с длиной волны $\lambda = 633$ нм на цилиндрах из полиэстера с

металлическим напылением и отверстием на теневой стороне 100 нм. Моделирование проводилось в программном пакете FullWAVE (RSoft), в основе которого лежит FDTD-алгоритм.

Показано, что диэлектрический цилиндр из полиэстера радиусом $R=2,1749\lambda$ с серебряной пленкой 90 нм на теневой стороне и отверстием в пленке диаметра 100 нм позволяет получить наноджет с максимальной интенсивностью 10,61 отн. ед. В то время как диэлектрический цилиндр из полиэстера позволяет получить фокусное пятно с максимальной интенсивностью 7,73 отн. ед. В дальнейшем планируется продолжать исследования в этой области с использованием различных металлов и дизайнов моделей цилиндра.

4. 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.

5. Литература

- [1] Geints, Y.E. Photonic nanojet super-resolution in immersed ordered assembly of dielectric microspheres / Y.E. Geints, A.A. Zemlyanov // *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*. – 2017. – Vol. 200. – P. 32-37.
- [2] Zhou, S. Effects of light polarization in photonic nanojet // *Optical and Quantum Electronics*. – 2019. – Vol. 51(112). – DOI: 10.1007/s11082-019-1827-7.
- [3] Zhen, Z. Anultranarrow photonic nanojet formed by an engineered two-layer microcylinder of high refractive-index materials / Z. Zhen, Y. Huang, Y. Feng, Y. Shen, Z. Li // *Optics Express*. – 2019. – Vol. 27(6). DOI: 10.1364/OE.27.009178.
- [4] Darafsheh, A. Systematic study of the characteristics of the photonic nanojets formed by dielectric microcylinders / A. Darafsheh, D. Bollinger // *Optics Communications*. – 2017. – Vol. 402. – P. 270-275.
- [5] Darafsheh, A. Photonic nanojet properties of dielectric / A. Darafsheh, D. Bollinger // *Proceedings of SPIE*. – 2020. – Vol. 10106. – P. 101061U-6. DOI: 10.1117/12.2252758.
- [6] Kozlova, E.S. Focusing of laser light by circular microcylinders with a metal shell / E.S. Kozlova, V.V. Kotlyar // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 201. – P. 36-41.
- [7] Huaming, X. Side-lobes-controlled photonic nanojet with a horizontal graded-index microcylinder / H. Xing, W. Zhou, Y. Wu // *Optics Letters*. – 2018. – Vol. 43(17). – P. 4292-4295.
- [8] Cao, Y. Deep Subwavelength-Scale Light Focusing and Confinement in Nanohole-Structured Mesoscale Dielectric Spheres / Y. Cao, Z. Liu, O.V. Minin, I.V. Minin // *Nanomaterials*. – 2019. – Vol. 9(186). DOI: 10.3390/nano9020186.
- [9] Wu, M. Creation of a longitudinally polarized photonic nanojet via an engineered microsphere / M. Wu, R. Chen, J. Ling, Z. Chen, X. Chen, R. Ji, M. Hong // *Optics Letters*. – 2017. – Vol. 42(7). – P. 1444-1447.
- [10] Liu, C. Photonic nanojet induced modes generated by a chain of dielectric microdisks / C.-Y. Liu, C.-C. Li // *Optik*. – 2016. – Vol. 127. – P. 267-273.
- [11] Liu, C. Periodical focusing mode achieved through a chain of mesoscale dielectric particles with a refractive index near unity / C. Liu, O.V. Minin, I.V. Minin // *Optics Communications*. – 2019. – Vol. 434. – P. 110-117.
- [12] Heydarian, R. A coherent mechanism of super-resolution by a dielectric microsphere and microcylinder / R. Heydarian, C.R. Simovski // *Physics. Optics*. – 2020 – [Electronic resource]. – Access mode: arXiv:2001.08135.
- [13] Tenne, R. Super-resolution enhancement by quantum image scanning microscopy / R. Tenne, U. Rossman, B. Rephael, Y. Israel, A. Krupinski-Ptaszek, R. Lapkiewicz, Y. Silberberg, D. Oron // *Nature Photonics*. – 2019. – Vol. 13. – P. 116-122.

- [14] Gao, P. Pushing the plasmonic imaging nanolithography to nano-manufacturing / P. Gao, X. Li, Z. Zhao, X. Ma, M. Pu, C. Wang, X. Luo // Optics Communications. – 2017. –Vol. 404. – P. 62-72.
- [15] Babashah, H. Integration in analog optical computing using metasurfaces revisited: toward ideal optical integration / H. Babashah, Z. Kavehvash, S. Koochi, A. Khavasi // Journal of the Optical Society of America B. – 2017. –Vol. 34(6). – P. 1270-1279.

Simulation of light focusing by a dielectric microcylinder with a metal film and gap on shadow side

A.A Savelyeva^{1,2}, E.S.Kozlova^{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. In this work, using the FullWAVE software package, numerical simulation of focusing of TM-wave with a wavelength of 633 nm was performed. It is shown that a dielectric microcylinder made of polyester with a radius of $R = 2.1749\lambda$, coated on the shadow side with a silver film of 90 nm with a hole with a diameter of 100 nm, allows to get a focus with a maximum intensity of 1.37 times more (10.61 a. u), than a conventional dielectric cylinder (7.73 a. u).