

# Моделирование фокусировки лазерного излучения микроцилиндром с двумя металлическими оболочками

Е.С. Козлова<sup>1,2</sup>, В.В. Котляр<sup>1,2</sup>, А.А. Савельева<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

**Аннотация.** Моделирование с помощью метода конечных разностей, реализованного в COMSOL Multiphysics, распространения ТМ-поляризованного импульса с длиной волны 405 нм через диэлектрический цилиндр диаметром 5 мкм из кварцевого стекла и золотой и серебряной оболочками общей толщиной 10 нм показало наличие узкого наноджета с максимальной интенсивностью в 6 раз превышающей интенсивность падающего излучения. Ширина и глубина наноджета по полуспаду интенсивности составили 0,37 и 3,26 от длины волны.

## 1. Введение

Сверхразрешение, или преодоление предела дифракции, выраженного в соответствии с теорией Эбби и критерием Рэля, является темой множества фундаментальных и прикладных исследований в современной оптике [1]. Высокий интерес связан с тем, что область применения сверхразрешения включает в себя нанолитографию [2], оптическое микроманипулирование [3], а так же запись информации на оптические носители [4].

Увеличение объема информации на оптических дисках достигается за счет уменьшения длины волны лазера и увеличения числовой апертуры объектива. Однако оптический диапазон длин волн имеет свой предел. В настоящее время для записи Blu-ray Disc в современных проигрывателях используются лазеры с длиной волны 405 нм [5]. Так же имеются ограничения по увеличению числовой апертуры фокусирующей системы.

Для острой фокусировки широко используются микроцилиндры [6-8]. В [6] рассматривается фокусировка излучения (длина волны 500 нм) диэлектрическим ( $n=1,5$ ) цилиндром эллиптического сечения. Ширина фокуса по полуспаду интенсивности составила 230 нм. Отдельное внимание уделяется многослойным цилиндрам [7-8]. В некоторых работах в качестве материала используются исключительно диэлектрики [7], в то время как в других дополнительно используют металлы [8]. В [7] рассматривали формирование ультрадлинных наноджетов для входного излучения на длине волны 632,8 нм с помощью диэлектрических цилиндров из комбинации ВаF и LaSF. В [8] рассматривается формирование наноджета с помощью диэлектрический микроцилиндра ( $n=1,5$ ) с оболочкой из золота. Показано, что для излучения, длиной волны 532 нм на расстоянии порядка длины формируется наноджет шириной по полуспаду интенсивности 250 нм.

В данной работе с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics рассмотрена фокусировка излучения диэлектрическими цилиндрами с металлической оболочкой. В качестве падающего излучения рассматривался ТМ-поляризованный лазерный пучок с длиной волны 405 нм. В работе было проведено исследование характеристик фокусного пятна, таких как максимальная интенсивность, ширина и глубина пятна по полуспаду интенсивности.

## 2. Результаты моделирования

В данной работе рассматривается диэлектрический цилиндр из кварцевого стекла ( $n_{SiO_2}=1,41$ ), на который падает ТМ-поляризованное лазерное излучение с длиной волны  $\lambda=405$  нм. В ходе анализа процесса распространения излучения были рассмотрены цилиндры без оболочки, а также с одной и двумя металлическими оболочками. В качестве материалов рассматривались золото ( $n_{Au}=1,46+1,945i$ ) и серебро ( $n_{Ag}=0,05+2,168i$ ). Исходя из результатов, полученных в работах [9-10], толщина металлического слоя была выбрана равной  $r_{shell} = 10$  нм, при этом в случае комбинированной оболочки она состояла из толщины золотого  $r_{Au}$  и серебряного  $r_{Ag}$  слоя. На рисунке 1 приведена оптическая схема рассматриваемой задачи.

Для моделирования использовался пакет COMSOL Multiphysics, реализующий решение волнового уравнения методом конечных разностей. В ходе моделирования использовались нерегулярные сетки с переменным шагом. Так в областях, близкой к разделу двух сред (металл/диэлектрик) баралась сетка с мелким шагом  $\lambda/80$ , в то время как остальная область рассчитывалась с шагом  $\lambda/40$ .

По результатам моделирования был проведен анализ зависимости таких параметров формируемых фокусных пятен (наноджетов), как фокусное расстояние  $f$ , максимальная интенсивность  $I_{max}$ , ширина пятна по полуспаду интенсивности  $FWHM_x$  и глубина фокуса по полуспаду интенсивности  $DOF_z$ . Результаты приведены в таблице 1. Цветом в таблице отмечен радиус первого от центра цилиндра металлического слоя.

Таблица 1. Параметры фокусных пятен.

$r_{Au}$ , нм	$r_{Ag}$ , нм	$f$ , нм	$I_{max}$ , а.у.	$FWHM_x$ , нм	$FWHM_x$ , $\lambda$	$DOF_z$ , нм	$DOF_z$ , $\lambda$
0	0	920	12,71	0,1496	0,37	1,4451	3,57
5	5	1015	6,16	0,1482	0,37	1,3201	3,26
5	5	1015	6,12	0,1482	0,37	1,3585	3,35
10	0	978	3,94	0,1468	0,36	1,3148	3,25
0	10	1075	9,95	0,1511	0,37	1,3442	3,32

Из таблицы 1 видно, что золотой пленки приводит к сильному падению интенсивности (в 3 раза), однако в данном случае удается получить наиболее компактное пятно по всем координатам. Использование серебряной пленки также приводит к падению максимальной интенсивности в фокусе (в 1,28 раз), при этом увеличивается и ширина пятна по полуспаду интенсивности. При этом сам фокус смещается на 150 нм от границы цилиндра. Использование двух металлических слоев в покрытии диэлектрического позволяет скомпенсировать влияние золотой пленки, при этом интенсивность в фокусе падает в 2 раза, а сам фокус смещается на 100 нм. Значительных изменений в показателях геометрических размеров наноджетов не наблюдается, однако номинально ширина и глубина фокуса уменьшаются. Кроме того, в случае использования в качестве первого слоя золота, а второго - серебра удается получить пятно с меньшими геометрическими размерами и большей максимальной интенсивностью в сравнении со случаем обратного порядка следования материалов оболочек.

## 3. Заключение

В данной работе рассмотрена фокусировка излучения с помощью диэлектрических цилиндров с металлической оболочкой с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics. Длина волны излучения равна 405 нм. В работе было проведено исследование характеристик

фокусного пятна, таких как максимальная интенсивность и ширина пятна по полуспаду интенсивности.

#### 4. Благодарности

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства научных организаций (соглашение № 007-ГЗ/Ч3363/26) и частично поддержана грантами РФФИ (18-07-01122, 18-07-01338, 17-47-630417, 17-47-630420, 16-47-630483, 15-47-02492, 15-07-01174), Министерством образования и науки РФ (СП-4375.2016.5).

#### 5. Литература

- [1] Monticone, D.G. Beating the Abbe Diffraction Limit in Confocal Microscopy via Nonclassical Photon Statistics / D.G. Monticone, K. Katamadze, P. Traina, E. Moreva, J. Forneris, I. Ruoberchera, P. Olivero, I.P. Degiovanni, G. Brida, M. Genovese // *Phys. Rev. Lett.* – 2014. – Vol. 113(14). – P. 143602.
- [2] McLeod, E. Subwavelength direct-write nanopatterning using optically trapped microspheres / E. McLeod, C.B. Arnold // *Nature Nano.* – 2008. – Vol.3. – P. 413-417.
- [3] Peifeng, J. Photonic Crystal Optical Tweezers with High Efficiency for Live Biological Samples and Viability Characterization / J. Peifeng, W. Jingda, L. W. Gary, K. G. Ethan, P.H. Suzie, and L.Y. Lih // *Scientific Reports.* – 2016. – Vol. 6. – P. 19924.
- [4] Li, X. Multifocal optical nanoscopy for big data recording at 30 TB capacity and gigabits/second data rate / X. Li, Y. Cao, N. Tian, L. Fu, and M. Gu // *Optica.* – 2015. – Vol. 2. – P. 567-570.
- [5] Shimada, K. New optical architecture for holographic data storage system compatible with Blu-ray Disc™ system / K. Shimada, T. Ide, T. Shimano; K. E. Anderson; K. R. Curtis // *Optical Engineering.* – 2014. – Vol. 53(2). – P. 025102.
- [6] Liu, C.-Y. Photonic nanojet modulation by elliptical microcylinders / C.-Y. Liu, L.-J. Chang // *Optik.* – 2014. – Vol. 125. – P.4043-4046.
- [7] Shen, Y. Ultralong photonic nanojet formed by a two-layer dielectric microsphere / Y. Shen, L.V. Wang, J.-T. Shen // *Optics Letters.* – 2014. – Vol. 39(14). – P. 4120-4123.
- [8] Liu, C.-Y. Superenhanced photonic nanojet by core-shell microcylinders / C.-Y. Liu // *Physics Letters A.* – 2012. – Vol. 376. – P. 1856-1860.
- [9] Liu, C.-Y. Direct imaging of optimal photonic nanojets from core-shell microcylinders / C.-Y. Liu, K.-L. Hsiao // *Opt. Lett.* – 2015. – Vol. 40(22). – P. 5303-5306.
- [10] 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.

## Laser light focusing by microcylinder with two metallic shells

E.S. Kozlova<sup>1,2</sup>, V.V. Kotlyar<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

**Abstract.** The formation of a narrow nanojet with the maximum intensity in 6 times higher than the intensity of the incident light by microcylinder from silica glass with gold-silver shell was presented by using the finite element method implemented in COMSOL Multiphysics. TM-polarized light at a wavelength of 405 nm was used as incident light. The full width and depth of the nanojet at half maximum of intensity were 0.37 and 3.26 of incident wavelength, respectively.

**Keywords:** Light focusing, cylinder, FEM