

Численное моделирование фокусировки излучения диэлектрическими микроцилиндрами с несколькими слоями

А.А. Савельева^{1,2}, Е.С. Козлова^{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

В работе с помощью метода конечных элементов показано, что диэлектрическая оболочка позволяет увеличить максимальную интенсивность формируемой фотонной наноструи, при этом уменьшить ширину (для ТЕ-поляризации) и увеличить глубину (для ТМ-поляризации) фокуса по полуспаду интенсивности.

Ключевые слова

Фотонная наноструя, микроцилиндр, острая фокусировка, FEM-метод

1. Введение

Сжатие света в узкий пучок является одной из приоритетных задач нанофотоники [1, 2]. В [3] с помощью численного моделирования показано, что при фокусировке света с длиной волны $\lambda=550$ нм цилиндром с показателем преломления $n = 4$ ширина фокуса по полуспаду интенсивности (FWHM) может достигать 70 нм. В [4] показано, что треугольная призма из кварцевого стекла формирует фокусное пятно, максимальная интенсивность которого превышает интенсивность падающего излучения в 6 раз (FWHM=0,38 λ). В [5] предложен способ фокусировки многослойными цилиндрами с металлическими оболочками из золота, серебра и меди. Показано, что металлические покрытия, влияют на расположение наноджета. Для микроцилиндра из золота и серебра было получено фокальное пятно с FWHM=293 нм.

2. Моделирование

В данной работе с помощью численного моделирования в COMSOL Multiphysics исследуется процесс фокусировки ТЕ- и ТМ- поляризованного излучения с длиной волны $\lambda = 633$ нм на двухслойных круглых диэлектрических микроцилиндрах. Общий диаметр микроцилиндра зафиксирован равным 2 мкм, а диаметр сердечника варьировался. Показатель преломления сердечника микроцилиндра составлял n_1 , а показатель преломления оболочки - n_2 . Для моделирования использовались триангулярные сетки с шагом сетки $\lambda/40$ для всей расчетной области, и $\lambda/60$ для участков с переменными коэффициентами преломления.

В ходе анализа полученных результатов моделирования оценивались следующие параметры фокального пятна: максимальная интенсивность I_{\max} , ширина FWHM и глубина DOF фокуса по полуспаду интенсивности, фокусное расстояние f . Результаты моделирования для простого цилиндра с показателем преломления $n_1 = 1,45$ и для двухслойных цилиндров, дизайн которых описан выше, представлены в Таблице 1.

Из таблицы видно, что диэлектрическая оболочка с более высоким показателем преломления позволяет увеличить максимальную интенсивность сформированного наноджета при этом уменьшив его ширину. Например, при фокусировке ТЕ-поляризованного излучения двухслойным диэлектрическим цилиндром ($n_1 = 1,45$, $n_2 = 1,8$) удалось получить фокусное пятно с интенсивностью 8,98 отн. ед., что в 1,13 раза больше интенсивности, полученной при фокусировке простым цилиндром, с FWHM = 0,19 мкм. В случае фокусировки ТМ-

поляризованного излучения двухслойный цилиндр позволяет увеличить глубину фокуса в 1,27 раза по сравнению с простым диэлектрическим цилиндром. Полученные результаты согласуются с полученными ранее в ходе моделирования с помощью FDTD-метода [6].

Таблица 1

Результаты моделирования

	n_1	n_2	$D_{серд}$, мкм	I_{max} , отн. ед.	DOF, мкм	FWHM, мкм	f , мкм
TE	1,45	-	2,0	7,97	0,50	0,24	0,02
	1,45	1,90	1,7	6,61	0,22	0,23	0,00
	1,45	1,80	1,5	8,98	0,23	0,19	0,00
	1,45	1,59	1,9	8,45	0,40	0,22	0,00
TM	1,45	-	2,0	5,56	0,67	0,45	0,18
	1,45	1,90	1,7	5,88	0,34	0,39	0,00
	1,45	1,80	1,5	3,84	0,62	0,48	0,07
	1,45	1,59	1,2	5,22	0,85	0,45	0,18

3. Заключение

В данной работе с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics численно промоделирована фокусировка света на двухслойных диэлектрических цилиндрах. Результаты моделирования показали, что диэлектрическая оболочка с большим показателем преломления, чем показатель преломления сердцевины, позволяет увеличить максимальную интенсивность наноджета в 1,13 раза. Так же в случае ТЕ-поляризованного света наблюдалось уменьшение FWHM в 0,8 раз, в то время как для ТМ поляризации наблюдалось увеличение DOF в 1,27 раза. Далее в работе планируется исследовать многослойные микроцилиндры.

4. Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ (грант № 18-29-20003) в части ТЕ-поляризации, Российского научного фонда (грант № 18-19-00595) в части ТМ-поляризации 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] Котляр, В.В. Острая фокусировка светового поля с поляризационной и фазовой сингулярностью произвольного порядка / В.В. Котляр, С.С. Стафеев, А.А. Ковалёв // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 3. – С. 337-346. DOI: 10.18287/2412-6179-201943-3-337-346.
- [2] Zhou, S. Effects of light polarization in photonic nanojet / S. Zhou // Optical and Quantum Electronics. – 2019. – Vol. 51. – P. 112. DOI: 10.1007/s11082-019-1827-7.
- [3] Zhou, S. An ultra-narrow photonic nanojet generated from a high refractive-index micro-flatended cylinder / S. Zhou, T. Zhou // Applied Physics Express. – 2020. – Vol. 13. – P. 042010. DOI: 10.35848/1882-0786/ab827a.
- [4] Зайцев, В.Д. Формирование фотонных наноструй двумерными микропризмами / В.Д. Зайцев, С.С. Стафеев // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 6. – С. 909-916. DOI: 10.18287/2412-6179-СО-746.
- [5] Liu, C.-Y. Direct imaging of optimal photonic nanojets from core-shell microcylinders / C.-Y. Liu, K.-L. Hsiao // Optics Letters. – 2015. – Vol. 40(22). – P. 5303-5306. DOI: 10.1364/OL.40.005303.

- [6] Kozlova, E.S. Simulation of Laser Light Focusing by Two-Layered Dielectric Cylinders / E.S. Kozlova, A.A. Savelyeva // XXII International Conference of Transparent Optical Networks, Bari, Italy. – 2020. DOI: 10.1109/ICTON51198.2020.9203224.