

## Моделирование фокусировки лазерного излучения двухслойными диэлектрическими микроцилиндрами

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

<sup>1</sup> ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,  
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151,

<sup>2</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,  
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34

### Аннотация

Используя метод конечных разностей во временной области, реализованный в программном пакете FullWAVE, был промоделирован процесс фокусировки плоско поляризованного лазерного излучения с длиной волны 633 нм двухслойными диэлектрическими микроцилиндрами с круглым поперечным сечением 2 мкм. Было показано, что оболочка с более высоким показателем преломления (1,8 и 1,9), чем показатель преломления сердцевины, который равен 1,45, позволяет увеличить глубину фокуса в 2,57 раза, а также сместить область формирования фокального пятна вдоль оптической оси в направлении от границы микроцилиндра. Так же подобраны параметры микроцилиндра таким образом, что в процессе фокусировки формируется более компактное фокусное пятно, ширина по полуспаду интенсивности которого составляет 0,25 от длины волны излучения, с интенсивностью в 1,4 раза выше, чем интенсивность в фокусе, формируемом однородным микроцилиндром.

**Ключевые слова:** двухслойный диэлектрический микроцилиндр, фотонная наноструя, острая фокусировка, FDTD-метод.

**Цитирование:** Савельева, А.А. Моделирование фокусировки лазерного излучения двухслойными диэлектрическими микроцилиндрами / А.А. Савельева, Е.С. Козлова // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45, № 2. – С. 208-213. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-820.

**Citation:** Savelyeva AA, Kozlova ES. Simulation of laser light focusing with two-layer dielectric microcylinders. Computer Optics 2021; 45(2): 208-213. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-820.

### Введение

Явление острой фокусировки света активно изучается в современной нанофотонике [1–4]. Сжатие света в узкий пучок является приоритетной задачей, ведь чем меньше сформированное фокусное пятно, тем больше данных можно записать на оптические носители информации [5] или, к примеру, легче перемещать наночастицы в пространстве за счет сконцентрированной световой энергии [6].

Одним из способов достижения острой фокусировки является формирование фотонных наноструй – сверхузких световых пятен, распространяющихся на несколько длин волн [7, 8]. В качестве фокусирующего элемента могут выступать микроцилиндры [9–12], микросферы [13–15], микродиски [16] и другие наноэлементы [17–19]. Так, например, в [10] авторы рассматривают фокусировку света на градиентном микроцилиндре, который разделен на слои в направлении излучения света. С помощью такого цилиндра была получена сверхузкая наноструя с шириной фокуса по полуспаду интенсивности 116,6 нм. Микроцилиндры с некруглым сечением рассмотрены в [11]. Показано, что микроцилиндр с эллиптическим сечением формирует фотонную нанострую, длина которой в 10 раз превышает длину волны падающего излучения. Для численных экспериментов в работе использовался FDTD-метод. В статье [13] авторы пред-

ставляют результаты численного моделирования фокусировки света микросферами из кварцевого стекла. Показано, что при освещении элемента пучками с линейной поляризацией и длиной волны  $\lambda = 600$  нм микросфера с отверстием на теневой стороне позволяет сформировать узкий фокус с шириной по полуспаду интенсивности  $0,14\lambda$  и с высокой интенсивностью 112 отн. ед. В [12] теоретически и экспериментально продемонстрирована возможность генерации фотонных наноструй диэлектрическим микроцилиндром с многослойной металлической оболочкой. С помощью микроцилиндра с покрытием из золота и серебра на расстоянии 1286 нм была сформирована фотонная наноструя с шириной по полуспаду интенсивности FWHM = 293 нм. Длина волны падающего излучения была равна 405 нм. Авторы отмечают, что полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами численного моделирования, реализованного при помощи FDTD-метода.

В работах [16–18] фокусаторы представлены уже не одиночными элементами, как в статьях, приведенных выше, а целыми волноводами, состоящими из цепочек микродисков, наноцилиндров или наносфер. Передача лазерного излучения путем фокусировки света микродисками из кварцевого стекла и нитрида кремния была теоретически и экспериментально исследована в [16]. Для численных расчетов был использован FDTD-метод. Экспериментальная проверка

теоретических результатов была проведена с помощью сканирующего оптического микроскопа. Результаты показали, что экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами численного моделирования методом FDTD. В [18] авторы показали, что аналогичный механизм передачи излучения за счет периодически фокусирующихся мод возможен не только в круглых, но и в кубических структурах, причем коэффициент преломления этих элементов был близок к единице ( $n = 1,05$ ).

Известно, что микроцилиндр с более низким показателем преломления лучше пропускает свет и образует фокальное пятно с более высокой интенсивностью. Однако в современных статьях [20, 21] показано, что использование многослойных структур позволяет улучшить фокусирующие свойства элементов. Например, в статье [20] генетический алгоритм и теория Ми используются для поиска оптимальной структуры многослойного микроцилиндра, который позволяет получить сверхдлинные фотонные наноструи при фокусировке света с длиной волны  $\lambda = 632,8$  нм. В результате было показано, что микроцилиндр, состоящий из пяти слоев, показатели преломления которых варьируются от 1,47 до 2,37, дает фотонную нанострую с глубиной по полуспаду интенсивности (DOF)  $107,5\lambda$  и шириной по полуспаду интенсивности (FWHM)  $0,22\lambda$ . В работе [21] рассматривались усеченные многослойные микроцилиндры с показателями преломлений для самого крайнего внешнего и внутреннего слоев 1,9 и 1,4 соответственно. Длина микроцилиндра составляет 1,6 мкм, а его диаметр – 4 мкм. Было показано, что такой четырехслойный микроцилиндр образует нанострую с  $FWHM = 0,24\lambda$  ( $\lambda = 500$  нм).

В данной работе рассмотрен процесс фокусировки света двухслойными диэлектрическими микроцилиндрами круглого сечения. Для моделирования использовался FDTD-метод, реализованный в пакете FullWAVE. В качестве граничных условий использовались PML-слои. Изучалось влияние оболочки с различными показателями преломления на фокусировку ТЕ- и ТМ-поляризованного электромагнитного излучения. Было показано, что использование двухслойной конструкции позволяет улучшить характеристики наноструй. Стоит отметить, что процесс изготовления микроцилиндров с двумя слоями проще, чем процесс изготовления многослойных конфигураций, представленных в статьях [20, 21].

**Моделирование для ТЕ-поляризованного излучения**

В первой части работы рассмотрим процесс фокусировки лазерного излучения с длиной волны  $\lambda = 633$  нм и ТЕ-поляризацией (ненулевая компонента  $E_z$ ) на двухслойных круглых диэлектрических микроцилиндрах. Общий диаметр микроцилиндра был зафиксирован равным 2 мкм, а диаметр сердечника варьировался от 1,2 мкм до 2 мкм. Показатель прелом-

ления сердечника микроцилиндра составлял  $n_1$ , а показатель преломления оболочки –  $n_2$ . Показатели преломления для оболочек были выбраны аналогично тем, что использовались в работе [17], а также предыдущих исследованиях авторов [22]: 1,9; 1,8; 1,59.

Для моделирования использовались следующие параметры сетки:  $l_x = 5$  мкм – длина расчетной области по  $x$ ,  $l_y = 8$  мкм – длина расчетной области по  $y$ ,  $cT = 30$  мкм, где  $c$  – скорость света,  $T$  – время моделирования,  $h_x = h_y = 20$  нм – пространственные шаги по  $x$  и  $y$  соответственно,  $h_t = 10$  нм – шаг по псевдовремени. Схема численного моделирования представлена на рис. 1.

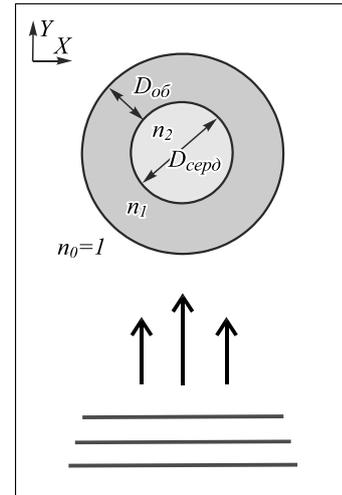


Рис. 1. Схема численного моделирования

Сначала рассматривались микроцилиндры с коэффициентами преломления  $n_1 = 1,45$  и  $n_2 = 1,9$ . В ходе анализа результатов моделирования оценивались следующие параметры фотонных наноструй: максимальная интенсивность  $I_{max}$ , фокусное расстояние  $f$ , ширина FWHM и глубина DOF фокуса по полуспаду интенсивности. Все характеристики фокальных пятен приводились для распределений, формируемых за элементом в свободном пространстве. Результаты представлены в табл. 1.

Табл. 1. Параметры фокусного пятна, сформированного двухслойным микроцилиндром ( $n_1 = 1,45$  и  $n_2 = 1,9$ )

$D_{серд}$ , мкм	$I_{max}$ , отн.ед.	DOF, $\lambda$	FWHM, $\lambda$	$f$ , мкм
2,0	8,18	0,73	0,32	0
1,9	5,72	0,79	0,38	0,05
1,8	3,55	1,16	0,55	0,25
<b>1,7</b>	<b>5,00</b>	<b>1,52</b>	<b>0,50</b>	<b>0,09</b>
1,5	2,90	2,27	0,57	0,57
1,2	2,63	1,90	0,63	0,45

Из табл. 1 видно, что лучшей конфигурацией двухслойного микроцилиндра является случай, когда  $D_{серд} = 1,7$  мкм, результаты для которого выделены жирным шрифтом. Несмотря на то, что максимальная интенсивность фотонных наноструй наблюдается для простого диэлектрического микроцилиндра с показателем преломления  $n_1 = 1,45$ , в случае использования двухслойного микроцилиндра глубину фокуса воз-

можно увеличить примерно в 2 раза, что упрощает использование таких фотонных наноструктур на практике.

Далее зафиксируем показатель преломления для сердцевинки  $n_1 = 1,45$  и промоделируем фокусировку излучения, используя следующие значения показателя преломления оболочки  $n_2 = 1,8$  и  $1,59$ . Результаты представлены в табл. 2 и 3.

Табл. 2. Параметры фокусного пятна, сформированного двухслойным микроцилиндром ( $n_1 = 1,45$  и  $n_2 = 1,8$ )

$D_{серд}$ , мкм	$I_{max}$ , отн.ед.	DOF, $\lambda$	FWHM, $\lambda$	$f$ , мкм
2,0	8,18	0,73	0,32	0
1,9	5,44	0,95	0,38	0,13
1,8	3,24	1,80	0,79	0,27
1,7	4,71	1,23	0,51	0,21
<b>1,5</b>	<b>4,17</b>	<b>2,02</b>	<b>0,51</b>	<b>0,39</b>
1,2	4,27	1,83	0,51	0,45

Из табл. 2 видно, что лучшая конфигурация представлена двухслойным микроцилиндром с  $D_{серд} = 1,5$  мкм. Можно заметить, что двухслойный микроцилиндр не дает такой высокой интенсивности в фокусном пятне, как однослойные микроцилиндры, но тем не менее глубина сформированного фокуса намного выше, чем для других представленных моделей.

Табл. 3. Параметры фокусного пятна, сформированного двухслойным микроцилиндром ( $n_1 = 1,45$  и  $n_2 = 1,59$ )

$D_{серд}$ , мкм	$I_{max}$ , отн.ед.	DOF, $\lambda$	FWHM, $\lambda$	$f$ , мкм
2,0	8,18	0,73	0,32	0
<b>1,9</b>	<b>11,12</b>	<b>0,51</b>	<b>0,25</b>	<b>0</b>
1,8	6,04	0,95	0,44	0,21
1,7	5,37	1,11	0,44	0,13
1,5	5,67	1,45	0,44	0,15
1,2	4,47	2,75	0,51	0,25

Из табл. 3 видно, что двухслойный микроцилиндр с диаметром сердцевинки  $D_{серд} = 1,9$  мкм позволяет формировать узкий фокус с наилучшими параметрами: высокой интенсивностью и наименьшими размерами фокусного пятна. Стоит отметить, что ширина фокуса по полуспаду интенсивности в данном случае меньше дифракционного предела, который в 2D-случае может быть рассчитан по следующей формуле:

$$d_{min} \approx \frac{0,44\lambda}{n_2} = 0,28\lambda. \quad (1)$$

Дифракционные картины, получаемые при фокусировке ТЕ-поляризованного света обычным микроцилиндром с  $n_1 = 1,45$  и двухслойными микроцилиндрами с оптимальными соотношениями сердечника и оболочки, представлены на рис. 2.

На рис. 3 представлены продольные и поперечные сечения распределений интенсивности для обычного и двухслойных микроцилиндров.

Из рис. 2 и 3 видно, что фотонная наноструя, сформированная двухслойным микроцилиндром, имеет удлиненную форму при  $n_2$ , равном 1,9 (рис. 3) и 1,8 (рис. 3). Более того, она образуется на некотором рас-

стоянии от границы микроцилиндра. Из анализа рис. 2 можно сделать вывод, что тонкая диэлектрическая оболочка с показателем преломления, незначительно превышающим показатель преломления сердцевинки, позволяет уменьшить геометрические размеры фокусного пятна и увеличить его интенсивность.

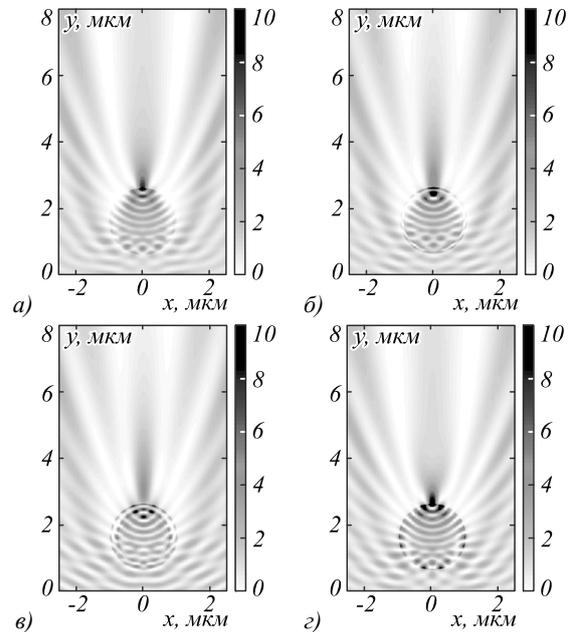


Рис. 2. 2D-распределение интенсивности для обычного микроцилиндра (а) и двухслойных микроцилиндров с  $n_2 = 1,9$  и  $D_{серд} = 1,7$  (б);  $n_2 = 1,8$  и  $D_{серд} = 1,5$  (в);  $n_2 = 1,59$  и  $D_{серд} = 1,9$  (г)

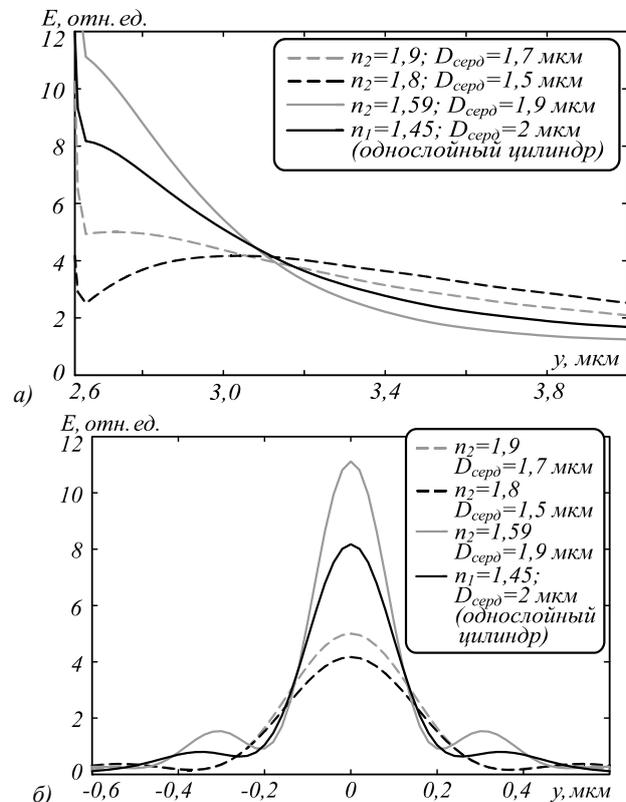


Рис. 3. Распределение интенсивности вдоль оси Y (а) вдоль оси X (б) для ТЕ-поляризованного излучения

**Моделирование для ТМ-поляризованного излучения**

В этом параграфе мы представили аналогичную серию численных экспериментов для тех же конфигураций микроцилиндров, но для ТМ-поляризованного излучения (ненулевая компонента  $H_z$ ) и кратко описали полученные результаты, которые приведены в табл. 4–6.

Табл. 4. Параметры фокусного пятна, сформированного двухслойным микроцилиндром ( $n_1 = 1,45$  и  $n_2 = 1,9$ )

$D_{серд}$ , МКМ	$I_{max}$ , отн.ед.	$DOF$ , $\lambda$	$FWHM$ , $\lambda$	$f$ , МКМ
2,0	5,53	0,85	0,70	0,15
1,9	4,66	1,01	0,63	0,15
1,8	4,60	1,36	0,70	0,31
<b>1,7</b>	<b>5,05</b>	<b>1,58</b>	<b>0,70</b>	<b>0,31</b>
1,5	4,16	1,99	0,70	0,49
1,2	3,66	1,58	0,70	0,57

Табл. 5. Параметры фокусного пятна, сформированного двухслойным микроцилиндром ( $n_1 = 1,45$  и  $n_2 = 1,8$ )

$D_{серд}$ , МКМ	$I_{max}$ , отн.ед.	$DOF$ , $\lambda$	$FWHM$ , $\lambda$	$f$ , МКМ
2,0	5,53	0,85	0,70	0,15
1,9	4,85	1,04	0,70	0,15
1,8	5,28	0,82	0,70	0,21
1,7	4,60	2,15	0,70	0,31
<b>1,5</b>	<b>4,21</b>	<b>2,27</b>	<b>0,70</b>	<b>0,47</b>
1,2	4,09	1,86	0,70	0,57

Табл. 6. Параметры фокусного пятна, сформированного двухслойным микроцилиндром ( $n_1 = 1,45$  и  $n_2 = 1,59$ )

$D_{серд}$ , МКМ	$I_{max}$ , отн.ед.	$DOF$ , $\lambda$	$FWHM$ , $\lambda$	$f$ , МКМ
2,0	5,53	0,85	0,70	0,15
1,9	5,21	0,95	0,70	0,17
1,8	4,89	1,07	0,70	0,17
1,7	4,85	2,78	0,70	0,15
1,5	5,49	0,95	0,70	0,21
<b>1,2</b>	<b>5,127</b>	<b>0,96</b>	<b>0,4</b>	<b>0,27</b>

Из табл. 4–6 видно, что двухслойные микроцилиндры позволяют увеличить глубину фокуса, так, например, двухслойный микроцилиндр с  $n_2 = 1,8$  и  $D_{серд} = 1,5$  формирует фокус с  $DOF = 2,27\lambda$ , что в 2,57 раза больше  $DOF$  фокусного пятна, формируемого обычным диэлектрическим микроцилиндром с  $n_1 = 1,45$ . При этом ширина по полуспаду интенсивности сохранилась, а уменьшение максимальной интенсивности фокального пятна составляет около 20% от максимального значения, полученного для однородного микроцилиндра с низким показателем преломления.

Дифракционные картины, сформированные при фокусировке ТМ-поляризованной волны обычным микроцилиндром с  $n_1 = 1,45$  и двухслойными микроцилиндрами с оптимальными соотношениями сердцевины и оболочки, представлены на рис. 4.

На рис. 5 представлены продольные и поперечные сечения распределений интенсивности для обычного и двухслойных микроцилиндров.

Из рис. 4–5 видно, что фотонная наноструя, полученная в случае использования двухслойного микроцилиндра, имеет более вытянутую форму и находится на некотором расстоянии от границы микроцилиндра.

роцилиндра, имеет более вытянутую форму и находится на некотором расстоянии от границы микроцилиндра.

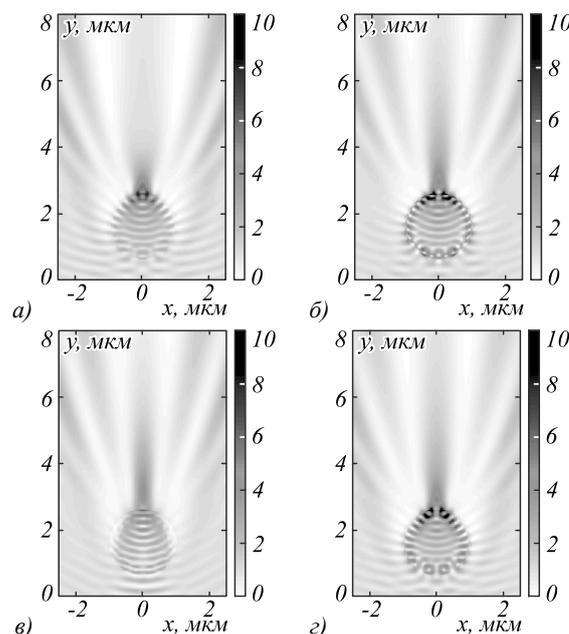


Рис. 4. 2D-распределение интенсивности для обычного микроцилиндра (а) и двухслойных микроцилиндров с  $n_2 = 1,9$  и  $D_{серд} = 1,7$  (б);  $n_2 = 1,8$  и  $D_{серд} = 1,5$  (в);  $n_2 = 1,59$  и  $D_{серд} = 1,2$  (z)

**Заключение**

В данной работе с помощью FDTD-метода, реализованного в программном пакете FullWAVE, исследован процесс фокусировки лазерного излучения двухслойными диэлектрическими микроцилиндрами круглого сечения. Изучено влияние оболочки с разными показателями преломления на фокусировку ТЕ- и ТМ-поляризованного электромагнитного излучения с длиной волны 633 нм. Коэффициент преломления сердцевины был зафиксирован и равен 1,45, в то время как для оболочки учитывались различные значения показателей преломления: 1,9, 1,8 и 1,59. Все эти показатели соответствуют кварцевому стеклу с различными примесями [21].

Было показано, что оболочки с более высоким показателем преломления, чем показатель преломления сердцевины, позволяют увеличить глубину фокуса и сместить фокус от границы микроцилиндра. Например, конфигурация микроцилиндра с показателем преломления оболочки  $n_2 = 1,8$  и  $D_{серд} = 1,5$  позволяет увеличить глубину фокуса более чем в 2,57 раза как для ТЕ-, так и для ТМ-волны. В то же время, если разница между показателями преломления сердцевины и оболочки не слишком велика, двухслойный микроцилиндр может фокусировать ТЕ-волну в узкое фокальное пятно, пространственные параметры которого имеют достаточно малые значения. Например, двухслойный микроцилиндр с показателями преломления сердцевины  $n_1 = 1,45$  и оболочки  $n_2 = 1,59$  соот-

ответственно дает более компактное фокальное пятно ( $\text{FWHM} = 0,25\lambda$ ,  $\text{DOF} = 0,51\lambda$ ) с интенсивностью ( $I_{\text{max}} = 11,12$  отн.ед.) в 1,4 раза выше, чем интенсивность фокуса, сформированного обычным микроцилиндром с показателем преломления  $n_1 = 1,45$ . Отметим, что поперечный размер данного фокуса меньше дифракционно-го предела, который в 2D-случае равен  $0,28\lambda$ .

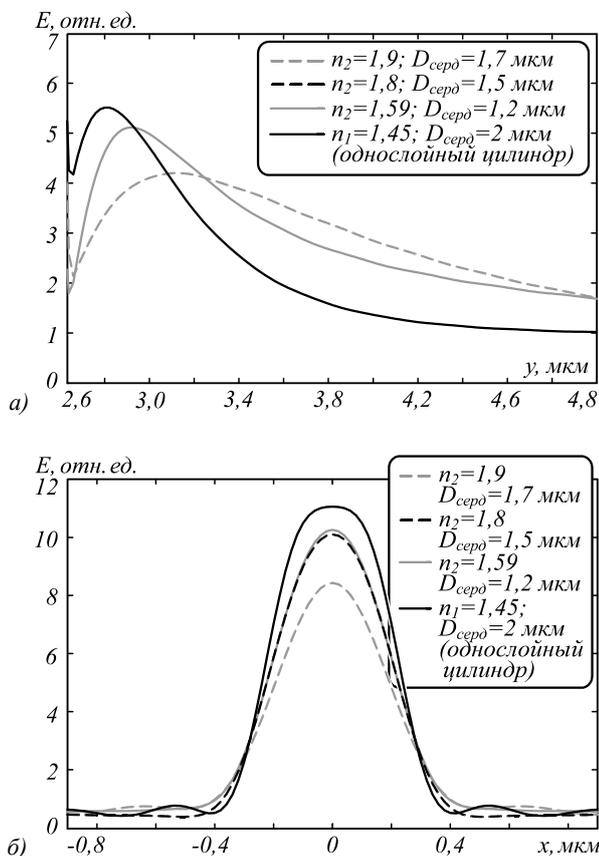


Рис. 5. Распределение интенсивности вдоль оси  $Y$  (а) вдоль оси  $X$  (б) для ТМ-поляризованного излучения

Полученные результаты могут найти свое применение в различных областях, таких как наносенсорика [23], нанолитография [24] и микроскопия [25]. Стоит отметить, что двухслойные микроцилиндры приведенных конфигураций легче изготовить, чем многослойные микроцилиндры, представленные в [20, 21], и в то же время некоторые из них позволяют получить столь же компактные по ширине фокусные пятна, что и многослойные элементы.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-07-01380) в части «Моделирование для ТЕ-поляризованного излучения» и (грант 18-29-20003) в части «Моделирование для ТМ-поляризованного излучения», а также Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение № 007-ГЗ/Ч3363/26) в части «Введение».

### Литература

1. **Zhou, S.** Effects of light polarization in photonic nanojet / S. Zhou // *Optical and Quantum Electronics*. – 2019. – Vol. 51. – 112.
2. **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: 10.18287/2412-6179-2019-43-3-337-346.
3. **Хонина, С.Н.** Сравнение фокусировки коротких импульсов в приближении Дебая / С.Н. Хонина, А.В. Устинов, С.Г. Вологовский // *Компьютерная оптика*. – 2018. – Т. 42, № 3. – С. 432-446. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-3-432-446.
4. **Досколович, Л.Л.** Расчёт дифракционной линзы с фиксированным положением фокуса при нескольких заданных длинах волн / Л.Л. Досколович, Е.А. Безус, Д.А. Быков, Р.В. Скиданов, Н.Л. Казанский // *Компьютерная оптика*. – 2019. – Т. 43, № 6. – С. 946-955. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-946-955.
5. **Kallepalli, D.L.** Ultra-high density optical data storage in common transparent plastics / D.L. Kallepalli, A.M. Alshehri, D.T. Marquez, L. Andrzejewski, J.C. Scaiano, R. Bhardwaj // *Scientific Reports*. – 2016. – Vol. 6. – 26163.
6. **Chenga, S.** Optical manipulation of microparticles with the momentum flux transverse to the optical axis / S. Chenga, T. Xiab, M. Liua, S. Xua, S. Gaoa, G. Zhanga, S. Taob // *Optics and Laser Technology*. – 2019. – Vol. 113. – P. 266-272.
7. **Zhen, Z.** An ultranarrow 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, Issue 6. – P. 9178-9188.
8. **Darafsheh, A.** Photonic nanojet properties of dielectric / A. Darafsheh, D. Bollinger // *Proceedings of SPIE*. – 2020. – Vol. 10106. – 101061U.
9. **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. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.648.
10. **Xing, H.** Side-lobes-controlled photonic nanojet with a horizontal graded-index microcylinder / H. Xing, W. Zhou, Y. Wu // *Optics Letters*. – 2018. – Vol. 43, Issue 17. – P. 4292-4295.
11. **Liu, C.-Y.** Geometric effect on photonic nanojet generated by dielectric microcylinders with non-cylindrical cross-sections / C.-Y. Liu, F.-C. Lin // *Optics Communications*. – 2016. – Vol. 380. – P. 287-296.
12. **Liu, C.-Y.** Direct imaging of optimal photonic nanojets from core-shell microcylinders / C.-Y. Liu, K.-L. Hsiao // *Optics Letters*. – 2015. – Vol. 40, Issue 22. – P. 5303-5306.
13. **Caο, 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, Issue 2. – 186.
14. **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, Issue 7. – P. 1444-1447.
15. **Ruiz, C.M.** Detection of embedded ultra-subwavelength-thin dielectric features using elongated photonic nanojets / C.M. Ruiz, J.J. Simpson // *Optics Express*. – 2010. – Vol. 18, Issue 16. – P. 16805-16812.

16. **Liu, C.-Y.** Photonic nanojet induced modes generated by a chain of dielectric microdisks / C.-Y. Liu, C.-C. Li // *Optik*. – 2016. – Vol. 127. – P. 267-273.
17. **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.
18. **Astratov, V.N.** Focusing microprobes based on integrated chains of microspheres / V.N. Astratov, A. Darafsheh, M.D. Kerr, K.W. Allen, N.M. Fried // *PIERS Online*. – 2010. – Vol. 6, Issue 8. – P. 793-797.
19. **Котляр, В.В.** Фотонные струи, сформированные квадратными микроступеньками / В.В. Котляр, С.С. Стафеев, А.Ю. Фельдман // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 1. – С. 72-80. – DOI: 10.18287/0134-2452-2014-38-1-72-80.
20. **Huang, Y.** Optimization of photonic nanojets generated by multilayer microcylinders with a genetic algorithm / Y. Huang, Z. Zhen, Y. Shen, C. Min, G. Veronis // *Optics Express*. – 2019. – Vol. 27, Issue 2. – P. 1310-1325.
21. **Zhang, H.** Enhanced subwavelength photonic nanojet focusing via a graded-index round-head microcylinder / H. Zhang // *Optik*. – 2020. – Vol. 203. – 163973.
22. **Kozlova, E.S.** Comparative simulation of linear polarized light focusing by dielectric microcylinders with metallic coating / E.S. Kozlova, V.V. Kotlyar, A.A. Savelyeva // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1096. – 012102. – DOI: 10.1088/1742-6596/1096/1/012102.
23. **Julien, P.** Detecting a zeptogram of pyridine with a hybrid plasmonic-photonic nanosensor / P. Julien, M. Jerome, G. Davy, B. Jean-Louis, P. Jerome // *ACS Sensors*. – 2019. – Vol. 4, Issue 3. – P. 586-594.
24. **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.
25. **Wei, J.** High-speed maskless nanolithography with visible light based on photothermal localization / J. Wei, K. Zhang, T. Wei, Y. Wang, Y. Wu, M. Xiao // *Scientific Reports*. – 2017. – Vol. 7. – 43892.

### Сведения об авторах

**Савельева Александра Александровна**, 1996 года рождения, в 2020 году окончила Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ по специальности «Прикладная математика и информатика». Область научных интересов: дифракционная оптика, численные методы, FDTD-метод, острая фокусировка света. E-mail: [lexis2450@gmail.com](mailto:lexis2450@gmail.com).

**Козлова Елена Сергеевна**, 1989 года рождения. В 2011 году окончила Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ по специальности «Прикладная математика и информатика». Кандидат физико-математических наук с 2014 года. Научный сотрудник лаборатории лазерных измерений ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН и по совместительству доцент кафедры технической кибернетики Самарского университета. Область научных интересов: дифракционная оптика, численные методы. E-mail: [kozlova.elena.s@gmail.com](mailto:kozlova.elena.s@gmail.com).

ГРНТИ: 29.31.01

Поступила в редакцию 8 октября 2020 г. Окончательный вариант – 15 февраля 2021 г.

---

# Simulation of laser light focusing with two-layer dielectric microcylinders

A.A. Savelyeva<sup>1,2</sup>, E.S. Kozlova<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS,  
443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya 151,

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

## Abstract

Focusing of a linearly polarized laser beam of wavelength 633 nm with two-layer dielectric microcylinders of a circular cross-section and 2- $\mu\text{m}$  diameter was simulated using a finite-difference time-domain (FDTD) method, implemented using the FullWAVE software. It was shown that using a cladding whose refractive index (1.8 or 1.9) is higher than that of the core (1.45), it is possible to increase the depth of focus by a factor of 2.57 multiplied by the incident wavelength and shift the focal spot position along the optical axis away from the microcylinder boundary. It was also shown that parameters of the microcylinder could be chosen in such a way that a tighter focal spot was generated, with its full width at half maximum of intensity being 2.27 of the incident wavelength. The intensity at this focus was shown to be 1.4 times higher than that at the focus generated with a homogeneous microcylinder.

**Keywords:** two-layer dielectric microcylinder, photonic nanojet, tight focusing, FDTD-method.

**Citation:** Savelyeva AA, Kozlova ES. Simulation of laser light focusing with two-layer dielectric microcylinders. *Computer Optics* 2021; 45(2): 208-213. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-820.

**Acknowledgements:** This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research under grants No. 18-07-01380 ("Modeling of a TE-wave") and No. 18-29-20003 ("Modeling of a TM-wave") and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the government project of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS under agreement 007-Г3 / Ч3363 / 26 ("Introduction").

## References

- [1] Zhou S. Effects of light polarization in photonic. *Opt Quantum Electron* 2019; 51: 112.
  - [2] Kotlyar VV, Stafeev SS, Kovalev AA. Sharp focusing of a light field with polarization and phase singularities of an arbitrary order. *Computer Optics* 2019; 43(3): 337-346. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-3-337-346.
  - [3] Khonina SN, Ustinov AV, Volotovskiy SG. Comparison of focusing of short pulses in the Debye approximation. *Computer Optics* 2018; 42(3): 432-446. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-3-432-446.
  - [4] Dskolovich LL, Bezus EA, Bykov DA, Skidanov RV, Kazanskiy NL. Calculation of a diffractive lens having a fixed focal position at several prescribed wavelengths. *Computer Optics* 2019; 43(6): 946-955. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-946-955.
  - [5] Kallepalli DL, Alshehri AM, Marquez DT, Andrzejewski L, Scaiano JC, Bhardwaj R. Ultra-high density optical data storage in common transparent plastics. *Sci Rep* 2016; 6: 26163.
  - [6] Chenga, S, XiabT, Liua M, Xua S, Gaoa S, Zhanga G, Taob S. Optical manipulation of microparticles with the momentum flux transverse to the optical axis. *Opt Laser Technol* 2019; 113: 266-272.
  - [7] Zhen Z, Huang Y, Feng Y, Shen Y, Li Z. An ultranarrow photonic nanojet formed by an engineered two-layer microcylinder of high refractive-index materials. *Opt Express* 2019; 27(6): 9178-9188.
  - [8] Darafsheh A, Bollinger D. Photonic nanojet properties of dielectric. *Proc SPIE* 2020; 10106: 101061U.
  - [9] Kozlova ES, Kotlyar VV. Focusing of laser light by circular microcylinders with a metal shell. *Procedia Engineering* 2017; 201: 36-41. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.648.
  - [10] Xing H, Zhou W, Wu Y. Side-lobes-controlled photonic nanojet with a horizontal graded-index microcylinder. *Opt Lett* 2018; 43(17): 4292-4295.
  - [11] Liu C-Y, Lin F-C. Geometric effect on photonic nanojet generated by dielectric microcylinders with non-cylindrical cross-sections. *Opt Commun* 2016; 380: 287-296.
  - [12] Liu C-Y, Hsiao K-L. Direct imaging of optimal photonic nanojets from core-shell microcylinders. *Opt Lett* 2015; 40(22): 5303-5306.
  - [13] Cao Y, Liu Z, Minin OV, Minin IV. Deep subwavelength-scale light focusing and confinement in nanohole-structured mesoscale dielectric spheres. *Nanomaterials* 2019; 9(2): 186.
  - [14] Wu M, Chen R, Ling J, Chen Z, Chen X, Ji R, Hong M. Creation of a longitudinally polarized photonic nanojet via an engineered microsphere. *Opt Lett* 2017; 42(7): 1444-1447.
  - [15] Ruiz CM, Simpson JJ. Detection of embedded ultra-subwavelength-thin dielectric features using elongated photonic nanojets. *Opt Express* 2010; 18(16): 16805-16812.
  - [16] Liu C-Y, Li C-C. Photonic nanojet induced modes generated by a chain of dielectric microdisks. *Optik* 2016; 127: 267-273.
  - [17] Liu C, Minin OV, Minin IV. Periodical focusing mode achieved through a chain of mesoscale dielectric particles with a refractive index near unity. *Opt Commun* 2019; 434: 110-117.
-

- 
- [18] Astratov VN, Darafsheh A, Kerr MD, Allen KW, Fried NM. Focusing microprobes based on integrated chains of microspheres. *PIERS Online* 2010; 6(8): 793-797.
- [19] Kotlyar VV, Stafeev SS, Feldman AY. Photonic nanojets formed by square microsteps. *Computer Optics* 2014; 38(1): 72-80. DOI: 10.18287/0134-2452-2014-38-1-72-80.
- [20] Huang Y, Zhen Z, Shen Z, Min C, Veronis G. Optimization of photonic nanojets generated by multilayer microcylinders with a genetic algorithm. *Opt Express* 2019; 27(2): 1310-1325.
- [21] Zhang H. Enhanced subwavelength photonic nanojet focusing via a graded-index round-head microcylinder. *Optik* 2020; 203: 163973.
- [22] Kozlova ES, Kotlyar VV, Savelyeva AA. Comparative simulation of linear polarized light focusing by dielectric microcylinders with metallic coating. *J Phys Conf Ser* 2019; 1096: 012102. DOI: 10.1088/1742-6596/1096/1/012102.
- [23] Julien P, Jerome M, Davy G, Jean-Louis B, Jerome P. Detecting a zeptogram of pyridine with a hybrid plasmonic-photonic nanosensor. *ACS Sens* 2019; 4(3): 586-594.
- [24] Tenne R, Rossmann U, Rephael B, Israel Y, Krupinski-Ptaszek A, Lapkiewicz R, Silberberg Y, Oron D. Super resolution enhancement by quantum image scanning microscopy. *Nat Photonics* 2019; 13: 116-122.
- [25] Wei J, Zhang K, Wei T, Wang Y, Wu Y, Xiao M. High-speed maskless nanolithography with visible light based on photothermal localization. *Sci Rep* 2017; 7: 43892.
- 

#### *Authors' information*

**Alexandra Alexandrovna Savelyeva**, (b. 1996) in 2020 graduated from the Samara National Research University named after academician S.P. Korolyov – SSAU with a degree in Applied Mathematics and Informatics. Research interests: diffractive optics, numerical methods, FDTD method, sharp focusing of light. E-mail: [lexis2450@gmail.com](mailto:lexis2450@gmail.com).

**Elena Sergeevna Kozlova**, (b. 1989) received Master's degree in Applied Mathematics and Informatics in Samara State Aerospace University (2011). She received her PhD in 2014. She is researcher of Laser Measurements laboratory at the Image Processing Systems Institute – Branch of the Federal Scientific Research Centre “Crystallography and Photonics” of Russian Academy of Sciences and Associate Professor of Computer Science department at Samara National Research University. Scientific interests: diffractive optics, FDTD method, near-field optics. E-mail: [kozlova.elena.s@gmail.com](mailto:kozlova.elena.s@gmail.com).

---

*Received October 8, 2020. The final version – February 15, 2021.*

---