

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОКУСИРОВКИ ПЛОСКОЙ ЛИНЕЙНО-ПОЛЯРИЗОВАННОЙ ВОЛНЫ УСЕЧЁННОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗОННОЙ ПЛАСТИНКОЙ

Стафеев С.С.

Институт систем обработки изображений РАН,  
Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

### Аннотация

В работе показано, что при освещении линейно-поляризованной плоской волной с длиной волны 532 нм диэлектрического цилиндра с радиусом 595 нм в непосредственной близости от поверхности цилиндра формируется острый фокус – «фотонная наноструя». Диаметр фокусного пятна по полуспаду интенсивности равен 0,31 от длины волны, а глубина фокуса – 0,57 от длины волны. Добавление к цилиндру усечённых концентрических незамкнутых колец с радиусами равными радиусам зонной пластинки позволяет увеличить глубину фокуса до 1,18 от длины волны, оставляя при этом неизменными значения диаметра фокуса и интенсивности в непосредственной близости от поверхности цилиндра.

**Ключевые слова:** острая фокусировка, фотонная наноструя, зонная пластинка Френеля.

### Введение

Одним из перспективных направлений исследований в области нанопотоники в настоящее время является исследование острого фокуса, формируемого с помощью диэлектрических цилиндров или сфер с диаметрами порядка длины волны. В литературе за такими фокусными пятнами закрепилось название фотонной наноструи (“*photonic nanojet*”). Характерными особенностями фотонных наноструй является малая ширина (диаметр) пучка и его низкая расходимость.

Термин «фотонная наноструя» появился впервые в работе [1]. В статье [2] приводится анализ фотонных наноструй (ФН), формируемых диэлектрическими сферами ( $n = 1,59$ ) с различными диаметрами, при освещении их плоской линейно-поляризованной волной ( $\lambda = 400$  нм) и описывается область их возможного применения. Также в [2] в частности показано, что сферы с диаметрами 1 мкм и 2 мкм формируют ФН с диаметрами в плоскости, перпендикулярной направлению поляризации, равными  $0,325\lambda$  и  $0,375\lambda$ . В [3] была сформирована ФН с максимальной интенсивностью, в 150 раз превышающей интенсивность падающего излучения. Экспериментальное наблюдение ФН было осуществлено с помощью сканирующего конфокального микроскопа в [4], где было показано, что латексная сфера с диаметром 3 мкм формирует в воздухе ФН с диаметром по полуспаду интенсивности, равным 270 нм (длина волны была равна 520 нм). Влияние поляризации входного излучения на изменение параметров ФН было рассмотрено в [5], где было показано, что замена круговой поляризации на радиальную позволяет уменьшить эффективный фокусный объём в 10 раз. В перечисленных выше работах в качестве объектов исследования выступали сферы, однако ФН можно сформировать и с помощью цилиндров, при этом исследовались как «бесконечные» цилиндры, так и конечные. Например, в работе [6] эксперименталь-

но формировалась ФН с помощью дисков из нитрида кремния высотой 400 нм и диаметром от 1 до 10 мкм. Дифракция света на многослойных цилиндрах рассматривалась в [7].

В данном исследовании численно было показано, что добавление незамкнутых концентрических колец к диэлектрическому цилиндру, формирующему фотонную нанострую, позволяет в 2 раза увеличить глубину фокуса, оставляя неизменными диаметр и максимальную интенсивность в фокусе.

### Моделирование

Моделирование проводилось методом FDTD, реализованным в программе Fullwave [8]. Параметры моделирования: размер сетки по пространству – 0,01 мкм, по времени – 0,007 мкм/с, где  $c$  – скорость света в вакууме, на краях вычисляемой области помещались поглощающие слои толщиной 0,5 мкм. В качестве входного излучения использовалась ТЕ-поляризованная плоская волна ( $\lambda = 532$  нм). При вычислении интенсивности усреднение проводилось по последнему периоду.

### Фокусировка с помощью цилиндра

Первым объектом исследования выступал бесконечный диэлектрический цилиндр с радиусом круглого сечения 0,595 мкм и показателем преломления, равным  $n = 1,5$ . Результаты моделирования представлены на рис. 1. Распределение интенсивности в вычисляемой области представлено на рис. 1а. На рис. 1б показано распределение интенсивности вдоль оси  $z$ . Из рис. 1б видно, что непосредственно за поверхностью цилиндра формируется максимум интенсивности («фокус»), глубина которого равна  $\text{DOF} = 0,57\lambda$ . На рис. 1в показано распределение интенсивности в поперечной плоскости в фокусе. Диаметр пятна в фокусе равен  $\text{FWHM} = 0,31\lambda$ , а на расстоянии 0,1 мкм от фокуса –  $\text{FWHM} = 0,38\lambda$ . Оба значения меньше дифракционного предела, равного для двумерного случая  $0,44\lambda$ .

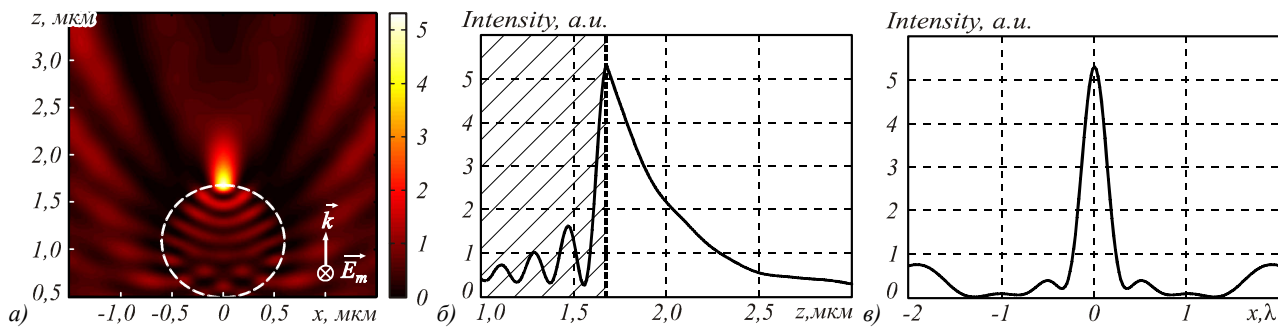


Рис. 1. Распределение интенсивности в вычисляемой области (а), вдоль оси z (б), в фокусе при фокусировке с помощью диэлектрического цилиндра радиусом 0,595 мкм (в). Штриховкой на рис. 1б показана область внутри цилиндра

**Фокусировка с помощью усечённой зонной пластинки**

Для увеличения глубины фокуса, формируемого одиночным цилиндром, было предложено окружить последний незамкнутыми концентрическими кольцами. Радиусы колец вычислялись по формуле радиусов зонной пластинки  $r_m^2 = \lambda m f + \lambda^2 m^2 / 4$ , где  $f = 532$  нм, всего было добавлено 12 колец. Фактически фокусировка осуществляется цилиндрической бинарной зонной пластинкой, усечённой по плоскости, параллельной оси цилиндра, и освещаемой плоской ТЕ-поляризованной волной, как на рис. 1а. Результаты моделирования представлены на рис. 2: на рис. 2а приведено мгновенное распределение амплитуды напряженности электрического поля в вычисляемой области, на рис. 2б – усредненное распределение интенсивности в вычисляемой области, а на рис. 2в – распределение интенсивности вдоль оси z.

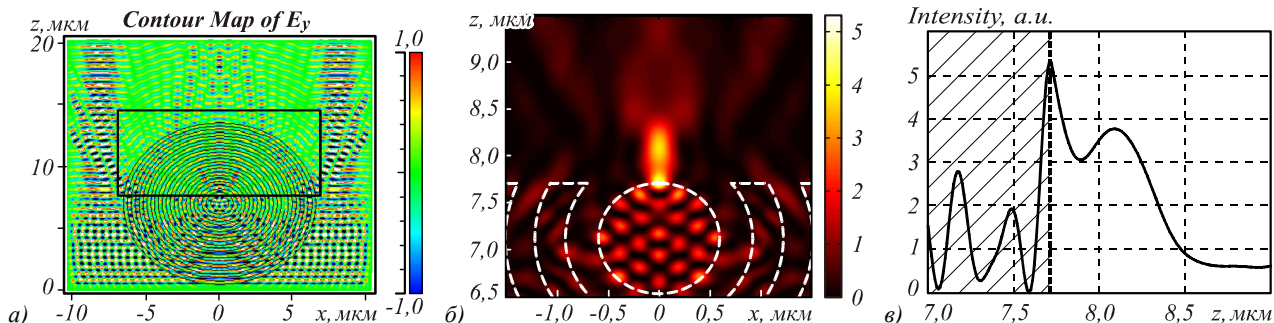


Рис. 2. Мгновенное распределение амплитуды в вычисляемой области (квадратная область показывает усечённый фрагмент колец) (а); распределение интенсивности в вычисляемой области (б) и вдоль оси z (в) при фокусировке с помощью диэлектрического цилиндра радиусом 0,595 мкм, окружённого усечёнными диэлектрическими кольцами

**Заключение**

В работе была промоделирована фокусировка ТЕ-поляризованной плоской волны ( $\lambda = 532$  нм) диэлектрическими ( $n = 1,5$ ) объектами: цилиндром с радиусом 0,595 мкм, и цилиндром с добавленными к нему усечёнными концентрическими кольцами. При фокусировке с помощью диэлектрического цилиндра наблюдалось формирование фотонной наноструи с диаметром по полуспаду интенсивности равным  $0,31\lambda$  и глубиной фокуса  $0,57\lambda$ . При добавлении усечённых колец к такому диэлектрическому цилиндру увеличивается глубина фокуса (до  $1,18\lambda$ ) при неизменной ширине фокуса непосредственно за поверхностью цилиндра.

**Литература**

1. **Chen, Z.** Photonic nanojet enhancement of backscattering of light by nanoparticles: a potential novel visible-light ultramicroscopy technique / Z. Chen, A. Taflove, V. Backman // Optics Express. – 2004. – V. 12, N 7 – P. 1214-1220.
2. **Li, X.** Optical analysis of nanoparticles via enhanced backscattering facilitated by 3-D photonic nanojets // X. Li, Z. Chen, A. Taflove, V. Backman // Optics Express. – 2005. – V. 13, N 2. – P. 526-533.
3. **Lecler, S.** Properties of a three-dimensional photonic jet / S. Lecler, Y. Takakura, P. Meyrueis // Optics Letters. – 2005. – V. 30, N 19. – P. 2641-2643.
4. **Ferrand, P.** Direct imaging of photonic nanojets / P. Ferrand, J. Wenger, A. Devilez, M. Pianta, B. Stout, N. Bonod, E. Popov, H. Rigneault // Optics Express. – 2008. – V. 16, N 10. – P. 6930-6940.

5. **Liu, Y.** Influence of incident light polarization on photonic nanojet / Y. Liu, B. Wang, Z. Ding // Chinese Optics Letters. – 2011. – V. 9, N 7. – P. 072901.
6. **McCloskey, D.** Low divergence photonic nanojets from Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> microdisks / D. McCloskey, J.J. Wang, J.F. Donegan // Optics Express. – 2012. – V. 20, N 1. – P. 128-140.
7. **Котляр, В.В.** Анализ дифракции электромагнитной волны на бесконечном круглом цилиндре с несколькими однородными слоями / В.В. Котляр, М.А. Личманов // Компьютерная Оптика. – 2002. – Т. 24. – С. 26-32.
8. <http://www.rsoftdesign.com/products.php?sub=Component+Design&itm=FullWAVE>.

### References

1. **Chen, Z.** Photonic nanojet enhancement of backscattering of light by nanoparticles: a potential novel visible-light ultramicroscopy technique / Z. Chen, A. Taflove, V. Backman // Optics Express. – 2004. – V. 12, N 7 – P. 1214-1220.
2. **Li, X.** Optical analysis of nanoparticles via enhanced backscattering facilitated by 3-D photonic nanojets // X. Li, Z. Chen, A. Taflove, V. Backman // Optics Express. – 2005. – V. 13, N 2. – P. 526-533.
3. **Lecler, S.** Properties of a three-dimensional photonic jet / S. Lecler, Y. Takakura, P. Meyrueis // Optics Letters. – 2005. – V. 30, N 19. – P. 2641-2643.
4. **Ferrand, P.** Direct imaging of photonic nanojets / P. Ferrand, J. Wenger, A. Devilez, M. Pianta, B. Stout, N. Bonod, E. Popov, H. Rigneault // Optics Express. – 2008. – V. 16, N 10. – P. 6930-6940.
5. **Liu, Y.** Influence of incident light polarization on photonic nanojet / Y. Liu, B. Wang, Z. Ding // Chinese Optics Letters. – 2011. – V. 9, N 7. – P. 072901.
6. **McCloskey, D.** Low divergence photonic nanojets from Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> microdisks / D. McCloskey, J.J. Wang, J.F. Donegan // Optics Express. – 2012. – V. 20, N 1. – P. 128-140.
7. **Kotlyar, V.V.** Analysis of electromagnetic wave diffraction on an infinite circular cylinder with several layers of homogeneity / V.V. Kotlyar, M.A. Lichmanov // Computer Optics. – 2002. – V. 24. – P. 26-32. – (In Russian).
8. <http://www.rsoftdesign.com/products.php?sub=Component+Design&itm=FullWAVE>.

## FOCUSING OF LINEARLY POLARIZED PLANE WAVE USING TRUNCATED CYLINDRICAL ZONE PLATE

S.S. Stafeev

Image Processing Systems Institute of the RAS,

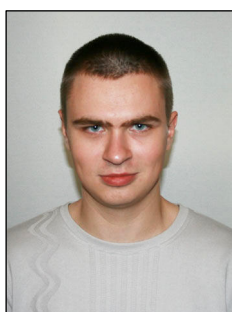
S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (National Research University)

Abstract

In this paper it was shown that linearly polarized plane wave (wavelength equals to 532 nm) propagated through a dielectric cylinder with a radius 595 nm forms near the cylinder surface a sharp focus ("photonic nanojet"). Diameter of focal spot equals to 0.31 of wavelength, and depth of focus equals to 0.57 of wavelength. Adding truncated nonclosed concentric rings with radiuses equal to radiuses of zone plate to the cylinder increases the depth of focus to 1.18 of the wavelength, but the diameter and intensity of focal spot near the cylinder surface are unchanged.

*Key Words:* tight focusing, photonic nanojet, Fresnel zone plate.

### Сведения об авторе



**Стафеев Сергей Сергеевич**, 1985 года рождения, в 2009 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ по специальности «Прикладные математика и физика». Аспирант кафедры технической кибернетики СГАУ, стажёр-исследователь лаборатории лазерных измерений Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН). Область научных интересов: дифракционная оптика, разностное решение уравнений Максвелла, оптика ближнего поля.

E-mail: [sergey.stafeev@gmail.com](mailto:sergey.stafeev@gmail.com).

**Sergey Sergeevich Stafeev** (b. 1985) received master's degree in applied mathematics and physics in Samara State Aerospace University (2009). He is a postgraduate student of the Samara State Aerospace University and researcher of Laser Measurements laboratory at the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS). Scientific interests: diffractive optics, FDTD method, near-field optics.