

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗОНАНСНОЙ ФОКУСИРОВКИ ПИКОСЕКУНДНОГО И ФЕМТОСЕКУНДНОГО ИМПУЛЬСОВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МИКРОЦИЛИНДРОМ

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

<sup>1</sup> Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия,

<sup>2</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

### Аннотация

Моделирование распространения пикосекундного (2,5 пс) и фемтосекундного (17,08 фс) лазерных импульсов через диэлектрический цилиндр с коэффициентом преломления 1,59 и резонансным радиусом показало наличие фокусного пятна, шириной по полуспаду интенсивности 0,22 и 0,235 центральной длины волны соответственно.

**Ключевые слова:** резонансная фокусировка, пикосекундный и фемтосекундный импульсы, мода шепчущей галереи.

**Цитирование:** Козлова, Е.С. Моделирование резонансной фокусировки пикосекундного и фемтосекундного импульсов диэлектрическим микроцилиндром / Е.С. Козлова, В.В. Котляр // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 3. – С. 319-323.

### Введение

В последнее время много внимания уделяется изучению субволновой фокусировки лазерного света на микрочастицах, в том числе на микросферах и микроцилиндрах, радиусы которых сравнимы с длиной волны света [1–5]. Так, в [1–4] численно изучалась фокусировка многослойными микросферами [1], сфероидальными микросферами [2] и двухслойными микросферами [3, 4]. При этом минимальный диаметр фокусного пятна по полуспаду интенсивности был равен  $\text{FWHM}=0,4\lambda$  [2], а максимальная глубина фокуса равна  $\text{DOF}=20\lambda$  [3] и  $\text{DOF}=22\lambda$  [4]. В [5, 6] рассматривалась фокусировка микроцилиндром: эллиптическим [5] и многослойным [6]. Минимальный размер фокуса был получен  $\text{FWHM}=0,46\lambda$  [6]. В [7, 8] моделировалась резонансная фокусировка света микросферами. В [7] с помощью диэлектрической микросферы вместе с нанометровым металлическим шариком получена резонансная фокусировка света в пятно с диаметром  $\text{FWHM}=0,25\lambda$ , а для диэлектрической микросферы получен резонансный фокус размером  $\text{FWHM}=0,40\lambda$  [8]. В [9] аналитически с помощью ряда из функций Бесселя рассматривалась резонансная фокусировка ТЕ-поляризованного лазерного света микроцилиндром из полиэстра (показатель преломления  $n=1,59$ ). Для 18-й моды (мода шепчущей галереи) получен фокус вне микроцилиндра размером  $\text{FWHM}=0,22\lambda$ .

В данной работе с помощью FDTD-метода исследуется фокусировка ТЕ-поляризованных пико- и фемтосекундных импульсов на диэлектрическом микроцилиндре с резонансным радиусом. После прохождения импульса в цилиндре остаётся вытекающая мода шепчущей галереи (для пикосекундного импульса). Для 18-й моды насыщение наступает после прохождения 1200 периодов (2,5 пс), а для 19 – после прохождения 3500 периодов (7,3 пс). При распространении фемтосекундного лазерного импульса длительностью 17,08 фс через диэлектрический цилиндр с коэффициентом преломления 1,59 и резонансным радиусом 0,7152 длины волны (5 мода) ширина фокусного пятна по полуспаду интенсивности равна 0,235 центральной длины волны. При этом мода внутри цилиндра не успевает сформироваться.

### 1. Фокусировка пикосекундного импульса

Рассмотрим моделирование распространения плоской ТЕ-волны через цилиндр в течение 2,5 пс и 7,3 пс. Моделирование проводится с помощью решения уравнений Максвелла FDTD-методом, реализованным в FullWAVE. Параметры моделирования: длина волны излучения  $\lambda=0,633$  мкм, радиус цилиндра  $R=2,1749\lambda$ , показатель преломления среды 1, показатель преломления цилиндра  $n=1,59$ . Шаги дискретизации по пространственным переменным – 0,002 мкм, по времени – 0,0001 мкм.

На рис. 1 приведены графики максимальной интенсивности, по которым можно оценить количество периодов в излучении, после прохождения которых процесс выйдет на насыщение. Из рис. 1 видно, что для 18-й моды насыщение (когда наступает стационарная ситуация: накопленная в цилиндре в единицу времени энергия становится равна вытекающей из цилиндра энергии) наступает после прохождения 1200 периодов (2,5 пс), а для 19-й – после прохождения 3500 периодов (7,3 пс).

На рис. 2 показано распределение интенсивности внутри цилиндра в момент прохождения 1000 периодов импульса длительностью 2,5 пс через цилиндр радиуса  $R=2,1749\lambda$ . Ширина фокусного пятна (рис. 2) достигает наилучшего значения  $\text{FWHM}=0,22\lambda$  и совпадает с аналитически рассчитанным [9].

### 2. Фокусировка фемтосекундного импульса

Промоделируем резонансную фокусировку диэлектрическим микроцилиндром фемтосекундных импульсов длительностью  $t_s$  17,08 фс и 8,54 фс. С помощью методов, изложенных в [10], возможно рассчитать резонансные радиусы цилиндров для пятой моды (табл. 1).

В статье были рассмотрены такие материалы, как полиэстр и кварцевое стекло (коэффициенты преломления соответственно 1,59 и 1,46). Моделирование проводилось в пакете FullWAVE. Шаги дискретизации по пространственным переменным – 0,002 мкм, по времени – 0,0001 мкм. Результаты моделирования приведены на рис. 3а, б. В табл. 2, 3 приведены параметры фокусного пятна для рассмотренных случаев.

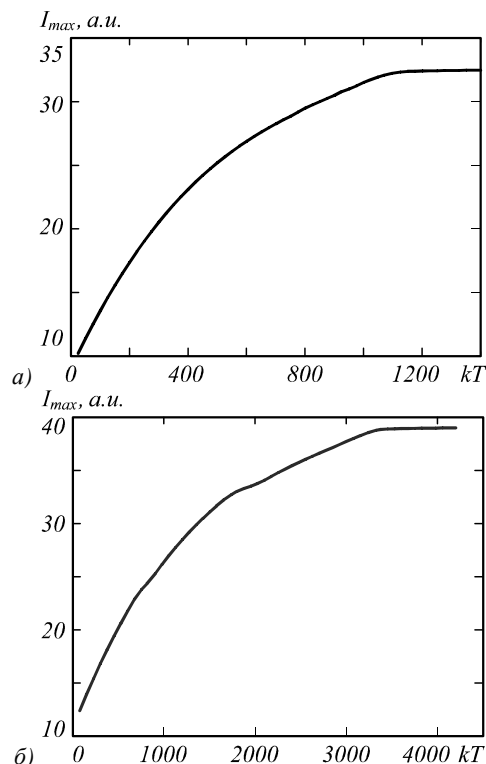


Рис. 1. Зависимость максимальной интенсивности в фокусе от длительности импульса (в периодах) для а) 18-й моды ( $R = 2,1749\lambda$ ); б) 19-й моды ( $R = 2,284\lambda$ )

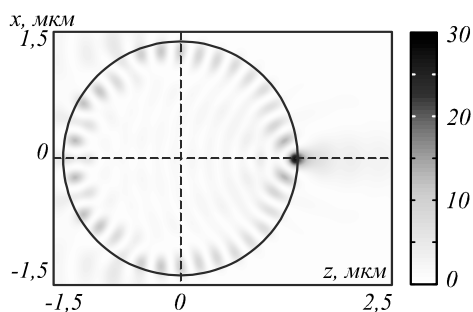


Рис. 2. Распределение интенсивности в ходе дифракции TE-импульса светом длительностью 2,5 пс (1200 периодов) на цилиндре ( $R = 2,1749\lambda$ ) в момент прохождения 1000 периодов

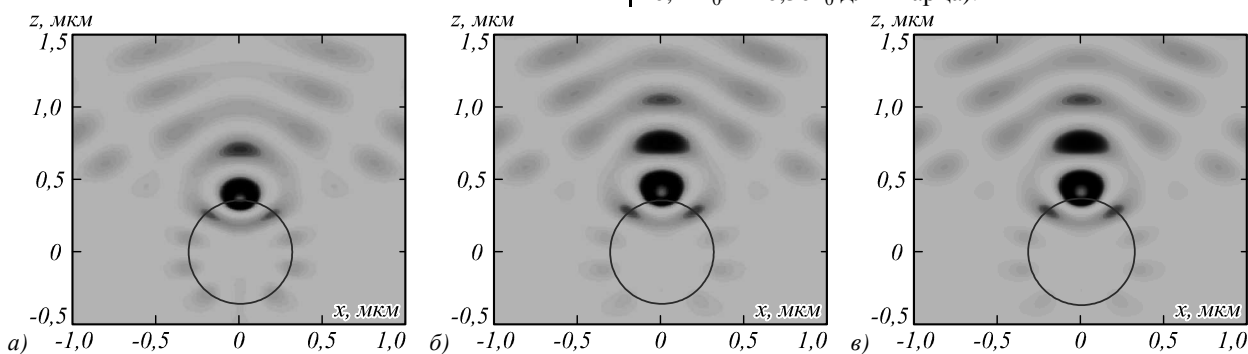


Рис. 3. Дифракционная картина резонансной фокусировки на цилиндре а)  $n = 1,59$ ; б)  $n = f(\omega)$ ; в)  $n = 1,46$  для импульса длительностью 17,08 фс

Для сравнения было промоделировано распространение фемтосекундного импульса длительностью 17,08 фс через цилиндр из кварцевого стекла ( $n = 1,46$ ) с радиусом, отличным от резонансного

$R = 0,8\lambda_0$ . Ширина фокусного пятна по полуспаду интенсивности составила  $0,269\lambda_0$ . Таким образом, изменение радиуса цилиндра на 5% влечёт за собой изменение ширины фокусного пятна на 5%.

Табл. 1. Радиусы цилиндров

$n$	1,59	1,46	$f(\omega)$
$R, \lambda_0$	0,7152	0,7588	0,7588
$R, \text{мкм}$	0,3802	0,4037	0,4037

Табл. 2. Параметры фокусного пятна для цилиндра из полиэстера ( $n = 1,59$ )

$t_s, \text{фс}$	$FWHM_x, \lambda_0$	$DOF_z, \lambda_0$	$I_{max}, \text{a.u.}$
17,08	0,235	0,271	9,447
8,54	0,243	0,271	8,091

Табл. 3. Параметры фокусного пятна для цилиндра из кварцевого стекла ( $n = 1,46$ )

$t_s, \text{фс}$	$FWHM_x, \lambda_0$	$DOF_z, \lambda_0$	$I_{max}, \text{a.u.}$
17,08	0,255	0,316	8,204
8,54	0,262	0,320	7,634

В работе [11] показано, что в случае моделирования фемтосекундных импульсов необходимо учитывать зависимость диэлектрической проницаемости от частоты. Воспользуемся моделью Селлмейера для кварцевого стекла [12] и проведём моделирование с помощью  $(FD)^2TD$  метода, реализованного в пакете FullWAVE, на вышеприведённых параметрах. Результаты моделирования приведены на рис. 4в. В табл. 4 приведены параметры фокусного пятна для рассмотренных случаев.

Табл. 4. Параметры фокусного пятна для цилиндра из кварцевого стекла ( $n = f(\omega)$ )

$t_s, \text{фс}$	$FWHM_x, \lambda_0$	$DOF_z, \lambda_0$	$I_{max}, \text{a.u.}$
17,08	0,255	0,316	8,241
8,54	0,262	0,316	7,605

Из сравнения табл. 3 и табл.4 видно, что в данном случае учёт дисперсии вещества можно пренебречь, так как отклонение результатов составило менее 2%.

Из рис. 3 видно, что в цилиндре успевает сформироваться мода шепчущей галереи за время прохождения фемтосекундного импульса. Однако она достаточно быстро вытекает из него. Из табл. 2–4 и рис. 4 видно, что при резонансной фокусировке фемтосекундного импульса удаётся преодолеть дифракционный предел ( $0,44\lambda_0/n = 0,28\lambda_0$  для полиэстера и  $0,44\lambda_0/n = 0,30\lambda_0$  для кварца).

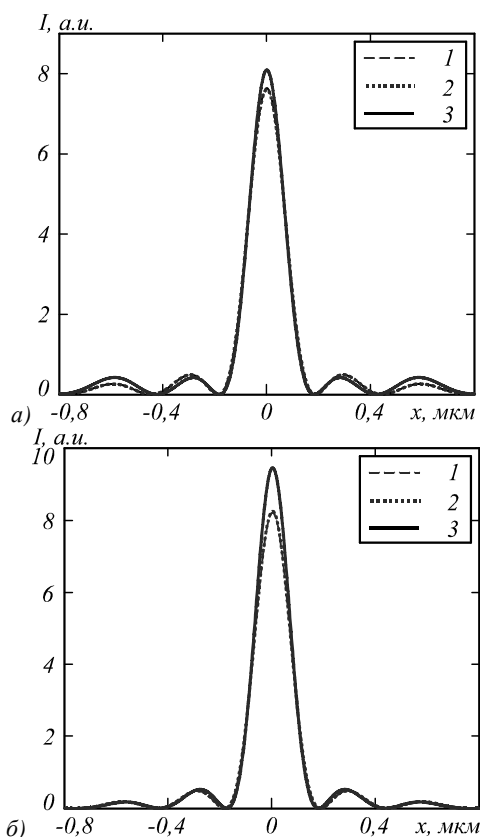


Рис. 4. Распределение интенсивности в фокусе для цилиндров с  $n = f(\omega)$  – линия 1;  $n = 1,46$  – линия 2;  $n = 1,59$  – линия 3 для импульса длительностью: а) 8,54 фс, б) 17,08 фс

Это свидетельствует о том, что малая длительность импульса не даёт раскрыться резонансным эффектам, хотя разница в динамике фокусировки одного и того же импульса на двух цилиндрах с близкими радиусами заметна. На рис. 5 представлена динамика изменения интенсивности в фокусе. Время измеряется в количестве  $k$  пройденных импульсом периодов.

Из рис. 5 видно, что в случае выбора цилиндра с резонансным радиусом интенсивность в фокусе постоянно растёт (максимальная интенсивность в 8,2 раза превышает максимальную интенсивность падающего света), в то время как в случае с цилиндром нерезонансного радиуса значение быстро достигает своего максимума и с течением времени уже не меняется (максимальная интенсивность в 7,3 раза превышает максимальную интенсивность падающего света).

### Заключение

В работе показано, что по мере прохождения пикосекундного импульса через цилиндр с коэффициентом преломления 1,59 ширина фокуса уменьшается, интенсивность в фокусе растёт, также растёт энергия моды, запасённая внутри цилиндра. Для 18-й моды насыщение (стационарный случай) наступает после прохождения 1200 периодов (2,5 пс), а для 19-й – после прохождения 3500 периодов (7,3 пс). Заметим, что для формирования следующей по номеру моды требуется увеличение длительности импульса почти в 2 раза. Ширина фокусного пятна, формируемого импульсом длительностью 2,5 пс,

при прохождении через цилиндр радиуса  $R = 2,1749\lambda$ , достигает минимального значения  $\text{FWHM} = 0,222\lambda$  и совпадает с аналитически рассчитанным в стационарном случае [8, 9]. При этом изменение радиуса цилиндра на 2% влечёт увеличение размера пятна на 32%.

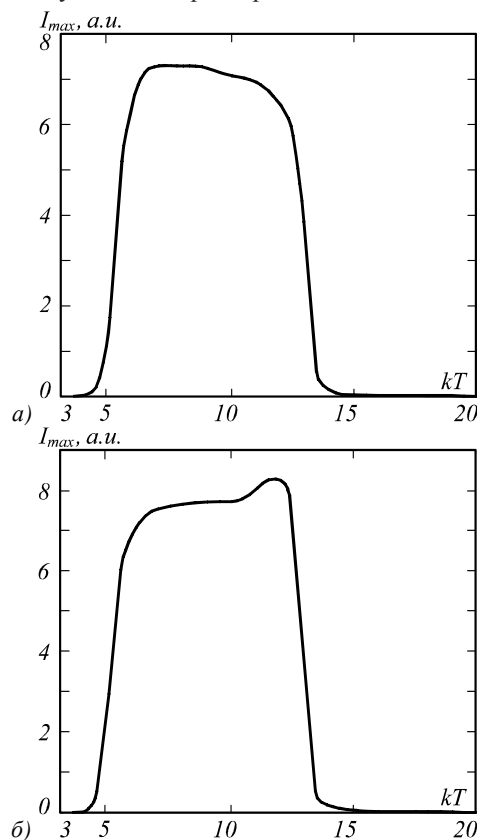


Рис. 5. Динамика изменения интенсивности в фокусе при прохождении импульса длительностью 17,08 фс через цилиндр с радиусом а)  $R = 0,8\lambda_0$  и б)  $R = 0,7588\lambda_0$

При распространении фемтосекундного лазерного импульса длительностью 17,08 фс через диэлектрический цилиндр с коэффициентом преломления  $n = 1,59$  и радиуса  $R = 0,7152\lambda_0$  (5 мода) ширина фокусного пятна по полуспаду интенсивности равна  $\text{FWHM} = 0,235\lambda_0$ . Длительности импульса не хватает для формирования моды в цилиндре, и резонансные эффекты почти не проявляются. Так, изменение радиуса цилиндра на 5% приводит к изменению ширины фокусного пятна на 5%. Хотя разница в динамике формирования интенсивности в фокусе для цилиндров с резонансным и нерезонансным радиусами заметна.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-3970.2014.9) и молодого учёного кандидата наук МК-4816.2014.2, а также грантов РФФИ 13-07-97008, 14-29-07133, 14-07-31218 и 15-07-01174.

### Литература

1. Geints, Y.E. Photonic nanojet calculations in layered radially in homogeneous micrometer-sized spherical particles / Y.E. Geints, A.A. Zemlyanov, E.K. Panina //

- Journal of the Optical Society of America B. – 2011. – Vol. 28(8). – P. 1825-1830.
2. **Han, L.** Photonic jet generated by spheroidal particle with Gaussian-beam illumination / L. Han, Y. Han, G. Gouesbet, J. Wang, G. Grehan // Journal of the Optical Society of America B. – 2014. – Vol. 31(7). – P. 1476-1483.
  3. **Grojo, D.** Bessel-like photoic nanojets from core-shell sub-wavelength spheres / D. Grojo, N. Sandeau, L. Boarino, C. Constantinescu, N. De Leo, M. Laus, K. Sparnacci // Optics Letters. – 2014. – Vol. 39(13) – P. 3989-3992.
  4. **Shen, Y.** Ultralong photonic nanojet formed by a two-layer dielectric microsphere. / Y. Shen, L.V. Wang, J. Shen // Optics Letters. – 2014. – Vol. 39(14). – P. 4120-4123.
  5. **Liu, C.** Photonic nanojet modulation by elliptical microcylinders / C. Liu, L. Chang // Optik. – 2014. – Vol. 125(15). – P. 4043-4046.
  6. **Xu, B.B.** Annual focusing lens based on transformation optics / B.B. Xu, W.X. Jiang, G.X. Yu, T.J. Cui // Journal of the Optical Society of America A. – 2014. – Vol. 31(5). – P. 1135-1140.
  7. **Heifetz, A.** Subdiffraction optical resolution of a gold nanosphere located within the nanojet of a Mie-resonant dielectric microsphere / A. Heifetz, J.J. Simpson, S.C. Kong, A. Taflove, V. Backman // Optics Express. – 2007. – Vol. 15(25). – P. 17334-17342.
  8. **Geints, Y.E.** Photonic jets from resonantly excited transparent dielectric microspheres / Y.E. Geints, A.A. Zemlyanov, E.K. Panina // Journal of the Optical Society of America B. – 2012. – Vol. 29(4). – P. 758-762.
  9. **Козлов, Д.А.** Резонансная фокусировка лазерного света однородным диэлектрическим микроцилиндром / Д.А. Козлов, В.В. Котляр // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 3. – С. 393-396.
  10. **Котляр, В.В.** Расчёт резонансного радиуса диэлектрического цилиндра при освещении его плоской волной ТЕ-поляризованного света / В.В. Котляр, Д.А. Козлов, А.А. Ковалев // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 2. – С. 163-171. – ISSN 0134-2452.
  11. **Козлова, Е.С.** Моделирование фокусировки фемтосекундного импульса эллипсоидом, параболоидом, сферой и полусферой / Е.С. Козлова, В.В. Котляр // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, № 1. – С. 31-38. – ISSN 0134-2452.
  12. **Couairon, A.** Filamentation and damage in fused silica induced by tightly focused femtosecond laser pulses / A. Couairon, L. Sudrie, M. Franco, B. Prade, A. Mysyrowicz // Physical Review B. – 2005. – Vol. 71(12). – P. 125435-125441.

### References

- [1] Geints YE, Zemlyanov AA, Panina EK. Photonic nanojet calculations in layered radially in homogeneous micrometer-sized spherical particles. J Opt Soc Am B 2011; 28(8): 1825-30.
- [2] Han L, Han Y, Gouesbet G, Wang J, Grehan G. Photonic jet generated by spheroidal particle with Gaussian-beam illumination. J Opt Soc Am B 2014; 31(7): 1476-83.
- [3] Grojo D, Sandeau N, Boarino L, Constantinescu C, De Leo N, Laus M, Sparnacci K. Bessel-like photoic nanojets from core-shell sub-wavelength spheres. Opt Lett 2014; 39(13): 3989-92.
- [4] Shen Y, Wang LV, Shen J. Ultralong photonic nanojet formed by a two-layer dielectric microsphere. Opt Lett 2014; 39(14): 4120-23.
- [5] Liu C, Chang L. Photonic nanojet modulation by elliptical microcylinders. Optik 2014; 125(15): 4043-46.
- [6] Xu BB, Jiang WX, Yu GX, Cui TJ. Annual focusing lens based on transformation optics. J Opt Soc Am A 2014; 31(5): 1135-40.
- [7] Heifetz A, Simpson JJ, Kong SC, Taflove A, Backman V. Subdiffraction optical resolution of a gold nanosphere located within the nanojet of a Mie-resonant dielectric microsphere. Opt Express 2007; 15(25): 17334-42.
- [8] Geints YE, Zemlyanov AA, Panina EK. Photonic jets from resonantly excited transparent dielectric microspheres. J Opt Soc Am B 2012; 29(4): 758-62.
- [9] Kozlov DA, Kotlyar VV. Resonant laser focus light by uniformity dielectric microcylinder. Computer Optics 2014; 38(3): 393-396.
- [10] Kotlyar VV, Kozlov DA, Kovalev AA. Calculation of the resonant radius of dielectric cylinder under illumination by a plane TE-wave. Computer Optics 2015; 39(2): 163-71.
- [11] Kozlova ES, Kotlyar VV. Modelling of focusing femtosecond pulse by ellipsoid, paraboloid, sphere and hemisphere. Computer optics 2013; 37(1): 31-38.
- [12] Couairon A, Sudrie L, Franco M, Prade B, Mysyrowicz A. Filamentation and damage in fused silica induced by tightly focused femtosecond laser pulses. Phys Rev B 2005; 71(12): 125435-41.

## SIMULATION OF THE RESONANCE FOCUSING OF PICOSECOND AND FEMTOSECOND PULSES BY USE OF A DIELECTRIC MICROCYLINDER

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

<sup>1</sup> Image Processing Systems Institute, Samara, Russia,  
Russian Academy of Sciences,

<sup>2</sup> Samara State Aerospace University, Samara, Russia

### Abstract

Numerical simulation of the propagation of picosecond (2.5 ps) and femtosecond (17.08 fs) laser pulses through a dielectric cylinder with a refractive index of 1.59 and a resonance radius of  $0,7152\lambda$  has shown that as a result, focal spots are generated, which have respective sizes of  $0,22\lambda$  and  $0,235\lambda$  at full-width of half-maximum intensity, where  $\lambda$  is the central wavelength of the pulse.

**Keywords:** resonance focus, picosecond pulse, femtosecond pulse, whispering gallery mode.

**Citation:** Kozlova ES, Kotlyar VV. Simulation of the resonance focusing of picosecond and femtosecond pulses by use of a dielectric microcylinder. Computer Optics 2015; 39(3): 319-3.

*Сведения об авторах*

**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 Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН). Область научных интересов: дифракционная оптика, численные методы.

E-mail: [kozlova.elena.s@gmail.com](mailto:kozlova.elena.s@gmail.com).

**Elena Sergeevna Kozlova**, (b. 1985) 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 of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS). Scientific interests: diffractive optics, FDTD method, near-field optics.

*Сведения об авторе **Котляр Виктор Викторович** – см. стр. 303 этого номера.*

---

*Поступила в редакцию 17 июня 2015 г.  
Окончательный вариант – 6 июля 2015 г.*