

# Фокусировка импульсных лазерных линейно-поляризованных гауссовых пучков с использованием рефракционных микроаксионов

С.К. Сергунин<sup>1</sup>, С.В. Краснов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

**Аннотация.** В данной работе с использованием программного продукта Lumerical были выполнены расчеты фокусировки импульсных лазерных линейно-поляризованных гауссовых пучков с помощью рефракционных микроаксионов. Показано изменение картины поперечных и продольных распределений пучка от размеров рефракционного микроаксиона и времени импульса.

## 1. Введение

Фокусировка коротких импульсных пучков [1-7] используется в различных приложениях, таких как обработка материалов [8-11], формирование наномасштабных структур [12-15], оптический захват и манипулирование [16, 17].

Для описания ультракоротких импульсов используются разные модели, основанные на источниках с потенциалом Герца [1, 2], на векторных и скалярных потенциалах [3, 4], а также дифференциальном подходе [5]. Метод потенциала Герца нужен для эффективного получения выражений для электромагнитных полей, которые строго удовлетворяют четырем уравнениям Максвелла. Модель комплексного источника используется для определения точного решения уравнения Гельмгольца, которое описывает физически реализуемый непараксиальный пучок, обобщающий стандартный гауссов пучок.

Заметим, что Гауссово распределение импульса нужно осторожно использовать в случае ультракоротких импульсов, так как эта модель не обеспечивает отсутствие отрицательных частот [3]. Чтобы избежать такой ситуации, рассматривают частотно-взвешенный Гауссов спектр [4], а также Пуассоновский частотный спектр [3, 5]. При этом увеличивается вклад высоких частот, и происходит относительное уменьшение размера фокального пятна [1, 4, 18, 19].

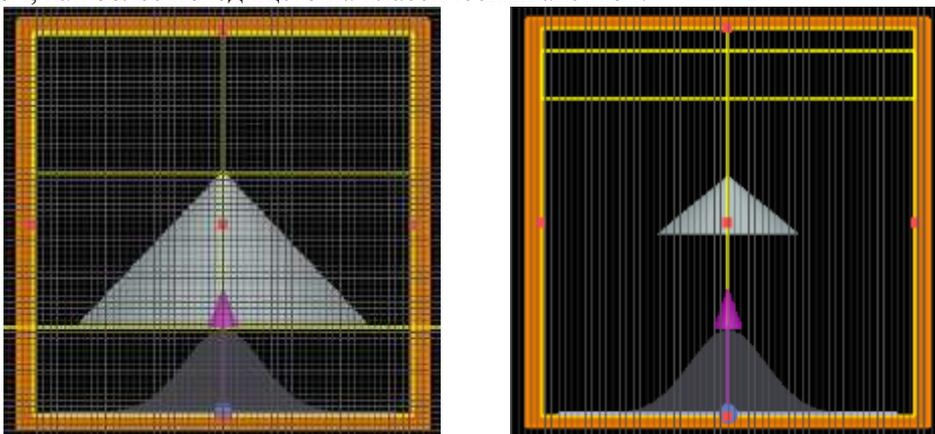
Заметим, что фокусировку лазерного излучения можно осуществлять не только линзой, но и аксионом [20-22]. В работе [23] было проведено моделирование фокусировки коротких и длинных световых импульсов с использованием рефракционного аксиона методом конечных разностей во временной области. Было показано, что длительность пучка не сказывается на усреднённой картине интенсивности в плоскости фокусировки, однако при использовании коротких импульсов может достигаться очень высокая пиковая мощность. Сравнение численных результатов для различных типов поляризации излучения показало, что при острой фокусировке энергия перераспределяется между радиальным и продольным компонентами электрического поля, в то время как энергия азимутального компонента не изменяется.

В работе [24] представлено 3D моделирование сфокусированного широкополосного лазерного излучения, охватывающего диапазон, в семь раз превышающий диапазон Рэля вдоль оси распространения и в полтора раза превышающий локальный радиус луча, перпендикулярный оптической оси. В работе [25] приведены аналитические исследования трехмерных волновых пакетов Эйри-подобных пучков с помощью решения  $(3 + 1)$  D уравнения Шредингера в свободном пространстве.

В данной работе с использованием программного продукта Lumerical были выполнены расчеты фокусировки импульсных лазерных линейно-поляризованных гауссовых пучков с помощью рефракционных микроаксионов. Показано изменение выходного поля от размеров рефракционного микроаксикона и времени импульса.

## 2. Результаты расчетов

С использованием программного продукта Lumerical были выполнены расчеты фокусировки импульсных лазерных линейно-поляризованных гауссовых пучков с помощью стеклянных (показатель преломления 1.4) рефракционных микроаксионов. Угол раскрытия аксиконов при вершине составляет  $80^\circ$ , а высота варьировалась: 2,5 микрометра (Рис.1 слева) и 1,25 микрометра (Рис.1 справа). Сначала нами были проведены исследования с большим аксиконом, как более подходящего на классический аксикон.



**Рисунок 1.** Положения в пространстве относительно Гауссова пучка аксиконов большого (2.5 мкм слева) и малого (1.25 мкм справа) размеров.

На Рис. 2 показаны графики временных характеристик Гауссова импульса, в частности, зависимости спектра от длины волны (первая строка), от частоты (вторая строка), и зависимость сигнала от времени (третья строка). График сигнала длиной 50 фмс обрезан в силу программных ограничений, которые не позволяют вывести весь импульс. Видно, что с уменьшением длины импульса происходит смещение центральной длины волны и расширение спектра.

Пространственное распределение падающего Гауссова пучка описывается следующей формулой:

$$G(x, y) = e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \sigma = 3\lambda_0. \quad (1)$$

где  $\lambda_0 = 0.5$  мкм.

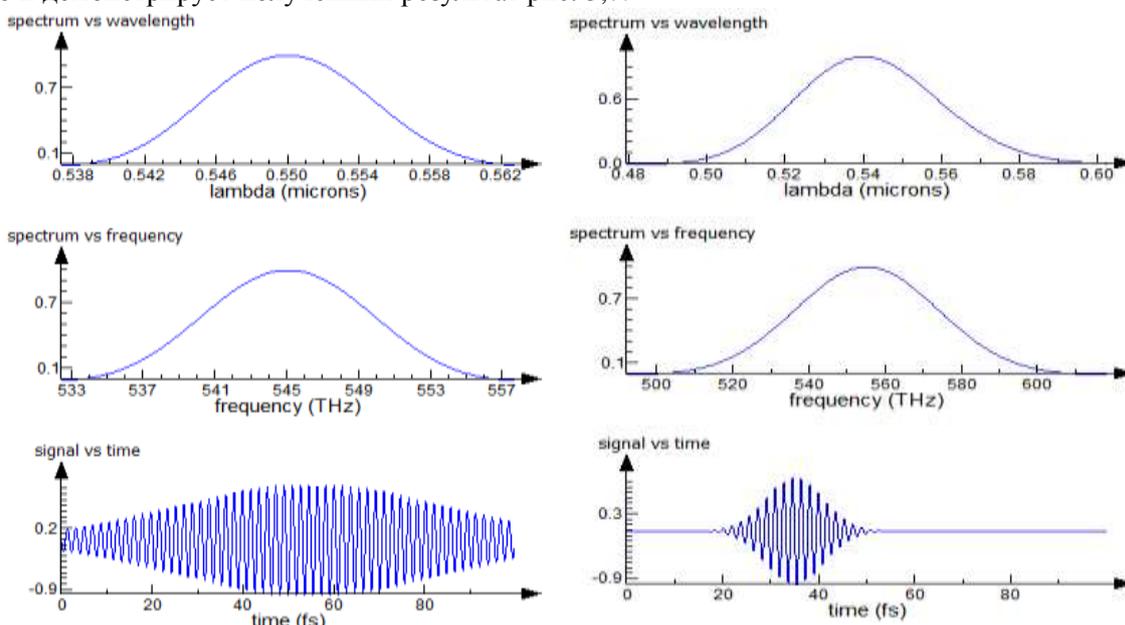
Пространственное распределение (1) использовалось во всех расчетах, а временное распределение менялось в зависимости от времени импульса.

В таблице 1 отображены характеристики входного Гауссова импульса.

### 2.1. Результаты для большого аксикона

Геометрические размеры большого аксикона были выбраны так, чтобы падающий на него пучок (1) полностью попадал на элемент. На рисунке 3 показаны графики сечений фокального пятна вдоль оси  $x$  и  $y$  в плоскости максимальной интенсивности при длительности импульса 50

фмс, длительность импульса 50 фмс практически соответствует непрерывному сигналу. В этом случае при острой фокусировке должно на уширение фокального пятна вдоль оси поляризации, что и демонстрирует полученный результат рис. 3,7.

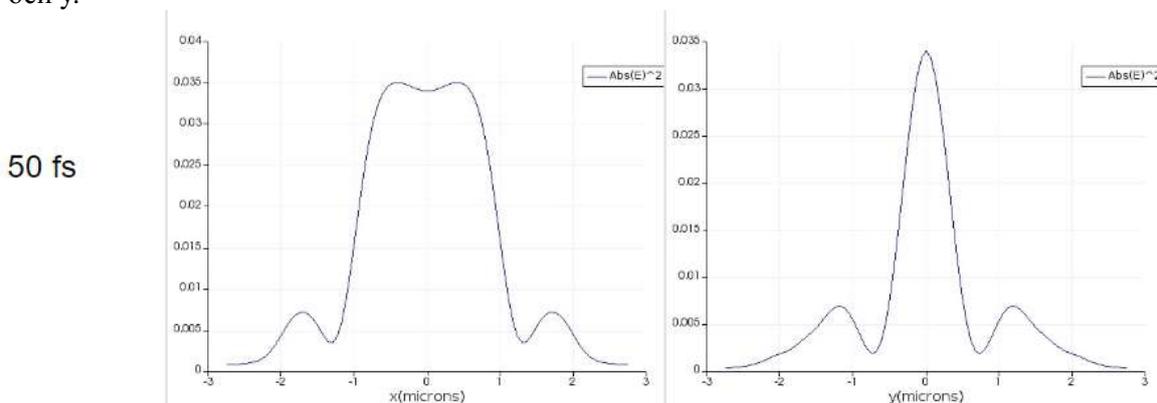


**Рисунок 2.** Характеристики импульсного излучения для длительности импульса 50 фмс (слева) и 10 фмс(справа).

**Таблица 1.** Характеристики Гауссова импульса.

Время импульса(фмс)	bandwidth (THz)	span мкм	offset(фмс)	Центральная длина волны(мкм)
50	8.82542	0.00890571	55	0.55
10	44.1271	0.0445987	35	0.54

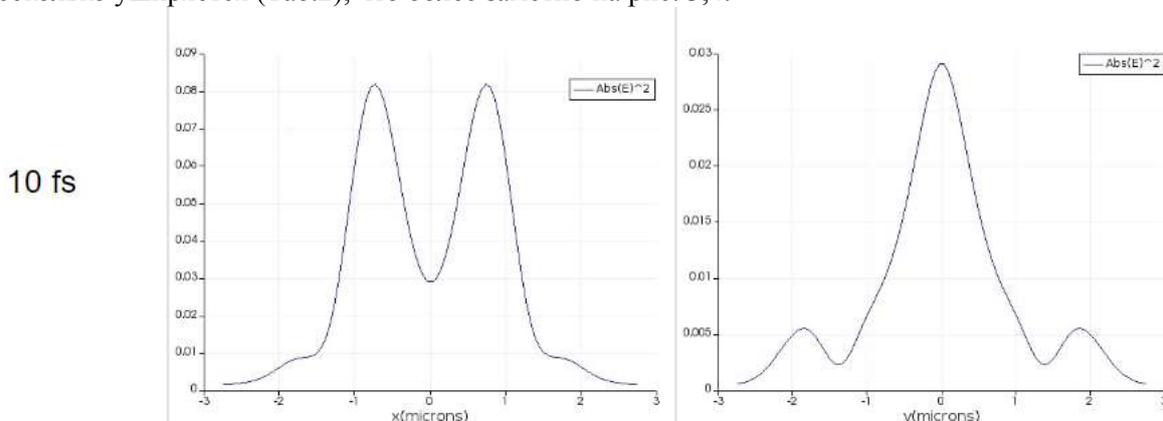
Если сравнивать графики сечений можно заметить изменения центрального пятна сфокусированного пучка (3,4 рисунок второй столбец) при уменьшении длительности импульса наблюдается сдвиг центров интенсивности относительно центральной оси и расширение пучка по оси  $y$ .



**Рисунок 3.** Графики сечений фокального пятна по оси  $x$  (слева) и  $y$ (справа) в плоскости максимальной интенсивности при длительности импульса 50 фмс для большого аксиконов.

На рисунках 5,6 показаны картины поперечных и продольных распределений пучка при фокусировке большим аксиконом. Продольные распределения при изменении длительности

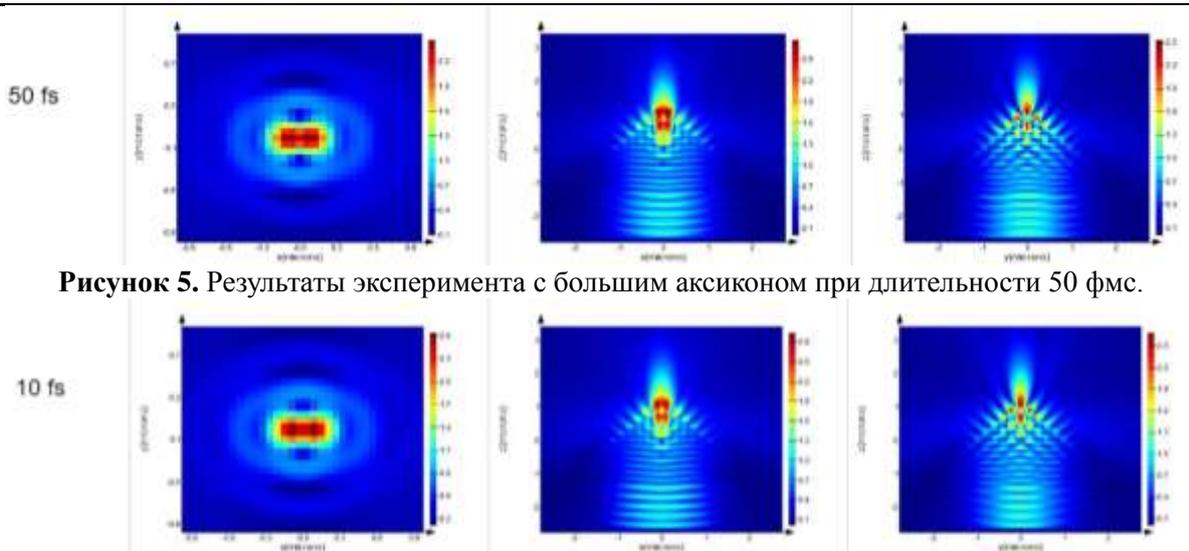
практически не меняются, а поперечные фокальное пятно при уменьшении длительности несколько уширяется (Таб.2), что более заметно на рис. 3,4.



**Рисунок 4.** Графики сечений фокального пятна по оси x (слева) и y(справа) в плоскости максимальной интенсивности при длительности импульса 10 фмс для большого аксикона.

**Таблица 2.** Свойства пучка после прохождения аксикона.

Длина импульса(фмс)	Размер фокального пятна по полуспаду интенсивности вдоль осей (мкм)	
	x	y
50	2.0	0.7
10	2.6	1.2



**Рисунок 5.** Результаты эксперимента с большим аксиконом при длительности 50 фмс.

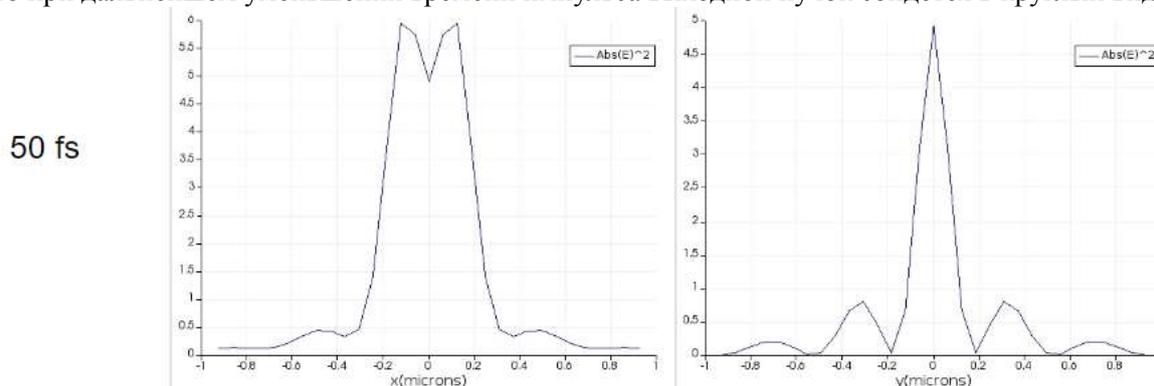
**Рисунок 6.** Результаты эксперимента с большим аксиконом при длительности 10 фмс.

## 2.2. Результаты для малого аксикона

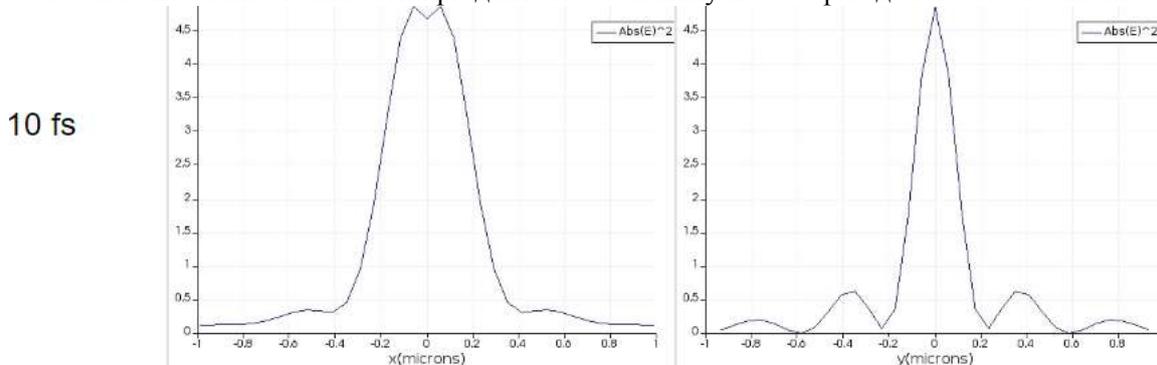
Для наглядности малый аксикон взят с размерами половины высоты большего то есть 1.25 микрометра, из-за своих размеров он уже не может полностью преобразовать пучок, а частично пропускает мимо. На графиках сечений малого аксикона по оси x и y в плоскости максимальной интенсивности ясно видно, что с уменьшением времени импульса происходит уширение фокального пятна в пространстве как по оси x (второй столбец рис.7,8) так и по оси y (третий столбец рис.7,8).

Если рассматривать картины поперечных и продольных распределений пучка ясно видно изменений центрального выходного пучка рис. 9,10 при уменьшении длины импульса наблюдается, что фокальное пятно становится более гомогенным, но все-таки несколько шире

чем при большей длительности (Таб.3), что заметно еще и из рис. 7,8. Можно предположить, что при дальнейшем уменьшении времени импульса выходной пучок сойдется в круглый вид.



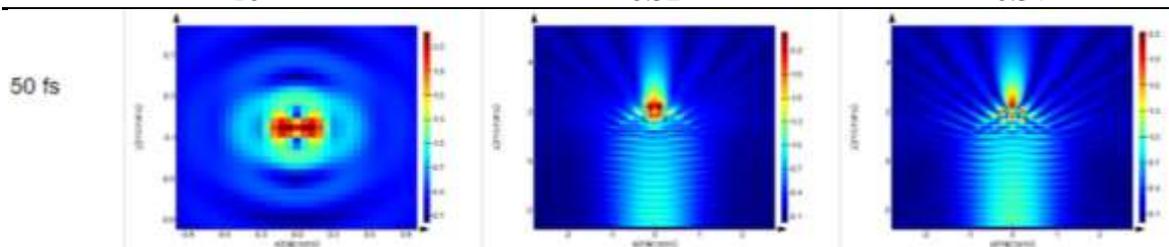
**Рисунок 7.** Графики сечений фокального пятна по оси x (слева) и y(справа) в плоскости максимальной интенсивности при длительности импульса 50 фмс для малого аксикона.



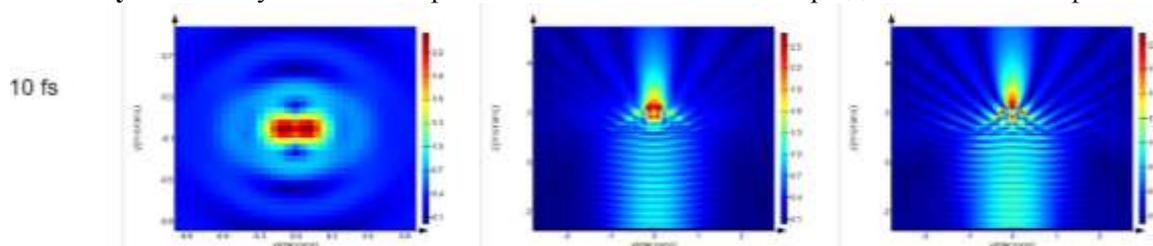
**Рисунок 8.** Графики сечений фокального пятна по оси x (слева) и y(справа) в плоскости максимальной интенсивности при длительности импульса 10 фмс для малого аксикона.

**Таблица 3.** Свойства пучка после прохождения аксикона.

Длина импульса(фмс)	Размер фокального пятна по полуспаду интенсивности вдоль осей (мкм)	
	x	y
50	0.41	0.2
10	0.52	0.34



**Рисунок 9.** Результаты эксперимента с малым аксиконем при длительности 50 фмс.



**Рисунок 10.** Результаты эксперимента с малым аксиконем при длительности 10 фмс.

### 3. Вывод

В данной работе с использованием программного продукта Lumerical были выполнены расчеты фокусировки импульсных лазерных линейно-поляризованных гауссовых пучков с помощью рефракционных микроаксионов. Показано изменения картины поперечных и продольных распределений пучка от размеров рефракционного микроаксикона и времени импульса. Наблюдали для большого аксикона (Рис.1 справа) то, что картины поперечных и продольных распределений пучка при фокусировке продольное распределение при изменении длительности практически не меняется, а поперечное фокальное пятно при уменьшении длительности несколько уширяется (Таб.2). А для малого аксикона (Рис.1 слева) при уменьшении длины импульса фокальное пятно становится более однородным, что заметно из рис. 7,8. Можно заметить схожесть картины поперечных и продольных распределений вдоль оси поляризации при большом времени импульса, так как его можно считать практически непрерывным (Рис.3,7), а также можно увидеть заметную разницу в картинах поперечных и продольных распределений пучка, а также динамики их изменения с уменьшением времени импульса (Рис.3-4,7-8).

### 4. Благодарность

Работа была выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. (грант № 18-07-01470 А)

### 5. Литература

- [1] Duarte, F.J. Ultrashort, strongly focused laser pulses in free space in Coherence and Ultrashort Pulse Laser Emission // InTech. – 2010. – P. 355-382.
- [2] Wong, L.J. Improved beam waist formula for ultrashort, tightly-focused linearly, radially, and azimuthally polarized laser pulses in free space / L.J. Wong, F.X. Kärtner, S.G. Johnson // Opt. Lett. – 2014. – Vol. 39(5). – P. 1258-1261.
- [3] Li, X. Fields of an ultrashort tightly focused laser pulse / X. Li, Y.I. Salamin, K.Z. Hatsagortsyan, C.H. Keitel // J. Opt. Soc. Am. B. – 2016. – Vol. 33. – P. 405.
- [4] Feng, S. Spatiotemporal structure of isodiffracting ultrashort electromagnetic pulses / S. Feng, H.G. Winful // Phys. Rev. E. – 2000. – Vol. 61. – P. 862-873.
- [5] Porras, M.A. Nonsinusoidal few-cycle pulsed light beams in free space // J. Opt. Soc. Am. B. – 1999. – Vol. 16. – P. 1468.
- [6] Khonina, S.N. Ultrafast rotating dipole or propeller-shaped patterns: subwavelength shaping of a beam of light on a femtosecond timescale / S.N. Khonina, I. Golub // Opt. Lett. – 2016. – Vol. 41. – P. 1605-1607.
- [7] Khonina, S.N. Time behavior of focused vector beams / S.N. Khonina, I. Golub // J. Opt. Soc. Am. A. – 2016. – Vol. 33. – P. 1948.
- [8] Omatsu, T. Metal microneedle fabrication using twisted light with spin / T. Omatsu, K. Chujo, K. Miyamoto, M. Okida, K. Nakamura, N. Aoki, R. Morita // Optics Express. – 2010. – Vol. 18(17). – P. 17967-17973.
- [9] Cheng, J. A review of ultrafast laser materials micro-machining / J. Cheng, C. Liu, S. Shang, D. Liu, W. Perrie, G. Dearden, K. Watkins // Optics and Laser Technology. – 2013. – Vol. 46. – P. 88-102.
- [10] Алфёров, С.В. О возможности управления лазерной абляцией при острой фокусировке фемтосекундного излучения / С.В. Алфёров, С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, К.Н. Тукмаков, О.Ю. Моисеев, С.А. Шуляпов, К.А. Иванов, А.Б. Савельев-Трофимов // Квантовая электроника. – 2014. – Т. 44, № 11. – С. 1061-1065.
- [11] Хонина, С.Н. Исследование фокусировки в близкорасположенные световые пятна при освещении дифракционных оптических элементов коротким импульсным лазерным пучком / С.Н. Хонина, С.А. Дегтярев, А.П. Порфирьев, О.Ю. Моисеев, С.Д. Полетаев, А.С. Ларькин, А.Б. Савельев-Трофимов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 2. – С. 187-196. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-2-187-196.

- [12] Okamoto, K. Laser fluence dependence of periodic grating structures formed on metal surfaces under femtosecond laser pulse irradiation / K. Okamoto, M. Hashida, Y. Miyasaka // *Physical Review B*. – 2010. – Vol. 82. – P. 165417.
- [13] Meshalkin, A. Direct photoinduced surface relief formation in carbazole-based azopolymer using polarization holographic recording // *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. – 2016. – Vol. 18(9-10). – P. 763-768.
- [14] Подлипов, В.В. Исследование фотоиндуцированного формирования микроструктур на поверхности карбазолсодержащего азополимера в зависимости от плотности мощности освещающего пучка / В.В. Подлипов, Н.А. Ивлиев, С.Н. Хонина, Д.В. Нестеренко, В.С. Васильев, Е.А. Акимова // *Компьютерная оптика*. – 2018. – Т. 42, № 5. – С. 779-785. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-5-779-785.
- [15] Хонина, С.Н. Анализ характеристик параксиальных векторных Гауссовых пучков, влияющих на формирование микроструктур в азополимере / С.Н. Хонина, С.И. Харитонов, С.Г. Волоотовский, В.В. Подлипов, Н.А. Ивлиев // *Компьютерная оптика*. – 2019. – Т. 43, № 5. – С. 780-788. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-5-780-788.
- [16] Agate, B. Femtosecond optical tweezers for in-situ control of two-photon fluorescence / B. Agate, C.T.A. Brown, W. Sibbett, K. Dholakia // *Opt. Express*. – 2004. – Vol. 12. – P. 3011-3017.
- [17] Wang, L.-G. Dynamic radiation force of a pulsed Gaussian beam acting on a Rayleigh dielectric sphere / L.-G. Wang, C.-L. Zhao // *Optics Express*. – 2007. – Vol. 15(17). – P. 10615-10621.
- [18] Khonina, S.N. Tighter focus for ultrashort pulse vector light beams: change of the relative contribution of different field components to the focal spot upon pulse shortening / S.N. Khonina, I. Golub // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2018. – Vol. 35(6). – P. 985-991. DOI: 10.1364/JOSAA.35.000985.
- [19] Хонина, С.Н. Сравнение фокусировки коротких импульсов в приближении Дебая / С.Н. Хонина, А.В. Устинов, С.Г. Волоотовский // *Компьютерная оптика*. – 2018. – Т. 42, № 3. – С. 432-446. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-3-432-446.
- [20] Котляр, В.В. Моделирование острой фокусировки радиально-поляризованной лазерной моды с помощью конического и бинарного микроаксионов / В.В. Котляр, С.С. Стафеев // *Компьютерная оптика*. – 2009. – Т. 33, № 1. – С. 52-60.
- [21] Khonina, S.N. Narrowing of a light spot at diffraction of linearly-polarized beam on binary asymmetric axicons / S.N. Khonina, D.V. Nesterenko, A.A. Morozov, R.V. Skidanov, V.A. Soifer // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. – 2012. – Vol. 21(1). – P. 17-26. DOI: 10.3103/S1060992X12010043.
- [22] Khonina, S.N. Focused, evanescent, hollow, and collimated beams formed by microaxicons with different conical angles / S.N. Khonina, S.A. Degtyarev, D.A. Savelyev, A.V. Ustinov // *Optics Express*. – 2017. – Vol. 25(16). – P. 19052-19064. DOI: 10.1364/OE.25.019052.
- [23] Метерко, А.В. Сравнение фокусировки рефракционным аксионом импульсов с различной поляризацией и длительностью / А.В. Метерко, С.Н. Хонина // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета)*. – 2012. – Т. 4, № 35. – С. 210-217.
- [24] Hoff, D. Tracing the phase of focused broadband laser pulses / D. Hoff, M. Krüger, L. Maisenbacher, A.M. Sayler, G.G. Paulus, P. Hommelhoff // *Nature physics*. – 2017. – Vol 13.
- [25] Zhengzhong, H. Three-dimensional localized Airy–Cartesian and Airy–helical–Cartesian wave packets in free space / H. Zhengzhong, D. Dongmei // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2018. – Vol. 35(4).

## Focusing of pulsed laser linearly polarized Gaussian beams using refractive microaxicons

S.K. Sergunin<sup>1</sup>, S.V. Krasnov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

**Abstract.** In this work, using the Lumerical software product, focusing calculations of pulsed laser linearly polarized Gaussian beams using refractive microaxicons were performed. It is shown that the output field changes as a function of the size of the refractive microaxicon and the pulse time.