

ФОРМИРОВАНИЕ 3D ФОКАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ С ЗАОСТРЕНИЕМ ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЙ МНОГОФОТОННОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ

© 2011 С. Н. Хонина¹, В. С. Павельев², Б. Н. Чичков³

¹ Институт систем обработки изображений РАН

² Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

³ Ганноверский лазерный центр (г. Ганновер, Германия)

В рамках скалярной теории дифракции с использованием параксиальной и непараксиальной моделей показано, что дополнение линзы слабым аксиконом или логарифмическим аксиконом позволяет придать фокальной области вид конуса, остриё которого имеет меньший поперечный размер, чем фокальное пятно отдельной линзы. Использование в качестве рабочей части этого заострённого конца при углублении остальной части фокуса в подложке позволит повысить разрешение в приложениях многофотонной полимеризации.

Многофотонная полимеризация, аксикон, логарифмический аксикон, коническая фокальная область.

Введение

Технология литографии, основанная на эффекте многофотонной полимеризации, в последнее время зарекомендовала себя в качестве экономичной и гибкой технологии формирования трёхмерных микро- и наноструктур. Фокусировка излучения фемтосекундного лазера в объём фотополимера приводит в результате многофотонного поглощения к полимеризации в области, ограниченной определённым значением квадрата интенсивности излучения. В результате появляется возможность формирования трёхмерных структур практически произвольной топологии с субволновым разрешением (до 100-200 нм) [1–5].

В работе [6] было показано, что смещение центра области полимеризации относительно границы подложки и слоя фотополимера позволяет повысить разрешение до 65 нм. Высокое разрешение и относительно низкая стоимость процесса делают целесообразным применение технологии многофотонной полимеризации не только для изготовления трёхмерных структур (например, структурированных волноводов [4]), но и для формирования

микрорельефа дифракционных оптических элементов (ДОО) [7,8].

Таким образом, эта технология становится реальной альтернативой дорогостоящей технологии электронной литографии [9] и технологии прямой лазерной записи, разрешение которой ограничено длиной волны источника излучения [10, 11].

Трёхмерная конфигурация распределения квадрата интенсивности в фокальной области имеет большое значение для улучшения и расширения возможностей использования многофотонной полимеризации. В частности, вытянутый и имеющий острые концы «воксель» (объёмный световой элемент, формирующийся в фокальной области) позволяет повысить разрешение за счёт использования в качестве рабочей части именно заостренного конца при углублении остальной части в подложке [12].

Фокальная область при дополнении сферической линзы даже «слабым» собирающим аксиконом выглядит как конус, остриё которого имеет меньший поперечный размер, чем фокальное пятно отдельной линзы. Данный эффект связан с тем, что аксикон увеличивает числовую апер-

туру центральных лучей линзы и позволяет перенаправить их из фокальной плоскости ближе к плоскости линзы. В зависимости от параметров аксикона можно варьировать протяжённость и «остроту» формируемого конуса [13, 14].

Дополнение линзы аксиконом увеличивает числовую апертуру линзы на постоянную величину, что для высокоапертурных фокусирующих систем, как правило используемых для многофотонной полимеризации, сказывается только для лучей, проходящих через центральную часть (периферийная часть и так имеет числовую апертуру, близкую к предельной) [14].

Использование фокусирующих систем с высокой числовой апертурой позволяет достичь высокой концентрации энергии в фокальном пятне, размер которого уменьшается с ростом значения числовой апертуры. Однако при этом фокальный воксель становится менее вытянутым вдоль оптической оси и приобретает более закруглённую форму [12].

Таким образом, для приложений многофотонной полимеризации, с одной стороны, необходимо обеспечивать высокую концентрацию энергии, что делает неприемлемым использование кольцевых диафрагм [15] или других приёмов, приводящих к уменьшению поперечного размера фокальной области за счёт её существенного удлинения. С другой стороны, уменьшение глубины фокальной области в продольном направлении приводит к уширению её поперечного размера и уменьшению точности позиционирования при использовании в качестве рабочей части только края фокальной области.

Возможность достижения компромисса в описанной выше ситуации очевидна для высокоапертурных фокусирующих систем за счёт локального «усиления» только центральной части линзы дополнительным фазовым изменением (например, дифракционным фраксиконом [13] или дифракционным логарифмическим аксиконом [16, 17]).

В данной работе такая возможность рассмотрена в рамках скалярной теории и небольших значений числовой апертуры. Такой подход имеет смысл при использовании мощных лазерных излучений.

1. Моделирование в условиях параксиального приближения

1.1. Фокусировка гауссового пучка

Рассмотрим в параксиальном приближении фокусировку гауссового пучка с радиусом перетяжки s

$$g(r) = \exp\left(-\frac{r^2}{s^2}\right) \quad (1)$$

линзой:

$$t_{ls}(r) = \exp\left(-ik \frac{r^2}{2f_0}\right) \quad (2)$$

с фокусным расстоянием f_0 ; $k = 2\pi / l$ – волновое число, l – длина волны излучения.

Для расчёта распространения поля в свободном пространстве воспользуемся преобразованием Френеля:

$$F(r, z) = \frac{k}{iz} \exp(ikz) \exp\left(\frac{ikr^2}{2z}\right) \times \int_0^R f(r) \exp\left(\frac{ikr^2}{2z}\right) J_0\left(\frac{kr r}{z}\right) r dr, \quad (3)$$

где

$$f(r) = g(r) \cdot t_{ls}(r), \quad R – \text{радиус линзы.}$$

На рис. 1 приведены результаты расчёта с использованием (3) для гауссового пучка с длиной волны излучения $l = 532$ нм и радиусом перетяжки $s = 0,5$ мм, сфокусированного линзой (2) радиусом $R = 1$ мм и с фокусным расстоянием $f_0 = 100$ мм.

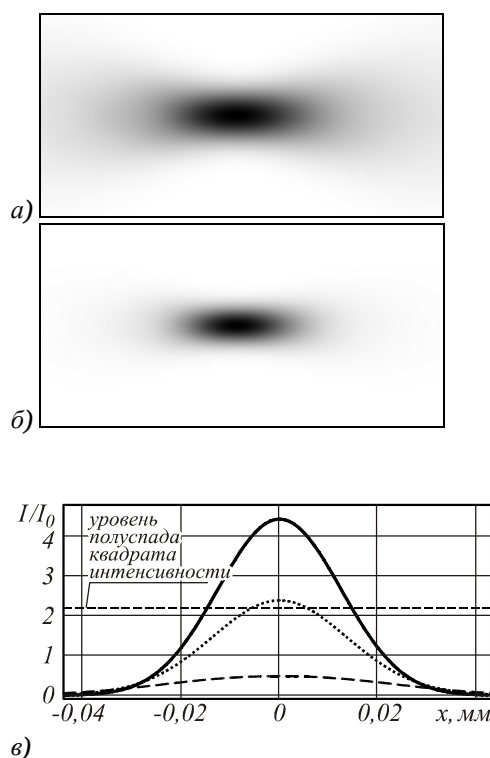


Рис. 1. Фокусировка гауссового пучка:

распределение интенсивности (а) и квадрата интенсивности в области

$$z \in [80 \text{ мм}, 120 \text{ мм}] \text{ (б)},$$

$$x \in [-0,1 \text{ мм}; 0,1 \text{ мм}],$$

распределение квадрата интенсивности в плоскостях

$$z = 100 \text{ мм (сплошная линия)},$$

$$z = 95 \text{ мм (точечная линия)},$$

$$z = 90 \text{ мм (пунктирная линия) (в)}$$

Как видно на рис. 1 в, хотя при удалении от плоскости фокусировки пучок уширяется, но размер вершины, превышающей некоторый уровень квадрата интенсивности, становится меньше. Полная ширина пучка по полуспаду квадрата интенсивности (FWHM2) в плоскости фокуса ($z = 100 \text{ мм}$) равна $0,0292 \text{ мм}$, а в плоскости $z = 95 \text{ мм}$ FWHM2 = $0,011 \text{ мм}$, т.е. почти в три раза меньше. Данный эффект может быть использован для приложений многофотонной полимеризации.

Для достижения меньших размеров рабочей области желательно, чтобы фокальная область имела более заострённые края. Однако слишком сильное вытягивание за счёт увеличения фокуса линзы или использования вместо неё аксикона приведёт к значительной потере энергии.

Компромиссным вариантом может быть дополнение линзы слабым аксиконом, которое позволяет формировать конусную форму фокальной области [13, 14].

Фазовая функция такой модифицированной линзы будет иметь вид:

$$t_{\text{lsax}}(r) = \exp\left(-ik \frac{r^2}{2f_0} - ika_0 r\right), \quad (4)$$

где

a_0 – параметр, соответствующий числовой апертуре аксикона.

На рис. 2 приведены результаты расчёта, аналогичные приведённым на рис. 1, при использовании модифицированной линзы (4) с $ka_0 = 10$, $a_0 \approx 0,00085$. Как видно на рис. 2, в данном случае фокальная область в отличие от обычной линзы имеет асимметричную форму.

Полная ширина пучка по полуспаду квадрата интенсивности в плоскости фокуса ($z = 85 \text{ мм}$) равна $0,0257 \text{ мм}$, что примерно на 10% меньше, чем при использовании обычной линзы. Однако в пологой части фокальной области наблюдается более быстрое уширение, и в результате в плоскости $z = 78 \text{ мм}$ происходит меньшее, чем ожидалось, сужение (FWHM2 = $0,012 \text{ мм}$).

1.2. Фокусировка равномерного пучка

При фокусировке плоской волны, ограниченной круглой диафрагмой радиусом R , картина в области фокуса будет иной, чем при использовании гауссового пучка. На рис. 3 приведены результаты моделирования фокусировки равномерного пучка обычной (2) и дополненной аксиконом (4) линзами с теми же параметрами, что были использованы в предыдущем разделе.

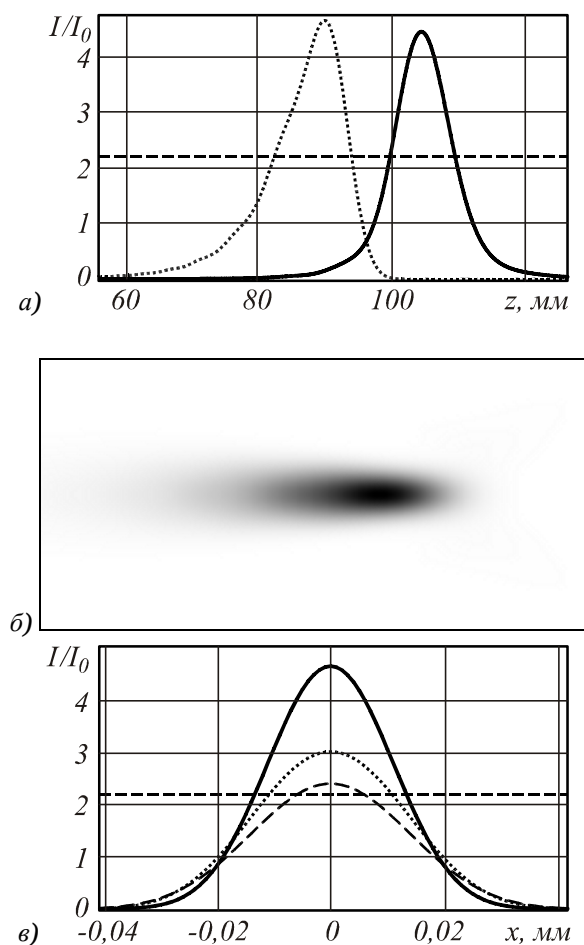


Рис. 2. Фокусировка гауссового пучка с помощью модифицированной линзы (4):

распределение квадрата интенсивности на оптической оси для обычной линзы (сплошная линия) и для модифицированной линзы (точечная линия) (а), в области $z \in [60 \text{ mm}, 100 \text{ mm}]$, $x \in [-0,1 \text{ mm}; 0,1 \text{ mm}]$ (б), в плоскостях $z = 85 \text{ mm}$ (сплошная линия), $z = 80 \text{ mm}$ (точечная линия), $z = 78 \text{ mm}$ (пунктирная линия) (в)

Как видно из рис. 3, дополнение линзы аксиконом приводит к смещению фокального пятна и уменьшению его поперечного размера, а также изменению формы – теряется симметрия: пятно принимает заострённую форму и вытягивается. Таким образом, срез по полуспаду квадрата интенсивности фокальной области для модифицированной линзы приобретает более вытянутый в одном направлении вид, что позволяет ослабить требования к устройствам позиционирования.

На рис. 4 также видно, что изменение размера фокального пятна по полуспаду квадрата интенсивности для моди-

фицированной линзы является более медленным, а значит, в экспериментальной реализации будет достигнута лучшая точность.

2. Непараксиальное моделирование

Для расчёта действия короткофокусных линз воспользуемся методом разложения по плоским волнам. В случае наличия в задаче осевой симметрии расчёт распространения поля в свободном пространстве сводится к двойному интегралу:

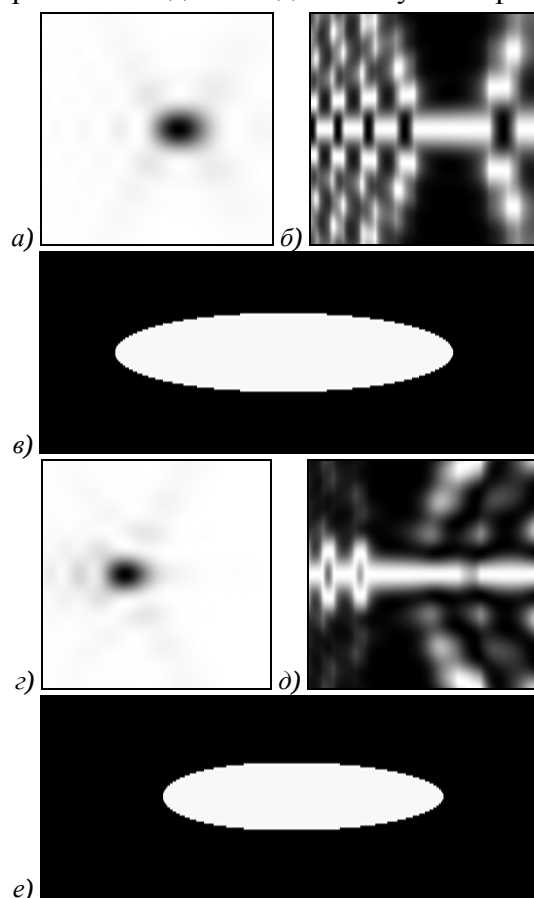


Рис. 3. Фокусировка равномерного пучка с помощью обычной линзы (2) (верхняя строка) и модифицированной линзы (4) (нижняя строка):

распределение интенсивности в области $z \in [70 \text{ mm}, 120 \text{ mm}]$, $x \in [-0,1 \text{ mm}; 0,1 \text{ mm}]$ (а), (с) и соответствующая топология (б), (д), а также срез по полуспаду квадрата интенсивности в области $z \in [95 \text{ mm}, 105 \text{ mm}]$, $x \in [-25 \text{ mm}; 25 \text{ mm}]$ (в), (е)

$$E(r, q, z) = ik^2 \int_0^{s_0} \left(\int_0^R f(r) J_0(ksr) r dr \right) \times \exp(ikz\sqrt{1-s^2}) J_0(ksr) s ds, \quad (5)$$

где диапазон пространственных частот $s \leq 1$ соответствует распространяющимся волнам.

Заметим, что дополнение линзы аксиконом, рассмотренное в предыдущем разделе, увеличивает числовую апертуру линзы на постоянную величину [13, 14], что для высокоапертурных линз сказывается только для лучей, проходящих через центральную часть (если периферийная часть имеет числовую апертуру, близкую к предельной). Поэтому логичнее «усиливать» только центральную часть линзы, например, дифракционным фазиком [13] $\exp(-iar^s)$, где $s < 1$, или дифракционным логарифмическим аксиконом [16].

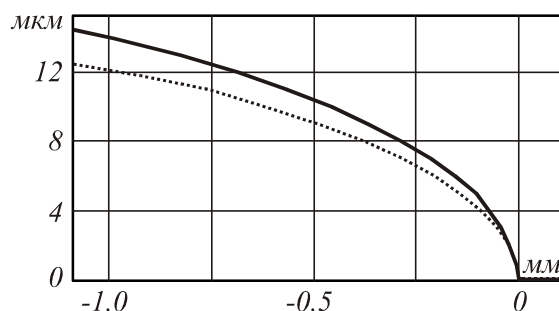


Рис. 4. Сравнение зависимости изменения размера фокального пятна по полуспаду квадрата интенсивности от расстояния до минимального краевого значения: для обычной линзы (сплошная линия) и модифицированной аксиконом линзы (точечная линия)

Дифракционный линейный аксикон $t_{ax}(r) = \exp(-ika_0 r)$ имеет постоянную числовую апертуру, соответствующую параметру a_0 . Так как линза в различных зонах преломляет лучи под разными углами, то числовая апертура линзы имеет зависимость от радиуса, которую можно определить следующим образом:

$$NA_{dl} = \sin \left[\arctg \left(\frac{r}{f} \right) \right]. \quad (6)$$

На рис. 5 показано изменение числовой апертуры линзы (2) при дополнении её дифракционным логарифмическим аксиконом $t_{lax}(r) = \exp(-ikg_0 \ln r)$.

В таблице 1 показаны результаты фокусировки равномерного излучения, ограниченного круглой диафрагмой радиуса $R = 1$ мм, с использованием трёх типов линз: обычной с фокусным расстоянием $f_0 = 10$ мм, дополненной аксиконом с $a_0 \approx 0,00085$ и дополненной логарифмическим аксиконом с $g_0 = a_0$.

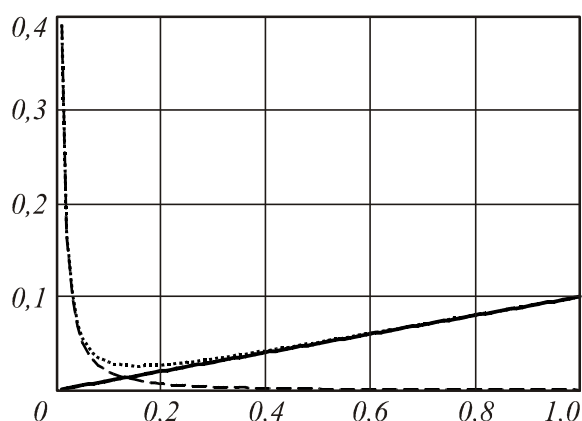
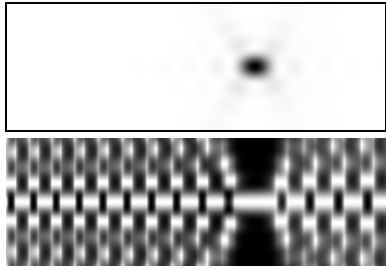
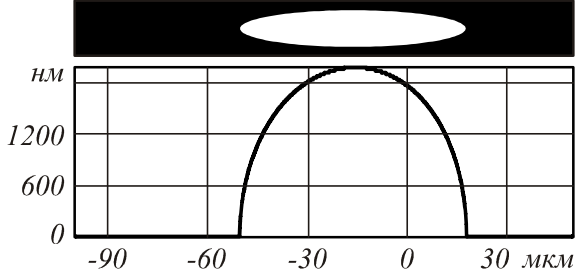
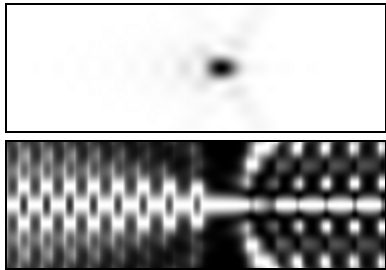
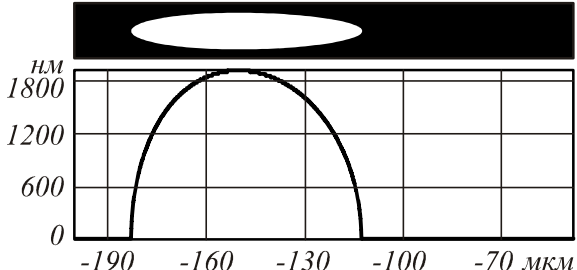
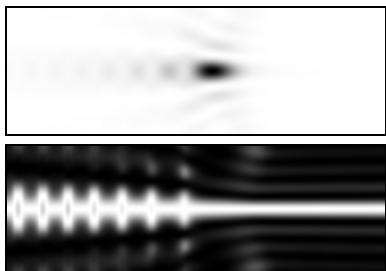
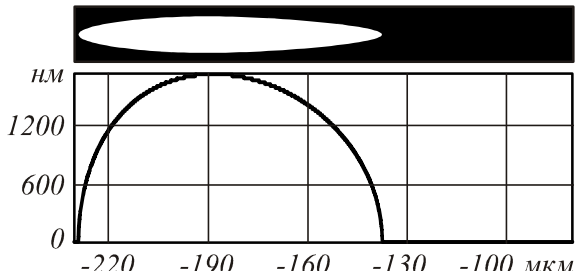


Рис. 5. Зависимость числовой апертуры линзы с $NA_{dl} = 0,1$, дополненной дифракционным логарифмическим аксиконом $\exp(-i10 \ln r)$ от радиуса

На рис. 6, 7 показаны сравнительные зависимости размера фокального пятна по полуспаду квадрата интенсивности от смещения вдоль оптической оси – либо от плоскости фокуса (рис. 6), либо от краевой точки среза (рис. 7). Видно, что изменение размера фокального пятна по полуспаду квадрата интенсивности для линзы, дополненной логарифмическим аксиконом, является наилучшим из рассмотренных. При этом продольное смещение из плоскости фокуса на 1 мм позволяет плавно изменять диаметр светового пятна, имеющий квадрат интенсивности выше определенного уровня, в пределах 300 нм.

Таблица 1. Фокусировка равномерного излучения, ограниченного круглой диафрагмой радиуса $R = 1$ мм, с использованием трёх типов оптических элементов

Тип фокусирующего элемента	Интенсивность и топология в области $z \in [9\text{ мм}; 10,5\text{ мм}]$, $x \in [-10\text{ мм}; 10\text{ мм}]$	Срез по полуспаду квадрата интенсивности в области $z \in [9,9\text{ мм}; 10,05\text{ мм}]$, $x \in [-1,5\text{ мм}; 1,5\text{ мм}]$
Линза		
Линза + аксикон		
Линза + логарифмический аксикон		

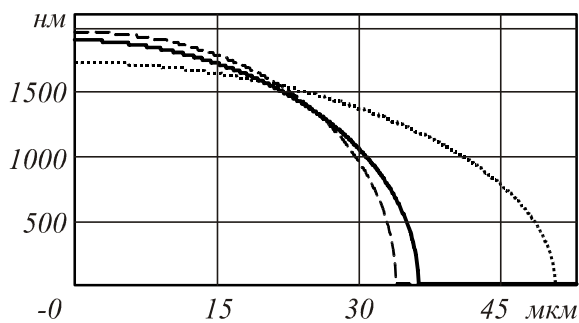


Рис. 6. Сравнение размера фокального пятна по полуспаду квадрата интенсивности в зависимости от расстояния до максимального значения: для линзы (пунктирная линия), для линзы, дополненной аксиконом (сплошная линия), для линзы, дополненной логарифмическим аксиконом (точечная линия)

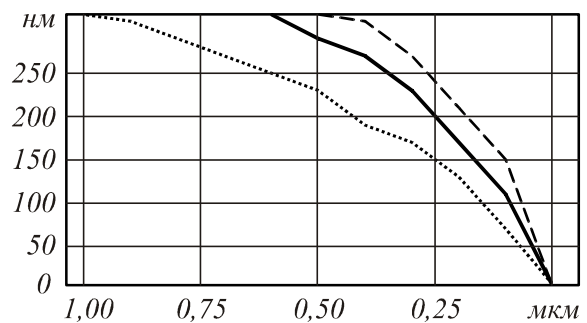


Рис. 7. Сравнение зависимости изменения размера фокального пятна по полуспаду квадрата интенсивности от расстояния до минимального краевого значения: для линзы (пунктирная линия), для линзы, дополненной аксиконом (сплошная линия), для линзы, дополненной логарифмическим аксиконом (точечная линия)

Заключение

В работе в рамках скалярной теории дифракции с использованием параксиальной и непараксиальной моделей показано, что дополнение линзы слабым аксиконом позволяет изменить форму фокальной области для более удобного использования в приложениях многофотонной полимеризации. В этом случае фокальная область принимает вид конуса, остриё которого имеет меньший поперечный размер, чем фокальное пятно отдельной линзы. Такой вытянутый с одной стороны «воксель» позволяет повысить разрешение за счёт использования в качестве рабочей части именно заострённого конца при углублении остальной части в подложке.

При фокусировке гауссового пучка линзой, модифицированной аксиконом, формируется конус, остриё которого, однако, является очень резким по сравнению с фокусировкой равномерного излучения. Таким образом, использование равномерного пучка является предпочтительным не только для уменьшения размера фокального пятна, но и для ослабления требований к устройствам позиционирования.

Использование вместо классического конического аксикона для модификации формы фокальной области логарифмического аксикона позволяет получить конус с более вытянутым и тонким остриём. Применение такого подхода будет ещё эффективнее в случае использования фокусирующих систем с высоким значением числовой апертуры.

Однако, как показано в данной работе, низкоапертурные фокусирующие системы также позволяют формировать на краю фокальной области световые пятна, диаметр которых по уровню полуспада от максимума квадрата интенсивности в 5-7 раз меньше длины волны. Такой подход имеет смысл при использовании лазерного излучения высокой интенсивности. В частности, при использовании линзы с числовой апертурой 0,1 и слабого логарифмического аксикона для фокусировки равномерного излучения с длиной волны 532 нм продольное смещение из плоско-

сти фокуса на 1 мкм позволяет плавно изменять диаметр светового пятна в пределах 300 нм.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (грант CRDF PG08-014-1), грантов РФФИ 10-07-00109-а, 10-07-00438-а и гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ НШ-7414.2010.9.

Библиографический список

1. Kawata, S. Finer features for functional microdevices / S. Kawata, H.B. Sun, T. Tanaka and K. Takada [Текст] // Nature. – 2001. – Т. 412(6848). – С. 697 – 698.
2. Cumpston, B.H. Two-photon polymerization initiators for three-dimensional optical data storage and microfabrication [Текст] / B.H. Cumpston, S.P. Ananthavel, S. Barlow, D.L. Dyer, J.E. Ehrlich, L.L. Erskine, A.A. Heikal, S.M. Kuebler, I.-Y. Sandy Lee, D. McCord-Maughon, J. Qin, H. Röske, M. Rumi, X.-L. Wu, S.R. Marder and J.W. Perry // Nature. – 1999. – Т. 398. – С. 51 – 54.
3. Maruo, S. Three-dimensional microfabrication with two-photon-absorbed photopolymerization [Текст] / S. Maruo, O. Nakamura and S. Kawata // Opt. Lett. – 1997. – Т. 22(2). – С. 132 – 134.
4. Serbin, J. Femtosecond laser-induced two-photon polymerization of inorganic-organic hybrid materials for applications in photonics [Текст] / J. Serbin, A. Egbert, A. Ostendorf, B.N. Chichkov, R. Houbertz, G. Domann, J. Schulz, C. Cronauer, L. Fröhlich and M. Popall // Opt. Lett. – 2003. – Т. 28(5). – С. 301 – 303.
5. Serbin, J. Fabrication of woodpile structures by two-photon polymerization and investigation of their optical properties [Текст] / J. Serbin, A. Ovsianikov, and B. Chichkov // Opt. Express. – 2004. – Т. 12(21). – С. 5221 – 5228.
6. Haske, W. 65 nm feature sizes using visible wavelength 3-D multiphoton lithography [Текст] / W. Haske, V.W. Chen,

- J.M. Hales, W. Dong, S. Barlow, S.R. Marder and J.W. Perry // Opt. Express. – 2007. – Т. 15(6). – С. 3426 – 3436.
7. Jia, B. Use of two-photon polymerization for continuous gray-level encoding of diffractive optical elements [Текст] / B. Jia, J. Serbin, H. Kim, B. Lee, J. Li and M. Gu // Appl. Phys. Lett. – 2007. – Т. 90. – С. 1 – 3.
8. Osipov, V.P. Realization of binary radial diffractive optical elements by two-photon polymerization technique [Текст] / V.P. Osipov, V.S. Pavelyev, D.G. Kachalov, A. Žukauskas and B.N. Chichkov // Optics Express. – 2010. – Т. 18. – С. 25808 – 25814.
9. Vasara, A. Binary surface-relief gratings for array illumination in digital optics [Текст] / A. Vasara, M.R. Taghizadeh, J. Turunen, J. Westerholm, E. Noponen, H. Ichikawa, J.M. Miller, T. Jaakkola and S. Kuisma // Applied Optics. – 1992. – Т. 31(17). – С. 3320 – 3336.
10. Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements. Ed. by V.A. Soifer [Текст]. – N.-Y.: John Wiley, 2002.
11. Korolkov, V.P. Zone-boundary optimization for direct laser writing of continuous-relief diffractive optical elements [Текст] / V.P. Korolkov, R.K. Nasyrov and R.V. Shimansky // Appl. Opt. – 2006. – Т. 45(1). – С. 53 – 62.
12. Sun, H.-B. Two-Photon Photopolymerization and 3D Lithographic Microfabrication [Text] / H.-B. Sun, S. Kawata1 // APS. – 2004. – Т. 170. – С. 169 – 273.
13. Хонина, С.Н. Фраксикон – дифракционный оптический элемент с конической фокальной областью [Текст] / С.Н. Хонина, С.Г. Волотовский // Компьютерная оптика. – 2009. – Т. 33, № 4. – С. 401 – 411.
14. Хонина, С.Н. Исследование применения аксиконов в высокоапертурной фокусирующей системе [Текст] / С.Н. Хонина, С.Г. Волотовский // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 1. – С. 35 – 51.
15. Quabis, S. Focusing light to a tighter spot [Текст] / S. Quabis, R. Dorn, M. Eberler, O. Glockl and G. Leuchs // Opt. Commun. – 2000. – Т. 179. – С. 1 – 7.
16. Sochacki, J. Annular-aperture logarithmic axicon [Текст] / J. Sochacki, Z. Jaroszewicz, L.R. Staronski and A. Kołodziejczyk // J. Opt. Soc. Am. A. – 1993. – Т. 10. – С. 1765 – 1768.
17. Хонина, С.Н. Сравнительный анализ распределений интенсивности, формируемых дифракционным аксиконом и дифракционным логарифмическим аксиконом [Текст] / С.Н. Хонина, С.А. Балалаев // Компьютерная оптика. – 2009. – Т. 33, № 2. – С. 162 – 174.

FORMATION OF 3D FOCAL DOMAIN WITH PEAK FOR APPLICATIONS OF MULTIPHOTON POLYMERIZATION

© 2011 S. N. Khonina¹, V. S. Pavelyev², B. N. Chichkov³

¹Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences

²Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

³Hannover Laser Center (Hannover, Germany)

The scalar diffractive theory (in paraxial and non-paraxial cases) has been used for the investigation of focal domain for lens+axicon and lens+logarithmic axicon optical systems. It was shown that focal domain has a peak with a subwavelength feature size. The use of this peak with shifting of the remaining part of the focal domain into the substrate makes it possible to improve the resolution for applications of multiphoton polymerization.

Multiphoton polymerization, axicon, logarithmic axicon, conical focal domain.

Информация об авторах

Хонина Светлана Николаевна, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник института систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, модовые и поляризационные преобразования, оптическое манипулирование, оптическая и цифровая обработка изображений. E-mail: khonina@smr.ru

Павельев Владимир Сергеевич, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой наноинженерии. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: дифракционная микрооптика и оптические волноводы, нанофотоника и синтез оптических метаматериалов, технологии формирования микро- и наноструктур. E-mail: nano@ssau.ru.

Чичков Борис Николаевич, доктор наук (Dr.Habil.), профессор, начальник отдела нанотехнологий Ганновского лазерного центра LZH (г. Ганновер, Германия). Область научных интересов: дифракционная микрооптика и оптические волноводы, лазерные технологии формирования микро- и наноструктур. E-mail: b.chichkov@lzh.de.

Khonina Svetlana Nikolaevna, doctor of physical and mathematical sciences, leading researcher, Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences, khonina@smr.ru. Area of research: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing.

Pavelyev Vladimir Sergeevitch, doctor of physical and mathematical sciences, head of the nanoengineering department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), nano@ssau.ru. Area of research: diffractive microoptics, optical waveguides, nanophotonics, synthesis of optical metamaterials, technologies for the forming of micro- and nanostructures.

Chichkov Boris Nikolaevitch, doctor of sciences (Dr. Habil.), professor, head of the nanotechnology department, Hannover Laser Center (Hannover, Germany), b.chichkov@lzh.de. Area of research: diffractive microoptics, optical waveguides, laser technologies for the forming of micro- and nanostructures.