

А. Г. Седухин^{1}, В. П. Корольков¹*

Оценка допустимых технологических характеристик оптического фильтра для генерации параксиальных гамма-связанных лазерных пучков с расширенной глубиной фокуса

¹Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: sedukhin@iae.nsk.su

Аннотация. Проведена оценка допустимых технологических характеристик планарного оптического фильтра пространственных частот для системы генерации сфокусированных параксиальных лазерных пучков, имеющих расширенную глубину фокуса и аналитически описываемых экспоненциальными и гамма-функциями. Описание системы генерации названных пучков и самих пучков было приведено ранее [A.G. Sedukhin, Gamma and gamma-coupled beams, Appl. Opt., 2018, 57(14) 3653-3660]. Физически, рассматриваемый фильтр пространственных частот представляет собой компьютерно-синтезированный оптический транспарант со структурой дифракционного раstra, работающего в нулевом порядке дифракции и имеющего плавно изменяющийся знакопеременный коэффициент пропускания, с кодированием пропускания на двух ортогональных несущих пространственных частотах. Используя компьютерное моделирование распространения светового поля на выходе системы генерации пучков, в настоящей работе показано, что для достижения приемлемого качества генерируемого пучка, оптическая плотность фильтра на участках, призванных осуществлять блокировку светового потока, должна составлять не менее 4D. Кроме того, отклонение глубины бинарно-фазового профиля фильтра от расчетного значения на рабочей длине волны не должно превышать $\pm 3\%$. Данные оценки необходимы для выбора оптических материалов оптического фильтра, а также для выбора режимов технологии изготовления данного фильтра.

Ключевые слова: сфокусированные лазерные пучки, системы генерации лазерных пучков, фильтры пространственных частот, дифракция света, технология прямой лазерной записи

A. G. Sedukhin^{1}, V. P. Korolkov¹*

Estimation of Acceptable Technological Characteristics of an Optical Filter for the Generation of Paraxial Gamma-Coupled Laser Beams with Extended Depth of Focus

¹Institute of Automation and Electrometry, SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
*e-mail: sedukhin@iae.nsk.su

Abstract. The acceptable technological characteristics of a planar optical filter of spatial frequencies are estimated for a system of generation of focused paraxial laser beams having an extended depth of focus and described analytically by exponential and gamma functions. A description of the generation system for these beams and the beams themselves was given earlier [A.G. Sedukhin, Gamma and gamma-coupled beams, Appl. Opt., 2018, 57(14) 3653-3660]. Physically, the spatial frequency filter under consideration is a computer-synthesized optical transparency with a structure of diffraction reticle operating in zero diffraction order and having a smoothly varying alternating transmittance, with encoding of the transmittance on two orthogonal spatial carrier frequencies. Using computer simulation of the light field propagation at the output of the beam generation system involved, this

work shows that in order to achieve satisfactory quality of the generated beam, the optical density of the filter in areas designed to block the light flux must be at least 4D. In addition, the deviation of the depth of the binary-phase profile of the filter from the calculated value at the operating wavelength should not exceed $\pm 3\%$. These estimates are necessary for selection of optical materials for the optical filter, as well as for selection of the technological regimes for fabricating the filter.

Keywords: focused laser beams, laser beam generation systems, spatial frequency filters, light diffraction, direct laser writing technology

Введение

Методы и устройства генерации лазерных пучков со специальными свойствами, желаемыми в конкретных приложениях, постоянно представляют интерес, как с научной, так и с технической точек зрения. В частности, во многих приложениях желаемым свойством сфокусированных пучков свободного пространства с центральным максимумом является сохранение малого поперечного размера их центрального максимума и постоянной световой интенсивности максимума в пределах расширенной глубины фокуса с одновременным быстрым затуханием побочных максимумов в пределах глубины фокуса. К настоящему времени предложено достаточно много разновидностей подобных пучков [1], различающихся между собой математическим представлением, соответствующей структурой и характеристиками сфокусированного поля, а также методами и устройствами генерации пучков. К классическим представителям сфокусированных пучков с аксиальной симметрией и с бесконечной, либо расширенной глубиной фокуса можно отнести параксиальные скалярные «бездифракционные» бесселевы пучки [1,2], бессель-гаусовы [3] пучки, пучки Эйри [4], а также многочисленные остросфокусированные векторные «игольчатые» пучки. Для демонстрации актуальности темы лазерных пучков с расширенной глубиной фокуса, ее дальнейшего развития и широкой практической востребованности данных пучков в таких разнообразных областях как, например, лазерная сварка, пайка и резка, высокоразрешающая изображающая и конфокальная микроскопия, оптическая связь, зондирование атмосферы и сканирующая лазерная литография, можно привести достаточно много ссылок на работы последних лет, например, [5–20]. Для возможности реализации теоретических характеристик данных пучков на практике и сохранения их свойств при распространении в свободном пространстве, важную роль играют оптические системы генерации пучков с конкретными ограничениями и допусками на используемые компоненты. В свою очередь, указанные ограничения обычно опосредованы особенностями и ограничениями тех или иных технологий изготовления компонентов этих оптических систем, и, в первую очередь, технологий изготовления оптических фильтров систем. Фактически, выдерживание технологических допусков на те или иные параметры и характеристики оптических компонентов является очень важным, поскольку это предопределяет степень приближения расчетных и экспериментальных профилей генерируемых пучков.

В настоящей работе, исследуются основные допустимые технологические характеристики планарного оптического фильтра пространственных частот, который является важнейшей составной частью системы генерации так называемых гамма-связанных многопараметрических параксиальных сфокусированных пучков [21]. Как и вышеназванные пучки, последние пучки имеют расширенную глубину фокуса (при выборе их параметров) но, по отношению к широко-используемым бессель-гауссовым пучкам, имеют более высокое качество фокусировки, а именно, характеризуются более быстрым затуханием побочных максимумов в поперечном и продольном направлениях, а также более стабильным поддержанием диаметра сфокусированного центрального лепестка в пределах глубины фокуса. Математически они описываются экспоненциальными и гамма-функциями, а физически представляются в виде аксиальных суперпозиций гауссовых пучков основной моды. Оптический фильтр пространственных частот данных пучков выполняется в виде гибридной компьютерно-синтезированной маски на планарной подложке, которая освещается коллимированным нормально-падающим пучком монохроматического света с длиной волны λ . При этом, модуляция модуля амплитуды волны осуществляется бинарно-амплитудной структурой фильтра, с модуляцией коэффициента пропускания света прозрачными либо непрозрачными участками на основе тонкой металлической хромовой пленки, с использованием модуляции на несущей пространственной частоте с периодом 60 мкм [21]. Вспомогательная бинарная модуляция фазы оптической волны, с инвертированием модуля амплитуды на участках с отрицательной расчетной фазой волны, осуществляется бинарно-фазовой структурой фильтра с расчетной глубиной фазового профиля $h = \lambda / [2(n-1)]$, где n – показатель преломления материала подложки, а бинарные уровни модуляции фазы составляют 0 и π радиан. Технологически, воспроизведение фазового профиля осуществляется с помощью технологии реактивного ионно-плазменного травления подложки из кварцевого стекла через хромовую маску (либо через маску из пленок фоторезиста и хрома). Более детально, оптическая система генерации пучка и структура фильтра описаны в работе [21].

При компьютерном моделировании было принято, что, с точностью до константы, амплитуда поля пучка, $\psi_{0,0,-1}^{(gc)}(\rho, \zeta)$, аналитически описывается следующей гамма-связанной функцией минус первого порядка для индексов аксиальной оконной функции $q = -1$ и нулевого радиального и азимутального порядков ($s = 0, l = 0$):

$$\psi_{0,0,-1}^{(gc)}(\rho, \zeta) = (\rho^2 + \omega_\alpha) \Gamma\left(0, \frac{\rho^2}{\omega_{+\zeta_w}}, \frac{\rho^2}{\omega_{-\zeta_w}}\right) - \omega_{+\zeta_w} \exp\left(-\frac{\rho^2}{\omega_{+\zeta_w}}\right) + \omega_{-\zeta_w} \exp\left(-\frac{\rho^2}{\omega_{-\zeta_w}}\right), \quad (1)$$

где $\rho = r/w_0$, и $\zeta = z/Z$ – относительные радиальная и аксиальная координаты, r и z – абсолютные радиальная и азимутальная координаты, $w_0 = \sqrt{2Z/k}$ – радиус перетяжки по амплитудному уровню $\exp(-1)$, $Z = kw_0^2/2$ – расстояние Рэлея, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны пучка, $\Gamma(0, \xi_1, \xi_2) = \int_{\xi_1}^{\xi_2} t^{-1} \exp(-t) dt$ – обобщенная гамма функция нулевого порядка комплексных аргументов ζ_1, ζ_2 , а функции ω_α и $\omega_{\pm\zeta_w}$ определяются как $\omega_\alpha = 1 + \alpha + i\zeta$, $\omega_{\pm\zeta_w} = 1 + i\zeta \pm i\zeta_w$, где $\alpha = 0,233$ и $\zeta_w = 1,61$ – параметры формы пучка, вычисленные путем оптимизации для расширенной глубины фокуса порядка двух расстояний Рэлея с сохранением аксиальной интенсивности и поперечной ширины пучка в пределах глубины фокуса с точностью не хуже 2%. Для сравнения, напомним, что для гауссового пучка основной моды аксиальная интенсивность падает на 41%, а диаметр центрального лепестка возрастает на 50% на расстоянии Рэлея. Платой за улучшение характеристик гамма-связанного пучка является возрастание интенсивности его первого побочного максимума до 14%. При расчете было принято: $\lambda = 532$ нм, $Z = 1000\lambda = 0,532$ мм.

Маска оптического фильтра была рассчитана для дальнего поля, с установкой маски на расстоянии $500 Z = 266$ мм от плоскости перетяжки пучка. Распределение нормированной интенсивности поля, генерируемого маской и вспомогательной положительной линзой, находилось путем расчета поля по методу углового спектра плоских волн. Данные расчета поля сравнивались с соответствующими данными прямого расчета поля по формуле (1). Указанные данные для основных характеристик пучка отображены в табл. 1 и 2, для случая моделирования поля с маской с различной оптической плотностью на непрозрачных участках. Аналогичные данные были получены также для случая вариаций технологической ошибки по глубине фазового профиля маски (данные таблицы не приводятся).

Результаты и заключение

Анализ полученных данных показывает, что наибольшую сложность при технологическом изготовлении маски оптического фильтра представляет собой реализация высокой оптической плотности амплитудной компоненты, с желаемой оптической плотностью выше 4D, при одновременном требуемом высоком разрешении элементов структуры данной маски с минимальным размером порядка 1 мкм. Также, технологическое отклонение глубины бинарно-фазового профиля фильтра от расчетного значения на рабочей длине волны не должно превышать $\pm 3\%$.

Таблица 1

Результаты численного моделирования характеристик гамма-связанного лазерного пучка $\psi_{0,0,-1}^{(gc)}(\rho, \zeta)$, имеющего длину волны $\lambda = 532$ нм, рассматриваемого в плоскости перетяжки и генерируемого оптической системой с фильтром с гибридной бинарной амплитудно-растровой структурой для случаев с максимальной оптической плотностью амплитудной маски равной $D = \infty, 4, 3$ и 2 .

D	Интенсивность центр. максимума, %	Интенсивность 1-го побочн. максимума, %	Интенсивность 2-го побочн. максимума, %	Радиус 1-го нуля интенсивности, мкм	Радиус 2-го нуля интенсивности, мкм	Радиус центр. максимума по уровню интенс-ти. $\exp(-2)$, мкм	Радиус 1-го побочн. максимума, мкм
∞	100	16,7	$9,5 \cdot 10^{-4}$	13,1	34,7	9,51	21,6
4	108,2	16,1	$1,03 \cdot 10^{-3}$	13,1	35,6	9,45	21,1
3	127,2	15,0	$1,32 \cdot 10^{-3}$	12,7	35,6	9,34	21,6
2	197,4	12,5	$2,50 \cdot 10^{-4}$	12,2	36,6	9,13	18,8

Таблица 2

Результаты численного моделирования характеристик гамма-связанного лазерного пучка $\psi_{0,0,-1}^{(gc)}(\rho, \zeta)$, имеющего длину волны $\lambda = 532$ нм, рассматриваемого в поперечной плоскости на расстоянии Рэлея Z и генерируемого оптической системой с фильтром с гибридной бинарной амплитудно-растровой структурой для случаев с максимальной оптической плотностью амплитудной маски равной $D = \infty, 4, 3$ и 2

D	Интенсивность центр. максимума, %	Интенсивность 1-го побочн. максимума, %	Интенсивность 2-го побочн. максимума, %	Радиус 1-го нуля интенсивности, мкм	Радиус 2-го нуля интенсивности, мкм	Радиус центр. максимума по уровню интенс-ти. $\exp(-2)$, мкм	Радиус 1-го побочн. максимума, мкм
∞	99,4	14,20	максимум отсутствует	13,1	нужь отсутствует	9,51	21,56
4	102,1	14,86	$6,5 \cdot 10^{-3}$	13,1	54	9,59	21,6
3	108,0	15,56	$1,5 \cdot 10^{-4}$	64,7	73,1	9,77	21,6
2	131,6	18,12	$2,5 \cdot 10^{-4}$	73,5	82,5	10,36	21,1

Благодарности

Работа выполнена за счет средств субсидии на финансовую поддержку государственного задания (гос. регистрационный № 124041700107-9).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Durnin J., Miceli J.J., and Eberly J.H., Diffraction-Free Beams, *Phys. Rev. Lett.* 1987. –Vol. 58(15). – P. 1499–1501.
2. Durnin J., Exact solutions for nondiffracting beams. I. The scalar theory, *J. Opt. Soc. Am. A.* 1987. – Vol. 4(4). – P. 651–654.
3. Gori F., Guattari G., and Padovani C., Bessel-Gauss beams, *Opt. Commun.* 1987. Vol. 64. – P. 491–495.
4. Vaveliuk P., Lencina A., Rodrigo J.A., and Martinez Matos O., Symmetric Airy beams, *Opt. Lett.* 2014. – Vol. 39(8). – P. 2370–2373.
5. Lu Y, Zhu K, Li J, Zhang S, Tan Y, Depth of focus extension by filtering in the frequency domain in laser frequency-shifted feedback imaging, *Appl. Opt.* 2018. – Vol. 57(20). – P. 5823–5830.
6. Abdelhalim B, Fromager M, Aït-Ameur K, Extended focus depth for Gaussian beam using binary phase diffractive optical elements, *Appl. Opt.* 2018. – Durnin J., Miceli J.J., and Eberly J.H., Diffraction-Free Beams. – Vol. 57(8). – P. 1899–1903.
7. Liu X, Li Q, Sikora A, Sentis M, Utéza O, Stoian R, Zhao W, Cheng G, Sanner N, Truncated Gaussian-Bessel beams for short-pulse processing of small-aspect-ratio micro-channels in dielectrics, *Opt. Express.* 2019. – Vol. 27(5). – P. 6996–7008.
8. Zhang G, Stoian R, Zhao W, Cheng G, Femtosecond laser Bessel beam welding of transparent to non-transparent materials with large focal-position tolerant zone, *Opt. Express.* 2018. – Vol. 26(2). – P. 917–926.
9. Xu D, Liu Y, Mo Z, Jiang J, Shi J, Liang Z, Wu Y, Zhao J, Yang H, Huang H, Liu H, Shui L, Deng D, Shaping autofocusing Airy beams through the modification of Fourier spectrum, *Opt. Express.* 2022. – Vol. 30(1). – P. 232–242.
10. Zhao J, Winetraub Y, DU L, VAN Vleck A, Ichimura K, Huang C, AAsI SZ, Sarin KY, DE LA Zerda A, Flexible method for generating needle-shaped beams and its application in optical coherence tomography, *Optica.* 2022. – Vol. 9(8). – P. 859–867.
11. Shen Z, Huang S, Generation of Subdiffraction Optical Needles by Simultaneously Generating and Focusing Azimuthally Polarized Vortex Beams through Pancharatnam-Berry Metalenses, *Nanomaterials* 2022. – Vol. 12(22). – P. 4074 (1–10).
12. Zeng T, Gui Y, Guo J, Guo L, Suppressing turbulence-induced laser beam wandering by using an axicon, *Opt. Lett.* 2023. – Vol. 48(19). – P. 5077–5080.
13. Gotovski P, Šlevas P, Orlov S, Ulčinas O, Urbas A, Generation of an optical needle beam with a laser inscribed Pancharatnam-Berry phase element under imperfect conditions, *Opt. Express.* 2021. – Vol. 29(21). – P. 33331–33345.
14. An Z, Lu W, Needle of longitudinally polarized light using the circular Airy beam, *Opt. Lett.* 2024. – Vol. 49(3). – P. 642–645.
15. Zacharias T, Hadad B, Bahabad A, Eliezer Y, Axial sub-Fourier focusing of an optical beam, *Opt. Lett.* 2017. – Vol. 42(16). – P. 3205–3208.
16. Li W, He P, Lei D, Fan Y, Du Y, Gao B, Chu Z, Li L, Liu K, An C, Yuan W, Yu Y, Super-resolution multicolor fluorescence microscopy enabled by an apochromatic super-oscillatory lens with extended depth-of-focus, *Nature Commun.* 2023. – Vol. 5107. – 11 pp.
17. Jiang Z, He W, Chen J, Jiang K, Li S, Wang L, Plasmonic direct-writing lithography via high numerical aperture objectives, *Opt. Lett.* 2023. – Vol. 48(15). – P. 4153–4156.
18. Ni H, Yuan G, Sun L, Chang N, Zhang D, Chen R, Jiang L, Chen H, Gu Z, Zhao X, Large-scale high-numerical-aperture super-oscillatory lens fabricated by direct laser writing lithography, *RSC Adv.* 2018. – Vol. 8. – P. 20117–20123.
19. Ai J, Du Q, Qin Z, Liu J, Zeng X, Laser direct-writing lithography equipment system for rapid and μm -precision fabrication on curved surfaces with large sag heights, *Opt. Express.* 2018. – Vol. 26(16). – P. 20965–20974.

20. Xu K, Qin J, Wang L, Sub-micrometer direct laser writing using an optimized binary-amplitude zone plate lens, *Opt. Lett.* 2021. – Vol. 46(20). – P. 5185–5188.
21. Sedukhin, A.G. Gamma and gamma-coupled beams, *Appl. Opt.* 2018. – Vol. 57(14). – P. 3653–3660.

© *A. Г. Седухин, В. П. Корольков, 2024*