

Обратный поток энергии в векторных модах световодов

С.С. Стафеев^{1,2}, А.Д. Прямиков³, Г.К. Алагашев³, В.В. Котляр^{1,2}

¹ ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151;

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34;

³ Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук,
119333, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, д. 48

Аннотация

В данной работе с помощью программного обеспечения RSoft Fullwave промоделировано распространение цилиндрического векторного пучка второго порядка в градиентном и микроструктурированном волокнах. Показано, что векторные пучки второго порядка являются векторными модами данных волокон. В вычисленных основных модах наблюдаются области, в которых поток энергии направлен в сторону, противоположную направлению распространения пучка (области обратного потока энергии). Абсолютная величина продольной составляющей обратного потока энергии была много меньше величины прямого потока.

Ключевые слова: обратный поток энергии, векторная мода, поляризационный вихрь, микроструктурированное волокно.

Цитирование: Стафеев, С.С. Обратный поток энергии в векторных модах световодов / С.С. Стафеев, А.Д. Прямиков, Г.К. Алагашев, В.В. Котляр // Компьютерная оптика. – 2023. – Т. 47, № 1. – С. 36-39. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1229.

Citation: Stafeev SS, Pryamikov AD, Alagashov GK, Kotlyar VV. Reverse energy flow in vector modes of optical fibers. Computer Optics 2023; 47(1): 36-39. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1229.

Введение

В настоящее время растет интерес исследователей к распространению в световодах мод с сингулярностями фазы [1–3] или поляризации [4]. В литературе по световодам данные моды получили название мод с орбитальным угловым моментом (ОУМ-мод), хотя в случае чисто поляризационных вихрей такие моды и не обладают ОУМ. Так как оптические вихри, обладающие разными топологическими зарядами, распространяются в волокне независимо друг от друга, их использование видится перспективным для уплотнения сигнала [5], где отдельный топологический заряд вихря отвечает за отдельный канал связи.

Для распространения ОУМ-мод используются волокна разных типов [6]: например, волокна с градиентным изменением показателя преломления сердечника [7], капиллярные волноводы [8–10]. Но в основном наблюдается рост использования для этих целей микроструктурированных волокон, работающих на основе принципа фотонно-кристаллической запрещенной зоны [11–16].

Следует отметить, что интересным эффектом высших мод, обладающих сингулярностью фазы и/или поляризации, является наличие в них областей, в которых направление потока энергии противоположно направлению распространения пучка (т.н. области обратного потока энергии) [17, 18]. Однако в волноведущих средах этот эффект ранее не исследовался.

В данной работе с помощью программного обеспечения RSoft Fullwave промоделировано распространение цилиндрического векторного пучка второго порядка в градиентном и микроструктурированном волокнах. Показано, что векторные пучки второго порядка являются векторными модами данных волокон. В центре световодов наблюдаются области, в которых поток энергии направлен в сторону, противоположную направлению распространения пучка (области обратного потока энергии).

1. Поток энергии основной моды стержневого микроструктурированного волновода

Моделирование в данной работе осуществлялось с помощью программного обеспечения RSoft Fullwave, в котором реализован расчет прохождения света через объекты микрооптики методом FDTD. Для расчета основной моды световода с заданным распределением показателя преломления использовалась встроенная в программу подпрограмма, которая итерационным методом рассчитывает основную моду на основе некоторого начального условия (в частности, с помощью начального условия задается именно векторный характер моды). В качестве пучка, заводимого в световод, использовался цилиндрический векторный пучок второго порядка, вектор Джонса которого равен:

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} -\sin(2\varphi) \\ \cos(2\varphi) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где φ – азимутальный угол в цилиндрической системе координат, выбранной таким образом, что ось z совпадает с направлением распространения пучка. Ранее нами было продемонстрировано, что именно для второго порядка векторного пучка на оси возникают отрицательные значения для продольной проекции вектора Пойнтинга [18].

В качестве первого исследуемого световода рассматривался стержневой световод [19], состоящий из шести стержней с радиусами $r=0,684$ мкм, расположенными вдоль окружности с радиусом $R=11,4$ мкм (рис. 1), длина волны света $\lambda=1$ мкм. Показатель преломления оболочки считался равным 1,45 (кварцевое стекло), показатель преломления стержня был равен 1,478 (допированное германием кварцевое стекло [19]). На краях расчетной области в моделировании помещались идеально согласованные слои (PML) толщиной в одну длину волны распространяющегося в световоде излучения. Параметры поглощающих слоев подбирались таким образом, чтобы минимизировать отражение от границ расчетной области.

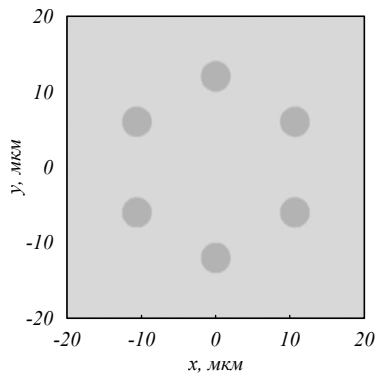


Рис. 1. Профиль моделируемого световода

На рис. 2 показано направление напряженности электрического поля основной моды, подтверждающее сохранение состояния поляризации в ней после распространения в волноводе. Распределение продольной составляющей вектора Пойнтинга S_z в вычисляемой области показано на рис. 3: $S_z = \text{Re}([\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*]_z)$. На рис. 4 для наглядности отдельно показаны зоны, в которых проекция вектора Пойнтинга на оптическую ось отрицательна.

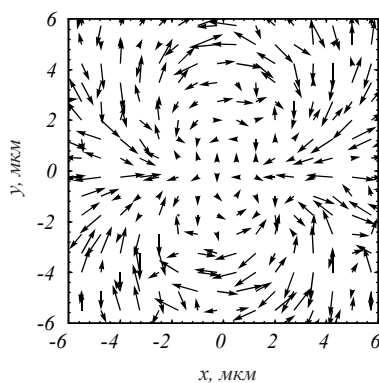


Рис. 2. Направление поляризации основной моды стержневого волокна

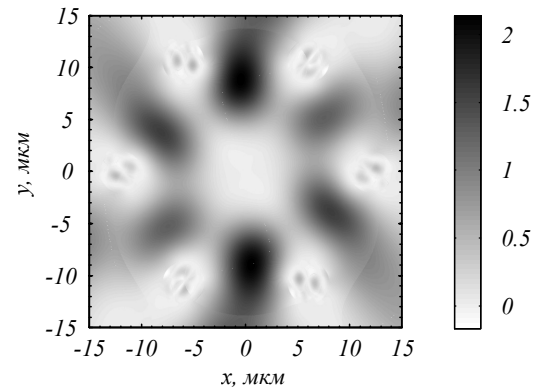


Рис. 3. Распределение продольной проекции вектора Пойнтинга в стержневом волокне

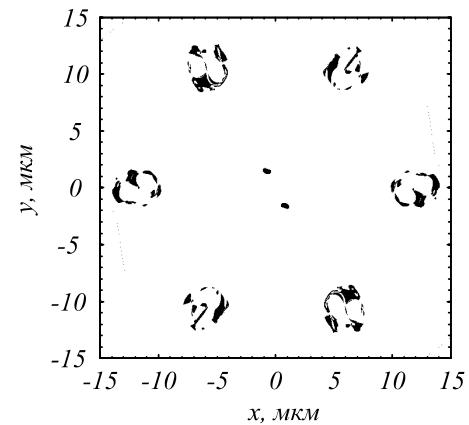


Рис. 4. Области обратного потока энергии в рассчитываемом стержневом световоде. Черный цвет соответствует обратному потоку, белый – прямому

Из рис. 3–4 видно, что в центре световода (две области) и рядом с отдельными стержнями формируются обратные потоки энергии (проекция вектора Пойнтинга на ось z принимает отрицательные значения). Стоит отметить, что абсолютная величина проекции вектора Пойнтинга в областях обратных потоков мала, эта малость является ожидаемой, так как большие значения обратного потока проявляются только в условиях острой фокусировки [18].

2. Поток энергии основной моды кольцевого микроструктурированного волновода

Рассмотрим далее похожий микроструктурированный световод. Данный световод представляет собой центральный стержень с диаметром 32 мкм, окруженный стержнями меньшего диаметра (12,5 мкм). Профиль рассчитываемого световода показан на рис. 5, показатель преломления оболочки считался равным 1,45, а показатель преломления стержней был равен 1,478, длина волны света $\lambda=1,55$ мкм. Ранее похожая структура световодов предлагалась для передачи ОАМ-мод [11, 12, 20].

На рис. 6 показано распределение продольной проекции вектора Пойнтинга (рис. 6а) и области, в которых она принимает отрицательные значения (рис. 6б). Рис. 6 также подтверждает сохранение обратных потоков энергии в световоде (рис. 5).

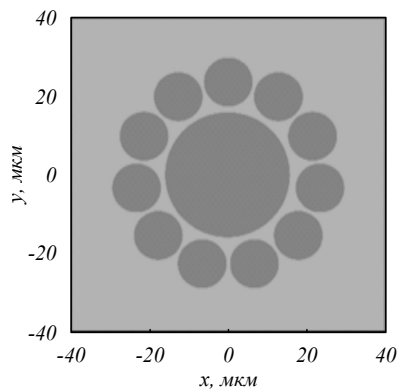


Рис. 5. Профиль моделируемого световода

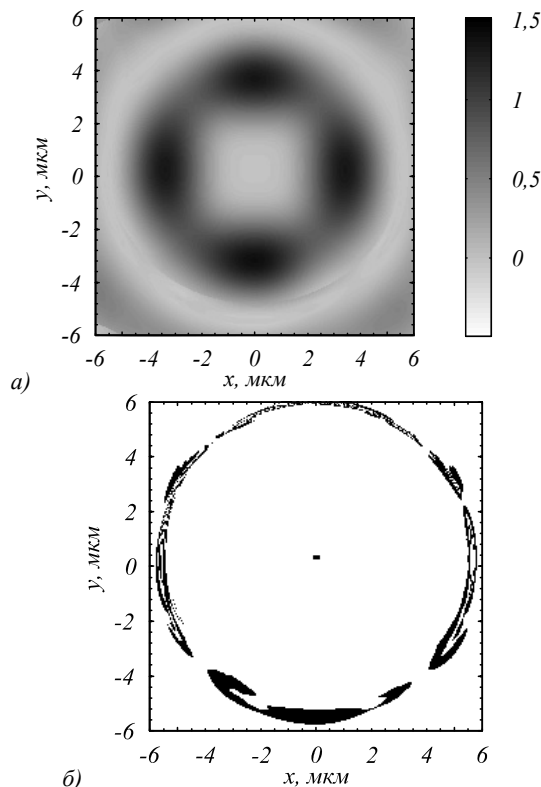


Рис. 6. Распределение продольной проекции вектора Пойнтинга (а) и области обратного потока энергии (черный цвет) (б) в рассчитываемом кольцевом световоде

3. Основная мода градиентного волокна

Рассмотрим теперь основную моду световода с сердечником, показатель преломления которого изменяется в соответствии с формулой [21]:

$$n(r) = n_0 \left[\text{ch} \left(\frac{\pi r}{2L} \right) \right]^{-1}, \quad (2)$$

где n_0 – показатель преломления линзы на оси, r – радиальная координата, L – полупериод схождения лучей (в таком градиентном световоде свет периодически собирается на оси). Ранее нами было продемонстрировано, что отдельный кусок такого волокна (градиентная линза) способен фокусировать цилиндрический векторный пучок или оптический вихрь вблизи своей выходной поверхности, формируя изо-

лированную от свободного пространства область обратного потока энергии [22].

В моделировании считалось, что $n_0 = 3,47$ (кремний), $L = 10$ мкм, радиус сердечника $R = 9,33$ мкм из соображений $n(R) = 1,5$, длина волны света $\lambda = 1,55$ мкм. Моделирование осуществлялось с помощью FDTD-метода, реализованного в программе Full-wave (шаг сетки по пространству $0,01$ мкм $= \lambda/155$).

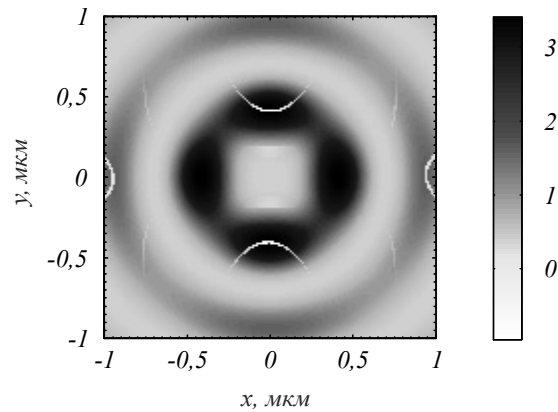


Рис. 7. Распределение продольной составляющей вектора Пойнтинга S_z в вычисляемой области

Из рис. 7 видно, что и в данном случае в сечении пучка содержатся области, в которых продольная проекция вектора Пойнтинга отрицательна. Отметим, что возникающие отражения на рис. 7 могут быть вызваны недостаточно хорошим подбором параметров идеальных поглощающих слоев (PML).

Заключение

В данной работе с помощью программного обеспечения RSoft Fullwave промоделировано распространение цилиндрического векторного пучка второго порядка в двух типах микроструктурированных (стержневой и кольцевой) и градиентном световодах. Моделирование показало, что векторные пучки второго порядка являются векторными модами данных волокон. В вычисленных основных модах данных световодов наблюдались области, в которых поток энергии направлен в сторону, противоположную направлению распространения пучка (области обратного потока энергии). Абсолютная величина продольной составляющей потока энергии была мала.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-22-00575).

References

- [1] Hadžievski L, Maluckov A, Rubenchik AM, Turitsyn S. Stable optical vortices in nonlinear multicore fibers. Light Sci Appl 2015; 4(8): e314-e314. DOI: 10.1038/lsa.2015.87.
- [2] Tu J, Liu Z, Gao S, Wang Z, Zhang J, Zhang B, Li J, Liu W, Tam H, Li Z, Yu C, Lu C. Ring-core fiber with negative curvature structure supporting orbital angular momentum modes. Opt Express 2019; 27(15): 20358-20372. DOI: 10.1364/OE.27.020358.

- [3] Wu Y, Wen J, Zhang M, Cao Y, Chen W, Zhang X, Yusuf T, Pang F, Wang T. Low-loss and helical-phase-dependent selective excitation of high-order orbital angular momentum modes in a twisted ring-core fiber. *Opt Lett* 2022; 47(16): 4016-4019. DOI: 10.1364/ol.468259.
- [4] Mao D, Zheng Y, Zeng C, Lu H, Wang C, Zhang H, Zhang W, Mei T, Zhao J. Generation of polarization and phase singular beams in fibers and fiber lasers. *Adv Photonics* 2021; 3: 014002. DOI: 10.1117/1.AP.3.1.014002.
- [5] Li S, Wang J. Multi-orbital-angular-momentum multi-ring fiber for high-density space-division multiplexing. *IEEE Photonics J* 2013; 5(5): 7101007. DOI: 10.1109/JPHOT.2013.2272778.
- [6] Ma M, Lian Y, Wang Y, Lu Z. Generation, transmission and application of orbital angular momentum in optical fiber: A review. *Front Phys* 2021; 9: 1-17. DOI: 10.3389/fphy.2021.773505.
- [7] Ung B, Vaity P, Wang L, Messaddeq Y, Rusch LA, LaRoche S. Few-mode fiber with inverse-parabolic graded-index profile for transmission of OAM-carrying modes. *Opt Express* 2014; 22(15): 18044-18055. DOI: 10.1364/oe.22.018044.
- [8] Brunet C, Vaity P, Messaddeq Y, LaRoche S, Rusch LA. Design, fabrication and validation of an OAM fiber supporting 36 states. *Opt Express* 2014; 22(21): 26117-26127. DOI: 10.1364/OE.22.026117.
- [9] Jin X, Gomez A, Shi K, Thomsen BC, Feng F, Gordon GSD, Wilkinson TD, Jung Y, Kang Q, Barua P, Sahu JK, Alam S, Richardson DJ, O'Brien DC, Payne FP. Mode coupling effects in ring-core fibers for space-division multiplexing systems. *J Lightw Technol* 2016; 34: 3365-3372. DOI: 10.1109/JLT.2016.2564991.
- [10] Jung Y, Kang Q, Zhou H, Zhang R, Chen S, Wang H, Yang Y, Jin X, Payne FP, Alam S, Richardson DJ. Low-loss 25.3 km few-mode ring-core fiber for mode-division multiplexed transmission. *J Lightw Technol* 2017; 35(8): 1363-1368. DOI: 10.1109/JLT.2017.2658343.
- [11] Li H, Ren G, Lian Y, Zhu B, Tang M, Zhao Y, Jian S. Broadband orbital angular momentum transmission using a hollow-core photonic bandgap fiber. *Opt Lett* 2016; 41(15): 3591-3594. DOI: 10.1364/ol.41.003591.
- [12] Li H, Ren G, Zhu B, Gao Y, Yin B, Wang J, Jian S. Guiding terahertz orbital angular momentum beams in multi-mode Kagome hollow-core fibers. *Opt Lett* 2017; 42(2): 179-182. DOI: 10.1364/ol.42.000179.
- [13] Sharma M, Pradhan P, Ung B. Endlessly mono-radial annular core photonic crystal fiber for the broadband transmission and supercontinuum generation of vortex beams. *Sci Rep* 2019; 9(1): 2488. DOI: 10.1038/s41598-019-39527-1.
- [14] Bai X, Chen H, Yang H. Design of a circular photonic crystal fiber with square air-holes for orbital angular momentum modes transmission. *Optik* 2018; 158: 1266-1274. DOI: 10.1016/j.ijleo.2018.01.015.
- [15] Wang W, Sun C, Wang N, Jia H. A design of nested photonic crystal fiber with low nonlinear and flat dispersion supporting 30+50 OAM modes. *Opt Commun* 2020; 471: 125823. DOI: 10.1016/j.optcom.2020.125823.
- [16] Zhang H, Zhang X, Li H, Deng Y, Zhang X, Xi L, Tang X, Zhang W. A design strategy of the circular photonic crystal fiber supporting good quality orbital angular momentum mode transmission. *Opt Commun* 2017; 397: 59-66. DOI: 10.1016/j.optcom.2017.03.075.
- [17] Kotlyar VV, Stafeev SS, Nalimov AG. Energy backflow in the focus of a light beam with phase or polarization singularity. *Phys Rev A* 2019; 99(3): 033840. DOI: 10.1103/PhysRevA.99.033840.
- [18] Stafeev SS, Kotlyar VV, Nalimov AG, Kozlova ES. The non-vortex inverse propagation of energy in a tightly focused high-order cylindrical vector beam. *IEEE Photonics J* 2019; 11(4): 4500810. DOI: 10.1109/JPHOT.2019.2921669.
- [19] Egorova ON, Semjonov SL, Kosolapov AF, Denisov AN, Pryamikov AD, Gaponov DA, Biriukov AS, Dianov EM, Salganskii MY, Khopin VF, Yashkov MV, Gurianov AN, Kuksenkov DV. Single-mode all-silica photonic bandgap fiber with 20- μ m mode-field diameter. *Opt Express* 2008; 16(16): 11735-11740. DOI: 10.1364/OE.16.011735.
- [20] Tandjè A, Yammine J, Dossou M, Bouwmans G, Baudelle K, Vianou A, Andresen ER, Bigot L. Ring-core photonic crystal fiber for propagation of OAM modes. *Opt Lett* 2019; 44(7): 1611-1614. DOI: 10.1364/OL.44.001611.
- [21] Mikaelian AL. Using a layered medium to focus waves. *Doklady Akademii Nauk* 1951; 81: 569-571.
- [22] Stafeev SS, Kozlova ES, Nalimov AG. Focusing a second-order cylindrical vector beam with a gradient index Mikaelian lens. *Computer Optics* 2020; 44: 29-33. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-633.

Сведения об авторах

Сведения об авторе **Стафеев Сергей Сергеевич** см. на стр 15 этого номера.

Прямиков Андрей Дмитриевич, 1975 года рождения. В 1999 году окончил физический факультете Московского Государственного Университета им. М. В. Ломоносова по специальности «Физик». Кандидат физико-математических наук с 2002 года. Старший научный сотрудник Института общей физики Российской академии наук (лаборатория спектроскопии Научного центра волоконной оптики при ИОФ РАН). Область научных интересов: микроструктурированные световоды, нелинейная волоконная оптика, фотонные кристаллы, оптические микрорезонаторы. E-mail: pryamikov@fo.gpi.ru. ORCID: 0000-0003-2808-7040.

Алагашев Григорий Константинович, 1989 года рождения. Окончил Московский физико-технический институт в 2013 году по специальности «Прикладные математика и физика». Младший научный сотрудник НЦВО им. Е.М. Дианова РАН – обособленное подразделение ФГБУН ФИЦ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН. Область научных интересов: волоконная оптика, микроструктурированные световоды, математическое моделирование. E-mail: alagashvgrigory@gmail.com. ORCID: 0000-0001-7654-7860.

Сведения об авторе **Котляр Виктор Викторович** см. на стр 14 этого номера.

ГРНТИ: 29.33.39

Поступила в редакцию 30 сентября 2022 г. Окончательный вариант – 27 октября 2022 г.

Reverse energy flow in vector modes of optical fibers

S.S. Stafeev^{1,2}, A.D. Pryamikov³, G.K. Alagashev³, V.V. Kotlyar^{1,2}

¹ IPSTI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS,
443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya 151,

² Samara National Research University, 443086, Samara, Russia, Moskovskoye Shosse 34,

³ Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, 119333, Moscow, Russia, 38 Vavilov street

Abstract

In this paper, the propagation of a second-order cylindrical vector beam in gradient-index and microstructured fibers is numerically simulated using the RSoft Fullwave software. The second-order vector beams are shown to be vector modes of these fibers. In the calculated fundamental modes, regions are found in which there is an energy flow directed oppositely to the beam propagation direction (regions of a reverse energy flow). The absolute value of the longitudinal component of the reverse energy flow is found to be much lower than that of the forward flow.

Keywords: reverse energy flow, vector mode, polarization vortex, microstructured fiber.

Citation: Stafeev SS, Pryamikov AD, Alagashev GK, Kotlyar VV. Reverse energy flow in vector modes of optical fibers. *Computer Optics* 2023; 47(1): 36-39. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1229.

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation (Project No. 22-22-00575).

Authors' information

Sergey S. Stafeev (b. 1985) received Master's degree in Applied Mathematics and Physics in Samara State Aerospace University (2009). He received his PhD in 2012. He is researcher of Laser Measurements laboratory at the Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Scientific interests: diffractive optics, FDTD method, near-field optics. E-mail: sergey.stafeev@gmail.com. ORCID: 0000-0002-7008-8007.

Andrey Dmitrievich Pryamikov, (b. 1975). In 1999 he graduated from Physics faculty of the Moscow State University, M. V. Lomonosov with a degree in Physics. Candidate of Physical and Mathematical Sciences since 2002. Senior Researcher at the Institute of General Physics of the Academy of Russian Sciences (Laboratory of Spectroscopy of the Research Center for Fiber Optics at the GPI RAS). Research interests: microstructured optical fibers, non-linear export optics, photonic crystals, optical microcavities.. E-mail: pryamikov@fo.gpi.ru. ORCID: 0000-0003-2808-7040.

Grigory Konstantinovich Alagashev, (b. 1989). Graduated from the Moscow Institute of Physics and Technology in 2013 with a degree in Applied Mathematics and Physics. Junior Research Fellow, NTSVO them. EAT. Dianov Institute of General Physics, Russian Academy of Sciences A.M. Prokhorov RAS. Research interests: fiber optics, microstructured light guides, mathematical modeling. E-mail: alagashevgrigory@gmail.com. ORCID: 0000-0001-7654-7860.

Victor Victorovich Kotlyar is a head of Laboratory at the Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS and professor of Computer Science department at Samara National Research University. He received his MS, PhD and DrSc degrees in Physics and Mathematics from Samara State University (1979), Saratov State University (1988) and Moscow Central Design Institute of Unique Instrumentation, the Russian Academy of Sciences (1992). He is SPIE- and OSA-member. He is co-author of 300 scientific papers, 5 books and 7 inventions. His current interests are diffractive optics, gradient optics, nanophotonics, and optical vortices. E-mail: kotlyar@smr.ru.

Received September 30, 2022. The final version – October 27, 2022.
