

Управление структурой оптических вихрей при изменении высоты кремниевых кольцевых решеток с помощью высокопроизводительных компьютерных систем

Д А Савельев^{1,2}

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34, Самара, Россия

²Институт систем обработки изображений - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия

dmitrey.savelyev@yandex.ru

Аннотация. В работе исследуется дифракция оптических вихрей первого порядка на кремниевых субволновых кольцевых решетках переменной высоты. Показано, что варьирование высоты отдельных колец субволновых решеток существенным образом влияет на картину дифракции в ближней зоне. Анализ картины интенсивности электрического поля показал, что можно добиться уменьшения размера фокального пятна более чем на 40% по сравнению со стандартным дифракционным аксиконом.

1. Введение

Структурированные лазерные пучки активно исследуются в настоящее время в различных областях оптики и фотоники [1], в частности, в области метаматериалов и метаповерхностей [2]. Известно использование метаповерхностей для генерации оптических вихрей с целью увеличения пропускной способности оптических систем связи [3]. Вообще говоря, сингулярные световые пучки занимают особое место в оптике [4-7] благодаря их использованию для ряда приложений, включая передачу информации по оптоволокну [8], в квантовой информатике [9] и в системах беспроводной связи [10], а также оптического манипулирования [11]. При внесении вихревой фазовой сингулярности в лазерный пучок можно добиться перераспределения энергии между компонентами электрического поля [12].

В настоящее время кремний и его соединения имеют разнообразные области применения [13], в частности, используются для изготовления полупроводниковых приборов [14], солнечных батарей [15], а также для решения задач фотоники [16]. Благодаря высокому показателю преломления кремния можно получить высокую плотность интеграции [13], а также уменьшить размер фокального пятна при острой фокусировке оптическими микроэлементами, в том числе дифракционными аксиконами и другими кольцевыми решетками [17-20].

В данной работе было проведено исследование дифракции мод Лагерра-суперГаусса (1,0) на кремниевых субволновых оптических 3D-структурах с различной высотой отдельных деталей рельефа элементов. Для численных расчетов (3D) распространения лазерного излучения использовался метод конечных разностей во временной области (FDTD) с применением вычислительного кластера мощностью 950 Гфлоп [21].

2. Дифракция оптических вихрей на кольцевых решетках переменной высоты

Рассматриваются кремниевые субволновые кольцевые решетки (период решетки $1,05\lambda$). Варьировались высоты h_i отдельных колец решетки, $i \in [0; 5]$, где $i = 0$ – это центральная часть элемента.

Параметры моделирования: длина волны излучения $\lambda = 1,55$ мкм., размер расчетной области x, y, z находился в диапазоне $[-5,7\lambda; 5,7\lambda]$. Шаг дискретизации по пространству: $\lambda/30$, шаг дискретизации по времени: $\lambda/(60c)$, где c – скорость света. Толщина поглощающего слоя PML со всех сторон окружающей расчетную область равна λ . В качестве входного пучка рассматривалась мода Лагерра-суперГаусса (1,0) [22] степени 6 с круговой поляризацией, где знак круговой поляризации противоположен знаку внесенной вихревой фазовой сингулярности.

Показатель преломления кремния n равен 3,47. В этом случае, высота рельефа бинарного элемента, соответствующая фазе π радиан, равна $0,2\lambda$ [18].

На рисунке 1 приведены результаты распространения рассматриваемого лазерного излучения через кольцевые решетки с высотой рельефа $0 \leq h_i \leq 4\lambda$, а также для сравнения через дифракционный аксикон с высотой $h = 0,2\lambda$ (соответствует фазе π радиан) с аналогичным периодом решетки. Размер фокального пятна на оптической оси оценивался по полуширине полуспада максимального значения интенсивности (full width at half maximum – FWHM), глубина фокуса (depth of focus – DOF), т.е. размер продольного светового отрезка, оценивалась также по половине интенсивности.

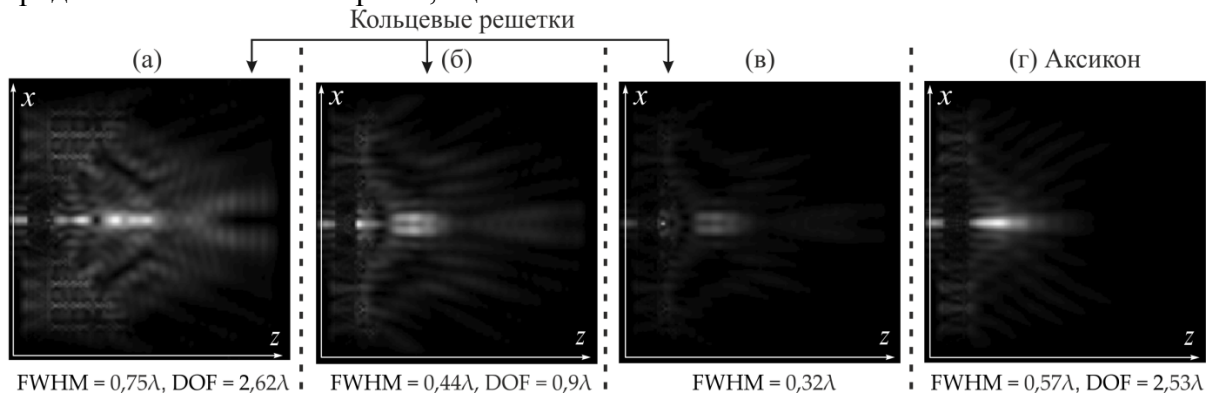


Рис. 1. Продольное сечение (xz) распространения лазерного излучения через субволновые оптические элементы: субволновые кольцевые решетки, (а) $h_0 = 0,2\lambda, h_1 = 0,5\lambda, h_2 = \lambda, h_3 = 2\lambda, h_4 = 3\lambda, h_5 = 4\lambda$; (б) $h_0 = 0, h_1 = h_5 = \lambda, h_2 = h_4 = 0,5\lambda, h_3 = 0,2\lambda$; (в) $h_0 = h_2 = h_4 = 0,5\lambda, h_1 = h_5 = \lambda, h_3 = 0,2\lambda$; (г) дифракционный аксикон, $h_1 = 0,2\lambda$.

Хорошо заметно, что изменение высоты отдельных зон кольцевых решеток существенным образом влияет на картину дифракции. Основной максимум формировался вне оптического элемента для всех случаев, кроме случая (в). Значение FWHM для этого случая приведено в первом максимуме вне элемента.

Сравнивая полученные значения с базовым аксиконом, следует отметить, что варьирование высот отдельных колец кольцевых решеток позволило получить фокальное пятно на 43,8% меньшее, чем при действии стандартного аксикона (Рис. 1(в), $\text{FWHM} = 0,32$), хотя основной максимум в этом случае формируется внутри элемента. При уменьшении высоты центральной части до 0 и, оставив остальные высоты неизменными, основной максимум был получен вне элемента, хотя и произошло уширение пучка. Тем не менее, и в этом случае, размер фокального пятна на 23% меньше ($\text{FWHM} = 0,44\lambda$), чем для случая стандартного дифракционного аксикона.

Также показано, что в случае последовательного уменьшения высоты от края элемента к центру можно получить пространственно-неоднородное распределение электрического поля на оптической оси и в области пространства ее окружающего, т.е. формирование протяженной области пониженной интенсивности на оптической оси при более высокой интенсивности вне оптической оси (оптической ловушки).

3. Заключение

В данной работе методом FDTD было проведено исследование распространения оптических вихрей с круговой поляризацией на кремниевых субволновых кольцевых решетках при изменении высоты отдельных колец решеток. Было показано, что варьирование высоты существенным образом влияет на картину дифракции в ближней зоне.

Анализ картины интенсивности электрического поля показал, что при подборе нужной высоте отдельных колец рельефа можно добиться уменьшения размера фокального пятна более чем на 40% по сравнению со стандартным дифракционным аксионом.

Также следует отметить, что в случае последовательного уменьшения высоты от края элемента к центру можно сформировать протяженной области пониженной интенсивности на оптической оси при более высокой интенсивности вне оптической оси (оптической ловушки).

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, в рамках выполнения Государственного задания (проект № 0777-2020-0017) в части «1. Введение», совместно с Советом по грантам Президента РФ (стипендия Президента Российской Федерации СП-1173.2022.5) в части «2. Дифракция оптических вихрей на кольцевых решетках переменной высоты» и под эгидой программы «ERA.Net RUS plus» при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-52-76021» в части «3. Заключение».

Литература

- [1] Yan, L. Vortex fibers for STED microscopy / L. Yan, P. Kristensen, S. Ramachandran // *Apl Photonics*. – 2019. – Vol. 4(2). – P. 022903.
- [2] Zhao, Y. Chirality detection of enantiomers using twisted optical metamaterials / Y. Zhao, A.N. Askarpour, L. Sun, J. Shi, X. Li, A. Alù // *Nature communications*. – 2017. – Vol. 8(1). – P. 1-8.
- [3] Ma, X. A planar chiral meta-surface for optical vortex generation and focusing / X. Ma, M. Pu, X. Li, C. Huang, Y. Wang, W. Pan, B. Zhao, J. Cui, C. Wang, Z. Zhao, X. Luo // *Scientific Reports*. 5(1) (2015) 1-7.
- [4] Cozzolino, D. Orbital angular momentum states enabling fiber-based high-dimensional quantum communication / D. Cozzolino, D. Bacco, B. Da Lio, K. Ingerslev, Y. Ding, K. Dalgaard, P. Kristensen, M. Galili, K. Rottwitt, S. Ramachandran, L.K. Oxenløwe // *Physical Review Applied*. – 2019. – Vol. 11(6). – P. 064058.
- [5] Volotovskiy, S.G. Algorithm for reconstructing complex coefficients of Laguerre–Gaussian modes from the intensity distribution of their coherent superposition / S.G. Volotovskiy, S.V. Karpeev, S.N. Khonina // *Computer Optics*. – 2020. – Vol. 44(3). – P. 352-362.
- [6] Tkachenko, G. Is it possible to create a perfect fractional vortex beam? / G. Tkachenko,

- M. Chen, K. Dholakia, M. Mazilu // *Optica*. – 2017. – Vol. 4(3). – P. 330–333.
- [7] Savelyev, D.A. Tight focusing of higher orders Laguerre-Gaussian modes / D.A. Savelyev, S.N. Khonina, I. Golub // *AIP Conference Proceedings*. – 2016. – Vol. 1724. – P. 020021-1-8.
- [8] Pryamikov, A. Light transport and vortex-supported wave-guiding in micro-structured optical fibres / A. Pryamikov, G. Alagashev, G. Falkovich, S. Turitsyn // *Scientific Reports*. – 2020. – Vol. 10(1). – P. 1-12.
- [9] Li, S. Deterministic generation of orbital-angular-momentum multiplexed tripartite entanglement / S. Li, X. Pan, Y. Ren, H. Liu, S. Yu, J. Jing // *Physical Review Letters*. – 2020. – Vol. 124(8). – P. 083605.
- [10] Li, S. Efficient optical angular momentum manipulation for compact multiplexing and demultiplexing using a dielectric metasurface / S. Li, X. Li, L. Zhang, G. Zhang, L. Zhang, M. Liu, C. Zeng, L. Wang, Q. Sun, W. Zhao, W. Zhang // *Advanced Optical Materials*. – 2020. – Vol. 8(8). – P. 1901666.
- [11] Zhan, Q. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications / Q. Zhan // *Advances in Optics and Photonics*. – 2009. – Vol. 1. – P. 1-57.
- [12] Khonina, S.N. High-aperture binary axicons for the formation of the longitudinal electric field component on the optical axis for linear and circular polarizations of the illuminating beam / S.N. Khonina, D.A. Savelyev // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. – 2013. – Vol. 117(4). – P. 623-630.
- [13] Cheng, L. Grating couplers on silicon photonics: design principles, emerging trends and practical issues / L. Cheng, S. Mao, Z. Li, Y. Han, H.Y. Fu // *Micromachines*. – 2020. Vol. 11(7). – P. 666.
- [14] Myny, K. The development of flexible integrated circuits based on thin-film transistors / K. Myny // *Nat. Electron.* – 2018. – Vol. 1. – P. 30-39.
- [15] Garnett, E. Light trapping in silicon nanowire solar cells / E. Garnett, P. Yang // *Nano Lett.* – 2010. – Vol. 10. – P. 1082-1087.
- [16] Wu, S. State-of-the-art and perspectives on silicon waveguide crossings: A review / S. Wu, X. Mu, L. Cheng, S. Mao, H.Y. Fu // *Micromachines*. – 2020. – Vol. 11(3). – P. 326.
- [17] Savelyev, D.A. Numerical analysis of subwavelength focusing using a silicon cylinder / D.A. Savelyev, S.N. Khonina // *Computer Optics*. – 2014. – Vol. 38(4). – P. 638-642.
- [18] Savelyev, D. Near-Field Vortex Beams Diffraction on Surface Micro-Defects and Diffractive Axicons for Polarization State Recognition / D. Savelyev, N. Kazanskiy // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21(6). – P. 1973.
- [19] Mu, X. Edge couplers in silicon photonic integrated circuits: A review / X. Mu, S. Wu, L. Cheng, H.Y. Fu // *Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 10(4). – P. 1538.
- [20] Savelyev, D.A. Optical vortices sharp focusing by silicon ring gratings using high-performance computer systems / D.A. Savelyev // *Proceedings of CECNet 2021*. – 2021. – P. 300-305.
- [21] Savelyev, D.A. The Comparison of Laser Radiation Focusing by Diffractive Axicons and Annular Gratings with Variable Height Using High-performance Computer Systems / D.A. Savelyev // *Proceedings of 2021 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*. – 2021. – P. 2709-2716.
- [22] Savelyev, D.A. The investigation of the features of focusing vortex super-Gaussian beams with a variable-height diffractive axicon / D.A. Savelyev // *Computer Optics*. – 2021. – Vol. 45(2). – P. 214-221.