

Особенности дифракции оптических вихрей на кремниевых кольцевых решетках

Д.А. Савельев

Самарский национальный исследовательский университет
им. академика С.П. Королева

Институт систем обработки изображений - филиал
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН

Самара, Россия

dmitrey.savelyev@yandex.ru

С.А. Дегтярев

Институт систем обработки изображений - филиал
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН

Самарский национальный исследовательский университет
им. академика С.П. Королева

Самара, Россия

sealek@gmail.com

Аннотация—В работе исследуется дифракция оптических вихрей на кремниевых кольцевых решетках. Варьируется высота отдельных колец решеток. Было продемонстрировано, что для кремниевых кольцевых решеток переменной высоты можно получить световой фокальный отрезок на 17,3% длиннее, чем световой отрезок, формируемый стандартным дифракционным аксиконом.

Ключевые слова— оптические вихри, кремниевые кольцевые решетки, FDTD, субволновая фокусировка.

1. ВВЕДЕНИЕ

Оптические вихри активно исследуются в настоящее время [1-3] в связи с их использованием для ряда приложений, в том числе для передачи информации по оптоволокну [4], для систем беспроводной связи [5], в квантовой информатике [6]. Также следует отметить показанную ранее возможность перераспределения энергии между компонентами электромагнитного поля для таких пучков при однородной поляризации излучения [7].

Аксиконы известны формированием протяженного светового отрезка вдоль оптической оси [8]. Ряд модификаций классических аксиконов [9], дифракционных аксиконов [10], аксиконов со сложной формой поверхности [11, 12], позволяет применять их для тех приложений, где также требуется формирование компактного в поперечном направлении фокуса [13].

В данной работе исследуется дифракция оптических вихрей на кремниевых субволновых кольцевых решетках: рассматривается дифракционный аксикон, а также кольцевые решетки с переменной высотой отдельных зон. Численные расчеты (3D) распространения оптических вихрей выполнялись с использованием метода конечных разностей во временной области (FDTD) с помощью высокопроизводительных компьютерных систем.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФРАКЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ КРЕМНИЕВЫМИ КОЛЬЦЕВЫМИ РЕШЕТКАМИ

Рассматривались кремниевые субволновые кольцевые решетки с периодом решетки $1,05\lambda$, а также дифракционный аксикон с числовой апертурой (NA) 0,95 (т.е. с тем же периодом). Показатель преломления кремния n равен 3,47.

В качестве входного пучка (круговая поляризация) рассматривалась мода Лагерра-суперГаусса (1,0) с длиной волны равной 1,55 мкм. Амплитуда моды Лагерра-суперГаусса (1,0) определяется выражением (1):

$$A(r, \varphi) = r \cdot \exp\left[-\frac{r^p}{2\sigma^p}\right], \quad (1)$$

где σ – размер пучка в мкм. Рассматривается $p = 6$.

Другие параметры моделирования: размер расчётной области для выбранной волны излучения x, y, z находился в диапазоне $[-5,8\lambda; 5,8\lambda]$. Шаг дискретизации по пространству: $\lambda/30$, шаг дискретизации по времени: $\lambda/(60c)$, где c – скорость света. Толщина поглощающего слоя PML со всех сторон окружающего расчетную область равна $1,1\lambda$.

Высота рельефа бинарного элемента, соответствующая фазе π радиан, при показателе преломления материала элемента $n = 3,47$ равна $0,2\lambda$ [14]. Данная высота была взята в виде базовой и в дальнейшем варьировались высоты отдельных колец решеток. Профили рассматриваемых оптических элементов приведены на рис. 1.

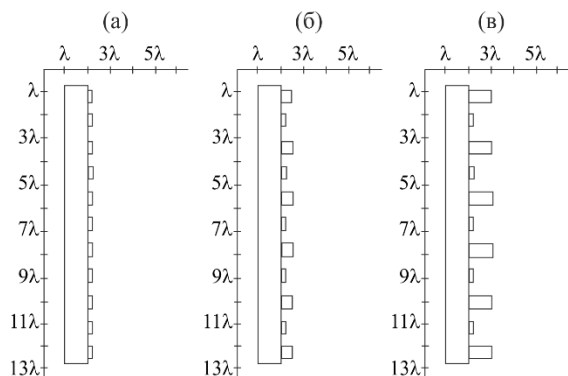


Рис. 1. Профили рассматриваемых кремниевых кольцевых решеток

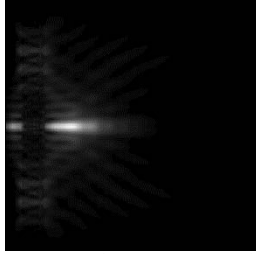
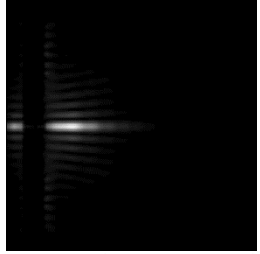
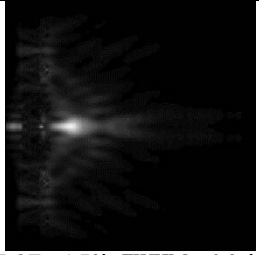
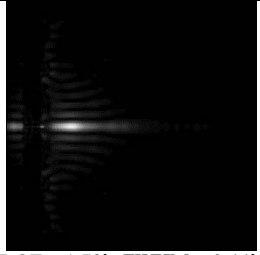
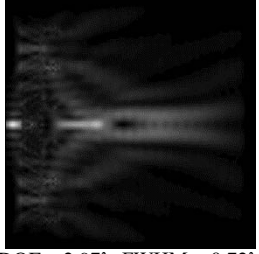
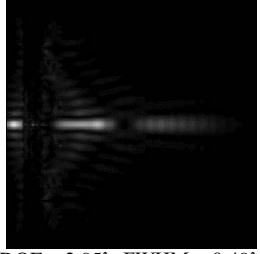
Размер фокального пятна на оптической оси оценивался по ширине по полуспаду интенсивности (full width at half maximum – FWHM), размер продольного светового отрезка измерялся аналогичным образом, по половине интенсивности (depth of focus – DOF).

В таблице 1 приведены результаты распространения рассматриваемого лазерного излучения через кольцевые решетки с максимальной высотой рельефа h от $0,2\lambda$ до λ , показанные на рис. 1. Демонстрируется общая интенсивность и интенсивность продольной компоненты электрического поля. Значения FWHM приведены для пиков интенсивности на оптической оси.

Следует отметить, что для случая $h = \lambda$ приведенные значения FWHM соответствуют второму максимуму (глобальному) на расстоянии $2,9\lambda$ от центральной части

рельефа элемента. На расстоянии 2λ формируется первый максимум (88% от интенсивности максимального значения) и значения FWHM для общей интенсивности равно $0,49\lambda$ (для продольной компоненты FWHM равен $0,43\lambda$). На таком же расстоянии для элемента с $h = 0,2\lambda$ размер фокального пятна составлял FWHM = $0,7\lambda$, а для $h = 0,5\lambda$ FWHM = λ .

ТАБЛИЦА 1. Двумерная картина дифракции оптических вихрей на кремниевых кольцевых решетках

Высота h	Общая интенсивность	Интенсивность продольной компоненты
0,2λ	 DOF = 2,53λ, FWHM = 0,57λ	 DOF = 2,53λ, FWHM = 0,44λ
0,5λ	 DOF = 1,73λ, FWHM = 0,86λ	 DOF = 1,73λ, FWHM = 0,44λ
λ	 DOF = 2,97λ, FWHM = 0,72λ	 DOF = 2,95λ, FWHM = 0,49λ

Что касается длины светового отрезка вдоль оптической оси, то первоначально увеличение колец решетки привело к его утолщению и уменьшению (строки 1 и 2 таблицы 1), однако в дальнейшем было получено увеличение продольного и уменьшение поперечного размера светового отрезка (случай $h = \lambda$).

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведено исследование дифракции мод Лагерра-суперГаусса (1,0) на кремниевых субволновых кольцевых решетках. Для численного моделирования использовался метод конечных разностей во временной области.

Показано, что для рассматриваемых версий кремниевых кольцевых решеток можно получить световую иглу на 17,3% длиннее ($h = \lambda$), чем для дифракционного аксикона ($h = 0,2\lambda$). Наименьшее значение фокального пятна было получено для кольцевой решетки с $h = \lambda$ в первом максимуме на оптической оси

(88% от максимального значения интенсивности), FWHM = $0,49\lambda$ (интенсивность продольной компоненты FWHM = $0,43\lambda$).

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 20-72-00051) в частях «2. Исследование дифракции оптических вихрей кремниевыми кольцевыми решетками» и «3. Заключение», а также Министерства науки и высшего образования РФ совместно с Советом по грантам Президента РФ (стипендия Президента Российской Федерации СП-1173.2022.5) в части «1. Введение».

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Wang, X. Recent advances on optical vortex generation / X. Wang, Z. Nie, Y. Liang, J. Wang, T. Li, B. Jia // *Nanophotonics*. – 2018. – Vol. 7(9). – P. 1533-1556.
- [2] 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.
- [3] Kotlyar, V.V. Topological Charge of Multi-Color Optical Vortices / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, A.G. Nalimov, S.S. Stafeev // *Photonics*. – 2022. – Vol. 9(3). – P. 145.
- [4] 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.
- [5] Li, S. Efficient Optical Angular Momentum Manipulation for Compact Multiplexing and Demultiplexing Using a Dielectric Metasurface / S. Li, X. Li, L. Zhang, G. Wang, L. Wang, M. Liu, C. Zeng, L. Wang, Q. Sun, W. Zhao, W. Zhang // *Advanced Optical Materials*. – 2020. – Vol. 8(8). – P. 1901666.
- [6] 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.
- [7] Khonina, S.N. Strengthening the longitudinal component of the sharply focused electric field by means of higher-order laser beams / S.N. Khonina, S.V. Alferov, S.V. Karpeev // *Optics Letters*. – 2013. – Vol. 38(17). – P. 3223-3226.
- [8] McLeod, J.H. The axicon: a new type of optical element / J.H. McLeod // *JOSA*. – 1954. – Vol. 44(8). – P. 592-597.
- [9] Gutierrez, B.K. Dynamic control of Bessel beams through high-phase diffractive axicons / B.K. Gutierrez, J.A. Davis, M.M. Sánchez-López, I. Moreno, D.M. Cottrell // *OSA Continuum*. – 2020. – Vol. 3(5). – P. 1314-1321.
- [10] Савельев, Д.А. Исследование особенностей фокусировки вихревых супергауссовых пучков при изменении высоты дифракционного аксикона / Д.А. Савельев // *Компьютерная оптика*. – 2021. – Т. 45, № 2. – С. 214-221. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-862.
- [11] Sanchez-Padilla, B. Wrinkled axicons: shaping light from cusps / B. Sanchez-Padilla, A. Žukauskas, A. Aleksanyan, A. Balčytis, M. Malinauskas, S. Juodkazis, E. Brasselet // *Optics Express*. – 2016. – Vol. 24(21). – P. 24075-24082.
- [12] Дегтярев, С.А. Создание и фокусировка векторного пучка второго порядка с помощью субволнового оптического элемента / С.А. Дегтярев, Д.А. Савельев // *Компьютерная оптика*. – 2022. – Т. 46, № 1. – С. 39-47. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1053.
- [13] Khonina, S.N. Bessel Beam: Significance and Applications – A Progressive Review / S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy, S.V. Karpeev, M.A. Butt // *Micromachines*. – 2020. – Vol. 11(11). – P. 997.
- [14] Savelyev, D. Near-Field Vortex Beams Diffraction on Sur-face Micro-Defects and Diffractive Axicons for Polarization State Recognition / D. Savelyev, N. Kazanskiy // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21(6). – P. 1973.