

Дифракция оптических вихрей на субволновых элементах с нелинейной зависимостью изменения показателя преломления

Д.А. Савельев

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева

²Институт систем обработки изображений - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН

Самара, Россия

dmitrey.savelyev@yandex.ru

Аннотация — В работе исследуется дифракция моды Лагерра-Гаусса (1,0) с круговой поляризацией на субволновых оптических микроэлементах с нелинейной зависимостью изменения показателя преломления подложки. Варьировалась высота рельефа элементов, а также направление изменения показателя преломления подложки. Было показано, что при использовании рассматриваемых типов подложек можно получить фокальное пятно на 37,8% меньшее, и световой отрезок на 29,7% длиннее, чем фокальное пятно и световой отрезок, формируемые стандартным дифракционным аксиконом.

Ключевые слова — субволновая фокусировка, GRIN, оптический вихрь, FDTD, кольцевые решетки

1. ВВЕДЕНИЕ

Материалы с градиентным индексом преломления (*GRADIENT INDEX* – *GRIN*) активно используются в настоящее время для ряда приложений [1-2], среди которых следует отметить коллимацию света [3], для связи [4], в биологии и медицине [5], также известно их использование для контроля над распространением света в интегрированных фотонных чипах [2].

Оптические вихри вызывают значительный интерес в области оптики благодаря своим особым оптическим свойствам [6-9], которые можно использовать для передовых приложений, таких как нелинейная оптика, переноса информации, оптический пинцет, квантовая запутанность высокого порядка [8]. Также известно использование метаповерхностей для генерации оптических вихрей [9].

В данной работе методом конечных разностей во временной области (*FDTD*) исследуется дифракция оптического вихря с круговой поляризацией на субволновых оптических микроэлементах с нелинейной зависимостью изменения показателя преломления подложки при изменении высоты рельефа элементов.

2. СУБВОЛНОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТЫ С *GRIN*-ПОДЛОЖКОЙ

В качестве входного лазерного излучения рассматривалась мода Лагерра-Гаусса (1,0) с круговой поляризацией при длине волны λ равной 0,532 мкм ($\sigma = 1,5$).

Основные параметры моделирования: размер стороны вычислительной 3D области 6 мкм, толщина поглощающего слоя *PML*, со всех сторон окружающего вычислительную область – 0,6 мкм. Шаг выборки по пространству – $\lambda/20$, шаг по времени – $\lambda/(40c)$, где c – скорость света.

Рассматривались субволновые кольцевые решетки (период решетки $1,05\lambda$) с *GRIN*-подложкой, показатель

преломления n подложки изменялся от 1,47 до 2,7. Бралось следующие значения n : 1,47, 1,74, 1,77, 1,98, 2,03, 2,17, 2,37, 2,7. Результаты сравнивались с действием дифракционного аксикона аналогичного периода со стандартной подложкой при $n = 1,47$. Показатель преломления рельефа у всех элементов был равен 1,47, в этом случае высота рельефа h , соответствующая фазовому скачку π радиан, равна $1,06\lambda$. Также был рассмотрен случай $h = 3,18\lambda$.

Профили рассматриваемых субволновых элементов при высоте рельефа $h = 1,06\lambda$ приведены на рис. 1, где элемент со стандартной подложкой обозначен как (1), элемент с *GRIN*-подложкой при изменении показателя преломления подложки от $n = 1,47$ (на краю) до $n = 2,7$ (в центре) обозначен как (2), элемент с *GRIN*-подложкой при изменении показателя преломления подложки от $n = 2,7$ (на краю) до $n = 1,47$ (в центре) обозначен как (3).

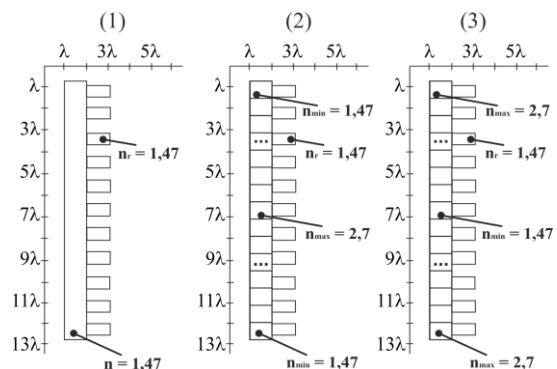


Рис. 1. Профили рассматриваемых субволновых оптических микроэлементов, $h = 1,06\lambda$

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

На рис. 2 приведены результаты исследований распространения оптических вихрей через рассматриваемые субволновые оптические микроэлементы с различной высотой рельефа. Значения *FWHM* приведены для пиков интенсивности вне элементов.

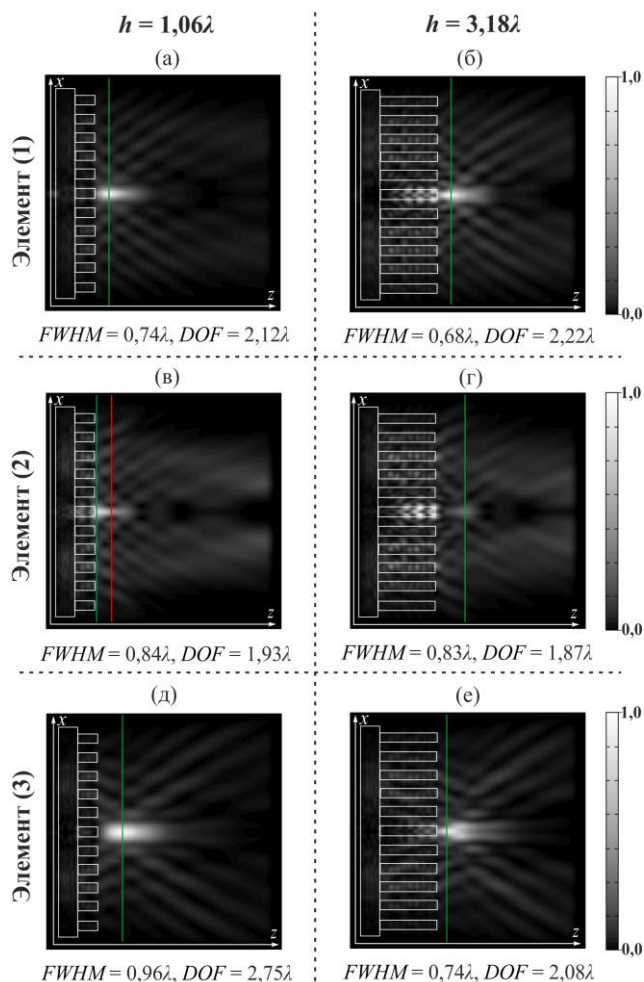


Рис. 2. Двумерная картина дифракции оптических вихрей на субволновых оптических мезоэлементах: при высоте рельефа $h = 1,06\lambda$ (а, в, д) и $h = 3,18\lambda$ (б, г, е); зеленым цветом выделены сечения в глобальном максимуме на оптической оси вне элемента, красным цветом выделен локальный максимум

Фактически, эффект *GRIN*-подложки по сравнению со стандартной подложкой (рис. 2, $h = 1,06$) проявляется как действие собирающей (при $n = 2,7$ в центре) и рассеивающей (при $n = 1,47$ в центре) линз, что проявляется смещении основного фокуса к элементу (2) и от элемента (3), соответственно. Причем действие элемента (2) проявилось в формировании 2 пиков интенсивности (рис. 2в), первый из которых находится рядом с рельефом (на расстоянии $0,1\lambda$) с $FWHM_1 = 0,84\lambda$, а второй (68% от максимальной интенсивности) на расстоянии $0,94\lambda$ от края рельефа при размере фокального пятна $FWHM_2 = 0,46\lambda$, что лучше действия элемента (1) на 37,8% (рис. 2а). Действие элемента (3) приводит к формированию широкого светового отрезка (рис. 3д), на 29,7% длиннее ($DOF = 2,75\lambda$) светового отрезка, формируемого стандартным дифракционным аксиконом.

Увеличение высоты для элемента (1) привело (рис. 2б) к уменьшению размера фокального пятна на 8% ($FWHM = 0,68\lambda$) при увеличении длины фокального отрезка на 4,7% ($DOF = 2,22\lambda$). Для элементов с *GRIN*-подложкой эффект обратный: в частности, для элемента (2) основные максимумы формируются внутри элемента

(рис. 2г), а первый максимум вне (45,2% от максимальной интенсивности) шире ($FWHM = 0,83\lambda$), а световой отрезок короче, чем результат, полученный для $h = 1,06\lambda$. Для элемента (3) увеличение высоты рельефа (рис. 2е) также привело к сокращению размера светового отрезка ($DOF = 2,08\lambda$), но также сократился размер фокального пятна ($FWHM = 0,74\lambda$).

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе методом конечных разностей во временной области было проведено исследование дифракции оптического вихря на субволновых элементах с *GRIN*-подложкой при изменении высоты рельефа элементов, проведено сравнение с действием стандартного дифракционного аксикона.

Показано, что при использовании *GRIN*-подложки можно получить фокальное пятно на 37,8% меньшее ($FWHM = 0,46\lambda$, при $n = 2,7$ в центре подложки) и световой отрезок на 29,7% длиннее ($DOF = 2,75\lambda$, при $n = 2,7$ на краях подложки), чем фокальное пятно и световой отрезок, формируемые стандартным дифракционным аксиконом.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ совместно с Советом по грантам Президента РФ (стипендия Президента Российской Федерации СП-1173.2022.5).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Jin, Y. Gradient index phononic crystals and metamaterials / Y. Jin, B. Djafari-Rouhani, D. Torrent // *Nanophotonics*. – 2019. – Vol. 8(5). – P. 685–701.
- [2] Luque-González, J.M. An ultracompact GRIN-lens-based spot size converter using subwavelength grating metamaterials / J.M. Luque-González, R. Halir, J.G. Wangüemert-Pérez, J. de-Oliva-Rubio, J.H. Schmid, P. Cheben, Í. Molina-Fernández, A. Ortega-Moñux // *Laser & Photonics Reviews*. – 2019. – Vol. 13(11). – P. 1900172.
- [3] Lalanne, P. Metalenses at visible wavelengths: past, present, perspectives / P. Lalanne, P. Chavel // *Laser & Photonics Reviews*. – 2017. – Vol. 11(3). – P. 1600295.
- [4] Park, H.Y. Ray model of an incident Gaussian beam for analyzing a micro-optical communication device with a GRIN lens system / H.Y. Park, S.W. Ha, M.J. Kim, S.G. Lee, S.G. Park, E.H. Lee // *Optical review*. – 2005. – Vol. 12(3). – P. 233–236.
- [5] Guo, C. 3D light-field endoscopic imaging using a GRIN lens array / C. Guo, T. Umer, S. Jia // *Applied Physics Letters*. – 2020. – Vol. 116(10). – P. 101105.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Shen, Y. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities / Y. Shen, X. Wang, Z. Xie, C. Min, X. Fu, Q. Liu, M. Gong, X. Yuan // *Light: Science & Applications*. – 2019. – Vol. 8(1). – P. 1–29.
- [9] Ahmed, H. Optical metasurfaces for generating and manipulating optical vortex beams / H. Ahmed, H. Kim, Y. Zhang, Y. Intaravanne, J. Jang, J. Rho, S. Chen, X. Chen // *Nanophotonics*. – 2022. – Vol. 11(5). – P. 941–956.