

## Особенности дифракции Гауссовых пучков в ближней зоне при изменении высоты кремниевых субволновых оптических элементов

Д.А. Савельев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34;

<sup>2</sup> ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151

### Аннотация

В данной работе методом конечных разностей во временной области исследованы особенности дифракции Гауссовых пучков и мод Лагерра–Гаусса на кремниевых субволновых оптических элементах с переменной высотой рельефа в ближней зоне. В качестве оптических элементов рассматривались дифракционные аксиконы и субволновые кольцевые решетки при изменении высоты рельефа. Было показано, что возможен такой подбор высоты отдельных колец рельефа кольцевых решеток, при котором достижимо уменьшение размеров фокального пятна вплоть до  $0,26\lambda$ , формирование протяженного светового отрезка (до  $4,88\lambda$ ), формирование оптических ловушек.

**Ключевые слова:** Гауссовы пучки, оптические вихри, кремниевые кольцевые решетки, дифракционный аксикон, острая фокусировка, оптическая ловушка, FDTD.

**Цитирование:** Савельев, Д.А. Особенности дифракции Гауссовых пучков в ближней зоне при изменении высоты кремниевых субволновых оптических элементов / Д.А. Савельев // Компьютерная оптика. – 2023. – Т. 47, № 6. – С. 938-947. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1402.

**Citation:** Savelyev DA. Features of a Gaussian beam near-field diffraction upon variations in the relief height of subwavelength silicon optical elements. Computer Optics 2023; 47(6): 938-947. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1402.

### Введение

Фотоника является прогрессирующей отраслью современной инновационной экономики [1–5], которая динамично развивается в настоящее время [4] во многих странах, в том числе Китае, США, Японии, Южной Корее и других. Фотоника охватывает широкий диапазон длин волн, начиная от ультрафиолетового и заканчивая СВЧ-излучением. Актуальны фотонные технологии для многих отраслей, в частности фотонные интегральные схемы позволили создать сверхбыстрые искусственные нейронные сети, что, в свою очередь, является основой нового класса машин для обработки информации [2, 4], которые могут использовать свет как для связи, так и для вычислений. Соответственно, на таких машинах можно использовать новые алгоритмы машинного обучения [4].

Также фотонные технологии находят свое применение в приложениях космической сферы [6], в особенности учитывая рост объемов данных [7], получаемых со спутников. Для фотонных технологий в качестве материала часто выступает кремний и его соединения [8–11], в частности для оптических устройств с использованием стандартных технологий производства полупроводников [12], а также миниатюризации решений для передачи света через оптические волокна [13], т.к. можно получить высокую плотность интеграции благодаря большому показателю преломления кремния [11].

Вихревые пучки представляют собой лазерное излучение особой структуры [14, 15], одним из наиболее важных свойств которого является наличие орбитального углового момента [14], который определяется порядком оптического вихря, также называемого топологическим зарядом.

Вихревые пучки активно используются в различных приложениях [16–25], в частности, известно их применение для оптической передачи информации [18, 19], острой фокусировки [20, 21], уплотнения каналов передачи данных при наличии у пучка с орбитальным угловым моментом большого числа возможных квантовых состояний [22], а также для зондирования [23], лазерной обработки [24] и оптического манипулирования [25]. Известна реализация трехмерной ловушки с помощью оптических полей различной конфигурации, в том числе пучков Эрмита–Гаусса и мод Лагерра–Гаусса [17, 26, 27].

Для формирования структурированного вихревого излучения хорошо известно использование средств дифракционной оптики, таких как аксиконы [28–31], в том числе спиральные и закрученные аксиконы [31], спиральные фазовые пластинки [32], многопорядковые дифракционные оптические элементы [33]. В частности, известно использование спиральных фазовых микропластинок, изготовленных на торце волновода, для формирования вихревых пучков в системах оптических коннекторов в дата-центрах [34].

В данной работе исследуются особенности дифракции Гауссовых и суперГауссовых пучков, а также оптических вихрей с круговой поляризацией на кремниевых 3D-микроструктурах с переменной высотой отдельных элементов рельефа.

Численные расчеты распространения лазерного излучения (3D) были выполнены с использованием метода конечных разностей во временной области (FDTD) [35] при помощи свободно распространяемого программного обеспечения Меер [17, 36].

**1. Входные пучки и рассматриваемые 3D-элементы**

Изменение высоты оптических элементов вполне ожидаемо влияет на картину дифракции в ближней зоне [17, 37, 38], что ранее было показано на примере дифракционного аксикона [17, 37], причем в случае однородной поляризации за счет перераспределения энергии между компонентами электромагнитного поля можно сформировать мощную продольную компоненту [17, 39, 40].

В данной работе будет рассматриваться круговая поляризация лазерного излучения, у которой знак круговой поляризации противоположен знаку внесенной вихревой фазовой сингулярности. Таким образом, на оптической оси должно формироваться круглое фо-

кальное пятно, в отличие от случая, когда знаки поляризации и фазовой сингулярности сонаправлены [29].

В качестве входных лазерных пучков рассматривались Гауссовые пучки и моды Лагерра–Гаусса (1,0), причем для получения более равномерного распределения интенсивности по сечению пучка рассматривались суперГауссовые функции [16, 40]. Амплитуда такого пучка степени  $p$  определяется по формуле (1):

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

где  $\sigma$  – это размер пучка в мкм. Амплитуда моды Лагерра–суперГаусса (1,0) определяется выражением [16]:

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

где  $\sigma$  – также размер пучка в мкм. В данной работе рассматривались значения  $p=2$  и  $p=6$  для обоих типов пучков.

На рис. 1 приведены входные пучки, сечения рассматриваемых оптических элементов и распространение лазерных пучков через дифракционный аксикон с  $h = 0,2\lambda$ .

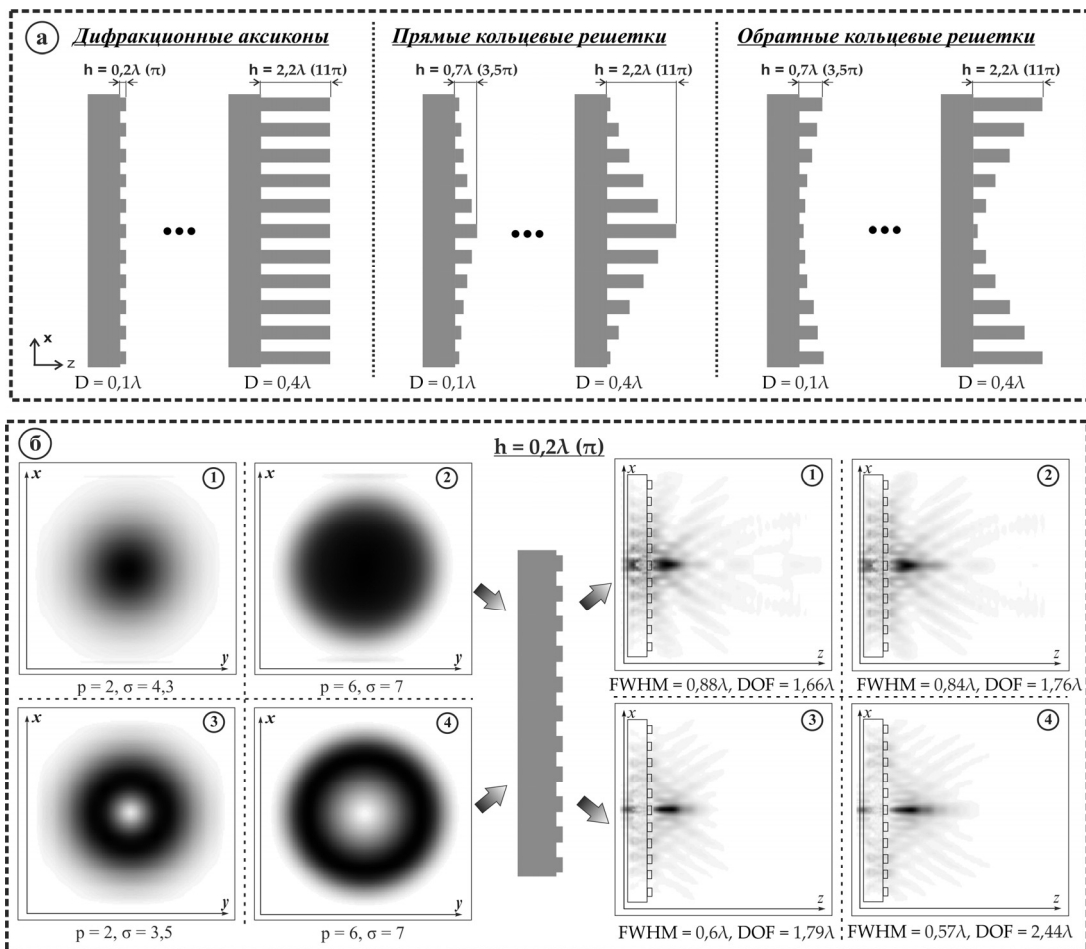


Рис. 1. Сечения рассматриваемых 3D оптических элементов (а), входные пучки и их распространение через дифракционный аксикон при  $h = 0,2\lambda$  (б), Гауссовы пучки (1), (2), моды Лагерра–Гаусса (1,0) (3), (4)

Параметры моделирования методом FDTD: длина волны излучения  $\lambda = 1,55$  мкм, размер расчётной 3D-области  $x, y, z$  в диапазоне  $[-5,8\lambda; 5,8\lambda]$ . Толщина поглощающего слоя PML (идеально согласованный слой, perfectly matched layer – PML) со всех сторон окружающей расчётную область –  $1,2\lambda$ , шаг дискретизации по пространству –  $\lambda/30$ , шаг дискретизации по времени –  $\lambda/(60c)$ , где  $c$  – скорость света.

Источник находился внутри подложки, которая занимает все пространство ниже рельефа и частично погружена в PML-слой.

В качестве материала с высоким показателем преломления в работе рассматривается кремний (Si),  $n = 3,47$ . В этом случае высота рельефа бинарного элемента, соответствующая фазе  $\pi$  радиан, равна:

$$h = \frac{\pi}{k(n-1)} = 0,202429\lambda \approx 0,2\lambda, \quad (3)$$

где  $n$  – показатель преломления,  $\lambda$  – длина волны рассматриваемого лазерного излучения,  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число.

Округление высоты рельефа до  $0,2\lambda$  было проведено вследствие оптимизации используемых вычислительных ресурсов (для уменьшения шага дискретизации) и ускорения исследований.

В качестве элементов рассматривались субволновые кольцевые решетки переменной высоты (период решетки элементов  $1,05\lambda$ ) и дифракционные аксиконы.

Варьировались высоты отдельных колец рельефа с шагом  $D$ , равным  $0,1\lambda, 0,2\lambda, 0,3\lambda$  и  $0,4\lambda$ . Таким образом, рассматривались высоты колец решеток от  $0,2\lambda$  до  $2,2\lambda$ .

Исследуются прямая (высота рельефа меняется от максимальной в центре к минимальной на краях) и обратная (высота рельефа меняется от минимальной в центре к максимальной на краях) кольцевые решетки. Кроме стандартного аксикона с высотой  $h$ , равной  $0,2\lambda$ , также были рассмотрены аксиконы с высотой рельефа, соответствующей максимальной высоте рассмотренных решеток ( $0,7\lambda, 1,2\lambda, 1,7\lambda$  и  $2,2\lambda$ ).

Размер фокального пятна на оптической оси оценивался по полной ширине полуспада максимального значения интенсивности (full width at half maximum – FWHM), глубина фокуса (depth of focus – DOF), то есть размер продольного светового отрезка, оценивалась также по половине интенсивности.

Высота рельефа бинарного элемента  $h = 0,2\lambda$ , соответствующая фазе  $\pi$  радиан, будет являться базовой для сравнения.

Для данной высоты минимальное фокальное пятно (FWHM =  $0,57\lambda$ ) и самая длинная световая игла (DOF =  $2,44\lambda$ ) были получены для случая моды Лагерра–Гаусса (1,0) при  $p = 6$ .

## 2. Исследование дифракции лазерного излучения на дифракционных аксиконах

В данном параграфе исследуется дифракция Гауссовых пучков и мод Лагерра–Гаусса (1,0) при  $p = 2$  и 6

на дифракционных аксиконах с высотой рельефа  $0,7\lambda, 1,2\lambda, 1,7\lambda$  и  $2,2\lambda$ , соответствующей максимальной высоте рассматриваемых в следующих параграфах кольцевых решеток.

На всех последующих рисунках приводятся значения FWHM в максимуме интенсивности на оптической оси вне элемента. Результаты исследований приведены на рис. 2.

Для Гауссовых пучков с  $p = 2$  и  $p = 6$  основные максимумы для высоты  $h = 0,7\lambda$  и  $h = 2,2\lambda$  формируются внутри элементов, а вне элементов существуют только локальные максимумы, в отличие от других случаев, где основные максимумы формируются вне рельефа.

Результат расчёта с использованием метода FDTD будет отличаться от результатов, полученных на основе геометрической оптики или в модели тонкого элемента по формулам Кирхгофа.

В частности, в модели тонкого элемента при разности высот рельефа, кратной  $2\lambda$ , набег фазы будет одинаков [16]. Однако это не так для строгой электромагнитной теории, что было показано, в частности, для дифракционного аксикона ранее [16, 20], а также данного исследования (сравним случаи  $h = 0,2\lambda$  и  $h = 2,2\lambda$ ).

Минимальное фокальное пятно среди всех рассмотренных на рис. 2 случаев было зафиксировано для моды Лагерра–Гаусса (1,0) при  $p = 2$  и высоте рельефа  $h = 1,2\lambda$  (FWHM =  $0,37\lambda$ ), что лучше на 38,3% для этого же типа пучка при высоте аксикона  $h = 0,2\lambda$ .

Самая длинная световая игла формируется для случая моды Лагерра–Гаусса (1,0) при  $p = 6$ , что меньше на 10% световой иглы, формируемой дифракционным аксиконом с  $h = 0,2\lambda$  при том же типе входного пучка.

Также следует отметить, что для моды Лагерра–Гаусса (1,0) при  $p = 6$  наблюдается сокращение длины световой иглы для всех рассмотренных высот дифракционного аксикона.

В последующих параграфах будем рассматривать смену отдельных элементов рельефа с выбранным шагом  $D$  для прямой и обратной кольцевых решеток.

## 3. Исследование дифракции лазерного излучения на прямых кольцевых решетках

В данном параграфе исследуется дифракция всех ранее рассмотренных лазерных пучков на прямых кольцевых решетках при изменении высоты с шагом  $D$ , равным  $0,1\lambda, 0,2\lambda, 0,3\lambda$  и  $0,4\lambda$ . Результаты распространения рассматриваемого лазерного излучения через прямые кольцевые решетки приведены на рис. 3. Также на рис. 3 показана максимальная высота рельефа элемента при соответствующем шаге  $D$ . Следует отметить, что для мод Лагерра–Гаусса (1,0) при смене высоты рельефа с  $D = 0,1\lambda$  ( $\pi/2$ ) и  $0,3\lambda$  ( $3\pi/2$ ) наблюдается формирование протяженных световых отрезков. В отличие от этих случаев для случаев смены высоты рельефа, кратных  $\pi$  с  $D = 0,2\lambda$  ( $\pi$ ) и  $0,4\lambda$  ( $2\pi$ ), основные пики интенсивности формируются внутри элементов.

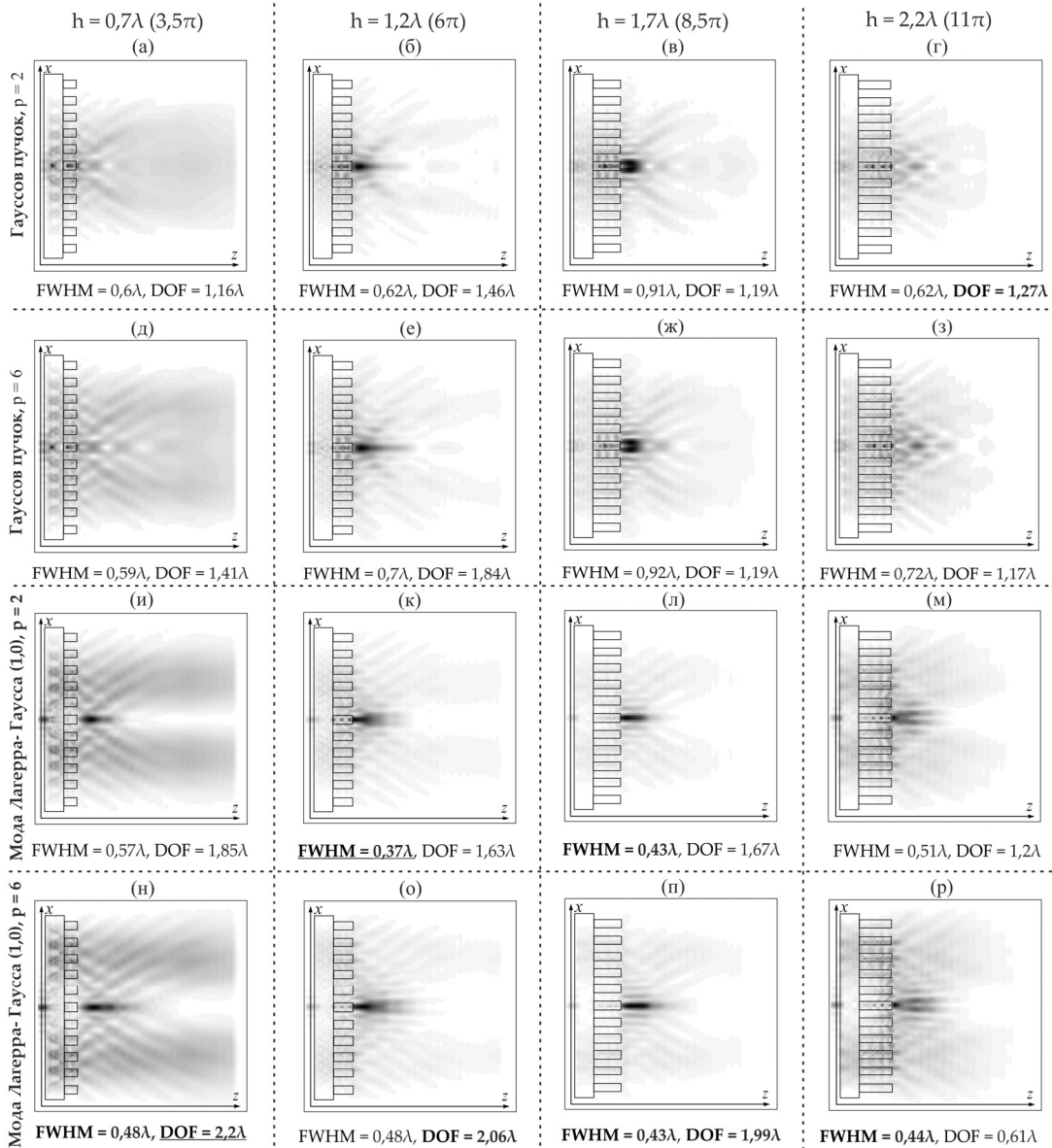


Рис. 2. Дифракция Гауссовых пучков и мод Лагерра–Гаусса (1,0) на дифракционном аксиконе при различной высоте рельефа (интенсивность) при  $h = 0,7\lambda$  (а, д, и, н),  $h = 1,2\lambda$  (б, е, к, о),  $h = 1,7\lambda$  (в, ж, л, п),  $h = 2,2\lambda$  (з, з, м, р)

Для Гауссовых пучков аналогичной зависимости не наблюдается, основные максимумы для случая  $D=0,4\lambda$  ( $2\pi$ ) формируются внутри элемента, для остальных случаев – вне элемента, хотя для случая  $D=0,1\lambda$  ( $\pi/2$ ) максимумы интенсивности формируются на границе. Также следует отметить случай с шагом  $D=0,2\lambda$ , где наблюдается формирование широких и протяженных световых игл.

Минимальное фокальное пятно среди всех рассмотренных случаев было получено для моды Лагерра–Гаусса (1,0) при  $p=6$  и высоте рельефа  $h = 1,2\lambda$  ( $FWHM = 0,35\lambda$ ), что на 38,6% меньше, чем для этого же типа пучка при высоте аксикона  $h = 0,2\lambda$ . Самая длинная световая игла формируется для случая Гауссова пучка при  $p=6$ ,  $DOF = 4,6\lambda$ , что лучше самой длинной световой иглы, формируемой дифракционным аксиконом при  $h = 0,2\lambda$  для

моды Лагерра–Гаусса (1,0) при  $p=6$  в 1,88 раза (и в 2,61 раза длиннее световой иглы, формируемой Гауссовым пучком того же типа).

Для случаев локализации основных максимумов внутри элементов следует отметить формирование на расстоянии меньше  $0,5\lambda$  от края рельефа центра прямой кольцевой решетки локального максимума с интенсивностью от 17,1% до 40,4% от максимальной интенсивности. В частности, для прямой кольцевой решетки ( $D=0,2\lambda$ ) для моды Лагерра–Гаусса (1,0) при  $p=2$  на расстоянии  $0,27\lambda$  от края рельефа наблюдается формирование фокального пятна (интенсивность 40,4% от максимальной интенсивности) с  $FWHM = 0,43\lambda$ .

Рассмотрим далее обратные кольцевые решетки, где высота рельефа меняется от минимальной в центре к максимальной на краях.

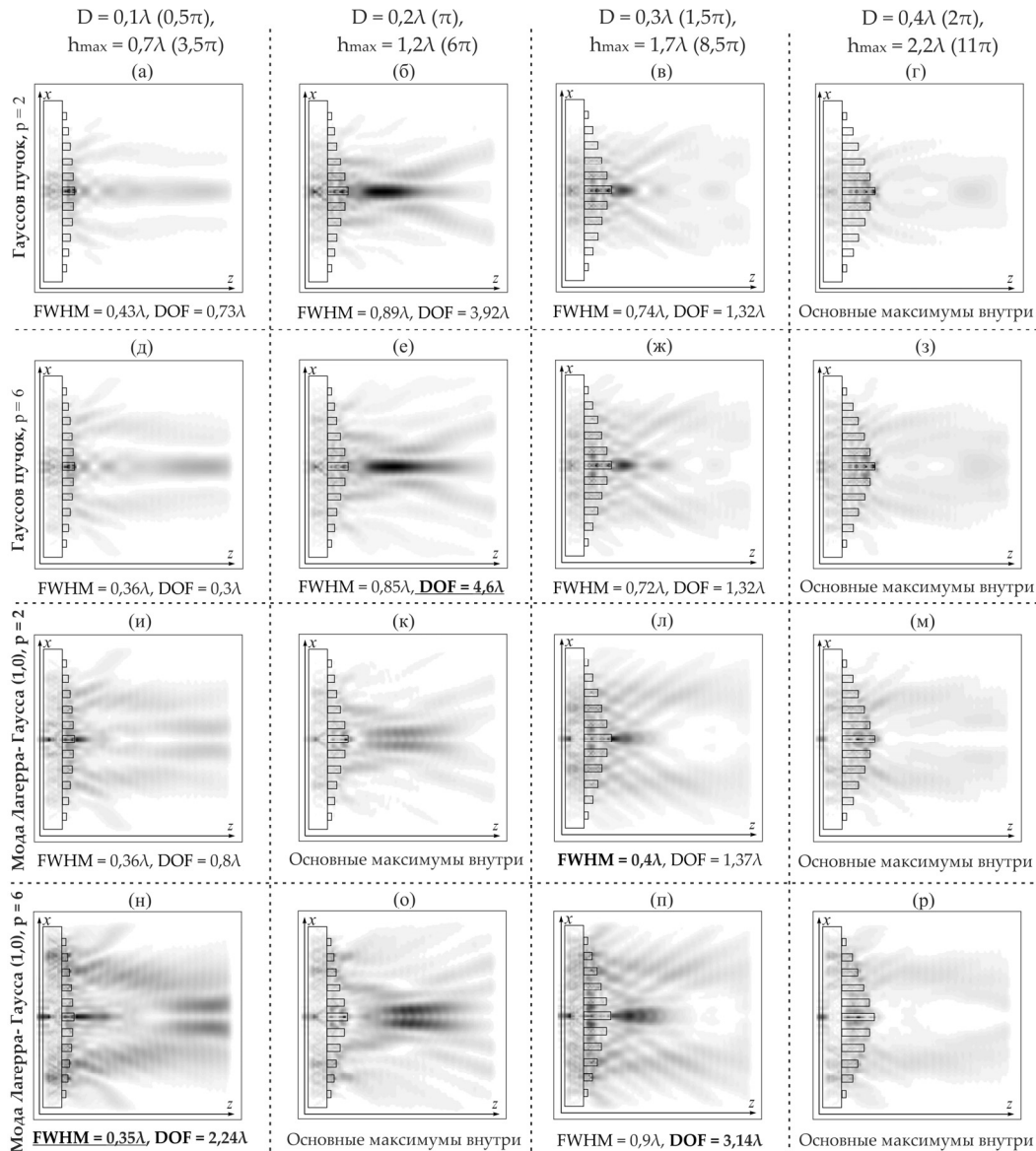


Рис. 3. Дифракция Гауссовых пучков и мод Лагерра-Гаусса (1,0) на прямой кольцевой решетке при различной высоте рельефа (интенсивность), максимальная высота рельефа  $h = 0,7\lambda$  (а, д, и, н),  $h = 1,2\lambda$  (б, е, к, о),  $h = 1,7\lambda$  (в, ж, л, п),  $h = 2,2\lambda$  (г, з, м, р)

#### 4. Исследование дифракции лазерного излучения на обратных кольцевых решетках

В данном параграфе исследуется дифракция рассматриваемых лазерных пучков на обратных кольцевых решетках при аналогичных параметрах смены шага  $D$  (рис. 4).

Следует отметить, что для получения острого фокуса у поверхности оптических элементов часто бывает достаточно использования таких элементарных оптических объектов, как микросферы, микроцилиндры, микрокубы [10, 41, 42], а также массивов таких микроэлементов [43]. В частности, удалось сфокусировать Гауссов пучок вблизи поверхности отдельного кремниевого цилиндра в световое пятно с  $FWHM = 0,25\lambda$  [44].

Минимальное фокальное пятно среди всех рассмотренных случаев было получено для Гауссовых

пучков при  $p = 6$  и  $D = 0,3\lambda$  (максимальная высота рельефа  $h_{max} = 1,7\lambda$ )  $FWHM = 0,48\lambda$ , что на 42,8% меньше, чем для этого же типа пучка при высоте аксикона  $h = 0,2\lambda$ .

Также следует отметить, что в непосредственной близости от края центральной зоны (вне элемента) для Гауссова пучка при  $p = 2$  и  $D = 0,4\lambda$  формируется узкое фокальное пятно с  $FWHM = 0,26\lambda$  (94,5% от максимальной интенсивности). В дальнейшем оно уширяется до  $0,62\lambda$ .

Самая длинная световая игла формируется обратной кольцевой решеткой для случая Гауссова пучка при  $p = 6$  и  $D = 0,2\lambda$  ( $DOF_2 = 4,88\lambda$ ), что длиннее как лучшего ранее рассмотренного случая для прямой кольцевой решетки и того же типа пучка ( $DOF = 4,6\lambda$ ), так и дифракционного аксикона при  $h = 0,2\lambda$  ( $DOF = 1,76\lambda$ ).

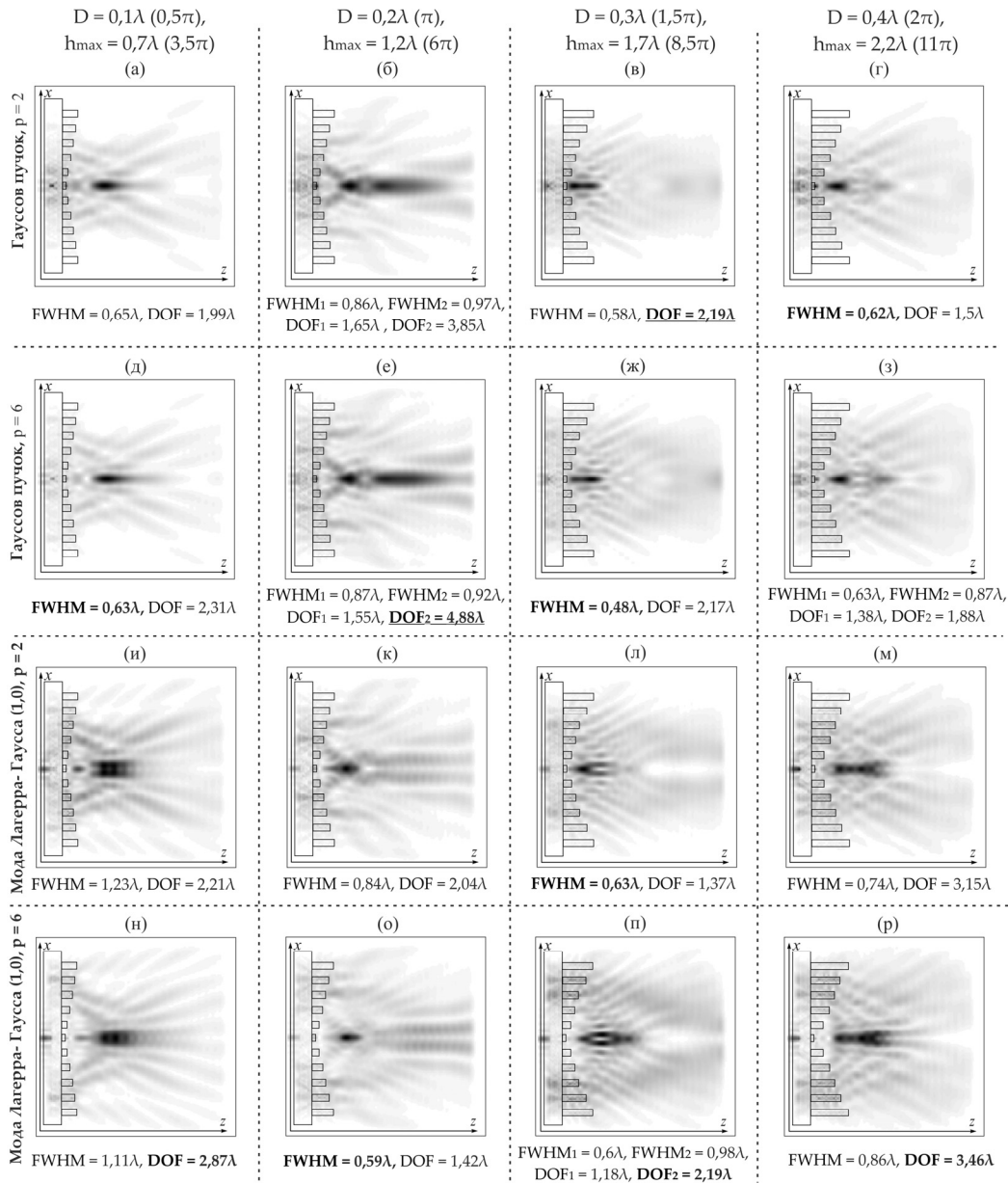


Рис. 4. Дифракция Гауссовых пучков и мод Лагерра–Гаусса (1,0) на обратной кольцевой решетке при различной высоте рельефа (интенсивность), максимальная высота рельефа  $h = 0,7\lambda$  (а, д, и, н),  $h = 1,2\lambda$  (б, е, к, о),  $h = 1,7\lambda$  (в, ж, л, п),  $h = 2,2\lambda$  (г, з, м, р)

Следует отметить, что для Гауссовых пучков при смене высоты рельефа с  $D=0,2\lambda$  ( $\pi$ ) и  $0,4\lambda$  ( $2\pi$ ) наблюдается формирование неоднородного распределения электрического поля на оптической оси – оптической ловушки. Для случаев  $D=0,1\lambda$  ( $\pi/2$ ) и  $0,3\lambda$  ( $3\pi/2$ ) наблюдается формирование протяженных световых отрезков. Для мод Лагерра–Гаусса (1,0) при  $D=0,3\lambda$  ( $3\pi/2$ ) также наблюдается формирование оптических ловушек. Фактически можно говорить о том, что центральная часть кольцевой решетки фокусирует, а соседние зоны расфокусируют лазерный пучок.

Для манипуляции микроскопическими объектами с помощью лазерного света известно использование оптического пинцета («оптической ловушки») [17, 27, 45]. Изобретение оптического пинцета позволило со-

вершить качественный и количественный скачок в биологических и биофизических исследованиях [46]. Для многих прикладных задач по оптическому захвату используются трехмерные оптические ловушки, представляющие собой равномерно окруженную максимумами интенсивности область с минимальной интенсивностью света («оптическая бутылка») [47].

Рассмотрим случаи формирования оптических ловушек обратными кольцевыми решетками (случаи рис. 4е и н) подробнее (рис. 5 и рис. 6).

Оценим первую ловушку (рис. 5). Как видно из графика, высота максимумов интенсивности (точки 1 и 3 на рис. 5) оптической ловушки в плоскости  $xz$  составляет 100% и 88,5% от максимальной интенсивности. Длина области пониженной интенсивности  $L = 1,2\lambda$ .

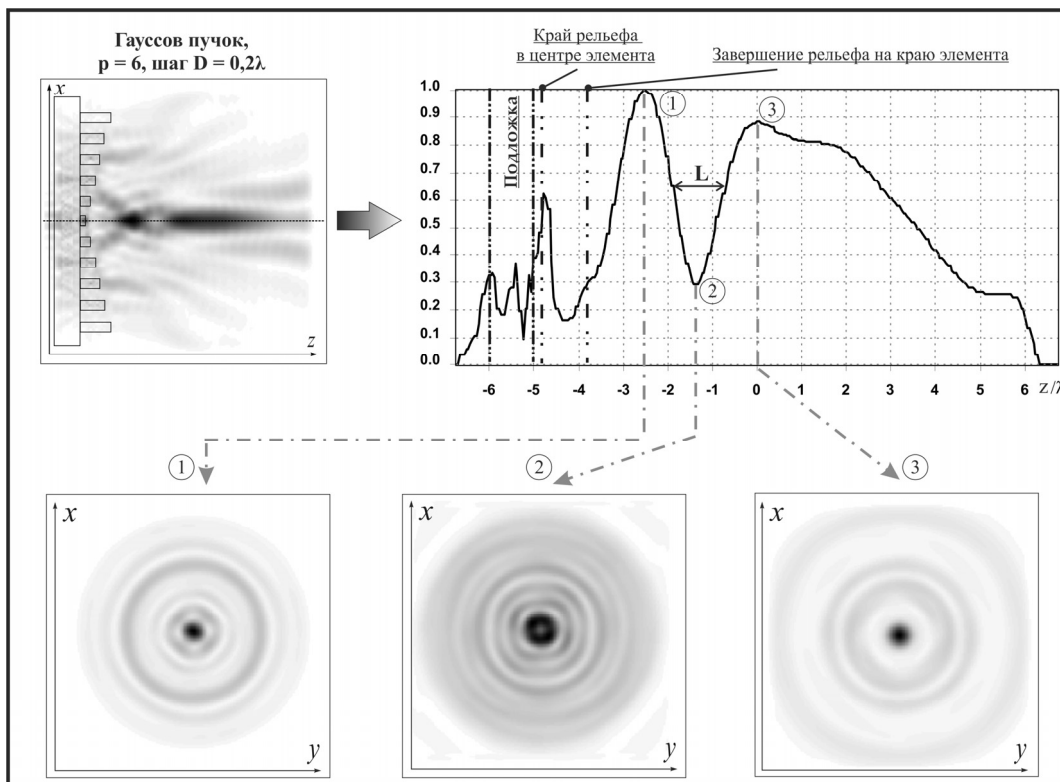


Рис. 5. Формирование оптических ловушек Гауссовым пучком при  $p = 6$  ( $D = 0,2\lambda$ )

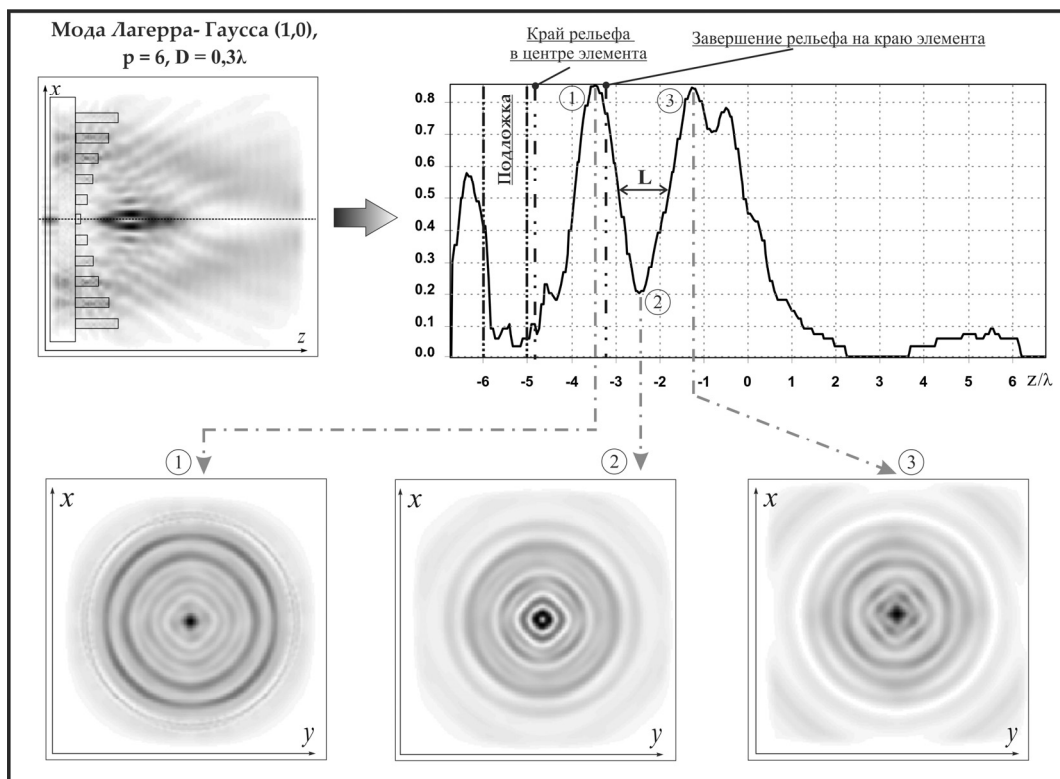


Рис. 6. Формирование оптических ловушек модой Лагерра-Гаусса (1,0) при  $p = 6$  ( $D = 0,3\lambda$ )

Если рассматривать сечение в области минимума (точка 2 рис. 5), то происходит формирование кольца с максимумом, равным 41% от максимальной интенсивности. Тогда ширина теневого фокального пятна равна  $FWHM = 0,42\lambda$ , а ширина кольца равна  $FWHM = 0,39\lambda$ .

Проведем аналогичный анализ для второй ловушки (рис. 6). В этом случае высота максимумов на оптической оси (точки 1 и 3, рис. 6) в продольной плоскости составляет 85,7% и 84,9% от максимальной интенсивности соответственно, а длина  $L = 1,12\lambda$ .

Для сечения в области минимума также наблюдается формирование кольца с пиком, равным 96 % (вне оптической оси) от максимальной интенсивности. Ширина теневого фокального пятна равна  $\text{FWHM}=0,27\lambda$ . Ширина кольца равна  $\text{FWHM}=0,38\lambda$ .

Следует отметить, что для данного случая удалось получить компактную оптическую ловушку с минимальным диапазоном колебания значений интенсивности стенок ловушки от 0,8 % до 11,1 %.

### Заключение

В данной работе методом FDTD было проведено исследование особенностей фокусировки Гауссовых пучков и оптических вихрей различной ширины на дифракционных аксиконах и прямых и обратных кольцевых решетках переменной высоты. Была показана возможность подбора параметров освещающего пучка и субволнового элемента таким образом, что достижимо уменьшение размеров фокального пятна вплоть до  $0,26\lambda$ , формирование протяженной световой иглы, а также формирование оптических ловушек.

Анализ картины интенсивности электрического поля показал, что минимальный размер фокального пятна в максимуме на оптической оси для дифракционного аксикона был получен при высоте рельефа  $h=1,2\lambda$  для моды Лагерра–Гаусса (1,0) при  $p=2$   $\text{FWHM}=0,37\lambda$ , что лучше на 38,3 % для этого же типа пучка при высоте аксикона  $h=0,2\lambda$ . Минимальное фокальное пятно для прямой кольцевой решетки было получено для моды Лагерра–Гаусса (1,0) при  $p=6$  и максимальной высоте рельефа  $h=1,2\lambda$  ( $D=0,2\lambda$ )  $\text{FWHM}=0,35\lambda$ , что на 38,6 % меньше, чем для этого же типа пучка при высоте аксикона  $h=0,2\lambda$ . В случае обратных кольцевых решеток минимальный размер фокального пятна был получен для Гауссова пучка при  $p=6$  и максимальной высоте рельефа  $h=1,7\lambda$  ( $D=0,3\lambda$ )  $\text{FWHM}=0,48\lambda$ , что на 42,8 % меньше, чем для этого же типа пучка при высоте аксикона  $h=0,2\lambda$ . Следует отметить, что в непосредственной близости от края центральной зоны (на расстоянии  $0,1\lambda$ ) обратной кольцевой решетки (вне элемента) для Гауссова пучка при  $p=2$  и максимальной высоте рельефа  $h=2,2\lambda$  ( $D=0,4\lambda$ ) формируется узкое фокальное пятно с  $\text{FWHM}=0,26\lambda$  (94,5 % от максимальной интенсивности), уширяющееся в дальнейшем до  $0,62\lambda$ .

Самая длинная световая игла была получена для случая обратной кольцевой решетки при максимальной высоте рельефа  $h=1,2\lambda$  ( $D=0,2\lambda$ ) для Гауссова пучка при  $p=6$  ( $\text{DOF}=4,88\lambda$ ), что длиннее лучшего рассмотренного случая для прямой кольцевой решетки и того же типа пучка ( $\text{DOF}=4,6\lambda$ ) и дифракционного аксикона при  $h=0,2\lambda$  и моды Лагерра–Гаусса (1,0) с  $\sigma=7$  мкм ( $\text{DOF}=2,44\lambda$ ).

В работе также показана возможность формирования одиночных оптических ловушек с помощью обратных субволновых кольцевых решеток, причем лучший результат был получен для моды Лагерра–

Гаусса (1,0) при  $p=6$ . В этом случае для максимальной высоты рельефа  $h=1,7\lambda$  ( $D=0,3\lambda$ ) наблюдается формирование узкой ( $\text{FWHM}=0,27\lambda$ ) и протяженной ( $L=1,12\lambda$ ) области пониженной интенсивности на оптической оси. Для данной оптической ловушки получен минимальный диапазон колебаний значений интенсивности стенок ловушки (от 0,8 % до 11,1 %).

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения Государственного задания (проект № FSSS-2023-0006) в частях «Введение», «Входные пучки и рассматриваемые 3D-элементы», «Исследование дифракции лазерного излучения на дифракционных аксиконах», а также за счет средств программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» в остальных частях.

### References

- [1] Siew SY, Li B, Gao F, Zheng HY, Zhang W, Guo P, Xie SW, Song A, Dong B, Luo LW, Li C, Lo GQ. Review of silicon photonics technology and platform development. *J Lightw Technol* 2021; 39(13): 4374-4389. DOI: 10.1109/JLT.2021.3066203.
- [2] Shastri BJ, Tait AN, de Lima TF, Pernice WH, Bhaskaran H, Wright CD, Prucnal PR. Photonics for artificial intelligence and neuromorphic computing. *Nat Photon* 2021; 15(2): 102-114. DOI: 10.1038/s41566-020-00754-y.
- [3] Liu S, Feng J, Tian Y, Zhao H, Jin L, Ouyang B, Zhu J, Guo J. Thermo-optic phase shifters based on silicon-on-insulator platform: State-of-the-art and a review. *Front Optoelectron* 2022; 15(1): 9. DOI: 10.1007/s12200-022-00012-9.
- [4] Genty G, Salmela L, Dudley JM, Brunner D, Kokhanovskiy A, Kobtsev S, Turitsyn SK. Machine learning and applications in ultrafast photonics. *Nat Photon* 2021; 15(2): 91-101. DOI: 10.1038/s41566-020-00716-4.
- [5] Khonina SN, Kazanskiy NL, Butt MA, Karpeev SV. Optical multiplexing techniques and their marriage for on-chip and optical fiber communication: a review. *Opto-Electron Adv* 2022; 5(8): 210127. DOI: 10.29026/oea.2022.210127.
- [6] Guilhot D, Ribes-Pleguezuelo P. Laser technology in photonic applications for space. *Instruments* 2019; 3(3): 50. DOI: 10.3390/instruments3030050.
- [7] Barmoutis P, Papaioannou P, Dimitropoulos K, Grammalidis N. A review on early forest fire detection systems using optical remote sensing. *Sensors* 2020; 20(22): 6442. DOI: 10.3390/s20226442.
- [8] Butt M, Khonina SN, Kazanskiy NL. Optical elements based on silicon photonics. *Computer Optics* 2019; 43(6): 1079-1083. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-1079-1083.
- [9] Wendisch FJ, Rey M, Vogel N, Bourret GR. Large-scale synthesis of highly uniform silicon nanowire arrays using metal-assisted chemical etching. *Chem Mater* 2020; 32(21): 9425-9434. DOI: 10.1021/acs.chemmater.0c03593.
- [10] Savelyev D, Kazanskiy N. Near-field vortex beams diffraction on surface micro-defects and diffractive axicons for polarization state recognition. *Sensors* 2021; 21(6): 1973. DOI: 10.3390/s21061973.
- [11] Shi Y, Zhang Y, Wan Y, Yu Y, Zhang Y, Hu X, Xiao X, Xu H, Zhang L, Pan B. Silicon photonics for high-capacity



- data communications. *Photonics Res* 2022; 10(9): A106-A134. DOI: 10.1364/PRJ.456772.
- [12] Cheng L, Mao S, Li Z, Han Y, Fu HY. Grating couplers on silicon photonics: Design principles, emerging trends and practical issues. *Micromachines* 2020; 11(7): 666. DOI: 10.3390/mi11070666.
- [13] Wu S, Mu X, Cheng L, Mao S, Fu HY. State-of-the-art and perspectives on silicon waveguide crossings: A review. *Micromachines* 2020; 11(3): 326. DOI: 10.3390/mi11030326.
- [14] Fatkhiev DM, Butt MA, Grakhova EP, Kutluyarov RV, Stepanov IV, Kazanskiy NL, Khonina SN, Lyubopytov VS, Sultanov AK. Recent advances in generation and detection of orbital angular momentum optical beams – A review. *Sensors* 2021; 21(15): 4988. DOI: 10.3390/s21154988.
- [15] Shen Y, Wang X, Xie Z, Min C, Fu X, Liu Q, Gong M, Yuan X. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities. *Light Sci Appl* 2019; 8: 90. DOI: 10.1038/s41377-019-0194-2.
- [16] Savelyev DA. The investigation of the features of focusing vortex super-Gaussian beams with a variable-height diffractive axicon. *Computer Optics* 2021; 45(2): 214-221. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-862.
- [17] Savelyev DA. Peculiarities of focusing circularly and radially polarized super-Gaussian beams using ring gratings with varying relief height. *Computer Optics* 2022; 46(4): 537-546. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1131.
- [18] Zhu F, Huang S, Shao W, Zhang J, Chen M, Zhang W, Zeng J. Free-space optical communication link using perfect vortex beams carrying orbital angular momentum (OAM). *Opt Commun* 2017; 396: 50-57. DOI: 10.1016/j.optcom.2017.03.023.
- [19] Khonina SN, Karpeev SV, Butt MA. Spatial-light-modulator-based multichannel data transmission by vortex beams of various orders. *Sensors* 2021; 21(9): 2988. DOI: 10.3390/s21092988.
- [20] Savelyev D, Degtyarev S. Features of the optical vortices diffraction on silicon ring gratings. *Optical Memory and Neural Networks* 2022; 31(1): 55-66. DOI: 10.3103/S1060992X22050095.
- [21] Savelyev DA. The comparison of laser radiation focusing by diffractive axicons and annular gratings with variable height using high-performance computer systems. 2021 *Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)* 2021: 2709-2716. DOI: 10.1109/PIERS53385.2021.9694860.
- [22] Bozinovic N, Yue Y, Ren Y, Tur M, Kristensen P, Huang H, Willner AE, Ramachandran S. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers. *Science* 2013; 340(6140): 1545-1548. DOI: 10.1126/science.1237861.
- [23] Sirenko AA, Marsik P, Bernhard C, Stanislavchuk TN, Kiryukhin V, Cheong SW. Terahertz vortex beam as a spectroscopic probe of magnetic excitations. *Phys Rev Lett* 2019; 122(23): 237401. DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.237401.
- [24] Khonina SN, Ustinov AV, Volotovskiy SG, Ivliev NA, Podlipnov VV. Influence of optical forces induced by paraxial vortex Gaussian beams on the formation of a microrelief on carbazole-containing azopolymer films. *Appl Opt* 2020; 59(29): 9185-9194. DOI: 10.1364/AO.398620.
- [25] Paez-Lopez R, Ruiz U, Arrizon V, Ramos-Garcia R. Optical manipulation using optimal annular vortices. *Opt Lett* 2016; 41(17): 4138-4141. DOI: 10.1364/OL.41.004138.
- [26] Lamperska W, Masajada J, Drobczyński S, Wasylczyk P. Optical vortex torque measured with optically trapped microbarbells. *Appl Opt* 2020; 59(15): 4703-4707. DOI: 10.1364/AO.385167.
- [27] Savelyev DA, Karpeev SV. Development of 3D microstructures for the formation of a set of optical traps on the optical axis. *Photonics* 2023; 10(2): 117. DOI: 10.3390/photronics10020117.
- [28] Yang Z, Lin X, Zhang H, Ma X, Zou Y, Xu L, Xu Y, Jin L. Design of bottle beam based on dual-beam for trapping particles in air. *Appl Opt* 2019; 58(10): 2471-2480. DOI: 10.1364/AO.58.002471.
- [29] Savelyev DA, Khonina SN. Characteristics of sharp focusing of vortex Laguerre-Gaussian beams. *Computer Optics* 2015; 39(5): 654-662. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-654-662.
- [30] Khonina SN, Kazanskiy NL, Khorin PA, Butt MA. Modern types of axicons: New functions and applications. *Sensors* 2021; 21(19): 6690. DOI: 10.3390/s21196690.
- [31] Supp S, Jahns J. Coaxial superposition of Bessel beams by discretized spiral axicons. *J Eur Opt Soc Rapid Publ* 2018; 14: 18. DOI: 10.1186/s41476-018-0086-8.
- [32] Balčytis A, Hakobyan D, Gabalis M, Žukauskas A, Urbonas D, Malinauskas M, Petruškevičius R, Brasselet E, Juodkazis S. Hybrid curved nano-structured micro-optical elements. *Opt Express* 2016; 24(15): 16988. DOI: 10.1364/OE.24.016988.
- [33] Khonina SN, Ustinov AV. Binary multi-order diffraction optical elements with variable fill factor for the formation and detection of optical vortices of arbitrary order. *Appl Opt* 2019; 58(30): 8227-8236. DOI: 10.1364/AO.58.008227.
- [34] Yu S. Potentials and challenges of using orbital angular momentum communications in optical interconnects. *Opt Express* 2015; 23(3): 3075. DOI: 10.1364/OE.23.003075.
- [35] Prather DW, Shi S. Formulation and application of the finite-difference time-domain method for the analysis of axially symmetric diffractive optical elements. *J Opt Soc Am A* 1999; 16(5): 1131-1142. DOI: 10.1364/JOSAA.16.001131.
- [36] Hanson JC. Broadband RF phased array design with MEEP: Comparisons to array theory in two and three dimensions. *Electronics* 2021; 10(4): 415. DOI: 10.3390/electronics10040415
- [37] Savelyev DA. The investigation of focusing of cylindrically polarized beams with the variable height of optical elements using high-performance computer systems. *Proc SPIE* 2021; 11793: 117930X. DOI: 10.1117/12.2591993.
- [38] Zhuang J, Zhang L, Deng D. Tight-focusing properties of linearly polarized circular Airy Gaussian vortex beam. *Opt Lett* 2020; 45(2): 296-299. DOI: 10.1364/OL.45.000296.
- [39] Khonina SN, Kazanskiy NL, Ustinov AV, Volotovskiy SG. The lensacon: nonparaxial effects. *J Opt Technol* 2011; 78(11): 724-729. DOI: 10.1364/JOT.78.000724.
- [40] Ding X, Ren Y, Lu R. Shaping super-Gaussian beam through digital micro-mirror device. *Sci China Phys Mech* 2015; 58(3): 1-6. DOI: 10.1007/s11433-014-5499-9.
- [41] Darafsheh A, Bollinger D. Systematic study of the characteristics of the photonic nanojets formed by dielectric microcylinders. *Opt Commun* 2017; 402: 270-275. DOI: 10.1016/j.optcom.2017.06.004.
- [42] Xing H, Zhou W, Wu Y. Side-lobes-controlled photonic nanojet with a horizontal graded-index microcylinder. *Opt Lett* 2018; 43(17): 4292-4295. DOI: 10.1364/OL.43.004292

- [43] Wei P-K, Chang W-L, Lee K-L, Lin E-H. Focusing subwavelength light by using nanoholes in a transparent thin film. *Opt Lett* 2009; 34(12): 1867-1869. DOI: 10.1364/OL.34.001867.
- [44] Savelyev DA, Khonina SN. Numerical analysis of subwavelength focusing using a silicon cylinder. *Computer Optics* 2014; 38(4): 638-642. DOI: 10.18287/0134-2452-2014-38-4-638-642.
- [45] Ashkin A, Dziedzic JM, Bjorkholm JE, Chu S. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles. *Opt Lett* 1986; 11(5): 288-290. DOI: 10.1364/OL.11.000288.
- [46] Dai X, Fu W, Chi H, Mesias VSD, Zhu H, Leung CW, Liu W, Huang J. Optical tweezers-controlled hotspot for sensitive and reproducible surface-enhanced Raman spectroscopy characterization of native protein structures. *Nat Commun* 2021; 12: 1292. DOI: 10.1038/s41467-021-21543-3.
- [47] Gong Z, Pan YL, Videen G, Wang C. Optical trapping and manipulation of single particles in air: Principles, technical details, and applications. *J Quant Spectrosc Radiat Transf* 2018; 214: 94-119. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.04.027.

### *Сведения об авторах*

**Савельев Дмитрий Андреевич**, доцент кафедры технической кибернетики Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва. Кандидат физико-математических наук, магистр прикладной математики и информатики, младший научный сотрудник лаборатории лазерных измерений Института систем обработки изображений РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, оптическая и цифровая обработка изображений, нанофотоника, сингулярная оптика, поляризационные преобразования, высокопроизводительные вычисления, наука о данных (Data Science), нейронные сети. E-mail: [dmitrey.savelyev@yandex.ru](mailto:dmitrey.savelyev@yandex.ru).

ГРНТИ: 29.31.15

Поступила в редакцию 31 июля 2023 г. Окончательный вариант – 9 августа 2023 г.

---

# Features of a Gaussian beam near-field diffraction upon variations in the relief height of subwavelength silicon optical elements

D.A. Savelyev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University, 443086, Samara, Russia, Moskovskoye Shosse 34;

<sup>2</sup>IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS,  
443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya 151

## Abstract

Features of the near-field diffraction of Gaussian beams and Laguerre-Gauss modes by silicon subwavelength optical elements with varying relief height were studied in this paper using a finite-difference time-domain method. Diffractive axicons and subwavelength ring gratings were considered as the optical elements with varying relief height. It was shown that the height of individual rings of the ring grating relief can be selected in such a way that the focal spot size is reduced to  $0.26\lambda$ , an extended intensity line of length up to  $4.88\lambda$  is generated and optical traps are formed.

**Keywords:** Gaussian beams, optical vortices, silicon ring gratings, diffractive axicon, sharp focusing, optical trap, FDTD.

**Citation:** Savelyev DA. Features of a Gaussian beam near-field diffraction upon variations in the relief height of subwavelength silicon optical elements. *Computer Optics* 2023; 47(6): 938-947. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1402.

**Acknowledgements:** This work was partly funded by the RF Ministry of Science and Higher Education within the government project under grant No. FSSS-2023-0006 (Sections "Introduction", "Incident beams and analyzed 3D elements", and "Investigation of the diffraction of laser beams by diffractive axicons"), with the rest part of the work funded from the program of strategic academic leadership "Priority 2030".

---

## Author's information

**Dmitry Andreevich Savelyev**, Associate Professor and senior scientist of Samara National Research University (Engineering Cybernetics department, Science and Research Laboratory of Automated Systems of Science Researches). Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Master of Applied Mathematics and Computer Science, Junior researcher at the Laboratory of Laser Measurements of the IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Research interests: diffractive optics, optical and digital image processing, nanophotonics, singular optics, polarization transformations, high-performance computing, data science, neural networks.

E-mail: [dmitrey.savelyev@yandex.ru](mailto:dmitrey.savelyev@yandex.ru).

---

*Received July 31, 2023. The final version – August 9, 2023.*

---