

# Исследование преобразований световых пучков при помощи волноводов

М.В. Забловская<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

**Аннотация.** В данной работе проводилось исследование преобразований пучков Гаусса-Лагерра, а также пучков Гаусса при помощи волноводов. Проведено исследование влияния типа волновода на степень искажения пучка.

## 1. Введение

Модовые световые пучки, сохраняющие поперечное распределение поля при распространении, привлекают повышенный интерес многих исследователей [1-3], т.к. благодаря своим свойствам такие пучки имеют широкий спектр применений [4, 5]. Свойство самовоспроизведения тесно связано со свойством инвариантности (сохранения, неизменяемости), которое является относительным и определяется по отношению к некоторому воздействию. В упомянутых выше работах рассматривалась инвариантность световых пучков (с точностью до масштаба) к оператору распространения в свободном пространстве, прохождению через линзовые системы, усечению диафрагмой и повороту. Также рассматривались свойства периодического самовоспроизведения (повторения с точностью до масштаба) светового поля на определенных расстояниях при распространении в однородной среде. К полям с продольно-периодическими свойствами также относятся "вихревые" световые пучки, которые объединяют в себе свойства инвариантности к распространению (структура поперечного сечения сохраняется с точностью до поворота) и периодичности (повторение происходит через расстояние, за которое совершится полный оборот).

Инвариантность к оператору распространения или преобразованию Френеля демонстрирует световые моды в различных оптических средах: Бесселевы моды - в свободном пространстве, моды Гаусса-Лагерра и Гаусса-Эрмита - в оптической среде с параболическим показателем преломления. Гауссовы моды также можно считать модами свободного пространства с точностью до масштаба. Заметим, что свойством инвариантности к оператору распространения обладает каждая мода в отдельности. Произвольная композиция световых мод, в общем случае, таким свойством не обладает. В работах [6-8] получены условия, позволяющие формировать суперпозиции световых мод с инвариантными свойствами.

Гауссовы моды также обладают инвариантностью к прохождению через линзовые системы. Известен ряд функций, инвариантных к преобразованию Фурье в бесконечных пределах. Например, в [9, 10] рассматривается способ синтеза объектов, инвариантных к преобразованию Фурье путем композиции исходной функций и ее Фурье-образа. Однако, при введении диафрагмы свойство Фурье-инвариантности таких объектов нарушается. Более удобными для диафрагмирования являются функции Гаусса-Эрмита и Гаусса-Лагерра, энергия которых как в

объектной, так и частотной плоскостях сконцентрирована на ограниченном отрезке. Хотя, строго говоря, эти функции инвариантны к преобразованию Фурье в бесконечных пределах. Собственными функциями ограниченных операторов распространения являются вытянутые сфероидальные волновые функции [11] и их обобщения [12, 13]. Суперпозиция собственных функций, аппроксимирующая некоторое световое распределение, будет обладать модовым характером при прохождении через оптические линзовые системы с ограниченной апертурой. Т. е., изображение будет устойчиво к дифракционным эффектам, связанным с ограниченными размерами апертуры оптической системы [10].

## 2. Исследование поляризационных преобразований

В работе [14] рассматривалось усовершенствование метода согласованных синусоидальных мод, основанное на применении формы записи характеристического уравнения. Метод реализован для мод волноводов.

В работе [15] предложена и численно исследована новая структура оптических резонаторов в пересечении гребенчатых фотоннокристаллических волноводов. Исследованы свойства симметрии возбуждаемых резонансных мод ТЕ-поляризации. Установлено, что резонансная мода обладает одной осью симметрии в цилиндрическом резонаторе и двумя осями симметрии в кольцевом резонаторе. Показано, что резонансная мода с двумя осями симметрии позволяет реализовать эффективный оптический резонатор в пересечении гребенчатых фотоннокристаллических волноводов. Исследованы способы оптимизации предложенных резонаторов. Во-первых, рассмотрена оптимизация с помощью введения дополнительной щели в область резонатора. Во-вторых, исследованы возможности нелинейных материалов с различным индексом рефракции. Рассчитанные резонаторы имеют добротность около 104 и малый модовый объём.

Одним из способов оптимизации формы резонансной моды является введение дополнительной переходной области между зоной резонатора и зоной фотонного кристалла. Оптимизация формы резонансной моды позволяет также усилить электрическое поле в заданных областях резонатора. Например, использование щелевого резонатора даёт возможность усилить электрическое поле в щели резонатора.

В работе [16] разработан математический аппарат для описания распространения волн в металлическом волноводе в цилиндрической системе координат. Показано преобразование конической волны с круговой поляризацией в вихревой цилиндрически поляризованный пучок на основе разложения поля по векторным цилиндрическим модам.

Гауссовы функции являются модами оптического волокна с квадратичной зависимостью показателя преломления. Однако, гауссовы моды сохраняют свою структуру и в свободном пространстве, изменяясь лишь масштабно. Многомодовые гауссовы пучки могут обладать свойствами самовоспроизведения [17].

Пучок Гаусса-Лагерра задается по формуле:

$$S_{nm}(r, \theta) = \frac{2\sqrt{\pi(n-m)!}}{a\sqrt{(n!)^3}} \left(\frac{r}{a}\right)^m \times \exp\left[-\frac{\left(\frac{r}{a}\right)^2}{2}\right] L_n^m\left(\left(\frac{r}{a}\right)^2\right) \exp[\pm im\theta],$$

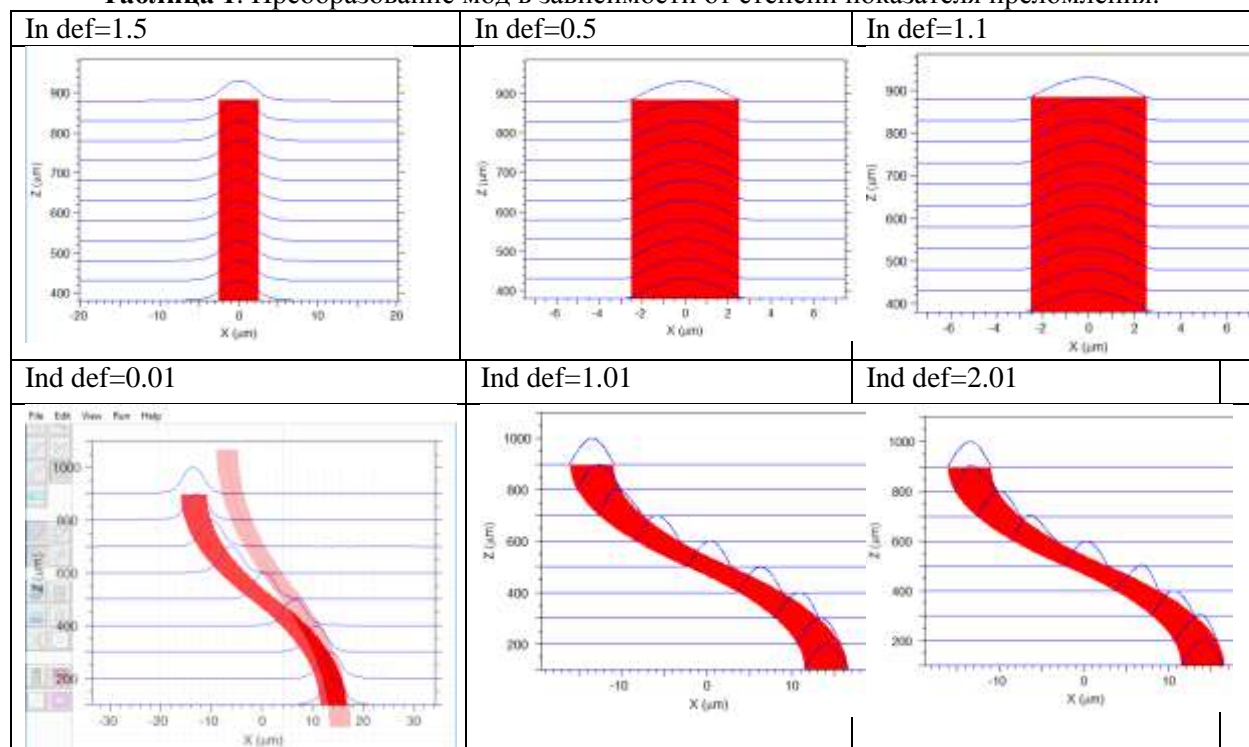
где  $L_n^m(x) = (-1)^m \frac{d^m}{dx^m} [L_{m+n}(x)]$  – обобщенный многочлен Лагранжа,  $r^2 = x^2 + y^2$ ,  $\theta = \arctg \frac{y}{x}$ .

Общая функция Гаусса задается следующим образом:

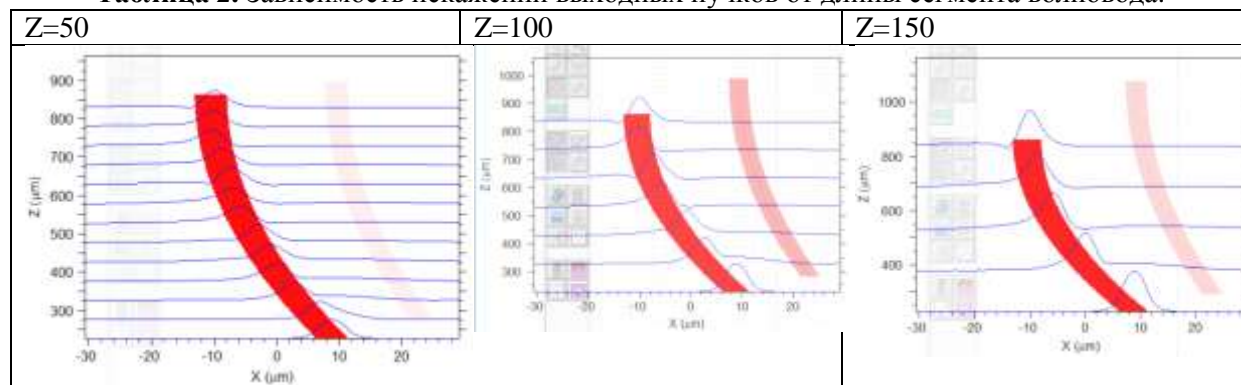
$$S_{nm}(r, \theta) = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} \times \exp\left[\frac{(x - \mu)^2}{2\delta^2}\right]$$

Рассмотрим влияние формы волновода на выходной Гауссов пучок. В таблице 1 представлены результаты моделирования прохождения пучка Гаусса в зависимости от формы волновода и его показателя преломления. В таблице 2 представлены результаты моделирования прохождения пучка Гаусса в зависимости от длины сегмента волновода.

**Таблица 1.** Преобразование мод в зависимости от степени показателя преломления.



**Таблица 2.** Зависимость искажений выходных пучков от длины сегмента волновода.



Проведем моделирование прохождения Гауссова пучка через волновод, изменяя толщину волновода (таблица 3).

### 3. Заключение

Была выявлена зависимость преобразований гауссовых мод от параметров волновода. Наблюдается прямо пропорциональная зависимость между толщиной волновода и степенью искажения выходного пучка. Результаты моделирования показали пропорциональную зависимость между длиной сегмента волновода и степенью искажения светового пучка.

### 4. Благодарности

Данная работа была выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-07-00505 А).

**Таблица 3.** Влияние толщины волновода на преобразование гауссовых мод.

Толщина (мкм)	Прохождение через волновод	3D разрез
5		
15		
25		
35		

## 5. Литература

- [1] Overfelt, P.L. Comparison of the propagation characteristics of Bessel, Bessel-Gauss, and Gaussian beams diffracted by a circular aperture / P.L. Overfelt, C.S. Kenney // J. Opt. Soc. Am. A. – 1991. – Vol. 8(5). – P. 732-744.
- [2] Padgett, M. An experiment to observe the intensity and phase structure of Laguerre-Gaussian laser modes / M. Padgett, J. Arlt, N. Simpson, L. Allen // Am. J. Phys. – 1996. – Vol. 64(1). – P. 77-82.
- [3] Котляр, В.В. Алгоритм расчета ДОО для генерации вращающихся модальных изображений / В.В. Котляр, В.А. Сойфер, С.Н. Хонина // Автометрия. – 1997. – № 5. – С. 46-54.
- [4] Котляр, В.В. Вращение световых многомодовых пучков Гаусса-Лагерра в свободном пространстве / В.В. Котляр, В.А. Сойфер, С.Н. Хонина // Письма в ЖТФ. – 1997. – Т. 23, № 17. – С. 1-6.
- [5] Хонина, С.Н. Формирование и передача на расстояние изображений с помощью мод Гаусса-Лагерра // Компьютерная оптика. – 1998. – Т. 18. – С. 71-82.
- [6] Хонина, С.Н. Дифракционные оптические элементы, согласованные с модами Гаусса-Лагерра / С.Н. Хонина, В.В. Котляр, В.А. Сойфер // Оптика и спектроскопия. – 1998. – Т. 85, № 4. – С.695-703.
- [7] Хонина, С.Н. Формирование мод Гаусса-Эрмита с помощью бинарных ДОО. II. Оптимизация апертурной функции // Компьютерная оптика. – 1998. – Т. 18. – С. 28-36.

- [8] Khonina, S.N. Diffraction optical elements matched to the Gauss-Laguerre modes / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer // Optics and Spectroscopy. – 1998. – Vol. 85(4). – P. 636-644.
- [9] Piestun, R. Propagation-invariant wave fields with finite energy / R. Piestun, Y.V. Schechner, J. Shamir // J. Opt. Soc. Am. A. – 2000. – Vol. 17(2). – P. 294-303.
- [10] Khonina, S.N. Gauss-Laguerre modes with different indices in prescribed diffraction orders of a diffractive phase element / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, R.V. Skidanov, V.A. Soifer, P. Laakkonen, J. Turunen // Optics Comm. – 2000. – Vol. 175. – P. 301-308.
- [11] Patorski, K. The self-imaging phenomenon and its applications // Progress in optics. – 1989. – Vol. 27.
- [12] Кириленко, М.С. Расчёт собственных функций изображающей двухлинзовой системы в условиях осевой симметрии / М.С. Кириленко, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 3. – С. 412-417.
- [13] Кириленко, М.С. Вычисление собственных функций ограниченного дробного преобразования Фурье / М.С. Кириленко, Р.О. Зубцов, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 3. – С. 332-338. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-3-332-338.
- [14] Котляр, В.В. Расчет пространственных мод оптических волноводов с неоднородным поперечным сечением методом согласованных синусоидальных мод / В.В. Котляр, Я.О. Шуюпова // Компьютерная оптика. – 2003. – Т. 25. – С. 41-48.
- [15] Казанский, Н.Л. Оптический нанорезонатор в пересечении гребенчатых фотоннокристаллических волноводов / Н.Л. Казанский, П.Г. Серафимович, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 4. – С. 426-431.
- [16] Харитонов, С.И. Преобразование конической волны с круговой поляризацией в вихревой цилиндрически поляризованный пучок в металлическом волноводе / С.И. Харитонов, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 2. – С. 197-211. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-2-197-211.
- [17] Хонина, С.Н. Экспериментальное формирование и селекция мод Гаусса-Эрмита с помощью ДОО // Компьютерная оптика. – 2002. – Т. 23. – С. 15-22.

## Transformation of light beams using waveguides

M.V. Zablovskaia<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

**Abstract.** In this paper, we studied the transformations of Gauss-Laguerre beams, as well as Gauss beams using waveguides. The influence of the waveguide type on the degree of beam distortion was studied.