

# Исследование влияния количества уровней квантования и технологических ошибок на ФРТ

С.В. Ганчевская<sup>1,2</sup>, Р.В. Скиданов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

**Аннотация.** В работе рассмотрено влияние радиальной технологической ошибки при изготовлении дифракционной линзы с разным количеством уровней квантования. Представлены результаты моделирования 8, 16-уровневых и полутонковой дифракционной линзы.

## 1. Введение

Развитие технологий формирования микрорельефов с высотой больше микрометра позволило изготавливать дифракционные [1, 2] или гармонические линзы [3], аппроксимирующие практически любую асферическую поверхность [4]. В этом случае необходимо компенсировать хроматические искажения [4,5,6], но с увеличением высоты рельефа хроматические aberrации уменьшаются [3]. Однако увеличение высоты рельефа приводит к существенному росту абсолютной величины отклонения микрорельефа от расчетного, что связано с зернистостью и нелинейностью свойств резиста, нестабильностью мощности лазера, ошибкой системы управления мощностью лазерного пучка. Величина отклонения поверхности микрорельефа от расчетного значения составляет около 50нм для рельефа высотой 5мкм. На первый взгляд это немного, однако, учитывая, что эти отклонения носят стохастический характер, наклон поверхности меняется довольно сильно и расчет в геометрооптическом приближении процесса фокусировки такой линзой показывает значительное уширение функции рассеяния точки (ФРТ). В качестве альтернативы гладкому микрорельефу предлагается использовать микрорельеф с ограниченным количеством уровней (8, 16). В этом случае локальный наклон микрорельефа определяется расположением уровней и почти не влияет на ширину функции рассеяния точки.

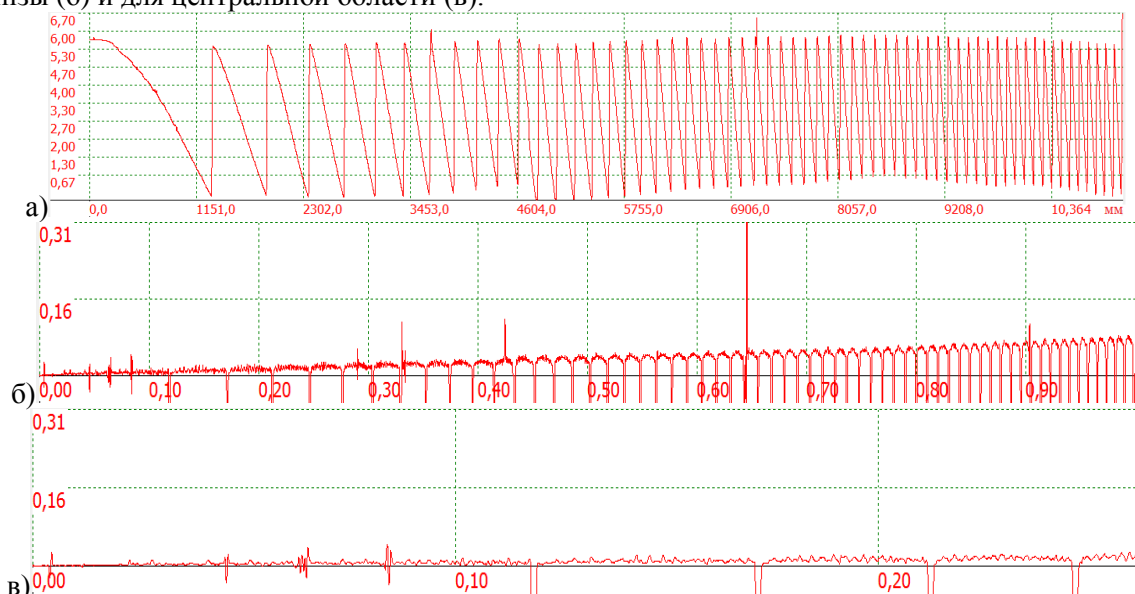
Влияние квантования фазовой функции на качество работы фокусирующих дифракционных оптических элементов (ДОЭ) подробно разобрано в главе 5 монографии [7]. В качестве характеристик, используемых для оценки качества работы фокусирующих ДОЭ, в [7] используется дифракционная эффективность фокусировки и среднеквадратичное отклонение полученного распределения интенсивности от требуемого. Для других типов дифракционных оптических элементов в работе [8] предложено использовать среднеквадратичное отклонение распределений интенсивности, полученных для идеального и исследуемого оптических элементов. Для таких оценок использовалось рассчитанное световое поле в рабочей области ДОЭ. В работе [9] проведено исследование влияния ошибок степенного травления на

формирование распределения интенсивности дифракционными линзами. Однако в [9] рассматривался идеализированный случай одинаковой ошибки при формировании сразу набора уровней в степенном травлении. При использовании технологии прямой лазерной записи ошибки при формировании отдельных уровней будут влиять только на дифракционную эффективность.

В настоящей работе рассматривается влияние технологических ошибок на ошибку формирования распределения интенсивности и дифракционную эффективность дифракционной линзой с разным количеством уровней.

## 2. Экспериментальное формирование рельефа.

Наличие технологических ошибок формирования микрорельефа при малой относительной ошибке оказывает существенное влияние на ФРТ, для иллюстрации на рисунке 1 представлена профилограмма радиального сечения изготовленной на фоторезисте гармонической линзы с фокусным расстоянием 70 мм и высотой микрорельефа 6 мкм. Также на рисунке 1 приведен график первой производной профилограммы по радиальной координате по всему размеру линзы (б) и для центральной области (в).



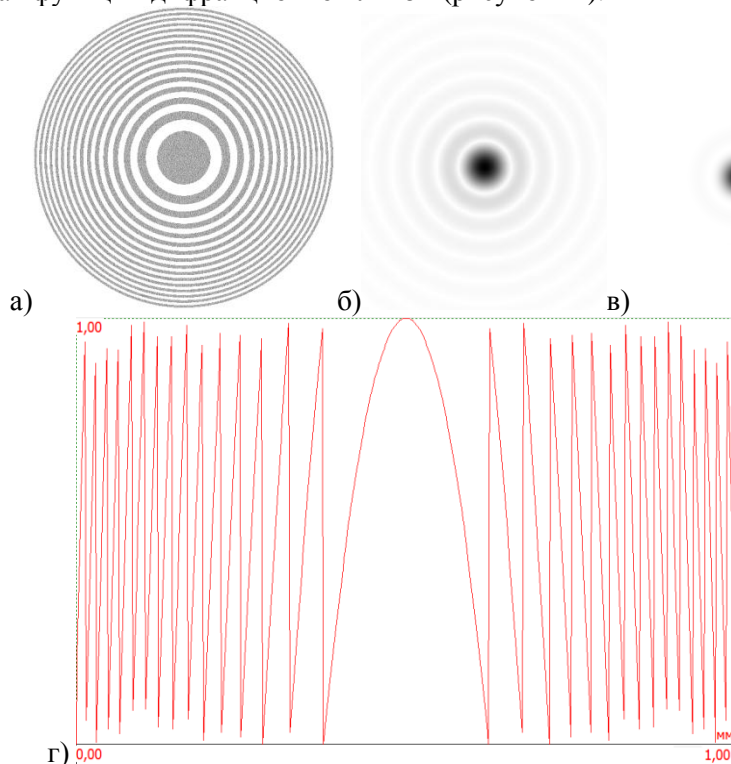
**Рисунок 1.** Профилограмма микрорельефа гармонической линзы с фокусным расстоянием 70мм и высотой микрорельефа 6мкм (а), график первой производной профилограммы (пики соответствуют границам зон) (б), график первой производной профилограммы (центральная область) (в).

Как видно из рисунка 1, сформированный микрорельеф почти не содержит заметных ошибок, в то время как график производной по радиальной координате показывает, что ошибка наклона микрорельефа сопоставима с величиной самого наклона, особенно в центральных областях линзы (рисунок 1в). Это значит, что при фокусировке разные участки линзы будут фокусировать свет на расстояниях, не совпадающих с заданным фокусным расстоянием. В связи с этим возникает идея искусственного ограничения количества уровней гармонической линзы, чтобы технологическая ошибка приводила только к росту коэффициента светорассеяния линзы, но не меняла ширину ФРТ.

## 3. Моделирование дифракционной линзы с количеством уровней $n=8$ , $n=16$ .

Для проверки идеи ограничения количества уровней линзы проведено моделирование фокусировки дифракционной линзы, в фазовую функцию которой добавлялись небольшие искажения, величина которых зависела от радиальной координаты. Моделирование осуществлялось с использованием преобразования Френеля.

На рисунке 2 показаны результаты моделирования «идеальной» дифракционной линзы. На рисунке 2а представлена фазовая функция дифракционной линзы, амплитуда дифракционной линзы (рисунок 2б), распределение интенсивности дифракционной линзы (рисунок 2в) и сечение фазовой функции дифракционной линзы (рисунок 2г).



**Рисунок 2.** Фазовая функция дифракционной линзы (а), амплитуда дифракционной линзы (б), распределения интенсивности в фокальной области (в), сечение фазовой функции дифракционной линзы (г).

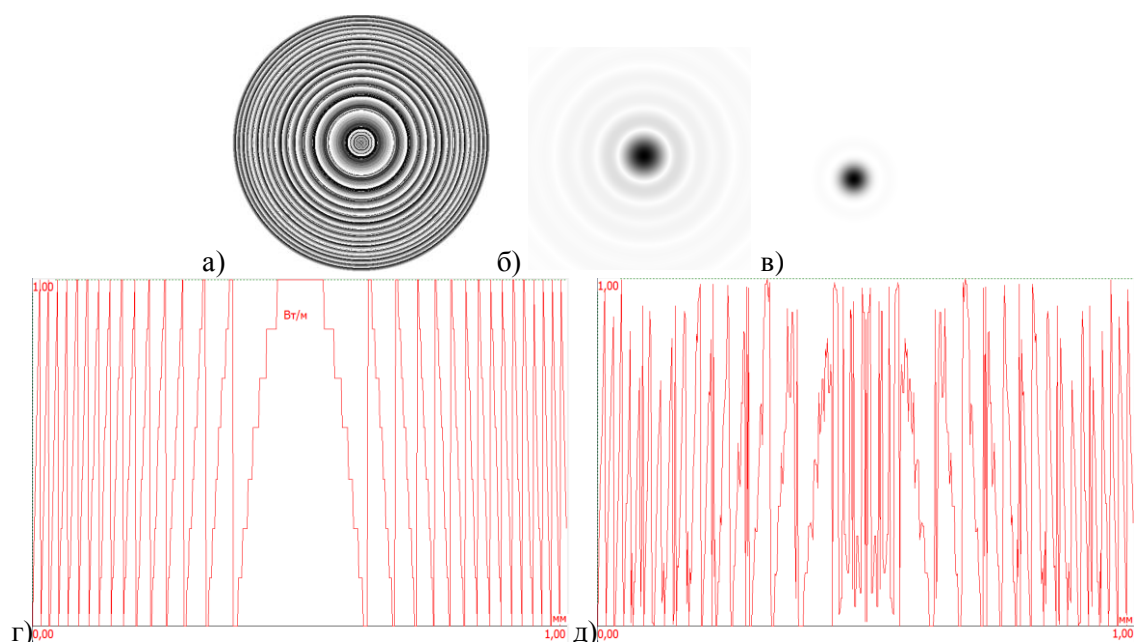
Посмотрим, как изменится сечение линзы, если использовать дифракционную линзу с количеством уровней  $n=8$  при внесении радиальной технологической ошибки.

На рисунке 3 показаны фазовая функция дифракционной линзы с количеством уровней  $n=8$  и внесенной радиальной технологической ошибкой (а), распределения интенсивности в фокальной области (б), сечение фазовой функции линзы (в) и сечение фазовой функции линзы с внесением радиальной технологической ошибки (г).

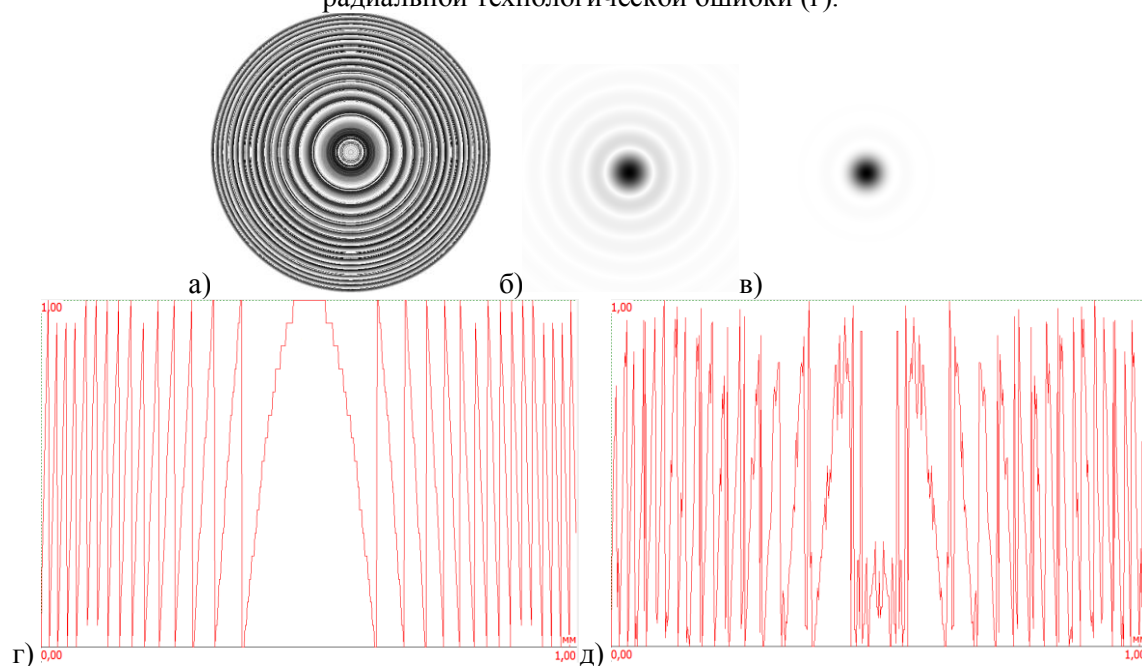
Из рисунка 3 видно, что при внесении искажении в микрорельеф дифракционной линзы с количеством уровней  $n=8$ , пики на сечении линзы становятся практически стохастическими. Тем не менее, визуальное ФРТ, полученная дифракционной линзой с количеством уровней  $n=8$  и радиальными искажениями, не отличается от ФРТ, полученной «идеальной» дифракционной линзой.

Рассмотрим дифракционную линзу с количеством уровней  $n=16$  и внесем радиальную технологическую ошибку. На рисунке 4 показаны фазовая функция дифракционной линзы с количеством уровней  $n=16$  и внесенной радиальной технологической ошибкой (а), распределения интенсивности в фокальной области (б), сечение фазовой функции линзы (в) и сечение фазовой функции линзы с внесением радиальной технологической ошибки (г).

Как и для дифракционной линзы с количеством уровней  $n=8$  при внесении искажении в микрорельеф дифракционной линзы с количеством уровней  $n=16$ , пики на сечении линзы становятся практически стохастическими. ФРТ, полученные дифракционными линзами с количеством уровней  $n=8$  и  $n=16$  и радиальными искажениями, визуально не отличаются от ФРТ, полученной «идеальной» дифракционной линзой.

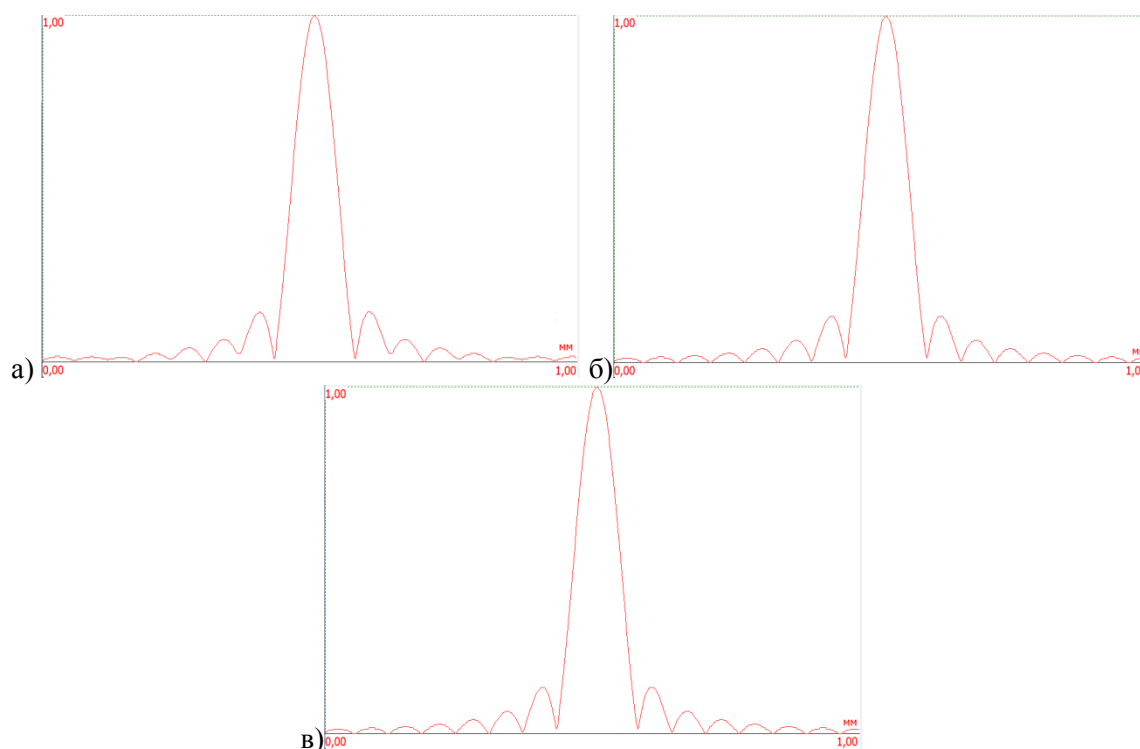


**Рисунок 3.** Фазовая функция дифракционной линзы с количеством уровней  $n=8$  и внесенной радиальной технологической ошибкой (а), распределения интенсивности в фокальной области (б), сечение фазовой функции линзы (в) и сечение фазовой функции линзы с внесением радиальной технологической ошибки (г).



**Рисунок 4.** Фазовая функция дифракционной линзы с количеством уровней  $n=8$  и внесенной радиальной технологической ошибкой (а), распределения интенсивности в фокальной области (б), сечение фазовой функции линзы (в) и сечение фазовой функции линзы с внесением радиальной технологической ошибки (г).

Сравним сечения амплитуды «идельной» дифракционной линзы (рисунок 5а), дифракционной линзы с количеством уровней  $n=8$  и внесенной радиальной технологической ошибкой (рисунок 5б), дифракционной линзы с количеством уровней  $n=16$  и внесенной радиальной технологической ошибкой (рисунок 5в).



**Рисунок 5.** Сечения амплитуды «идельной» дифракционной линзы (рисунок 5а), дифракционной линзы с количеством уровней  $n=8$  и внесенной радиальной технологической ошибкой (рисунок 5б), дифракционной линзы с количеством уровней  $n=16$  и внесенной радиальной технологической ошибкой (рисунок 5в).

Как видно из рисунка 5, визуальное сечение амплитуды практически не отличаются. На основе анализа результатов проведенных вычислительных экспериментов можно сделать вывод, что форма ФРТ практически не зависит от технологических ошибок при изготовлении многоуровневых дифракционных линз. Технологические ошибки влияют только на дифракционную эффективность работы таких линз. При наличии технологических ошибок должен возрастать уровень рассеянного излучения в фокальной плоскости, и при снижении дифракционной эффективности будет существенно снижаться качество формируемого изображения.

#### 4. Заключение

Форма ФРТ практически не зависит от технологических ошибок, главное – правильное расположение зон. Технологические ошибки влияют только на дифракционную эффективность работы дифракционных линз с разными уровнями квантования.

#### 5. Благодарности

Работа выполнена при поддержке проектов РФФИ 18-29-20045 (раздел 1), Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение № 007-ГЗ/ЧЗ363/26) (раздел 2).

#### 6. Литература

- [1] Казанский, Н.Л. Формирование изображений дифракционной многоуровневой линзой / Н.Л. Казанский, С.Н. Хонина, Р.В. Скиданов, А.А. Морозов, С.И. Харитонов, С.Г. Волоотовский // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, №3. – С. 425-434.
- [2] Sweeney, D.W. Harmonic diffractive lenses / D.W. Sweeney, G.E. Sommargren // Applied Optics. – 1995. – Vol.34(14). – P. 2469-2475.

- [3] Хонина, С.Н. Сравнительное исследование спектральных свойств асферических линз / С.Н. Хонина, А.В. Устинов, Р.В. Скиданов, А.А. Морозов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 3. – С. 363-369.
- [4] Карпеев, С.В. Исследование влияния широкополосного излучения на распределение интенсивности, формируемое дифракционным оптическим элементом / С.В. Карпеев, С.В. Алфёров, С.Н. Хонина, С.И. Кудряшов // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 689-694.
- [5] Грейсух, Г.И. Сравнительный анализ хроматизма дифракционных и рефракционных линз / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.А. Степенев // Компьютерная оптика. – 2005. – Т. 28, № 1. – С. 60-66.
- [6] Хонина, С.Н. Минимизация размера светового или теневого фокального пятна с контролируемым ростом боковых лепестков в фокусирующих системах с высокой числовой апертурой / С.Н. Хонина, С.Г. Вологовский // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 4. – С. 438-451.
- [7] Волков, А.В. Методы компьютерной оптики / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, Д.Л. Головашкин, Л.Л. Досколович, В.В. Котляр, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Соيفер, В.С. Соловьев, Г.В. Успенев, С.И. Харитонов, С.Н. Хонина – Москва, 2000.
- [8] Волков, А.В. Численное исследование дифракции света на дифракционных линзах / А.В. Волков, Р.В. Скиданов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. – 2000. – Т. 9. – С. 174-183.
- [9] Волков, А.В. Формирование микрорельефа дифракционных оптических элементов с использованием достижений микроэлектроники / А.В. Волков, Р.В. Скиданов // Компьютерная оптика. – 2001. – Т. 22. – С. 65-71.

## **Investigation of the influence of the number of quantization levels and technological errors on the point scattering function**

**S.V. Ganchevskaya<sup>1,2</sup>, R.V. Skidanov<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

<sup>2</sup>Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

**Abstract.** The influence of the radial technological error in the manufacture of a diffraction lens with a different number of quantization levels is considered. The simulation results of 8, 16-level and grayscale diffraction lenses are presented.