

Ограничение числа уровней квантования гармонической линзы как метод повышения качества формируемого изображения

Р.В.Скиданов, С.В.Ганчевская, В.С.Васильев, Н.Л.Казанский

Экспериментально исследованы характеристики (функции передачи модуляции) гармонических линз, изготовленных методом прямой лазерной записи по резисту. Промоделировано влияние технологических погрешностей при изготовлении линз на формирование функции рассеяния точки для гармонических линз с 32 и 256 уровнями квантования. Методом прямой лазерной записи изготовлены линзы с таким числом уровней. Экспериментально показано, что у гармонической линзы с 32 уровнями квантования функция передачи модуляции на высоких пространственных частотах (50 мм^{-1}) существенно больше.

Ключевые слова: дифракционная линза, гармоническая линза, квантованный микрорельеф, частотно-контрастная характеристика.

1. Введение

Развитие технологии прямой лазерной записи микрорельефов высотой более 1 мкм позволило изготавливать дифракционные [1, 2] или гармонические [3] линзы, аппроксимирующие практически любую асферическую поверхность [4]. При формировании изображений такими линзами хроматические искажения все еще достаточно велики [4–6], но с увеличением высоты рельефа они уменьшаются [3]; следовательно, очевидным путем снижения хроматизма является увеличение высоты микрорельефа. Однако это приводит к появлению нового источника искажений – к заметному росту абсолютной величины отклонения этого микрорельефа от расчетного [7], причина которого состоит в зернистости и нелинейности свойств резиста, в нестабильности мощности лазера, а также в ошибке в системе управления мощностью пучка лазерного излучения. Относительная величина отклонения высоты микрорельефа не меняется и составляет всего около 1% на участках с гладкой поверхностью. Такое значение относительной погрешности приводит к тому, что абсолютное отклонение поверхности микрорельефа от расчетного значения составляет 50–60 нм для рельефа высотой 6 мкм. На первый взгляд, это немного, однако, учитывая, что отклонения носят стохастический характер и меняются с каждым шагом записи (1 мкм), наклон поверхности изменится довольно сильно. 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

числом уровней. В этом случае локальный наклон микрорельефа определяется расположением уровней и почти не влияет на ширину ФРТ.

Однако слишком сильно уменьшать число уровней квантования также нельзя. Поскольку высота микрорельефа гармонической линзы равна 6 мкм, то для расчетной длины волны 550 нм фазовая функция примерно шесть раз меняется на 2π . Так как для однозначного задания наклона волнового фронта на каждые 2π фазовой функции нужны хотя бы три уровня квантования, то их минимальное число составляет 18. В настоящей работе было решено использовать 32 уровня квантования как минимальную степень двойки, превышающую 18. Скорее всего, существует некое оптимальное число уровней квантования, но его поиск требует дополнительного исследования.

Влияние квантования фазовой функции на качество работы фокусирующих дифракционных оптических элементов (ДОЭ) впервые описано в работе [8] (более подробно – в гл.5 монографии [9]). Для оценки качества работы фокусирующих ДОЭ в [9] используется дифракционная эффективность фокусировки и среднеквадратичное отклонение (СКО) полученного распределения интенсивности от требуемого. Для других типов ДОЭ в работе [10] предложено использовать СКО распределений интенсивности, полученных для идеального и исследуемого оптических элементов. Оценка проводилась с помощью рассчитанного светового поля в рабочей области ДОЭ. В работе [11] исследовалось влияние погрешностей степенного травления на формирование распределения интенсивности дифракционными линзами, однако рассматривался идеализированный случай одинаковой погрешности при формировании сразу целого набора уровней при степенном травлении. В случае использования технологии прямой лазерной записи погрешности при формировании отдельных уровней будут влиять только на дифракционную эффективность. В настоящей работе рассматривается влияние технологических погрешностей на погрешность формирования распределения интенсивности и дифракционную эффективность дифракционной линзы с разным числом уровней.

Р.В.Скиданов, С.В.Ганчевская, В.С.Васильев, Н.Л.Казанский. ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Россия, 443001 Самара, ул. Молодогвардейская, 151; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П.Королева, Россия, 443086 Самара, Московское ш., 34; e-mail: romans@ipsiras.ru

Поступила в редакцию 18 февраля 2020 г.

2. Расчет ФРТ для гармонических линз

Моделирование формирования ФРТ осуществлялось в рамках геометрической оптики путем трассировки множества параллельных лучей, проходящих через апертуру линз. Для проведения моделирования были рассчитаны две поверхности гармонических линз (с 256 и 32 уровнями квантования) с диаметрами 10 мм и фокусными расстояниями 55 мм для главной длины волны 550 нм; высота микрорельефа составляла 6 мкм. На рис. 1 представлены радиальные сечения поверхностей центральных областей этих линз.

К расчетным сечениям искусственно добавлялись отклонения, имитирующие технологические погрешности и составляющие 1% от высоты микрорельефа. Изображения сечений получившихся поверхностей в статье не приводятся, поскольку визуально отличить кривые с таким уровнем относительной погрешности невозможно. Получившиеся поверхности использовались для последующей трассировки большого числа ($\sim 10^7$) параллельных лучей в программном обеспечении, разработанном специально для моделирования гармонических линз. Результаты моделирования линз представлены в виде радиальных сечений ФРТ на рис. 2 (на рис. 2, б для демонстрации наличия фоновой засветки вокруг центрального пика по оси ординат использован логарифмический масштаб). В обычном масштабе средний уровень фоновой засветки составляет менее 0.1% от максимального значения и на рисунке не виден.

Как следует из рис. 2, линза с 32 уровнями квантования, в целом, имеет лучшую ФРТ, поскольку технологи-

ческие неровности на поверхности практически равномерно рассеивают свет по большой площади. Линза с 256 уровнями квантования из-за технологических погрешностей образует расширенное световое пятно вокруг центрального максимума, которое по уровню интенсивности сравнимо с самим максимумом. Такая форма ФРТ должна приводить к ухудшению функции передачи модуляции линзы с 256 уровнями квантования. Для проверки этого эффекта был проведен эксперимент.

3. Изготовление гармонических линз с 32 и 256 уровнями квантования и экспериментальное сравнение функций передачи модуляции обеих линз

Для проведения эксперимента на основе рассчитанных выше поверхностей методом прямой лазерной записи по фоторезисту были изготовлены две гармонические линзы. На рис. 3 представлены профили линз, измеренные на профилометре Tencor.

Как сказано выше, наличие технологических погрешностей формирования микрорельефа при малой относительной погрешности оказывает существенное влияние на ФРТ. Для иллюстрации на рис. 4, а приведен график первой производной профилограммы по радиальной координате по всему размеру линзы, а на рис. 4, б – только для центральной области.

Как видно из рис. 3 и 4, в целом, сформированный микрорельеф почти не содержит заметных погрешностей,

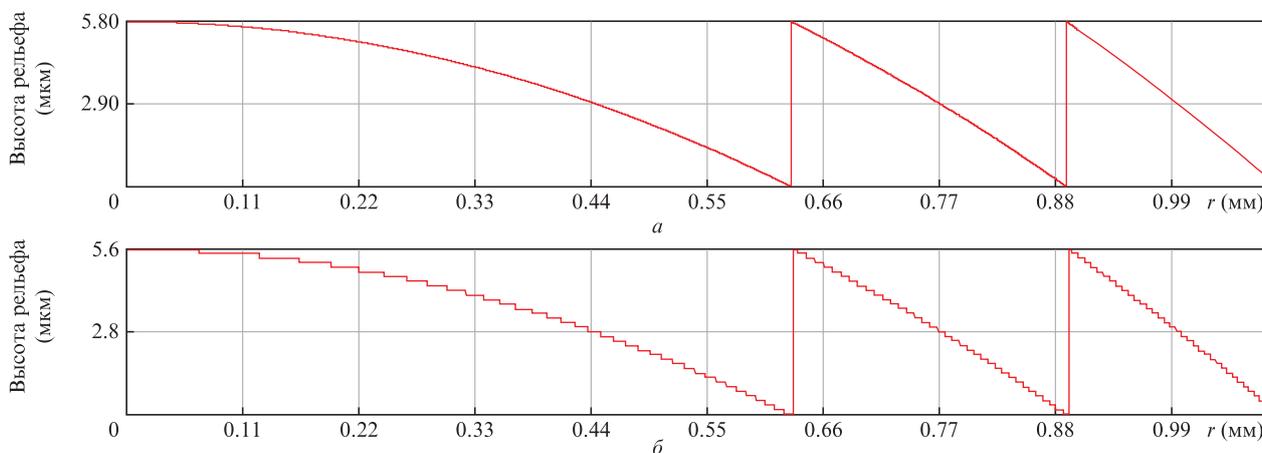


Рис. 1. Радиальные сечения поверхностей центральных областей гармонических линз с 256 (а) и 32 (б) уровнями квантования.

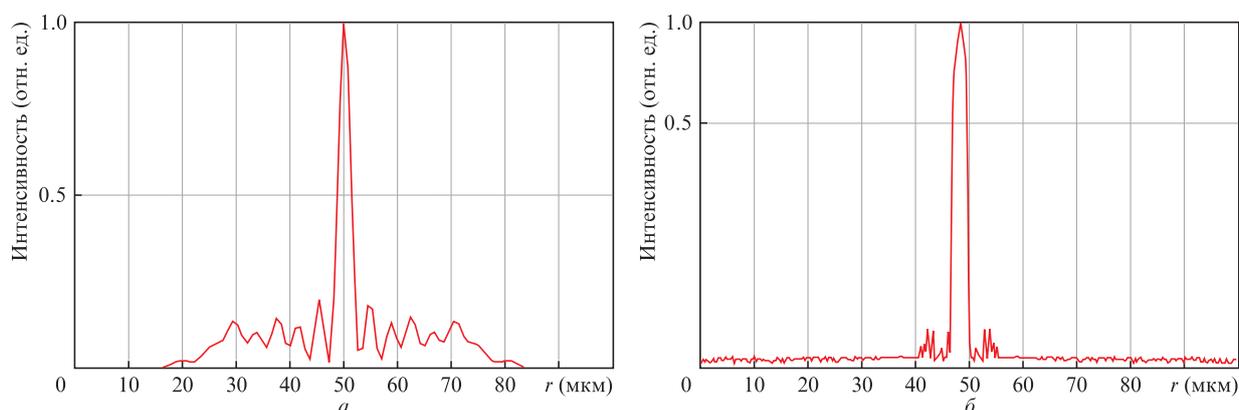


Рис. 2. Радиальные сечения ФРТ в фокальных плоскостях гармонических линз с 256 (а) и с 32 (б) уровнями квантования.

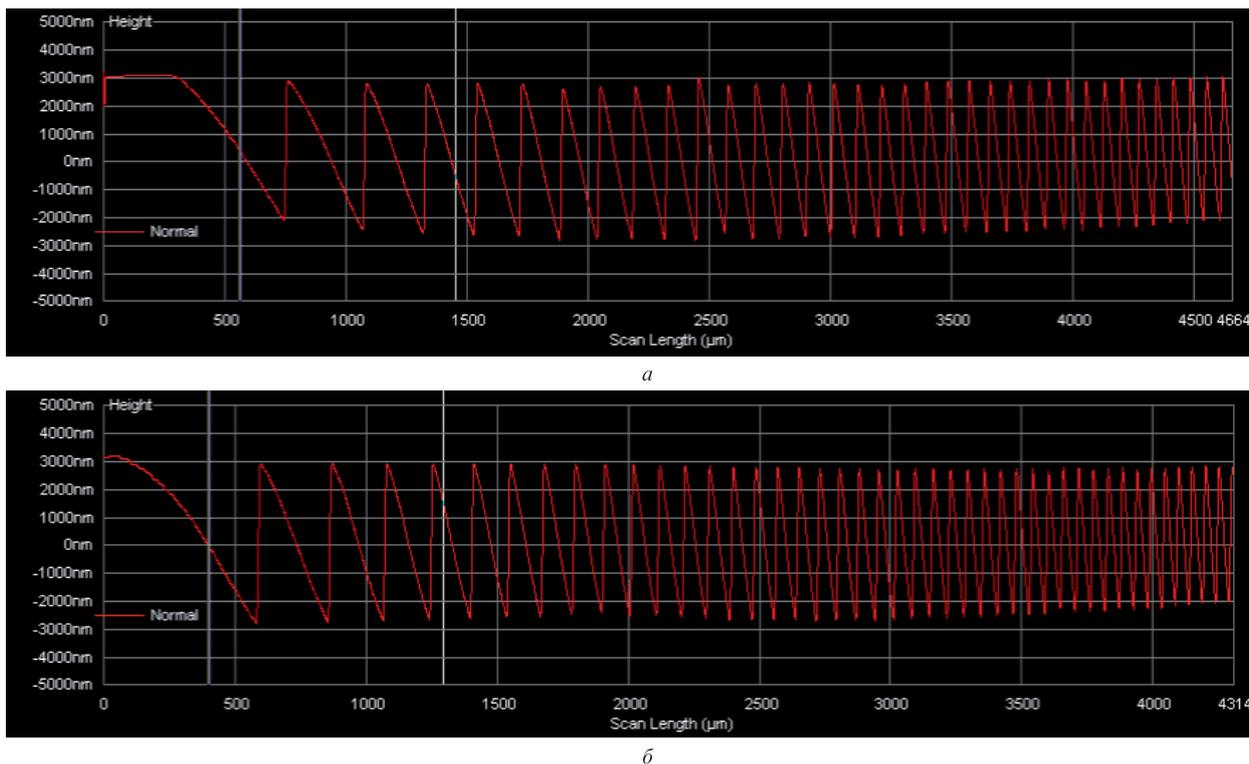


Рис.3. Профилограммы поверхностей микрорельефа гармонических линз с 256 (а) и 32 (б) уровнями квантования, полученные на профилометре Тенсог с разрешением 1 мкм.

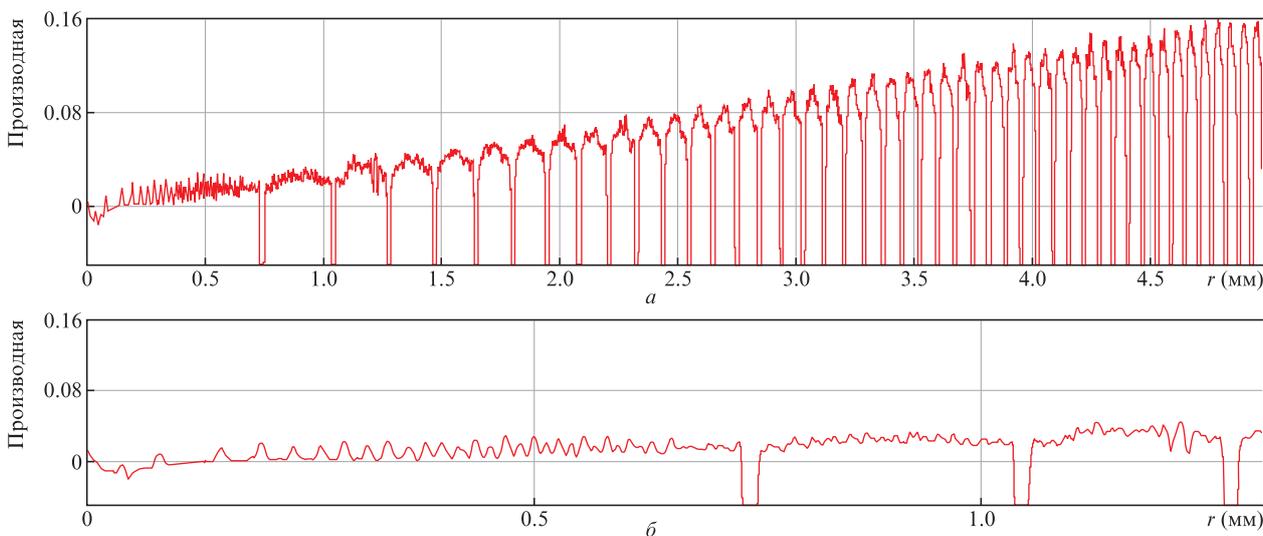


Рис.4. Первая производная по радиальной координате профилограммы микрорельефа гармонической линзы с фокусным расстоянием 55 мм и высотой микрорельефа 6 мкм (пики соответствуют границам зон) (а) и часть зависимости а для центральной области линзы (б).

тогда как график первой производной по радиальной координате показывает, что погрешность наклона микрорельефа сопоставима с величиной самого наклона, особенно в центральных областях линзы (см. рис.1,б). Это означает, что разные участки линзы будут фокусировать свет на расстояниях, не совпадающих с заданным фокусным расстоянием. В связи с этим возникла идея искусственного ограничения числа уровней гармонической линзы, чтобы технологическая погрешность приводила только к росту коэффициента светорассеяния линзы, но не меняла ширины ФРТ.

Для эксперимента использовалась оптическая схема, представленная на рис.5. На прозрачный транспарант бы-

ло нанесено изображение стандартной черно-белой миры для тестирования объективов, приведенное на рис.6.

В качестве целевого участка выступали изображения наклонных полос в нижней части миры. Именно по ним были определены частотно-контрастные характеристики (ЧКХ) обеих линз. На рис.7 представлены целевые участки миры, показанной на рис.6.

Как видно из рис.7,в,г, линза с 32 уровнями квантования строит чуть более контрастное изображение высокочастотных участков полосатого изображения. С использованием изображений на рис.7,а,б были измерены ЧКХ линз с 32 и с 256 уровнями квантования, представленные на рис.8.

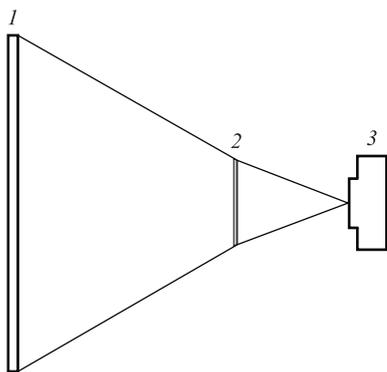


Рис.5. Оптическая схема для формирования изображений гармонической линзой:
 1 – транспарант с изображением мира; 2 – гармоническая линза; 3 – регистрирующая камера TourCam UCМOS03100KPA.

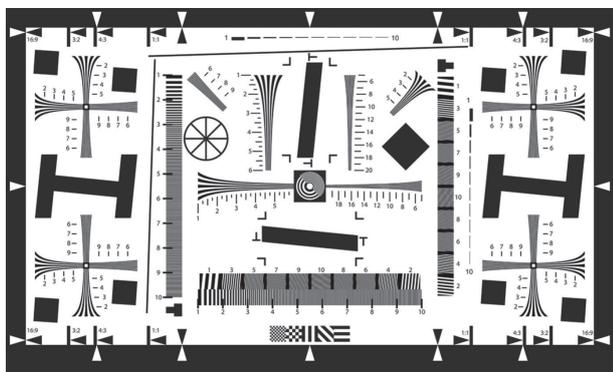


Рис.6. Изображение черно-белой миры для тестирования объектов.

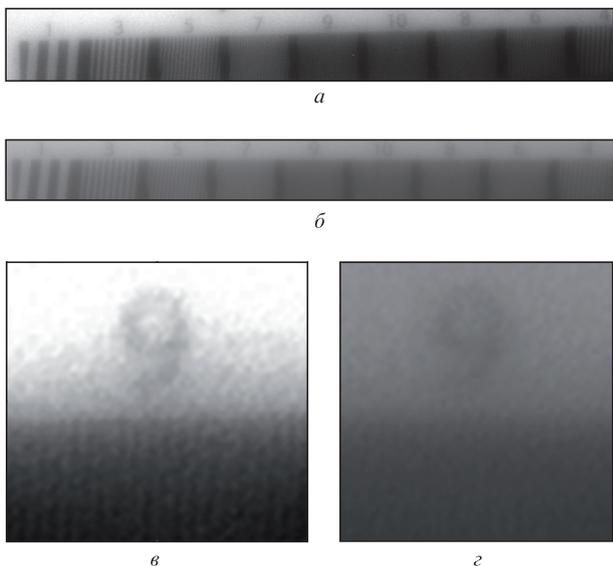


Рис.7. Изображения целевых участков миры, полученные с помощью линз с 32 (а, в) и с 256 (б, г) уровнями квантования.

Как видно из рис.8, ЧКХ линзы с 32 уровнями квантования существенно лучше, чем ЧКХ линзы с 256 уровнями квантования. Наибольшее различие в значениях функции передачи модуляции наблюдается на высоких частотах: так, на частоте 50 мм^{-1} для линзы с 32 уровнями квантования значение этой функции составляет 0.14, а для линзы с 256 уровнями квантования – всего 0.04.

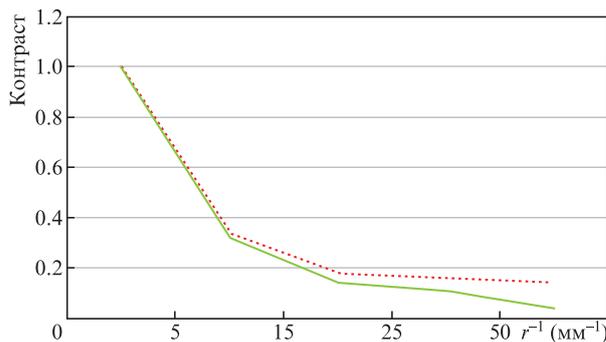


Рис.8. ЧКХ для линз с 32 (пунктирная линия) и с 256 (сплошная линия) уровнями квантования.

4. Заключение

Моделирование фокусировки света гармоническими линзами с 32 и 256 уровнями квантования показало, что ФРТ гармонической линзы с 256 уровнями имеет широкую область, в которой интенсивности сопоставимы с интенсивностью центрального максимума. Для гармонической линзы с 32 уровнями такого уширения не наблюдается. Это дало основание полагать, что использование гармонической линзы с 32 уровнями позволит улучшить ЧКХ на высоких частотах. Проведенное экспериментальное сравнительное исследование функций передачи модуляции гармонических линз с 32 и 256 уровнями квантования подтвердило выводы, полученные при моделировании формирования изображения гармоническими линзами с разным числом уровней квантования. Так, при использовании гармонической линзы с 32 уровнями квантования качество изображения несомненно лучше, чем в случае 256 уровней. Наиболее сильное влияние наблюдается в области высоких пространственных частот: на частоте 50 мм^{-1} имеет место почти четырехкратное различие между уровнями ЧКХ (0.14 для линзы с 32 уровнями и 0.04 для линзы с 256 уровнями).

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение №007- ГЗ/ЧЗ363/26).

1. Казанский Н.Л., Хонина С.Н., Скиданов Р.В., Морозов А.А., Харитонов С.И., Волотовский С.Г. *Компьютерная оптика*, **38** (3), 425 (2014).
2. Sweeney D.W. et al. *Appl. Opt.*, **34**, 2469 (1995).
3. Хонина С.Н., Устинов А.В., Скиданов Р.В., Морозов А.А. *Компьютерная оптика*, **39** (3), 363 (2015).
4. Карпеев С.В., Алфёров С.В., Хонина С.Н., Кудряшов С.И. *Компьютерная оптика*, **38** (4), 689 (2014).
5. Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Степенев С.А. *Компьютерная оптика*, **28** (1), 60 (2005).
6. Хонина С.Н., Волотовский С.Г. *Компьютерная оптика*, **35** (4), 438 (2011).
7. Скиданов Р.В., Досколович Л.Л., Ганчевская С.В., Бланк В.А., Подпинов В.В., Казанский Н.Л. *Компьютерная оптика*, **44** (1), 22 (2020).
8. Голуб М.А., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Соيفер В.А. *Автометрия*, **1**, 70 (1988).
9. Волков А.В., Казанский Н.Л., Головашкин Д.Л., Досколович Л.Л., Котляр В.В., Павельев В.С., Скиданов Р.В., Соифер В.А., Соловьев В.С., Успенев Г.В., Харитонов С.И., Хонина С.Н. *Методы компьютерной оптики* (М.: Физматлит, 2000).
10. Волков А.В., Скиданов Р.В. *Вестник Самарского гос. технич. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки*, **9**, 174 (2000).
11. Волков А.В., Скиданов Р.В. *Компьютерная оптика*, **22**, 65 (2001).