

# ГОЛОГРАФИЯ

УДК 535.421

## МЕТОД СИНТЕЗА ГОЛОГРАММ-ПРОЕКТОРОВ СФОКУСИРОВАННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ И ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС НА ЕГО ОСНОВЕ

© 2016 г. С. Н. Корешев, доктор техн. наук; И. Н. Корепин, аспирант; М. С. Вахнин, студент

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: korepin404@gmail.com, maks-vakhnin@rambler.ru

Рассмотрена реализация фотолитографического процесса, основанного на синтезированных голограммах сфокусированного изображения, работающих совместно с объективом невысокого качества. Обоснована перспективность применения данной системы для решения проблем ультракоротковолновой фотолитографии. Разработан метод синтеза голограмм сфокусированного изображения, основанный на составлении таблиц соответствия. На его основе создан программный комплекс синтеза и цифрового восстановления голограмм-проекторов сфокусированного изображения. Показаны возможность и перспективность использования комплекса в решении фотолитографических задач.

**Ключевые слова:** голограмма, фотолитография, синтезированная голограмма сфокусированного изображения, проекционная оптическая система.

Коды OCIS: 090.1760.

Поступила в редакцию 09.10.2015.

### Введение

Еще на заре развития оптической голограммы были попытки создания фотолитографических систем на ее основе (см. например, [1]). Тогда они не получили широкого развития в основном из-за отсутствия подходящих регистрирующих сред. С появлением новых материалов, не требующих "мокрой" фотохимической обработки, на рубеже XX и XXI веков были разработаны системы голографической фотолитографии, более пригодные для практического использования [2].

В работе [3] рассматриваются две системы, которые, по нашему мнению, являются наиболее интересными для дальнейшего применения в современном фотолитографическом процессе при работе в области дальнего ультрафиолетового диапазона спектра. Первая система основана на применении отражательных рельефно-фазовых голограмм-проекторов (ГП) Френеля. Она не требует применения проекционного объектива и вообще каких-либо пропускающих

оптических элементов. Во второй системе, основанной на ГП сфокусированного изображения, объектив выполняет лишь силовую функцию "собирания" излучения, в то время как изображающим элементом является ГП. Это позволяет снизить требования к качеству проекционного объектива и использовать простые и недорогие, в том числе и отражательные, оптические системы.

В обоих случаях формирование действительного изображения двумерного транспаранта осуществляется в два этапа. На первом этапе происходит запись ГП с реального фотошаблона, выполненного в масштабе 1:1 по отношению к формируемому изображению. На втором этапе записанная ГП освещается пучком излучения, сопряженным с опорным пучком, восстанавливая безаберрационное изображение исходного объекта.

Дальнейшим развитием этих голографических систем является переход от аналоговых ГП, записываемых с реального фотошаблона, к синтезированным на компьютере и изготовлен-

ленным при помощи лазерного или электронного генератора изображений. Применение синтезированных ГП в описанных выше схемах голограммической фотолитографии позволяет отказаться от изготовления исходного фотошаблона, что зачастую является сложной и трудоемкой операцией и снижает эффективность от использования данных схем.

### **Постановка задачи**

Подход к решению задачи синтеза в обеих схемах основан на компьютерном моделировании физического процесса записи голограммы. Такая математически рассчитанная голограмма изготавливается при помощи лазерного или электронного генератора изображений. Восстановление ГП происходит аналогично, как и в случае систем на основе аналоговых голограмм. При этом следует учитывать, что дискретный характер синтезированной голограммы накладывает ограничения на параметры синтеза и средства отображения ГП на подложке. Сравнительный анализ параметров синтеза и размера фокального пятна генератора изображений для систем с синтезированными ГП Френеля [4] и ГП сфокусированного изображения [5] показал, что голографические системы на основе синтезированных ГП Френеля не могут формировать изображение объекта с минимальным характеристическим размером элемента меньше, чем полторы длины волны восстанавливающего излучения. Кроме того, размер фокального пятна генератора изображений, применяемого для отображения таких ГП, должен быть в четыре раза меньше минимального характеристического размера элемента изображаемой структуры. Системы на основе синтезированных голограмм-проекторов сфокусированного изображения (далее СГСИ) лишены данных ограничений благодаря наличию в их составе проекционного объектива, выполняющего функцию силового элемента. Такая система позволяет частично освободить ГП от функций силового элемента и за счет этого несколько упростить ее структуру, а, следовательно, и стоимость.

Что касается практической реализации таких голографических схем, то в работах [6–8] рассматривается программный комплекс синтеза и восстановления ГП Френеля, а также эксперимент по восстановлению реальной ГП, синтезированной с его помощью. Вместе с тем информация о возможных методах синтеза СГСИ

в доступной нам литературе отсутствует. Такое состояние дел обусловило необходимость постановки настоящей работы, направленной на разработку метода и средств синтеза СГСИ, работающих совместно с проекционными объективами и пригодных для использования в проекционном фотолитографическом процессе.

### **Влияние проекционного объектива на выбор периодов дискретизации фотошаблона, входного и выходного зрачков оптической системы и голограммы**

Необходимость учета влияния оптической системы в алгоритме синтеза–восстановления обуславливает специфические требования, предъявляемые к выбору параметров синтеза и восстановления СГСИ, отличные от требований, приведенных в работе [4] для ГП Френеля.

В простейшем случае одномерной дискретной голограммы, регистрируемой с наклонным параллельным опорным пучком, числовая апертура пучка, продифрагировавшего на самом маленьком элементе структуры транспаранта, будет описываться выражением

$$A = n \sin \alpha = \lambda / a_t, \quad (1)$$

где  $A$  – числовая апертура пучка;  $n$  – показатель преломления среды между объектом и проекционным объективом;  $\alpha$  – апертурный угол дифрагировавшего пучка излучения;  $\lambda$  – рабочая длина волны;  $a_t$  – характеристический размер объекта, т.е. минимальный размер элемента структуры фотошаблона. Угол  $\alpha$  в выражении (1) можно считать максимальным апертурным углом оптической системы. В этом случае максимальная числовая апертура пучка в пространстве изображений оптической системы может быть описана выражением

$$A' = n' \sin \alpha' = A / \beta, \quad (2)$$

где  $A'$  – числовая апертура пучка в пространстве изображений оптической системы,  $n'$  – показатель преломления среды между объективом и голограммой,  $\alpha'$  – задний апертурный угол,  $\beta$  – линейное увеличение оптической системы.

Тогда, при условии  $n = n' = 1$ , минимальная величина пространственного периода голограммы  $T_{\min}$  будет определяться выражением

$$T_{\min} \leq \frac{\lambda}{2 \sin \alpha'} \leq \frac{\lambda \beta}{2 \sin \alpha}. \quad (3)$$

Из выражений (1)–(3) следует, что период дискретизации голограммы зависит от характеристического размера элемента структуры объекта, а также от увеличения оптической системы. С учетом теоремы Котельникова (теоремы отсчетов) эта зависимость будет описываться выражением

$$d \leq \frac{1}{2}T_{\min} \leq \frac{a_t\beta}{4}. \quad (4)$$

Из (4) следует, что минимальный характеристический размер голограммы, а значит, и диаметр рабочего фокального пятна генератора изображений, используемого для отображения голограммы на подложке, могут варьироваться путем выбора необходимого увеличения проекционной оптической системы.

Наличие в данной голографической системе проекционного объектива приводит к необходимости определения предельных значений размеров и периодов дискретизации его зрачков, обеспечивающих трансляцию информации о структуре объекта на плоскость голограммы. Как и в случае с выбором предельного значения периода дискретизации ГП, минимальные пространственные периоды функции, описывающей распределение комплексных амплитуд объектного пучка в плоскости входного или выходного зрачка, зависят от максимальных телесных углов  $\alpha$  и  $\alpha'$ , в пределах которых распространяется излучение, продифрагированное на объекте или голограмме. Следовательно, они могут быть определены исходя из следующих неравенств:

$$T_{d\min} \leq \frac{\lambda}{2\sin\alpha}, \quad (5)$$

$$T'_{d\min} \leq \frac{\lambda}{2\sin\alpha'}. \quad (6)$$

Тогда, с учетом теоремы Котельникова (теоремы отсчетов) минимальные пространственные периоды функции распределения комплексных амплитуд в плоскости входного и выходного зрачков будут выражаться следующими соотношениями:

$$d_d \leq \frac{1}{2}T_{d\min} \leq \frac{\lambda}{4\sin\alpha} \leq \frac{a_t}{4}, \quad (7)$$

$$d'_d \leq \frac{1}{2}T'_{d\min} \leq \frac{\lambda}{4\sin\alpha'} \leq \frac{a_t\beta}{4}. \quad (8)$$

Для передачи информации о комплексной амплитуде объектного пучка оптическая система должна обеспечить “захват” излучения,

распространяющегося в направлении плоскости голограммы в пределах телесного угла  $\alpha$ , зависящего от характеристического размера объекта. Кроме того, необходимость обеспечения непрерывности линий восстановленного изображения при синтезе голограммы требует соблюдения равенства периодов дискретизации фотошаблона и восстановленного изображения. Это обуславливает необходимость ограничения участка линейной апертуры оптической системы, несущего информацию о каждом элементе дискретизации объекта, величинами  $D_d$  и  $D'_d$  соответственно для передней и задней апертур оптической системы. Исходя из геометрических соображений (см. рис. 1), эти значения соответственно равны

$$D_d = R\tg\left[\arcsin\left(\frac{\lambda}{a_t}\right)\right], \quad (9)$$

$$D'_d = R'\tg\left[\arcsin\left(\frac{\lambda}{a_t\beta}\right)\right], \quad (10)$$

где  $R$  – расстояние от плоскости объекта до входного зрачка оптической системы;  $R'$  – расстояние от выходного зрачка оптической системы до плоскости голограммы.

Исходя из параметров  $D_d$ ,  $D'_d$ ,  $d_d$  и  $d'_d$ , можно определить количество точек плоскостей входного и выходного зрачков оптической системы, в которых необходимо вычислять значения комплексной амплитуды объектной волны при синтезе и цифровом восстановлении голограммы. Его можно рассчитать по следующим формулам для входного и выходного зрачков соответственно:

$$M_d = 1 + D_d / d_d, \quad (11)$$

$$M'_d = 1 + D'_d / d'_d. \quad (12)$$

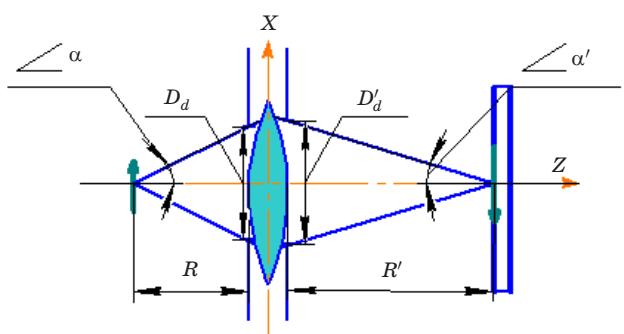


Рис. 1. Формирование оптической системой увеличенного изображения объекта в плоскости регистрации голограммы.

Такое количество отсчетов обеспечивает регистрацию на голограмме всей информации о структуре фотошаблона, однако при больших апертурах делает процесс синтеза голограммы чрезвычайно трудоемким. Так, например, для синтеза голограммы точечного объекта размечом 1 мкм при длине волны 0,488 мкм с использованием оптической системы, расположенной на расстоянии 50 мм от объекта и формирующей изображение с линейным увеличением  $-4^{\times}$ , согласно (11) необходимо вычислить комплексную амплитуду поля объектной волны в плоскости входного зрачка как минимум в 12300 узловых точках.

### **Метод синтеза голограммы-проектора сфокусированного изображения на основе составления таблицы соответствия**

Как было показано выше, сложность вычисления комплексной амплитуды объектной волны обусловлена большим количеством точек зрачка оптической системы, в которых необходимо вычислять фазу волнового фронта для гарантированной передачи информации о предмете без потерь.

Этот факт не позволяет выполнять вычисление всего поля объектной волны путем прямого расчета действительных лучей от всех светлых точек предмета. Однако, для данной операции требуется максимально точное вычисление амплитуды, что исключает возможность применения обычных для таких задач методов, основанных на аппроксимации значений функции волнового фронта.

Это обусловило необходимость разработки специального метода, обеспечивающего выполнение требуемых условий и скорости работы. В его основу был положен метод “lookup table”, хорошо зарекомендовавший себя в тех областях науки и техники, где требуется выполнять многократные однотипные вычисления [9].

В соответствии с этим методом все рабочее поле оптической системы в предметном пространстве разбивается на типовые участки (точки) с заданной дискретизацией, для которых путем расчета необходимого количества действительных лучей вычисляется комплексная амплитуда объектного пучка в плоскости синтеза ГП. Пучок лучей ограничивается конусом, равным двум апертурным углам, а количество лучей, равномерно распределенных внутри ко-

нуса, вычисляется в блоке расчета оптимальных параметров синтеза. Полученные значения комплексной амплитуды элементарного поля сохраняются в памяти, образуя ячейку таблицы соответствия. Эта ячейка представляет собой двумерный массив комплексных значений амплитуды объектной волны в каждой точке плоскости синтеза. На рис. 2 показана графическая визуализация такой ячейки.

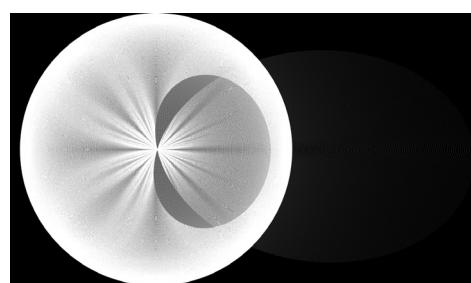
Несмотря на большую трудоемкость такого вычисления элементарных ячеек для всех точек рабочего поля зрения оптической системы, эта операция должна быть выполнена лишь один раз для каждого объектива, так как данный этап синтеза голограммы не зависит от структуры конкретного транспаранта.

На следующем этапе происходит сложение тех ячеек таблицы, которые соответствуют светлым точкам структуры объекта. При этом итоговое значение комплексной амплитуды объектной волны в точке с координатами  $(x, y)$  будет определяться согласно выражению

$$A(x, y) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n O(i, j)U_{i,j}(x, y), \quad (13)$$

где  $m, n$  – количество строк и столбцов таблицы соответствий, сформированной на первом этапе.  $U_{i,j}(x, y)$  – комплексная амплитуда элементарной волны в точке с координатами  $(x, y)$ ,  $O(i, j)$  – значение функции комплексной амплитуды волны в плоскости предмета в точке  $(i, j)$ . Произведение  $O(i, j)U_{i,j}(x, y)$  выражает условие сложения лишь тех ячеек таблицы, которые соответствуют светлым точкам структуры объекта.

Модификация данного метода, направленная на сокращение объема рассчитываемых данных, основана на применении свойств осевой симметрии проекционной оптической системы. Суть такой модификации заключается



**Рис. 2.** Графическое представление элементарной ячейки таблицы соответствия для точки на краю поля тестового объектива.

в сокращении количества ячеек таблицы соответствия, достаточного для получения голограммы любого объекта.

Пусть полярные координаты двух точек плоскости объекта отличаются только на некоторый угол  $\varphi$ . Другими словами, точки равноудалены от оптической оси проекционной системы. В таком случае, в силу осевой симметрии оптической системы, функции комплексных амплитуд излучения, исходящего из данных точек, будут одинаковыми по структуре. Они будут отличаться друг от друга лишь поворотом на тот же угол  $\varphi$ , на который отличаются координаты рассматриваемых точек.

Исходя из этого свойства, для сокращения избыточной информации на первом этапе синтеза достаточно проводить расчет комплексных амплитуд, соответствующих излучению одного ряда точек объектной плоскости, расположенных вдоль одной из полуосей  $x$  или  $y$  системы координат предмета. Функции распределения амплитуд других точек могут быть вычислены путем поворота соответствующей ячейки-массива на угол  $\varphi$ . С учетом сдвига системы координат и преобразования матрицы поворота, вычисление новых координат точек массива-ячейки может быть произведено в соответствии со следующей системой выражений:

$$\begin{cases} x' - x_0 = (x - x_0) \cos \varphi - (y - y_0) \sin \varphi, \\ y' - y_0 = (x - x_0) \sin \varphi + (y - y_0) \cos \varphi, \end{cases} \quad (14)$$

где  $\varphi$  – угол поворота, соответствующий угловой координате точки предмета, для которой вычисляется комплексная амплитуда;  $(x_0, y_0)$  – координаты центра картины распределения комплексной амплитуды элементарного излучения;  $(x, y)$  – старые координаты точки в массиве;  $(x', y')$  – новые координаты точки после поворота.

Точность вычисления комплексной амплитуды объектной волны в какой-либо точке плоскости синтеза ГП при помощи рассмотренного выше модифицированного метода зависит от двух факторов. Первый из них связан с ограниченной точностью выполнения арифметических операций над числами с плавающей точкой, что обуславливает появление накапливающейся ошибки при сложении большого количества ячеек. Однако использование современных высокопроизводительных вычислительных систем, а также хранение данных в памяти компьютера с двойной точностью обеспечивают минимальное влияние таких ошибок на качество

восстанавливаемого изображения. Вторым фактором, влияющим на точность формирования поля объектной волны, является выбор периода дискретизации массива-ячейки. Дело в том, что при повороте ячейки таблицы соответствия на определенный угол  $\varphi$  происходит повторная дискретизация преобразованных координат, что в свою очередь приводит к ошибке округления.

Для пояснения данного эффекта передискретизации обратимся к следующему примеру. Пусть при формировании некоторой ячейки на первом этапе работы алгоритма координаты какого-либо луча в плоскости голограммы составили  $x_0 = 1,72$  мкм,  $y_0 = 2,4$  мкм. Тогда при дискретизации с периодом  $d = 0,5$  мкм дискретные координаты луча будут равны

$$\begin{aligned} x_{0d} &= \left\lfloor \frac{x_0}{d} + 0,5 \right\rfloor = \left\lfloor 3,94 \right\rfloor = 3, \\ y_{0d} &= \left\lfloor \frac{y_0}{d} + 0,5 \right\rfloor = \left\lfloor 5,3 \right\rfloor = 5. \end{aligned} \quad (15)$$

Здесь и далее символом  $\lfloor \cdot \rfloor$  обозначено округление в меньшую сторону, т.е. выражение  $|x + 0,5|$  соответствует округлению  $x$  до ближайшего целого числа. Пусть теперь на “основном” этапе необходимо повернуть ячейку на угол  $\varphi = 30^\circ$  относительно геометрического центра массива. В соответствии с выражением (14) новые целочисленные координаты луча будут равны

$$\begin{aligned} x_{d1} &= \left\lfloor (x_{0d} \cos \varphi - y_{0d} \sin \varphi) + 0,5 \right\rfloor \approx |0,6| = 0, \\ y_{d1} &= \left\lfloor (x_{0d} \sin \varphi + y_{0d} \cos \varphi) + 0,5 \right\rfloor \approx |6,33| = 6. \end{aligned} \quad (16)$$

Вместе с тем, если производить дискретизацию координат после поворота ячейки, то новые координаты луча будут составлять

$$\begin{aligned} x_{d1} &= \left\lfloor \frac{(x_0 \cos \varphi - y_0 \sin \varphi)}{d} + 0,5 \right\rfloor \approx |1,08| = 1, \\ y_{d1} &= \left\lfloor \frac{(x_0 \sin \varphi + y_0 \cos \varphi)}{d} + 0,5 \right\rfloor \approx |6,376| = 6. \end{aligned} \quad (17)$$

Из сравнения результатов вычислений (16) и (17) видно, что при выполнении поворота дискретной ячейки-массива с периодом, равным периоду дискретизации голограммы, возникает ошибка округления. При вычислении комплексной амплитуды сложного объекта, содержащего большое количество точек, такая накапливающаяся ошибка приводит к значительным искажениям волнового фронта.

Чтобы избежать появления ошибок передискретизации, целесообразно хранить в памяти компьютера максимально точные значения координат луча на плоскости синтеза голограм-

мы. В таком случае ячейка таблицы соответствия трансформируется из двумерного массива комплексных амплитуд объектного поля в одномерный массив структур, содержащих координаты рассчитанного луча в виде вещественного числа с двойной точностью, а также значение комплексной амплитуды в данной точке. В этом случае отсутствует необходимость перехода к локальным координатам ячейки, а матрица поворота упрощается. Новые координаты повернутой точки будут описываться следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} x' = x \cos \varphi - y \sin \varphi \\ y' = x \sin \varphi + y \cos \varphi \end{cases}. \quad (18)$$

Применение разработанного метода позволяет избежать большинства ограничений, свойственных традиционным методам расчета оптического изображения. Благодаря разделению процесса вычисления комплексной амплитуды на два этапа, требование к минимизации затраченных вычислительных ресурсов компьютера и времени расчета становится не столь критичным параметром, так как основной этап вычисления происходит быстро и требует минимума вычислительных ресурсов. Кроме того, такое разделение позволяет выделить этот этап синтеза в отдельный программный модуль, не зависящий от внутренних параметров проекционного объектива. Программный модуль может быть инсталлирован в производственный вычислительный комплекс вместе с заранее рассчитанной таблицей соответствия, что позволяет снизить требования к вычислительной мощности производственного вычислительного комплекса.

Следующим этапом формирования голограммического поля является наложение опорной волны на плоскость регистрации голограммы. В данной работе рассматривается плоская опорная волна, падающая на поверхность голограммы под углом  $\theta$  к нормали. Следовательно, распределение фаз комплексной амплитуды на плоскости голограммы  $\Phi_{ref}$  может быть описано следующим выражением:

$$\Phi_{ref} = \frac{2\pi x \sin \theta}{\lambda}. \quad (19)$$

Сложение комплексных амплитуд электромагнитного поля опорной волны и излучения, прошедшего через объектив, составляет массив значений функции голографического поля. Умножение каждого его элемента на комплексно-

сопряженную величину обуславливает формирование массива значений интенсивности поля в каждой точке ГП, необходимого для отображения ее структуры на носителе.

### **Программный комплекс синтеза и цифрового восстановления СГСИ**

Разработанный на основе описанного ранее метода синтеза голограмм программный комплекс можно условно разделить на четыре блока: блок ввода данных, блок вычисления оптимальных параметров синтеза, собственно синтез ГП и цифровое восстановление синтезированной голограммы. Отметим, что необходимость включения в комплекс блока цифрового восстановления голограмм обусловлена трудоемкостью процесса их физического изготовления и проведения экспериментов, направленных на исследование их изображающих свойств.

Входными данными для работы программного комплекса являются такие параметры, как рабочая длина волны излучения, минимальный характеристический размер элемента изображаемого объекта и массив данных о его структуре. Кроме того, поскольку в схеме участвует проекционная оптическая система, то также необходимо ввести в программу габаритные и конструктивные параметры этой системы. На основании введенных данных проводится автоматический расчет оптимальных, с точки зрения качества восстанавливаемого изображения, значений основных параметров синтеза ГП. Среди них такие группы параметров, как периоды дискретизации голограммы и зрачков оптической системы, размеры линейного участка апертуры излучения, а также геометрические параметры схемы записи голограммы. Кроме того, в данном блоке производится проверка оптической системы на предмет возможности построения изображения с требуемыми увеличением и апертурой.

Синтез ГП осуществляется согласно методу, рассмотренному выше, а восстановление производится путем непосредственного расчета обратного хода действительных лучей через оптическую систему. Начальные значения амплитуды и фазы каждого луча определяются соответствующими значениями голографического поля, восстановленного в плоскости голограммы.

Выходные данные о структуре ГП или восстановленного изображения могут быть сфор-

мированы в виде текстового файла с распределением интенсивности поля либо в виде полуточнового изображения в формате bmp. Такой вывод данных обеспечивает возможность быстрой визуальной оценки полученных результатов перед их дальнейшей обработкой. На рис. 3 представлен пример изображаемого объекта и соответствующей ему СГСИ, полученной при помощи простого трехлинзового объектива, подобного тому, что рассматривался в работе [3].

Испытание работоспособности программного комплекса осуществлялось путем цифрового восстановления голограммы и визуального сравнения сформированного ею изображения с исходным объектом. Исследование проводилось для двух тест-объектов. Первый из них был показан на рис. 3. Его минимальный характеристический размер составлял 0,4 мкм. Структура второго объекта, с характеристическим размером 2 мкм, представлена на рис. 4. В этих случаях при номинальном значении длины волны, равном 193 нм, числовая апертура излучения составляла 0,5 и 0,1 соответственно.

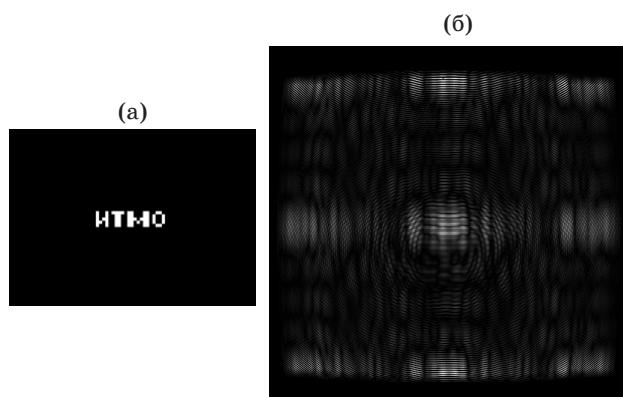


Рис. 3. Объект (а) и соответствующая ему СГСИ (б).

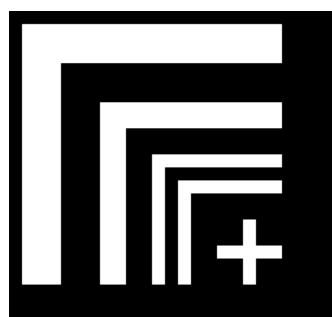


Рис. 4. Исходный тест-объект с характеристическим размером 2 мкм.

Как и в работе [6], посвященной исследованию изображающих свойств синтезированных ГП Френеля, в данной работе изображение, восстановленное с помощью ГП, подвергалось пороговой обработке в программе Photoshop. Такая обработка изображения является имитацией реакции фоторезиста на экспонирующее излучение [10]. Основным критерием качества был выбран диапазон пороговых значений, обеспечивающих максимальное соответствие обрабатываемого изображения исходному объекту. Выбор такого критерия обусловлен тем, что потеря качества изображений, восстанавливаемых с помощью синтезированных голограмм, выражается, в первую очередь, в виде появления ложных изображений, накладывающихся на основное и искажающих его структуру. При этом допустимые вариации интенсивностей, обусловленные этими помехами, в основном определяются пороговыми свойствами фоторезиста, применяющегося в фотолитографическом процессе. Чем шире линейный участок характеристической кривой фоторезиста, тем хуже он работает в качестве дискриминатора по интенсивности. Таким образом, выбранный критерий качества позволяет определить требования к характеристической кривой фоторезиста. Чем шире интервал порога появления помех дискретизации, тем больший интервал экспозиций допустим для используемого фоторезиста.

Результат цифрового восстановления первого тест-объекта представлен на рис. 5. Относи-

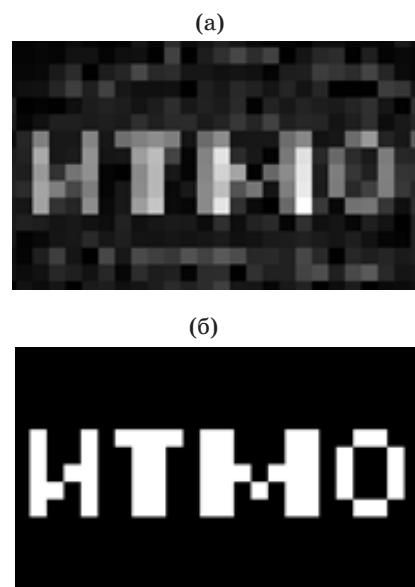


Рис. 5. Восстановленное изображение до (а) и после (б) пороговой обработки.

тельно высокий уровень помех на изображении до порогового преобразования объясняется остаточными помехами дискретизации. Тем не менее, уровень полезного сигнала достаточночен для того, чтобы после пороговой обработки структура изображения полностью соответствовала структуре исходного объекта. Интервал порогового преобразования, при котором не происходит искажения объекта, составил 11 единиц градации серого.

На рис. 6 показано восстановленное изображение второго тест-объекта с характеристическим размером 2 мкм. На нем также наблюдается выраженная неравномерность интенсивности светлых участков. В данном случае допустимый интервал уровней порога для данного объекта составил 61 единицу, что значительно больше аналогичного показателя для синтезированных голограмм Френеля [6].

На основании полученных результатов можно сделать вывод о корректной работе программного комплекса и о возможности его применения для синтеза и восстановления голограмм сфокусированного изображения.

Помимо исследования изображающих свойств синтезированных ГП, восстановленных при нор-

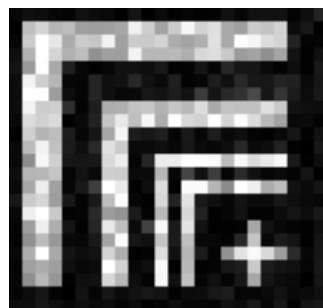


Рис. 6. Восстановленное изображение тест-объекта.

мальных условиях, также проводилось исследование предельных отклонений параметров схемы восстановления. Методика исследования заключалась в синтезе ГП и последующей серии итераций цифрового восстановления при различных значениях отклонений геометрических параметров схемы с последующей оценкой качества изображения.

Для проведения работы были выбраны следующие параметры схемы: отклонение угла падения восстанавливающей волны ( $\Delta\alpha$ ), смещение установки ГП в плоскости синтеза перпендикулярно оптической оси проекционного объектива ( $\Delta x$ ), отклонение длины волны восстанавливающего излучения ( $\Delta\lambda$ ). Отметим, что конструктивные параметры используемой оптической системы в данной работе считались точно соответствующими номинальным значениям. Это обусловлено тем, что отклонения параметров реальной оптической системы могут быть измерены с достаточно высокой точностью при ее изготовлении и впоследствии учтены в процессе синтеза ГП.

Предельным значением исследуемого параметра считалось его максимальное значение, при котором интервал уровней порога был больше нуля.

На рис. 7 показаны изображения второго тест-объекта при отклонениях исследуемых параметров, составляющих 20 мкм по смещению голограммы в плоскости, перпендикулярной оптической оси объектива,  $50''$  по несоответствию угла падения восстанавливающего излучения и 0,8 нм по отклонению рабочей длины волны излучения. При этом максимальный интервал уровней порогового преобразования составил соответственно 4, 2 и 2 единицы. Дальнейшее увеличение отклонений приводит к искажению структуры восстанавливаемого изображения

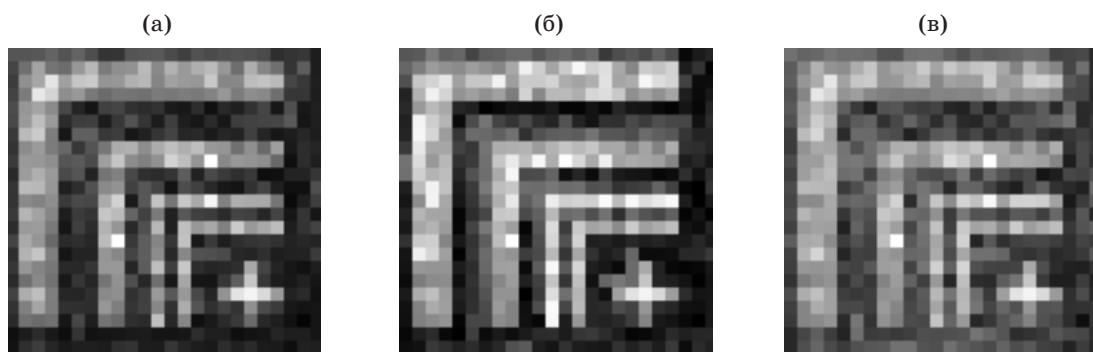


Рис. 7. Восстановленные изображения тест-объекта при максимальных допустимых отклонениях параметров схемы восстановления. а – поперечное смещение голограммы, б – угол падения восстанавливающей волны, в – отклонение длины волны рабочего излучения.

тестового объекта. Поэтому данные значения отклонений можно считать максимально допустимыми для исследуемого объекта.

Отметим, что в случае первого тест-объекта величину допустимых отклонений определить не удалось, так как даже малое отклонение от номинальных значений приводило к появлению некомпенсируемых искажений структуры изображения.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что предельные допустимые значения несоответствия параметров схемы восстановления ее виртуальному аналогу сильно зависят от характеристического размера структуры изображаемого объекта и, следовательно, от числовой апертуры излучения.

## Заключение

В ходе данного исследования был разработан метод синтеза ГП сфокусированного изображения с учетом реальных aberrаций оптической

системы, основанный на методе составлении таблиц соответствия. На его основе был разработан специализированный программный комплекс синтеза и цифрового восстановления голограмм-проекторов. Примененный в работе комплекс алгоритм синтеза позволил более чем в 4 раза сократить время синтеза голограммы по сравнению с традиционными методами формирования оптического изображения без существенной потери точности вычислений.

Результаты испытания программного комплекса позволили сделать вывод о корректности работы алгоритма синтеза и о перспективности использования данного программного комплекса для задач проекционной фотолитографии. Кроме того, было показано, что восстановление изображения из синтезированной голограммы возможно также при несоответствии геометрических параметров схем синтеза и восстановления, что определяет возможность практической реализации схемы восстановления с учетом ограниченной точности установки этих параметров.

\* \* \* \* \*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голограммия. М.: Мир, 1973. 688 с.
2. Ehrets P., Herzig H., Kuittinen M., Clube F., Darbellay Y. High Carrier-frequency fan-out gratings fabricated by total internal reflection holographic lithography // Opt. Eng. 1995. V. 34. № 8. P. 2377–2383.
3. Корешев С.Н., Ратушный В.П. Использование метода голограммии для получения изображений двумерных объектов при решении задач фотолитографии высокого разрешения // Оптический журнал. 2004. Т. 71. № 10. С. 32–39.
4. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Козуллин И.А. Выбор параметров синтеза голограмм-проекторов для фотолитографии // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 9. С. 29–34.
5. Корешев С.Н., Корепин И.Н. Выбор параметров синтеза голограмм-проекторов сфокусированного изображения // Оптический журнал. 2011. Т. 78. № 9. С. 45–49.
6. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Иванов Ю.А., Козуллин И.А. Программный комплекс для синтеза и цифрового восстановления голограмм-проекторов: влияние параметров синтеза на качество восстановленного изображения // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 1. С. 42–48.
7. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Громов А.Д. Метод синтеза голограмм-проекторов, основанный на разбиении структуры объекта на типовые элементы, и программный комплекс для его реализации // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 12. С. 30–37.
8. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Ратушный В.П. Восстановление синтезированных голограмм-проекторов Френеля при углах падения восстанавливающей волны, превышающих угол падения опорной волны при синтезе голограммы // Опт. и спектр. 2011. Т. 111. № 1. С. 156–161.
9. Корешев С.Н., Корепин И.Н. Методы синтеза голограмм сфокусированного изображения // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 10. С. 37–43.
10. Моро У. Микролитография. М.: Мир, 1990. 1240 с.