

# ГОЛОГРАФИЯ

---

УДК 535.417, 778.38

## МЕТОД СИНТЕЗА ГОЛОГРАММ-ПРОЕКТОРОВ, ОСНОВАННЫЙ НА РАЗБИЕНИИ СТРУКТУРЫ ОБЪЕКТА НА ТИПОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, И ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ

© 2012 г. С. Н. Корешев, доктор техн. наук; О. В. Никаноров, канд. техн. наук;  
А. Д. Громов, студент

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: nikanorovov@gmail.com

Предложен метод синтеза голограмм-проекторов Френеля, основанный на разбиении структуры объекта на типовые элементы. В качестве одного из основных достоинств предложения отмечается обеспечиваемая этим методом возможность существенного сокращения объема требуемых вычислений. Описан программный комплекс синтеза и восстановления голограмм-проекторов Френеля, реализующий этот метод. Приведены результаты экспериментального исследования комплекса, выполненные в процессе сравнительного анализа предложенного и традиционного методов синтеза голограмм-проекторов.

*Ключевые слова:* голографическая проекционная фотолитография, голограмма-проектор Френеля, синтез голограмм-проекторов, цифровое восстановление голограмм, фазовая голограмма, диффузная подсветка, фазовый сдвиг.

Коды OCIS: 090.1760.

Поступила в редакцию 25.07.2012.

### Введение

В современной литературе имеются сведения о разработках голографических фотолитографических систем на основе практически всех известных видов голограмм, в частности, голограмм Френеля [1, 2], голограмм сфокусированного изображения [3, 4] и синтезированных голограмм [5, 6]. Из них наиболее перспективными представляются системы, основанные на использовании отражательных рельефно-фазовых синтезированных голограмм-проекторов, рассчитываемых с помощью компьютера и отображаемых на носителях с помощью лазерных либо электронно-лучевых генераторов изображения. Особенно выигрышным применение таких систем должно оказаться в экстремально коротковолновом ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах спектра.

Суть процесса синтеза голограммы-проектора заключается в следующем: в компьютер

вводится изображение фотошаблона, голограмму которого мы хотим получить. После этого с помощью специализированного программного комплекса осуществляется расчет голографического поля, соответствующего голограмме-проектору. В результате этого расчета определяется распределение интенсивности в плоскости синтеза голограммы. Эти данные поступают на генератор изображений. Принцип его действия основан на формировании изображения в режиме растрового либо векторного сканирования за счет взаимодействия сфокусированного его оптической системой пятна активного излучения с материалом носителя голограммы в точно заданных участках рабочего поля устройства. Генератор изображения создает требуемую структуру рельефа за счет удаления фоторезиста с определенных участков апертуры изготавливаемой голограммы. Получившаяся рельефно-фазовая голограммная структура покрывается тонким слоем отражающего покрытия и используется как бинар-

ная отражающая рельефно-фазовая голограмма-проектор. Она восстанавливается опорным пучком и формирует действительное изображение фотошаблона на поверхности полупроводниковой пластины, покрытой слоем фоторезиста.

При изготовлении голограмм-проекторов основные трудности вызывают процессы синтеза и отображения на носителе рассчитанной голограммной структуры. Сложность синтеза голограмм-проекторов обусловлена, в первую очередь, необходимостью предельно точного математического описания процесса формирования голографического поля, не допускающего непосредственное применение преобразований Френеля и Фурье, а также необходимостью минимизации влияния присущего цифровым голограммам дискретного представления объектного транспаранта и синтезированной голограммы на качество восстанавливаемого изображения.

Из доступной нам литературы, посвященной синтезу и отображению на носителе голограмм-проекторов, предназначенных для использования в фотолитографическом процессе, наибольший интерес вызывают работы [5–7]. Отметим, что первая реальная демонстрация фотолитографического процесса, реализованного с помощью синтезированной голограммы-проектора Френеля, была описана в [7]. Синтез использованной при этом голограммы-проектора Френеля осуществлялся с помощью разработанного авторами специализированного комплекса синтеза и восстановления голограмм-проекторов Френеля [8].

В этом комплексе используется метод синтеза голограммы, основанный на математическом описании физических процессов регистрации и восстановления физической голограммы. В нем структура исходного объекта (фотошаблона) рассматривается как работающий на пропускание бинарный двумерный транспарант. Расчет распределения амплитуды объектной волны в плоскости синтеза голограммы-проектора в соответствии с этим методом сводится к векторному суммированию комплексных амплитуд полей, формируемых в этой плоскости всеми точками объекта. В результате рассчитанная для каждого пиксела голограммы амплитуда объектной волны складывается с соответствующей этому пикселу комплексной амплитудой опорной волны. Полученная сумма амплитуд возводится по модулю в квадрат и, таким образом, рассчиты-

вается распределение интенсивности голографического поля, соответствующего синтезируемой голограмме-проектору. Восстановление голограмм в соответствии с этим методом осуществляется аналогично и сводится к суммированию для каждого пиксела плоскости восстановленного изображения комплексных амплитуд полей, сформированных в этом пикселе каждой точкой голограммы, рассматриваемой в этом случае в виде точечного источника излучения. Рассмотренный метод синтеза и цифрового восстановления голограмм-проекторов отличает относительно высокая точность математического описания физических процессов записи и восстановления голограмм. Вместе с тем он не свободен от ряда недостатков, среди которых наиболее существенным можно считать свойственную этому методу большую избыточность объема вычислений при синтезе и восстановлении, связанную с необходимостью многократного расчета распределений фазы сферических волн, порожденных каждой точкой объекта и голограммы. Кроме того, метод требует практически одномоментного доступа к сохраняемым в компьютере данным о распределении амплитуд в большой области плоскости голограммы, что, в свою очередь, приводит к чрезмерной загрузке оперативной памяти компьютера. Поэтому использование этого метода для расчета больших по площади голограмм предопределяет весьма жесткие требования к быстродействию компьютера, объему его памяти и скорости доступа к ней. Необходимость снятия или, по крайней мере, смягчения этих требований обусловила постановку настоящей работы, направленной на разработку производительного метода синтеза голограмм-проекторов, позволяющего существенно сократить объем вычислений в процессах синтеза и восстановления голограмм. При этом ставилось условие обеспечения возможности использования кластерных систем для проведения расчетов, т. е. обеспечения возможности разбиения процесса синтеза голограммы на отдельные независимые мини-задания, что позволит использовать основное достоинство кластерных систем, заключающееся в параллелизме вычислений. Разрабатываемый метод должен предполагать расчет голограммы по частям на не зависящих друг от друга кластерах – компьютерах, что должно привести к еще большему сокращению временных затрат на синтез и восстановление голограмм.

## Метод синтеза голограмм-проекторов, основанный на разбиении объекта на типовые элементы его структуры

Практически все описанные в литературе методы ускорения процесса синтеза голограмм основываются на использовании методов “Look-up table”, т. е. методов, основанных на предварительном разбиении объекта на типовые элементы, вычислении структуры голографического поля, сформированного этим типовым элементом в плоскости синтеза голограммы, и последующем сложении голографических полей, порожденных этими типовыми элементами [9–12]. В качестве типовых элементов в этих методах обычно используются либо отдельные точки объекта [10–12], либо его прямоугольные области – полигоны [9].

Лежащая в основе этих методов идея сложения голографических полей, т. е. полей, сформированных в результате суперпозиции объектной и опорной волн, представляется нам сложной в реализации. Кроме того, она представляется нам идеей, не отвечающей физической сути процессов регистрации и восстановления голограмм-проекторов. В связи с этим в основу разработанного нами метода синтеза голограмм был положен принцип сложения не голографических полей, а полей объектных волн, порожденных типовыми элементами структуры объекта.

При разработке метода мы исходили из того, что до момента наложения опорной волны одинаковые элементы структуры объекта формируют одинаковую картину распределения комплексных амплитуд на плоскости голограммы. Следовательно, если представить объект в виде набора одинаковых элементов, то останется только рассчитать распределение комплексной амплитуды для каждого типа элементов из этого набора. Такое распределение мы условно назовем “штампом”, а основанный на его использовании метод синтеза голограмм – методом “штамповки”. Тогда процесс синтеза голограмм сводится к последовательному наложению штампов в соответствующих областях голограммы. В областях пересечения штампов производится сложение комплексных амплитуд парциальных волновых полей, порожденных типовыми элементами структуры объекта (см. рис. 1).

Такой метод расчета амплитуды объектной волны существенно сокращает время синтеза голограммы при увеличении сложности объ-

екта, так как суммарный объем вычислений распределения комплексной амплитуды сокращается до минимума. Проведем грубую оценку производительности традиционного и предлагаемого методов синтеза голограмм. С этой целью выделим две наиболее ресурсоемких операции процесса синтеза голограммы одной светящейся точки:

– расчет штампа, т. е. расчет распределения в плоскости синтеза голограммы комплексной амплитуды объектной волны, порожденной типовым элементом структуры объекта, количество операций –  $a$ ;

– запись “штампа” в матрицу, в которой и осуществляется синтез голограммы, количество операций –  $b$ .

Тогда количество операций, необходимое для синтеза голограммы объекта, состоящего из  $N$  пикселей, при использовании традиционного метода синтеза составляет  $(a + b)N$ . Метод “штамповки” позволяет обойтись в этом случае  $a + bN$  операциями. Следовательно, использование предлагаемого метода синтеза голограмм позволяет в  $k = (a + b)N / (a + bN)$  раз сократить время синтеза голограммы. Отметим, что  $a \gg b$  и их разница зачастую растет при увеличении количества светящихся элементов, а также то, что при синтезе голограмм особо сложных объектов величиной “ $a$ ” в знаменателе можно пренебречь. Тогда  $k \rightarrow (a + b)N / (bN) = aN / bN + bN / bN = aN / bN + 1 = a/b + 1$ .

В рассматриваемом нами случае плоская опорная волна считается падающей под углом

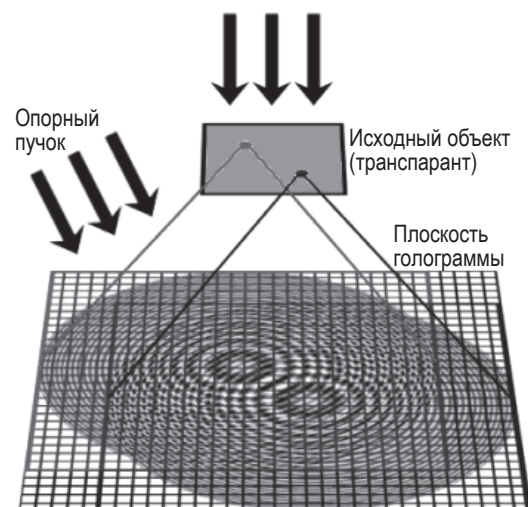


Рис. 1. Разбиение исходного объекта на типовые элементы, и представление результирующей голограммы как совокупности штампов.

на плоскость синтеза голограммы. При этом объект представляется в виде освещаемого падающим по нормали к нему параллельным пучком света двумерного бинарного транспаранта, располагаемого параллельно плоскости синтеза голограммы, на некотором удалении от нее так, что центр объекта считается лежащим на нормали, восстановленной из центра голограммы. При таком взаимном расположении объекта и голограммы штамп объектного поля, т. е. математически описанное пространственное распределение комплексной амплитуды волны, порожденной типовым элементом объекта, имеет вид матрицы, подобной математическому образу голограммы. Пространственно штамп привязывается к той же плоскости, что и голограмма (т. е. они совмещены), но центр штампа считается совпадающим с центром типового элемента, так что их можно считать лежащими на одной нормали, восстановленной из центра типового элемента структуры объекта. Размер штампа зависит от апертурного угла и, соответственно, от размера типового элемента и может быть рассчитан тем же способом, каким рассчитывают размер голограмм по габаритам объекта и параметрам схемы синтеза.

Отметим, что объект может быть разбит на типовые элементы, обладающие различной симметрией, благодаря чему возможно еще больше сократить время расчета, так как распределение комплексной амплитуды у симметричных объектов тоже происходит симметрично.

В общем случае любой исходный объект можно представить в виде совокупности точек. Точка является элементом с центральной симметрией, и, следовательно, картина распределения комплексной амплитуды порожденного ею поля (штамп) также будет обладать такой же симметрией. В итоге появляется возможность при реализации метода ограничиться расчетом, например, только одной четверти штампа точки, как показано на рис. 2.

Полученную в итоге картину достаточно скопировать с учетом требуемого поворота на остальные 3 четверти. Таким же образом можно поступать и при расчете более сложных элементов, при этом основным условием является симметричность поля относительно центра штампа.

В компьютерном представлении картина распределения комплексных амплитуд штампа рассчитывается и хранится в двумерной матри-

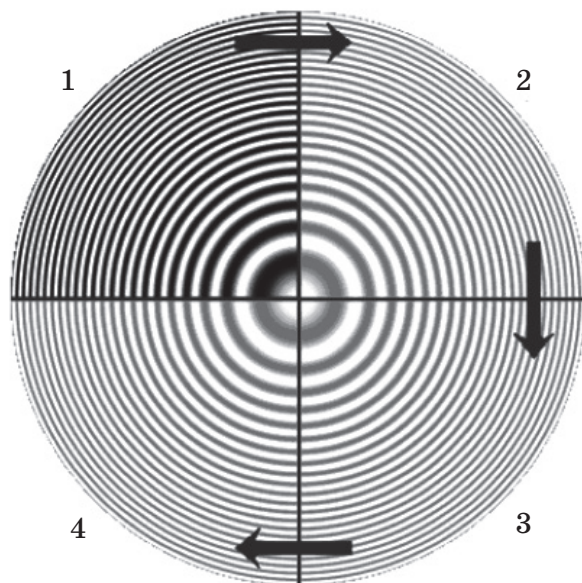


Рис. 2. Порядок расчета штампа элемента с центральной симметрией.

це. Отметим, что соседние элементы матрицы представляют собой значения амплитуды объектной волны, рассчитанные в точках голограмм, отстоящих друг от друга на период дискретизации голограммы. Очевидно, что этот период определяет расстояние, через которое производится расчет комплексной амплитуды для соседних точек голограммы или штампа, и является основным параметром, определяющим качество восстанавливаемого волнового фронта и, соответственно, качество восстанавливаемого изображения.

После сложения соответствующих комплексных амплитуд всех штампов на плоскости регистрации голограммы проводится расчет распределения амплитуды в картине суперпозиции объектной и опорной волн для каждой точки голограммы.

### Программный комплекс синтеза и восстановления голограмм-проекторов, реализующий предлагаемый метод синтеза голограмм

При разработке специализированного программного комплекса синтеза и цифрового восстановления голограмм, реализующего описанный выше метод “штамповки”, мы исходили из необходимости удовлетворения следующих основных требований. Создаваемый комплекс должен:

- включать в себя оптимизированные алгоритмы, позволяющие сократить ресурсоемкость расчетов;

- обладать “дружелюбным” пользовательским интерфейсом, который позволит проводить исследования пользователями уровня “пользователь ПК”;

- позволять проводить расчеты с помощью современных распределенных кластерных систем, что позволит значительно сократить общее время вычисления голограммы;

- допускать проведение распределенных вычислений на заранее подготовленных серверах в автоматическом режиме без обязательного контроля со стороны пользователя;

- не зависеть от конкретной операционной системы, программной и аппаратной платформ;

- представлять собой профессиональный программный продукт, пригодный для использования сторонними разработчиками.

Разработка комплекса включала в себя создание хранилища исходных кодов, позволяющего использовать в ходе работы над комплексом систему контроля версий, что обеспечивает возможность одновременной работы над проектом нескольких программистов. При проектировании архитектуры комплекса был принят вариант его модульной системы, заключающийся в разбиении будущего исходного кода на независимые модули, отвечающие за конкретные задачи. К ним относятся следующие:

- работа со штампами, содержащими дифракционные картины распределения комплексных амплитуд;

- синтез голограммы;

- чтение и сохранение растрового представления объекта и голограммы в виде графических файлов (*png*, *bmp*);

- сохранение журналов работы в виде текстовых файлов с заданным форматированием;

- наличие пользовательского интерфейса и др.

В результате применения такого подхода, в частности в ОС Windows, отдельные функциональные модули комплекса собираются в отдельные разделяемые библиотеки (*dll*), содержащие реализации алгоритмов синтеза и восстановления голограмм. В дальнейшем эти библиотеки могут быть легко использованы другими научными группами при необходимости включения в их программный продукт возможностей синтеза и восстановления голограмм методом “штамповки”.

Удобство использования комплекса на персональном компьютере обеспечивает графический интерфейс. Он позволяет вводить в комплекс необходимые параметры как синтеза, так и восстановления голограммы – проектора и выводить результаты проведенных расчетов в виде распределений интенсивности в синтезированной голограмме и в восстановленном изображении. В интерфейсе реализован достаточно гибкий вариант ввода параметров синтеза, характеристик объекта и рассчитываемой голограммы. Среди них длина волны используемого излучения, размер минимального элемента структуры объекта, расстояние от объекта до голограммы, угол падения опорной волны, размер характеристического элемента голограммы, характер распределения фазы проходящего через объектный транспарант пучка лучей при синтезе голограммы, глубина поверхностного рельефа при восстановлении отражательных рельефно-фазовых голограмм-проекторов и др.

Разработанный программный комплекс позволяет синтезировать и восстанавливать голограммы, содержащие примерно  $4,4 \times 10^9$  пикселей. Реальный предельный размер синтезируемой голограммы может быть получен из вышеприведенного числа путем учета периода ее дискретизации. Ключевые особенности комплекса состоят в менее жестких требованиях к размеру используемой оперативной памяти, в возможности параллельного синтеза независимых друг от друга субапертур голограммы на одном компьютере при наличии многоядерной или многопроцессорной вычислительной системы, а также в поддержке синтеза голограммной структуры методом распределенных вычислений на нескольких компьютерах.

### **Проверка работоспособности разработанных метода синтеза голограмм и программного комплекса**

Работоспособность описанных выше метода синтеза голограмм-проекторов и программного комплекса была проверена экспериментально. Для этого с помощью ранее разработанного [8] и нового, описываемого в настоящей статье, программных комплексов были синтезированы и численно восстановлены две отражательные рельефно-фазовые бинарные голограммы-проекторы Френеля, предназначенные для работы в излучении с длиной волны 13,5 нм. Синтез осуществлялся при использовании параметров,

выбранных в соответствии с [13]. В качестве объекта при синтезе использовалось бинарное изображение “уголков” размером  $23 \times 23$  пиксела, представленное на рис. 3 и обладающее характеристическим размером 80 нм (ширина самой тонкой линии на рис. 3).

Размер синтезированных голограмм-проекторов составлял  $435 \times 435$  пикселов, размером  $d = 20$  нм, расстояние между плоскостью объекта и плоскостью регистрации голограммы было принято равным 20,344 мкм, а угол падения опорного пучка составил  $14,7^\circ$ .

На рис. 4 представлены изображения бинарных голограмм, синтезированных с помощью нового и старого программных комплексов. Легко заметить, что структуры голограмм практически идентичны, что свидетельствует о работоспособности предложенного нами метода синтеза голограмм-проекторов – метода “штамповки”.



Рис. 3. Изображение исходного объекта.

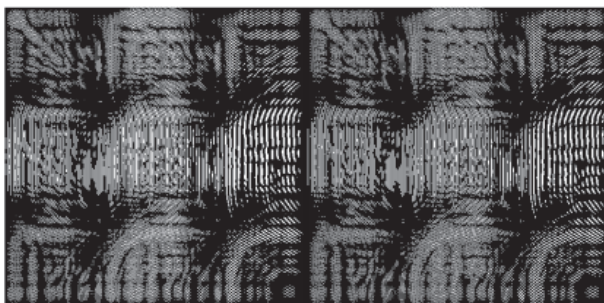


Рис. 4. Бинарные голограммы, синтезированные с помощью старого (слева) и нового программных комплексов (справа).

Восстановление синтезированных бинарных рельефно-фазовых отражательных голограмм осуществлялось в виртуальном пространстве с помощью тех же программных комплексов в условиях, соответствующих условиям их синтеза. Восстановленные изображения представлены на рис. 5 и 6, причем на рис. 6 представлены восстановленные изображения, прошедшие пороговую обработку, имитирующую нелинейность характеристической кривой фоторезиста [8].

Представленные изображения имеют схожий интервал уровней порога (23-85 слева и 23-95 справа), обеспечивающих наибольшее соответствие прошедшего пороговую обработку восстановленного изображения исходному объекту.

Соответствие структур и качество восстановленных изображений свидетельствует о работоспособности предложенного программного



Рис. 5. Изображения, полученные при восстановлении голограмм, синтезированных с помощью старого (слева) и нового (справа) программных комплексов.

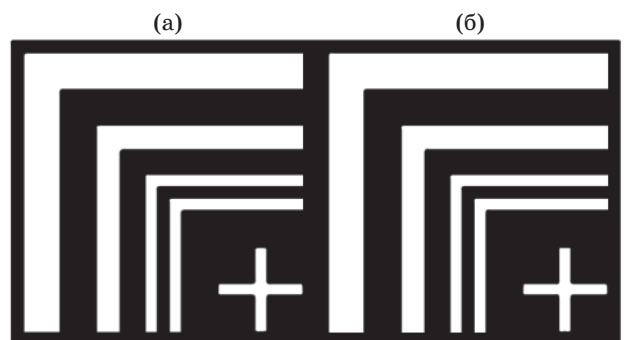


Рис. 6. Изображения, прошедшие пороговую обработку при восстановлении голограмм, синтезированных с помощью старого (традиционного) – (а) и нового (предложенного) – (б) программных комплексов.

комплекса. Отметим, что применение метода "штамповки" позволило примерно в три раза сократить время синтеза голограммы указанного выше объекта по сравнению с традиционным методом синтеза. При увеличении размеров объекта разница соответствующих значений времени, затрачиваемого на синтез, более заметна.

С целью демонстрации заложенной в комплекс возможности задания различных распределений фазы проходящей через объект волны при синтезе голограммы на рис. 7 представлены изображения голограммы и восстановленных изображений. Они были получены до пороговой обработки и после нее с помощью разработанного программного комплекса, основанного на разбиении объекта на типовые элементы его структуры. Отметим, что синтез голограммы в этом случае проводился при описанных выше параметрах. Однако фаза волны, проходящей через каждый пиксел объектного транспаранта, при этом считалась случайной, распределенной по нормальному закону в интервале  $0-\pi$ . Таким образом, в описываемом

случае мы имитировали диффузную подсветку объекта, осуществляемую с помощью матового стекла, установленного вплотную к объектному транспаранту.

Возможность использования комплекса для моделирования случаев восстановления голограмм-проекторов с различной высотой поверхностного рельефа иллюстрируют изображения, представленные на рис. 8.

Отметим, что характер представленных на рис. 8 изображений полностью согласуется с известной зависимостью дифракционной эффективности отражательных рельефно-фазовых голограмм от высоты их поверхностного рельефа.

### Заключение

В рамках данной работы был предложен, обоснован и успешно опробован метод синтеза голограмм, основанный на разбиении объекта на типовые элементы его структуры. На его базе создан специализированный комплекс синтеза и восстановления голограмм-проекторов Фре-

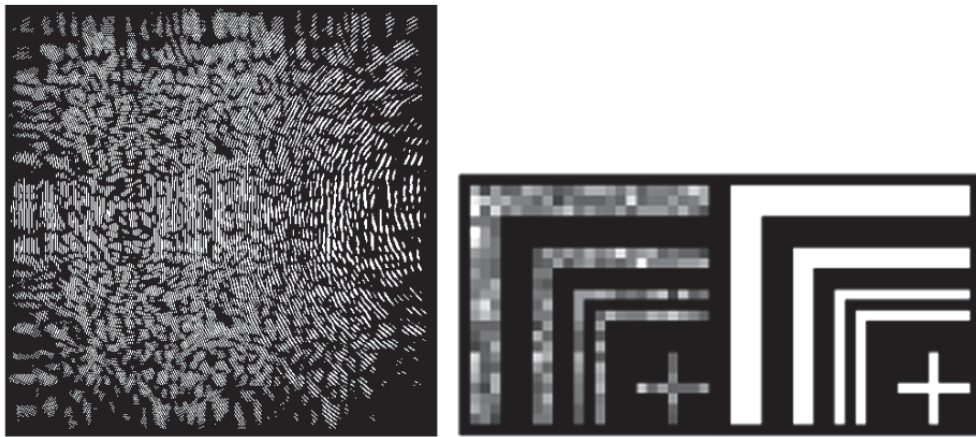


Рис. 7. Бинарная голограмма и ее восстановленные изображения до и после пороговой обработки, полученные при восстановлении голограмм, синтезированных с моделированием диффузной подсветки с диапазоном набега фаз  $(0-\pi)$ .



Рис. 8. Восстановленные изображения, полученные с помощью отражательных рельефно-фазовых голограмм с различной высотой поверхностного рельефа (слева направо:  $0$ ;  $0,02\lambda$ ;  $0,2\lambda$ ;  $0,25\lambda$ ;  $0,3\lambda$ ;  $0,48\lambda$ ;  $0,5\lambda$ ).

неля. Основные его отличия от предыдущей, ранее опубликованной, версии комплекса заключены в существенном сокращении времени синтеза за счет сокращения объема требуемых вычислений и в улучшенной модульной архитектуре программы, позволяющей эффективно использовать практически любое имеющееся вычислительное оборудование. Помимо этого, следует отметить его более удобный интерфейс и заложенную в нем возможность адаптации практически к любой из основных широко ис-

пользуемых операционных систем. Все эти нововведения обеспечили существенный рост производительности программного комплекса и обеспечили возможность его использования для синтеза голограмм-проекторов Френеля с относительно большой линейной апертурой. Работоспособность комплекса и высокое качество синтезируемых с его помощью голограмм подтверждены результатами проведенного сравнительного экспериментального исследования.

\* \* \* \* \*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Корешев С.Н., Ратушный В.П. Использование метода голографии для получения изображений двумерных объектов при решении задач фотолитографии высокого разрешения // Оптический журнал. 2004. Т. 71. № 10. С. 32–39.
2. Koreshev S.N., Ratushnyi V.P. Holographic method for obtaining images with limiting high resolution for extreme shot-wave lithography problems // Proc. SPIE. 2004. V. 5290. P. 221–232.
3. Clube F., Gray S., Struchen D., Tisserand J., Malfoy S., Darbellay Y. Holographic microlithography // Opt. Eng. 1995. V. 34. № 9. P. 2724–2730.
4. Корешев С.Н., Ратушный В.П. Голограммы сфокусированного изображения в задаче высокоразрешающей проекционной голографической фотолитографии // Опт. и спектр. 2006. Т. 101. № 6. С. 1038–1042.
5. Jacobsen C., Howells M. Projection x-ray lithography using computer-generated holograms: A study of compatibility with proximity lithography // J. Appl. Phys. 1992. V. 71. P. 2993–3001.
6. Naullenau P.P., Salmassi F., Cullikson E.M., Liddle J.A. Design and fabrication of a high-efficiency extreme-ultraviolet binary phase-only computer-generated hologram // Appl. Optics. 2007. V. 46. № 14. P. 2581–2585.
7. 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.
8. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Иванов Ю.А., Козулин 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.
9. Shimobaba T., Nakayama H., Masuda N., Ito T. Rapid calculation algorithm of Fresnel computer-generated-hologram using look-up table and wavefront-recording plane methods for three-dimensional display // OPTICS EXPRESS. 2010. V. 18. № 19. P. 19504–19509.
10. Lucente M. Interactive Computation of holograms using a “Look-up Table” // J. Electron. Imaging. 1993. № 2. P. 28–34.
11. Kim S.C., Kim E.S. Effective generation of digital holograms of three-dimensional objects using a novel “look-up table method” // Appl. Opt. 2008. V. 47. № 19. P. D55–D62.
12. Kim S.C., Kim E.S. Fast computation of hologram patterns of a 3D object using run-length encoding and novel look-up table methods // Appl. Opt. 2009. V. 48. № 6. P. 1030–1041.
13. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Козулин И.А. Выбор параметров синтеза голограмм-проекторов для фотолитографии // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 9. С. 29–34.