

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

На правах рукописи

Никаноров Олег Викторович

УДК 778.38

**СИНТЕЗИРОВАННЫЕ ГОЛОГРАММЫ–ПРОЕКТОРЫ ФРЕНЕЛЯ  
ДЛЯ ФОТОЛИТОГРАФИИ**

Специальность 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и  
комплексы

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Санкт-Петербург 2011 г.

Работа выполнена на кафедре прикладной и компьютерной оптики Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Корешев  
Сергей Николаевич (СПбГУ ИТМО)

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор Путилин  
Эдуард Степанович (СПбГУ ИТМО),

кандидат физико-математических наук, Шевцов  
Михаил Константинович (ВНЦ "ГОИ им. С.И.  
Вавилова")

Ведущее предприятие – ФГУП "НПК "ГОИ им. С.И. Вавилова" (Санкт-Петербург)

Защита диссертации состоится «14» июня 2011 года в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.227.01 “Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы” при Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий, механики и оптики по адресу: г. Санкт-Петербург, пер. Гривцова, 14., ауд. 313-а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПб ГУ ИТМО.

Отзывы и замечания (в 2 экз.) по автореферату направлять в адрес университета: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, секретарю диссертационного совета Д 212.227.01.

Автореферат разослан «13» мая 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.227.01  
кандидат технических наук, доцент



В.М. Красавцев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Современное развитие электроники и оптоэлектроники невозможно без перманентного совершенствования технологии фотолитографии. В частности, сегодня в этой области стандартом является применение лазерного излучения с длиной волны 193 нанометра, но очевидно, что в недалеком будущем необходимо переходить на иное оборудование, работающее с электромагнитным излучением с еще меньшей длиной волны. При этом весьма перспективными представляются фотолитографические системы, использующие отражательные рельефно-фазовые синтезированные голограммы-проекторы, которые характеризуются возможностью формирования полностью свободных от aberrаций, в том числе и полевых, действительных изображений элементов структуры изготавливаемых устройств. Главное преимущество таких голограмм-проекторов заключается в отсутствии необходимости использования оптически прозрачных сред. Это становится возможным благодаря тому, что они представляют собой отражающие рельефно-фазовые дифракционные решетки.

Трудности, сопровождающие дальнейшее использование классического метода фотолитографии, основанного на использовании объективов, работающих на пропускание и имеющих высокую стоимость, обуславливают актуальность настоящей диссертационной работы, направленной на разработку и исследование альтернативного метода фотолитографии, не использующего дорогостоящих объективов и каких-то ни было оптически прозрачных сред.

Цель работы состояла в разработке метода и средств голографической фотолитографии основанной на использовании синтезированных голограмм-проекторов Френеля.

Достижение этой цели предполагало решение ряда важных научно-технических задач. Среди них:

- проведение сравнительного анализа требований, предъявляемых к разрешающей способности генераторов изображений, предназначенных для изготовления фотошаблона и отображения голограммной структуры;
- оптимизация параметров дискретизации объектного транспаранта и голограммы, обеспечивающая минимизацию потерь качества восстанавливаемых изображений;
- создание и отладка программного комплекса синтеза и восстановления голограмм-проекторов;
- практическая демонстрация возможности использования синтезированной голограммы-проектора в реальном фотолитографическом процессе.

Основные научные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Равное одной четверти соотношение диаметра рабочего пятна генератора изображений, используемого для отображения на носителе синтезированной голограммы - проектора, к размеру минимального элемента структуры фотошаблона.
2. Невозможность достижения предельного для традиционных проекционных оптических систем размера минимального элемента отображаемой структуры, равного рабочей длине волны излучения, при использовании дискретных синтезированных голограмм. Предельным для дискретных синтезированных голограмм является характеристический размер восстановленного изображения, равный  $1,5 \lambda$ .
3. Практическая реализация метода голографической фотолитографии основанного на использовании синтезированных голограмм-проекторов Френеля.
4. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность безабберационного восстановления голограмм-проекторов Френеля при углах падения восстанавливающей волны, превышающих угол падения плоской опорной волны при синтезе голограммы и удовлетворяющим условию  $\theta' = \arcsin\left(\sin(\theta) \pm n \frac{\lambda}{d}\right)$ , где  $\theta$  - угол падения опорного пучка лучей,  $\lambda$  - длина волны,  $d$  - период дискретизации голограммы, а  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

Научная новизна работы состоит в том, что в ней:

- 1) Сформулированы, научно-обоснованы и экспериментально верифицированы критерии выбора параметров синтезированных голограмм-проекторов, обеспечивающие безабберационное восстановление двумерного транспаранта.
- 2) Найдены соотношения, связывающие допустимый угол падения восстанавливающей волны с периодом дискретизации голограммы и рабочей длиной волны.
- 3) С помощью созданного программного комплекса синтеза и цифрового восстановления голограмм-проекторов установлен характер влияния параметров синтезированных голограмм на качество восстанавливаемых с их помощью изображений.
- 4) Выявлен характер зависимости качества восстановленного изображения от уровня бинаризации и сформулированы рекомендации по его оптимизации.

Практическая ценность работы заключена в следующем:

- сформулированы рекомендации по выбору параметров синтеза рельефно-фазовых отражательных голограмм-проекторов;
- разработаны алгоритм и программный комплекс синтеза и цифрового восстановления голограмм-проекторов Френеля;
- получена голограмма-проектор, пригодная для использования в реальном фотолитографическом процессе;
- разработаны принципы построения стенда восстановления рельефно-фазовой отражательной голограммы-проектора Френеля, отличающегося возможностью безабберационного восстановления голограмм-проекторов при углах падения восстанавливающей плоской волны, превышающей угол падения плоской опорной волны при синтезе голограммы;
- практически реализованы методы голографической фотолитографии основанной на использовании синтезированных рельефно-фазовых отражательных голограмм-проекторов.

Личный вклад автора. Все теоретические и экспериментальные исследования выполнены лично автором, или при его непосредственном участии, совместно с научным руководителем Корешевым С.Н. и сотрудником ЗАО «ХолоГрэйт» Ратушным В.П., изготовление синтезированной голограммы-проектора на носителе было осуществлено в ООО «Специализированное предприятие «Голография»» (г. Киев, Украина), при непосредственном участии специалистов этой компании: А.А. Ивановского и И.В. Твердохлеба.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на V Международной конференции "ГОЛОЭКСПО-2008" (г. Санкт-Петербург, 2008г.), VI Международной конференции "ГОЛОЭКСПО-2009" (г. Киев, Украина, 2009г.) и VII Международной конференции "ГОЛОЭКСПО-2010" (г. Москва, 2010г.), на XXXVII, XXXVIII, XXXIX и XL научных и учебно-методических конференциях профессорско-преподавательского состава СПбГУ ИТМО (г. Санкт-Петербург, 2008-2011 г.), на VI, VII и VIII Всероссийских межвузовских конференциях молодых ученых (г. Санкт-Петербург, 2009-2011г.).

Реализация результатов. Практическая значимость результатов работы подтверждена актом внедрения.

Публикации. Общее число публикаций автора составляет 6 наименований. Все они включены в данную диссертационную работу, а так же есть решение о выдаче патента на полезную модель по заявке № 201 01 526 74 (дата приоритета 22.12.10).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, библиографического списка из 36 наименований и одного приложения; содержит 73 страницы текста и 28 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель и задачи, отображены научная новизна и практическая ценность, определены основные направления исследования.

**В первой главе диссертации** описано современное состояние проблемы использования синтезированных голограмм-проекторов в фотолитографии.

Сформулированы причины, обуславливающие необходимость применения альтернативных методов фотолитографии при использовании излучения ультрафиолетового диапазона спектра, в частности отсутствие оптически прозрачных сред для излучения данного диапазона волн и сложность изготовления фотолитографических объективов.

Использование отражательных рельефно-фазовых голограмм представлено в качестве одного из перспективных вариантов решения данной проблемы, так как в данном случае не используются прозрачные среды, а размер одновременно экспонируемой области полупроводниковой пластины в большей степени зависит от когерентности источников излучения и характеристик расширителей пучков, чем от полевых аберраций проекционного объектива, в качестве которого используется голограмм-проектор.

Представлены результаты анализа современной литературы, в которой имеются сведения о разработках голографических фотолитографических систем на основе практически всех известных видов голограмм, в частности, голограмм Френеля, голограмм сфокусированного изображения и синтезированных голограмм. Наиболее заманчивым из них представляется вариант, основанный на использовании синтезированных голограмм, рассчитываемых с помощью компьютера и отображаемых на носителе с помощью лазерных, либо электронно-лучевых генераторов изображения. Особенно выигрышным применение синтезированных голограмм может оказаться в экстремально коротковолновом ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах спектра.

Рассмотрена суть процесса синтеза голограммы, а также ее отображения на физическом носителе с помощью генератора изображений для создания рельефнофазовой голограммы-проектора Френелевского типа, которая при восстановлении опорным пучком формирует действительное изображение объекта на поверхности полупроводниковой пластины, покрытой слоем фоторезиста.

Отображены результаты использования другими научными группами синтезированных голограмм для решения фотолитографических задач.

В заключение рассмотрения описанных в литературе реализаций метода голографической проекционной фотолитографии, основанного на использовании синтезированной голограммы-проектора, отмечено, что до настоящего момента в ней в основном присутствуют лишь сведения о компьютерном моделировании процесса. Работы, описывающие практическое воплощение метода, несмотря на его безусловную перспективность, в литературе пока отсутствуют.

**Во второй главе** приведено определение и обоснование требований, предъявляемых к структуре и методам расчета и отображения синтезированных голограмм-проекторов, предназначенных для использования в голографическом фотолитографическом процессе.

В первом разделе данной главы проведен сравнительный анализ разрешающей способности генератора изображений, необходимой для изготовления фотошаблона и формирующей его изображение голограммы – проектора. При этом рассматривался наиболее удобный для практической реализации случай внеосевой голограммы с наклонным параллельным опорным пучком и бинарным амплитудным объектным транспарантом, освещаемым параллельным нормально падающим пучком лучей и располагаемом параллельно голограмме так, что геометрический центр транспаранта совпадает с нормалью, восстановленной из центра голограммы. При этих условиях числовая апертура излучения, дифрагировавшего на минимальном по размеру элементе структуры фотошаблона, может быть описана с помощью следующего выражения:

$$A = n \sin \alpha = \frac{\lambda}{a_t}, \quad (2.1)$$

где:  $A$  – числовая апертура пучка;  $n$  – показатель преломления среды между фотошаблоном и голограммой (в нашем случае  $n=1$ );  $\alpha$  – апертурный угол дифрагировавшего излучения;  $\lambda$  – рабочая длина волны;  $a_t$  – характеристический размер фотошаблона, т.е. минимальный размер элемента структуры фотошаблона. Для голографической регистрации рассматриваемого пучка лучей, одновременно с ним на плоскость регистрации голограммы должен быть направлен параллельный опорный пучок лучей. При этом необходимость пространственного разделения опорного и объектного пучков обуславливает соответствующий выбор минимально допустимого угла падения опорного параллельного пучка лучей на плоскость регистрации голограммы. Из геометрических представлений следует, что для случая точечного объекта угол падения опорного пучка на плоскость регистрации голограммы –  $\theta$  должен выбираться из условия  $\theta \geq \alpha$ . При этом минимальная величина пространственного периода

регистрируемой голограммной структуры  $T_{min}$  может быть определена с помощью следующего выражения:

$$T_{min} \leq \frac{\lambda}{2 \sin \alpha} \quad (2.2)$$

Из (2.2) и (2.1) с учетом теоремы Котельникова (теоремы отсчетов) было получено выражение, описывающее зависимость требуемого периода дискретизации голограммы  $d$  от характеристического размера фотошаблона  $a_i$ :

$$d \leq \frac{1}{2} T_{min} \leq \frac{a_i}{4} \quad (2.3)$$

Из (2.3) следует, что период дискретизации голограммы, а, значит, и диаметр рабочего фокального пятна генератора изображения, используемого для отображения на носителе синтезированной голограммы - проектора, предназначенной для формирования действительного изображения двумерного объекта, должен быть, как минимум, в 4 раза меньше характеристического размера объекта, т.е., в нашем случае, характеристического размера фотошаблона. Современные электроннолучевые генераторы изображений характеризуются весьма малыми диаметрами формируемого с их помощью фокального пятна вплоть до 4 нм. Отсюда, с учетом (2.3), можно сделать вывод о том, что современные электроннолучевые генераторы изображений могут быть использованы для отображения на носителях голограмм-проекторов, предназначенных для формирования изображений фотошаблонов с характеристическим размером не менее 16 – 40 нм. Указанные характеристические размеры являются современным технологическим порогом применимости синтезированных голограмм-проекторов в фотолитографическом процессе.

Во втором разделе данной главы проведена оптимизация параметров дискретизации фотошаблона и голограммы, обеспечивающих минимизацию потерь качества восстанавливаемых изображений. Данная задача была решена для случая синтеза одномерных амплитудных голограмм, характеризующихся направлением распространения опорной волны и расположением восстановленного изображения, подобными тем, что были рассмотрены в предыдущем разделе данной главы. При этом было принято, что если бы изготовление голограммы осуществлялась в непрерывном виде методом непосредственной аналоговой физической голографии, то функция ее амплитудного пропускания могла бы быть описана с помощью следующего выражения:

$$t(x) = t_0 - kI(x) \quad (2.4)$$

где  $I(x)$  – функция распределения интенсивности голографического поля в плоскости регистрации;  $t_0$  – начальный уровень пропускания;  $k$  – коэффициент пропорциональности.

В рассматриваемом случае наклонно падающей плоской опорной волны распределение интенсивности голографического поля имеет вид:

$$I(x) = A(x)A^*(x) + r^2 + A(x)r \exp(-2\pi i \xi_r x) + A^*(x)r \exp(2\pi i \xi_r x) \quad (2.5)$$

где  $A(x)$  – комплексная амплитуда объектной волны;  $A^*(x)$  – амплитуда волны, комплексно-сопряженной объектной волне;  $r$  – амплитуда плоской опорной волны;  $\xi_r = \frac{\sin(\theta)}{\lambda}$  – пространственная частота опорной волны,  $\theta$  – угол падения опорной волны относительно нормали к плоскости голограммы;  $\lambda$  – рабочая длина волны.

При восстановлении записанной таким образом голограммы опорной волной, использовавшейся при записи голограммы, распределение комплексной амплитуды восстановленного излучения в плоскости голограммы, сразу за голограммой может быть описано следующим выражением:

$$W(x) = R(x)t(x) = t_0 r \exp(2\pi i \xi_r x) - kI(x)r \exp(2\pi i \xi_r x) \quad (2.6)$$

где  $R(x) = r \exp(2\pi i \xi_r x)$  – комплексная амплитуда плоской восстанавливающей волны равная комплексной амплитуде опорной волны.

В случае же дискретной синтезированной голограммы, отображаемое на носителе с помощью генератора изображения распределение интенсивности голографического поля  $I_d(x)$  будет отличаться от распределения, описываемого выражением (2.5), и будет иметь следующий вид:

$$I_d(x) = \left( I(x) \sum_{n=-N/2}^{N/2} \delta(x - nd) \right) \otimes \text{rect}\left(\frac{x}{a}\right) \quad (2.7)$$

где  $d$  – период дискретизации голограммы;  $a$  – диаметр пятна генератора изображений, создающего голограмму;  $N$  – число элементов дискретизации голограммы. Подставив (2.7) в (2.4) и полученный результат в (2.6), получим выражение, описывающее распределение амплитуды излучения, восстановленного с помощью дискретной синтезированной голограммы в плоскости самой голограммы:

$$\begin{aligned} W_d(x) &= t_0 r \exp(2\pi i \xi_r x) - k r \exp(2\pi i \xi_r x) \left[ \left( I(x) \sum_{n=-N}^N \delta(x - nd) \right) \otimes \text{rect}\left(\frac{x}{a}\right) \right] = \\ &= t_0 r \exp(2\pi i \xi_r x) - k r \exp(2\pi i \xi_r x) \left[ \left\{ A(x)A^*(x) + r^2 + \right. \right. \\ &\left. \left. + A(x)r \exp(-2\pi i \xi_r x) + A^*(x)r \exp(2\pi i \xi_r x) \right\} \sum_{n=-N}^N \delta(x - nd_d) \right] \otimes \text{rect}\left(\frac{x}{a}\right) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Анализ структуры восстановленного поля был проведен в частотном пространстве. Для этого запишем выражение, описывающее спектр восстановленного поля  $U_d(\xi)$ :

$$U_d(\xi) = t_0 F\{r \exp(2\pi i \xi_r x)\} - k F\{r \exp(2\pi i \xi_r x)\} \otimes \left\{ \left[ F\{A(x)A^*(x)\} + F\{r^2\} + F\{A(x)r \exp(-2\pi i \xi_r x)\} + F\{A^*(x)r \exp(2\pi i \xi_r x)\} \right] \otimes \sum_{n=-N}^N \delta(\xi - \xi_n) \right\} a \frac{\sin(\pi \xi a)}{\pi \xi a} \quad (2.9)$$

В данном выражении сделано допущение, что число дискретных элементов на голограмме  $N$  настолько велико, что сумму  $\sum_{n=-N/2}^{N/2} \delta(x - n \cdot d)$  можно считать равной сумме  $\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - n \cdot d)$ . Фурье-образ этой бесконечной суммы дельта-функций, как известно, равен  $\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(\xi - \xi_n)$ .

Входящее в состав выражения (2.9) первое слагаемое, обусловленное средним пропусканием голограммы, полностью аналогично первому слагаемому соответствующего выражения, описывающего спектр непрерывной голограммы. Имеющая место во втором слагаемом (2.9) свертка выражения, описывающего спектры трех основных порядков дифракции непрерывной голограммы, с суммой дельта функций описывает обусловленное дискретным характером синтезированной голограммы периодическое повторение спектра поля, восстанавливаемого с помощью непрерывной голограммы. При этом период мультипликации спектра  $\xi_n = \frac{1}{d}$ , где  $d$  - период дискретизации голограммы. Содержащееся во втором слагаемом выражения (2.9) произведение мультиплицированного спектра с функцией  $\frac{\sin(\pi \xi a)}{\pi \xi a}$  свидетельствует о наличии зависящей от размера фокального пятна генератора изображения модуляции спектра восстановленного поля. На рис.1, выполненном для случая объекта, характеризующегося полосой пространственных частот  $\pm \Delta/2$ , схематично представлен спектр амплитуды поля, восстанавливаемого с помощью дискретной голограммы. Отметим, что изображенные на нем пики, шириной  $2\Delta$ , соответствуют интермодуляционным помехам, в два раза более узкие пики - соответствуют спектрам изображений, восстанавливаемых в  $\pm 1$  порядках дифракции голограммы, а стрелки - дельта функциям, описывающим обусловленное дискретизацией голограммы периодическое повторение спектра восстанавливающей волны.

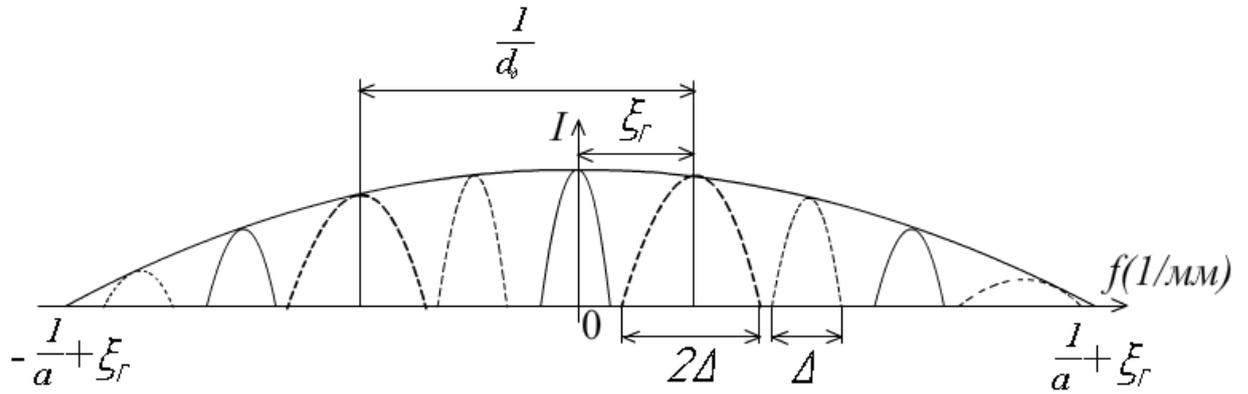


Рис. 2.1. Спектр поля, восстановленного с помощью синтезированной дискретной голограммы

Из выражения (2.9) и рис.2.1 следует возможность оптимизации параметров дискретизации и структуры голограммы, обеспечивающей, с одной стороны возможность пространственного разделения компонентов восстановленного поля, а с другой стороны – максимально возможную ширину пространственного спектра объекта при минимальном уровне помех. При этом рассматривается случай, когда период дискретизации голограммы равен диаметру фокального пятна генератора изображения:

$$a=d \quad , \quad (2.10)$$

Так, выполнение этого соотношения позволяет добиться максимальной дифракционной эффективности синтезированных голограмм, что более подробно описано в третьей главе диссертации.

В свою очередь, требование обеспечения пространственного разделения компонентов поля, восстанавливаемого с помощью голограммы, обуславливает необходимость ограничения ширины спектра регистрируемого объекта, т.е. необходимость обеспечения выполнения неравенства:

$$\Delta \leq \frac{1}{4d} \quad (2.11)$$

а также выбор пространственной частоты опорной волны, равной:

$$|\xi_r| = \frac{\sin|\theta|}{\lambda} = 1,5\Delta_{\max} \quad (2.12)$$

где  $\Delta_{\max} = \frac{1}{4d}$ .

Отсюда получим условие выбора угла падения опорной волны:

$$\sin|\theta| = \frac{1,5\lambda}{4d} \quad . \quad (2.13)$$

Из (2.13) следует ограничение, накладываемое на длину волны восстановления синтезированной голограммы. Поскольку  $\sin|\theta|$  не может превышать единицы, рабочая длина волны восстановления синтезированной голограммы – проектора не может быть более 2,7 периодов дискретизации голограммы.

Подстановка выражения (2.3) в (2.11) и (2.13) позволяет получить выражения, описывающие зависимость допустимых величин ширины спектра объекта и угла падения опорной волны от характеристического размера изображения, формируемого синтезируемой голограммой – проектором:

$$\Delta \leq \frac{1}{a_t} \quad (2.14)$$

$$\sin|\theta| = \frac{1,5\lambda}{a_t} \quad (2.15)$$

Из (2.15) следует невозможность использования дискретных синтезированных голограмм для формирования изображений с предельным для оптики характеристическим размером, равным длине волны восстанавливающего излучения. Предельным для дискретных синтезированных голограмм является характеристический размер восстановленного изображения, равный  $1,5\lambda$ .

Выражения (2.13), (2.14) и (2.15) позволяют по известному характеристическому размеру фотошаблона определить оптимальные, с точки зрения указанных выше критериев, параметры синтеза голограммы-проектора, а именно: период дискретизации голограммы, угол падения опорной волны, длину волны восстанавливающего излучения и необходимый диаметр фокального пятна генератора изображения, используемого для отображения голограммы на носителе.

В третьем разделе данной главы теоретически обоснована возможность безабберационного восстановления синтезированных голограмм-проекторов Френеля при углах падения восстанавливающей волны, значительно превышающих угол падения опорной волны при синтезе голограммы.

Как показано выше, принципиальная особенность синтезированных голограмм-проекторов Френеля заключена в их дискретизации, обусловленной использованием компьютеров для синтеза голограмм и генераторов изображений для отображения их структуры на носителе. В этом случае минимальный размер элемента структуры голограммы ограничен минимально возможным диаметром пятна генератора и характеристическим элементом структуры объекта. Такая особенность голограмм и относительно большой диаметр пятна современных генераторов изображений (4-6 нм) обуславливают относительную

низкочастотность синтезированных голограмм-проекторов Френеля используемых в методе голографической фотолитографии.

Низкие пространственные частоты голограммы затрудняют возможность разделения порядков дифракции в процессе проекции структуры изделия на поверхность фоторезиста. Возможность создания условий обеспечивающих увеличение допустимого угла падения восстанавливающего пучка при использовании синтезированных голограмм с относительно малой несущей пространственной частотой основывается на результатах частотного анализа спектра восстановленного волнового фронта.

При детальном анализе мультипликации спектра было получено выражение, позволяющее рассчитать угол падения восстанавливающей волны, обеспечивающий формирование в заданной области безабберационного изображения объекта из разных порядков дифракции голограммы:

$$\frac{\sin(\theta')}{\lambda} = \frac{\sin(\theta)}{\lambda} \pm n \frac{1}{d}, \text{ где } n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.20)$$

Таким образом, при восстановлении дискретных голограмм угол падения восстанавливающего пучка следует выбирать исходя из следующего выражения.

$$\theta' = \arcsin\left(\sin(\theta) \pm n \frac{\lambda}{d}\right), \text{ где } n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.21)$$

Экспериментальное подтверждение возможности создания условий обеспечивающих увеличение допустимого угла падения восстанавливающего пучка при использовании синтезированных голограмм с относительно малой несущей пространственной частотой будет представлено ниже.

**В третьей главе** описывается еще одна характерная особенность структуры синтезированной голограммы - ее квантованность, т.е. дискретное представление амплитуды модулируемого параметра восстанавливающего излучения. Например, в случае рельефно-фазовой голограммы - наличие в ее микроструктуре конечного числа уровней высоты рельефа. Наиболее распространены бинарные голограммы, в которых число уровней квантования равняется двум. Бинаризация упрощает процесс записи голограммы. Следовательно, при формулировке требований к структуре синтезированной голограммы, следует учитывать влияние ее особенностей на структуру восстанавливаемого изображения, таких как дискретизация и количество уровней квантования, чтобы получить необходимое качество изображения.

В первом разделе данной главы представлено сравнение энергетических характеристик традиционного и голографического методов фотолитографии. Анализ проводился с целью определения влияния голографического метода проекции на энергетические характеристики фотолитографического процесса.

В итоге было установлено соотношение мощности излучения, формирующего изображение фотошаблона на поверхности полупроводниковой пластины в голографическом варианте фотолитографического процесса, к мощности излучения, падающего на поверхность полупроводниковой пластины в традиционном варианте данного процесса:

$$\varepsilon_{\text{пл}} = \frac{\eta_{\text{гол}}}{k\tau} \quad (3.4)$$

где  $\tau$  - коэффициент пропускания проекционного объектива,  $k$  - коэффициент пропускания фотошаблона, равный отношению площади прозрачных элементов шаблона к его общей площади,  $\eta_{\text{гол}}$  - дифракционная эффективность используемой голограммы.

Из (3.4) следует близость  $\varepsilon_{\text{пл}}$  к единице, т.е. примерное равенство энергетических потерь в сравниваемых вариантах литографического процесса. Действительно, коэффициент  $k$  можно положить равным 0,5, пропускание проекционных объективов редко превышает 20%, а дифракционная эффективность рельефно фазовых голограмм обычно лежит в пределах 25 – 40%.

Из анализа выражений (3.4 – 3.5) можно сделать вывод о том, что замена традиционного проекционного объектива на голограмму – проектор не приводит к каким – либо ощутимым потерям энергии источника излучения, входящего в состав энергетической установки.

Во втором и третьем разделе данной главы приведен анализ влияния скважности, периода дискретизации и бинаризации на дифракционную эффективность синтезированных голограмм.

Была рассмотрена дифракционную эффективность фазовых дискретных голограмм в зависимости от скважности дискретной структуры, отображающей голограмму, и пространственной частоты голографической записи. Исследование проводилось для фазовой фурье-голограммы при ограниченном числе дискретных элементов, отображающих голограмму.

В результате показано, что максимальная эффективность, как и в случае амплитудной дискретной бинарной голограммы, имеет место при  $a/d = 1$ , где  $d$  - период дискретизации голограммы,  $a$  - размер отдельного элемента дискретизации, который считается одинаковым в направлении осей.

**В четвертой главе** представлены результаты работы, направленной на создание программного комплекса для синтеза и цифрового восстановления

голограмм-проекторов, а так же описаны результаты виртуальных экспериментов, осуществленных с его помощью, целью которых являлось определение влияния параметров синтеза на качество восстанавливаемых изображений. Необходимость включения в комплекс не только инструментов синтеза голограмм, но и алгоритмов их восстановления объясняется, в первую очередь, сильной зависимостью оптимальных, с точки зрения качества получаемого изображения, параметров синтеза голограмм-проекторов от структуры фотошаблона и, соответственно, необходимостью их подбора для каждого конкретного объекта.

В первом разделе главы описывается алгоритм синтеза голограмм-проекторов, который моделирует физический процесс формирования голографического поля. Его суть сводится к вычислению для каждой точки голограммы комплексной амплитуды поля формируемого всеми точками исходного объекта. При разработке алгоритма считалось, что виртуальный объект – фотошаблон установлен параллельно плоскости синтеза голограммы на расстоянии  $h$  от нее и освещается параллельным пучком когерентного излучения, нормально падающего на поверхность фотошаблона. В этом случае набег фазы излучения, прошедшего через точку объекта с координатами  $m, n$  и попавшего на голограмму в точку с координатами  $u, v$ , на пути от объекта до голограммы -  $\varphi_{u,v,m,n}$  рассчитывается с помощью следующего выражения:

$$\varphi_{u,v,m,n} = \frac{2 \cdot \pi \cdot l_{u,v,m,n}}{\lambda}, \quad (4.1)$$

где

$$l_{u,v,m,n} = \sqrt{(u - m)^2 + (v - n)^2 + h^2}. \quad (4.2)$$

Если предположить, что координаты точек объекта и голограммы  $u, v, n, m$  могут принимать лишь целочисленные значения, то можно получить выражение (4.3), описывающее комплексную амплитуду электромагнитного поля в произвольной точке на поверхности голограммы –  $g(u, v)$ ,

$$g(u, v) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N t(n, m) \{ \sin(\varphi_{u,v,n,m}) - i \cos(\varphi_{u,v,n,m}) \}, \quad (4.3)$$

где  $t(n, m)$  – коэффициент пропускания фотошаблона по амплитуде.

Опорная волна в рассматриваемом алгоритме представляется в виде параллельного пучка, падающего под углом  $\theta$  на плоскость синтеза голограммы, следовательно, распределение фаз на поверхности голограммы -  $\varphi_{on}$  может быть описано следующим выражением:

$$\varphi_{on} = \frac{2 \cdot \pi \cdot x \cdot \sin \theta}{\lambda}. \quad (4.4)$$

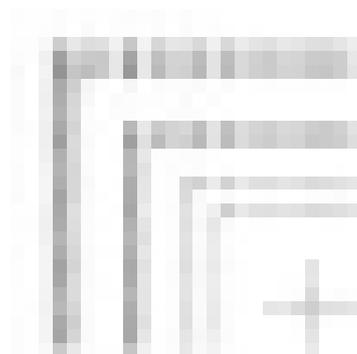
Отсюда, складывая комплексные амплитуды электромагнитного поля опорной волны и излучения, прошедшего через транспарант, получаем массив комплексных амплитуд голографического поля. Возведение каждого его элемента в квадрат по модулю обуславливает формирование массива значений интенсивности поля в каждой точке голограммы, необходимого для отображения ее структуры на соответствующем носителе. Так, если синтезируемую голограмму предполагается отображать в виде амплитудной голограммы, то указанные выше значения интенсивности должны отображаться в виде пропорциональных им значений амплитудного коэффициента пропускания голограммы. При отображении синтезируемой голограммы в виде рельефно-фазовой структуры рассчитанные значения интенсивности должны быть пропорциональны вариациям толщины носителя по апертуре голограммы. Невозможность обеспечения современными устройствами точного соответствия модулируемых параметров голограммы, т.е. коэффициента пропускания или толщины, обуславливает введение операции бинаризации в алгоритм синтеза голограмм-проекторов.

Во втором разделе данной главы описывается, что алгоритм восстановления голограмм-проекторов в рассматриваемом программном комплексе может осуществляться двумя методами. Один из них основан на том же алгоритме что и синтез голограмм, т.е. на использовании принципа Гюйгенса - Френеля, а второй метод основан на преобразовании Френеля. Реализация в комплексе двух указанных выше методов восстановления голограмм позволяет снизить жесткость ограничений, накладываемых на величину расстояния между объектом и голограммой, а также гарантирует отсутствие однотипных ошибок в алгоритмах синтеза и восстановления, основанных на принципе Гюйгенса – Френеля.

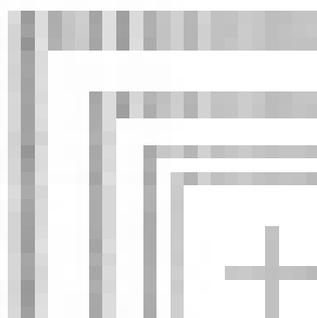
В третьем разделе главы представлен внешний вид программного комплекса и описан его интерфейс.

В четвертом разделе описываются исследования направленные на подтверждение работоспособности программного комплекса. Проверка была осуществлена в ходе синтеза и восстановления голограмм бинарного амплитудного транспаранта, представляющего собой набор полос шириной 4, 8 и 12 мкм. Работа выполнялась в соответствии с описанными выше пропорциями основных параметров синтеза и восстановления, а именно, при угле падения опорной волны  $10,5^{\circ}$  и при расстоянии от объекта до голограммы 0,8 мм, размере апертуры голограммы  $0,3 \times 0,3 \text{ мм}^2$ , длине волны 0,488 мкм, размере объекта  $0,1 \times 0,1 \text{ мм}^2$  и периодах дискретизации голограммы и объекта 1 и 4 мкм, соответственно, что соответствовало дифракционному ограничению размера восстанавливаемого изображения - 4 мкм для разных точек поверхности объекта. Цифровое восстановление синтезированных голограмм осуществлялось без их бинаризации двумя методами. Один из них был основан на использовании преобразования

Френеля, а другой на когерентном сложении амплитуд излучения, приходящего в каждую точку объекта от всех точек голограммы, т.е. на принципе Гюйгенса - Френеля. Результаты восстановления в полутоновом виде представлены на рис 4.3 и 4.4. Отметим, что для удобства отображения они инвертированы, т.е. их светлые участки представлены темными и наоборот. Наблюдаемая на рисунках "полосатость" светлых участков восстановленного изображения, объясняется, скорее всего, помехами дискретизации голограммы. Обусловленная ими модуляция интенсивности в светлых участках изображения существенно превышает ту, что реализуется в его темных участках. На рис. 4.5 и 4.6 представлены эти же изображения, но прошедшие осуществляемое с помощью программы Photoshop пороговое преобразование, имитирующее реакцию фоторезиста на засветку актиничным излучением.



*Рис. 4.3. Изображение, восстановленное с помощью преобразования Френеля*



*Рис. 4.4. Изображение, восстановленное на основе принципа Гюйгенса – Френеля*

Отметим, что интервал уровней порога, не приводящих к потере качества восстановленного изображения, у изображения, восстановленного с помощью преобразования Френеля, лежал в пределах 245-246 градаций серого и был существенно меньше интервала уровней порога, допустимого для изображения, представленного на рис. 4.5, лежавшего в пределах 225 – 251 градации серого. Величина интервала уровней порога, обеспечивающего наибольшее соответствие прошедшего пороговую обработку восстановленного изображения исходному объекту,

характеризует требования, предъявляемые к углу наклона характеристической кривой фоторезиста, предназначенного для совместного использования с синтезированной голограммой-проектором, и, следовательно, может быть выбрана в качестве критерия качества



*Рис. 4.5. Изображение, восстановленное с помощью преобразования Френеля при пороговом преобразовании*



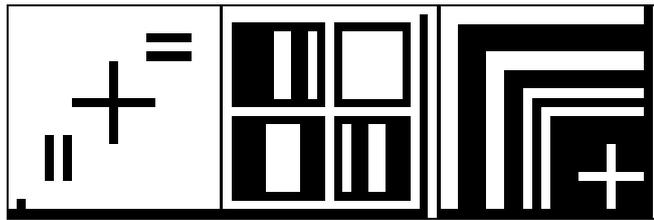
*Рис. 4.6. Изображение, восстановленное на основе принципа Гюйгенса – Френеля, после порогового преобразования*

восстанавливаемого изображения. Сравнение изображений, представленных на рис. 4.3 и 4.4, 4.5 и 4.6, позволяет сделать вывод о том, что при выбранных нами параметрах синтеза и восстановления голограмм, метод восстановления, основанный на принципе Гюйгенса – Френеля, дает лучшие результаты, по сравнению с методом, основанном на преобразовании Френеля.

Полученные экспериментальные данные и их соответствие результатам теоретического анализа, приведенного в предыдущих главах, подтверждают справедливость приведенных в ней рекомендаций, а также свидетельствуют о работоспособности разработанного нами программного комплекса и о возможности и перспективности его использования для оптимизации параметров синтеза голограмм-проекторов.

В пятом разделе главы демонстрируются возможность и перспективность использования комплекса для оптимизации параметров синтеза и восстановления голограмм-проекторов.

Работа выполнялась для трех разных по структуре, но одинаковых по размерам, степени детализации и условиям синтеза, объектов (рис. 4.10).

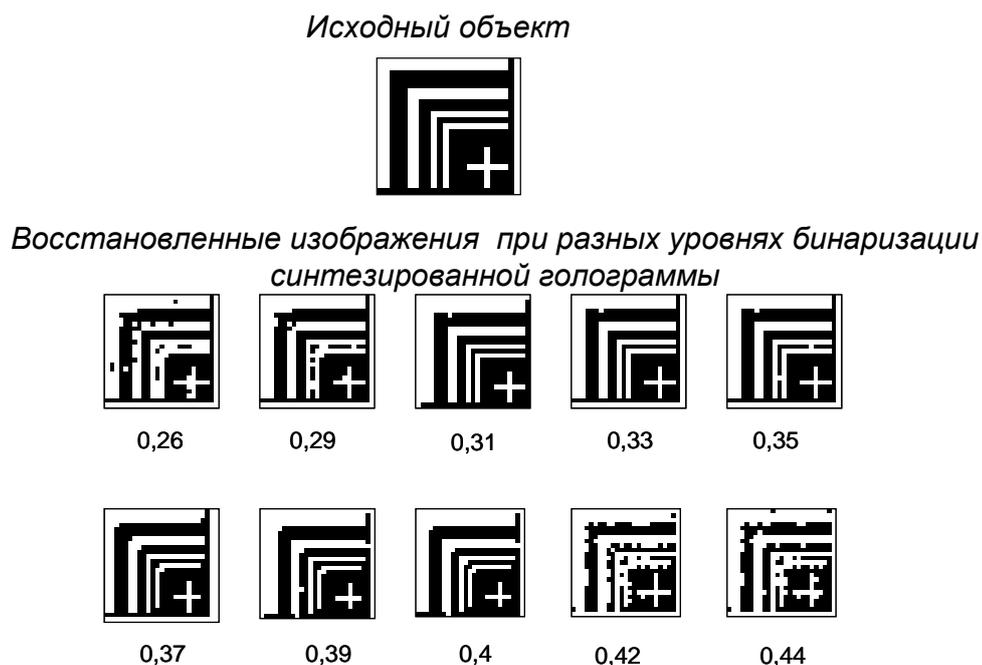


*Рис. 4.10. Вид объектов, используемых для экспериментального исследования оптимального угла падения опорной волны*

Ее методика основывалась на проведении исследования зависимости качества восстанавливаемого изображения от величины угла падения опорной волны, расстояния между фотошаблоном и голограммой и размера голограммы. В качестве критерия качества при этом, по-прежнему, использовался интервал уровней порога, не приводящих к потере элементов структуры восстановленного изображения. Напомним, что данная работа выполнялась с целью математического моделирования физической реализации процессов формирования и восстановления синтезированных голограмм. В связи с этим эксперименты проводились для рабочей длины волны имеющегося в лаборатории аргонового лазера - 0,488 мкм применительно к голограмме, которая может быть синтезирована с помощью имеющегося в наличии генератора изображений, с минимально возможным периодом дискретизации в 1мкм. Размер минимального элемента фотошаблона при этом выбирался равным 4 мкм, размер объекта – 96 мкм.

В шестом разделе главы описано исследование влияния бинаризации на качество восстановленного изображения и сформулированы рекомендации по оптимизации уровня бинаризации.

В связи с тем, что при отображении синтезируемой голограммы в виде рельефно-фазовой структуры рассчитанные значения интенсивности должны быть пропорциональны вариациям толщины носителя по апертуре голограммы-проектора. Невозможность обеспечения современными устройствами отображения на носителях точного соответствия модулируемых параметров голограммы, т.е. коэффициента пропускания или толщины, обуславливает введение в процесс синтеза голограмм-проекторов операции их бинаризации.



*Рис. 4.13. Изображение исходного объекта и его восстановленные изображения при разных уровнях бинаризации синтезированной голограммы*

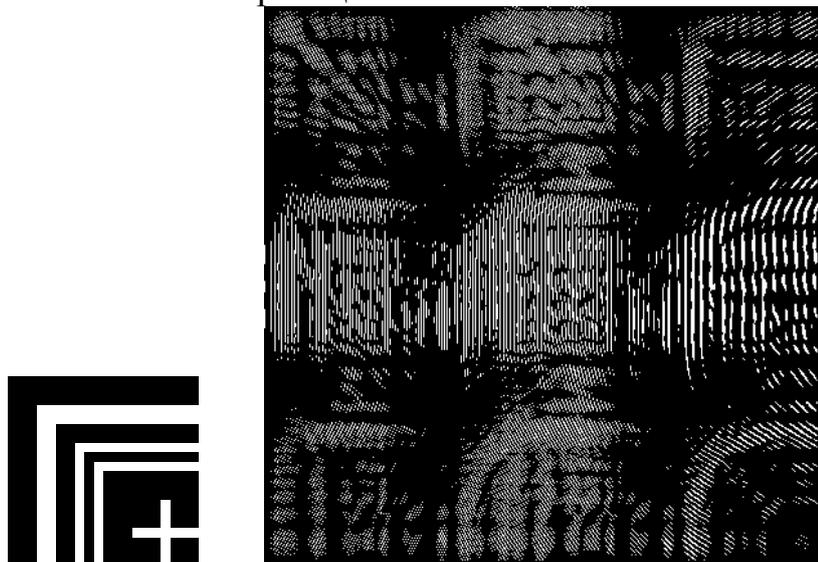
Из рисунка (рис.4.13), на котором представлены изображения восстановленные с помощью одной и той же голограммы, бинаризованной по различному уровню порога, видно, что выбранный уровень бинаризации оказывает сильное влияние на структуру восстанавливаемого изображения. Даже малые изменения уровня бинаризации могут приводить к существенным искажениям структуры восстанавливаемого изображения. Все это обуславливает необходимость включения операции оптимизации уровня бинаризации голограммы в перечень действий, необходимых для синтеза голограммы-проектора. Для объекта, приведенного на рис. 4.13, оптимальным является уровень бинаризации, лежащий в пределах 0,31 – 0,35. Отметим, что для объекта другой структуры оптимальным, с точки зрения качества восстановленного изображения, может быть совершенно другой диапазон уровней бинаризации.

В седьмом разделе главы предоставлено экспериментальное подтверждение возможности безабберационного восстановления синтезированной голограммы-проектора Френеля при углах падения восстанавливающей плоской волны, превышающих угол падения плоской опорной волны при синтезе голограммы.

Для подтверждения представленных во второй главе выводов о принципиальной возможности безабберационного восстановления синтезированной голограммы-проектора Френеля при углах падения восстанавливающей плоской волны, превышающих угол падения плоской опорной волны при синтезе голограммы, был проведен ряд экспериментов, выполненных с помощью программного комплекса синтеза и цифрового

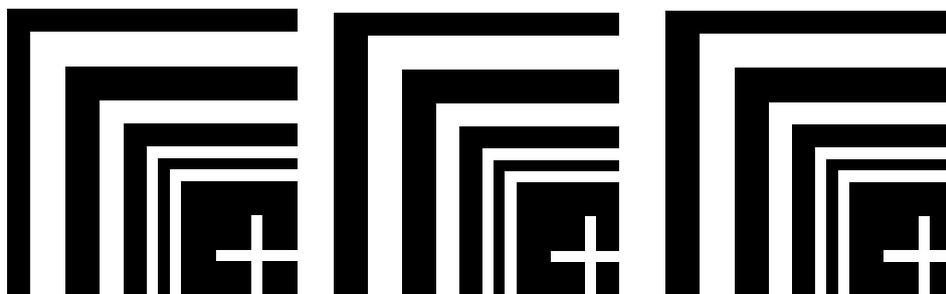
восстановления голограмм-проекторов. В свою очередь, выбор оптимальных параметров синтеза основывался на выводах, так же, описанных в упомянутой главе, из которой следует, что для длины волны  $\lambda$  равной 13,5 нм и объекта размером 23x23 пикселя с разрешением 80 нм следует принять следующие параметры: размер голограммы должен составлять 436x436 пикселей, характеристический элемент  $d$  - 20 нм, расстояние между плоскостью объекта и плоскостью регистрации голограммы  $h$  - 20,34 мкм, а угол падения опорного пучка должен быть рассчитан из соотношения (2.13) и составит  $\theta = 14,66...^\circ$ .

На рис. 4.14 представлены тест-объект и его синтезированная голограмма после бинаризации.



*Рис. 4.14. Изображения тест-объекта и его голограммы после бинаризации.*

Используя выражение (2.21) были получены все возможные углы падения восстанавливающей волны, не приводящие к появлению aberrаций. На рис. 4.15 для каждого из этих углов представлено восстановленное, с помощью метода Гюйгенса-Френеля, изображение тест-объекта после порогового преобразования, имитирующего реакцию фоторезиста на засветку актиничным излучением.

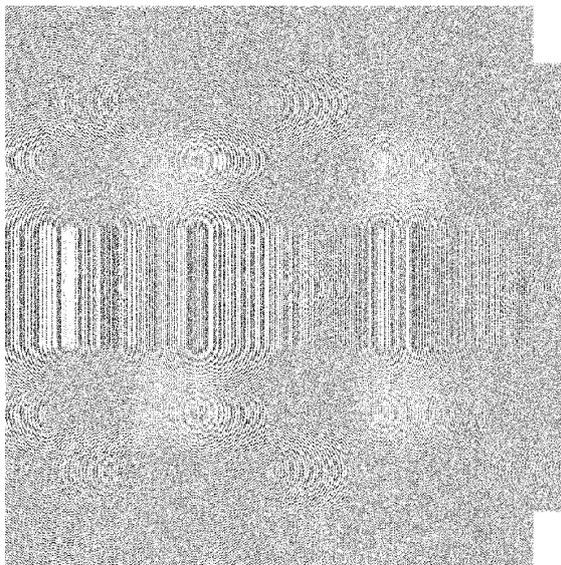


*Рис. 4.15. Восстановленное изображение тест-объекта после порогового преобразования при углах падения восстанавливающей волны:  $-14,66..^\circ$ ,  $24,95..^\circ$  и  $-68,14..^\circ$  соответственно.*

Структура приведенного изображения и допустимые параметры схемы восстановления, приведенные в Таблице 1, позволяют сделать вывод о возможности и перспективности использования в голографической фотолитографии описанного выше способа создания условий обеспечивающих увеличение допустимого угла падения восстанавливающего пучка.

**В пятой главе** описана практическая реализация метода голографической проекционной фотолитографии, основанного на использовании синтезированной голограммы-проектора френелевского типа.

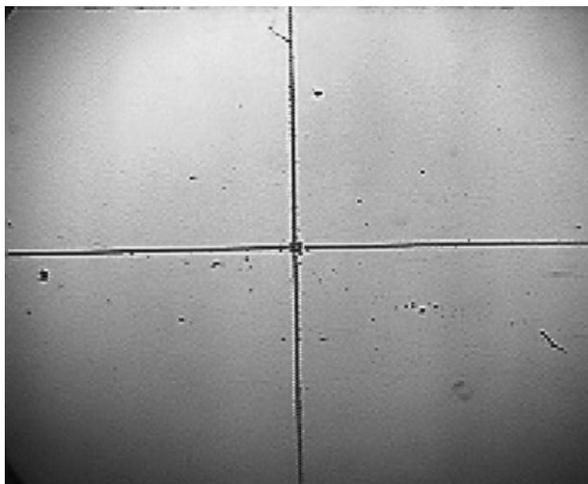
С целью демонстрации возможности и перспективности использования синтезированных голограмм-проекторов френелевского типа в процессах голографической проекционной фотолитографии нами, с помощью разработанного и описанного выше программного комплекса была синтезирована голограмма "креста", т.е. голограмма пересечения двух линий шириной 4мкм, каждая. Она предназначалась для отображения в виде рельефно-фазовой структуры на покрытой слое фоторезиста стеклянной подложке с помощью лазерного генератора изображения с диаметром фокального пятна 1 мкм. Рабочая длина волны голограммы была выбрана равной 0,488 мкм, а ее размеры составляли 4848x4848 пикселей при указанном выше диаметре одного пикселя 1 мкм и такого же расстояния между ними. Расстояние от объекта до голограммы было выбрано равным 15,8 мм, а угол падения плоской опорной волны при синтезе голограммы –  $10,5^{\circ}$ . При этом выбором глубины рельефа голограммы можно оптимизировать ее эффективность. Общий вид голограммной структуры представлен на рис.5.1.



*Рис.5.1. Общий вид синтезированной бинаризованной голограммы "креста"*

Отображенная на поверхности фоторезиста синтезированная рельефно-фазовая голограмма – проектор покрывалась в вакуумной камере тонким слоем хрома, что позволяло преобразовать ее в отражательную

голограмму. Восстановление полученной подобным образом голограммы осуществлялось на обращение параллельным восстанавливающим пучком,



*Рис.5.2. Восстановленное изображение "креста", полученное на слое хрома*

падающим на ее поверхность под углом  $\alpha = 17,75^{\circ}$ , а не под тем, что использовался при синтезе. Восстановленное с помощью синтезированной голограммы изображение креста использовалось нами для экспонирования слоя фоторезиста, нанесенного на покрытую пленкой хрома стеклянную пластину. Полученное таким образом на пленке хрома изображение креста представлено на рис. 5.2.

Беспекловая структура приведенного изображения позволяет сделать вывод о возможности и перспективности использования в голографической фотолитографии описанного выше способа создания условий обеспечивающих увеличение допустимого угла падения восстанавливающего пучка.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

Результаты диссертации отражены в следующих публикациях:

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) Корешев С.Н., Никаноров О.В., Иванов Ю.А. Программный комплекс для синтеза и цифрового восстановления голограмм-проекторов // Научно-технический вестник СПбИТМО, 2009, №5(63). С. 42-47.

- 4) Корешев С.Н., Никаноров О.В., Козулин И.А. Выбор параметров синтеза и восстановления голограмм-проекторов для фотолитографии // Сборник трудов и официальные материалы Пятой Международной Конференции «ГОЛОЭКСПО-2008», г. Санкт-петербург, 2008 г., С. 65-68.
- 5) Корешев С.Н., Никаноров О.В., Иванов Ю.А. Программный комплекс для синтеза и цифрового восстановления голограмм-проекторов // Сборник трудов и официальные материалы Шестой Международной Конференции «ГОЛОЭКСПО-2009», г. Киев, 2009 г., С. 144-146.
- 6) Корешев С.Н., Ратушный В.П., Никаноров О.В. Голографическая проекционная фотолитография // Сборник трудов и официальные материалы Седьмой Международной Конференции «ГОЛОЭКСПО-2010», г. Москва, 2010 г., С. 27-32.