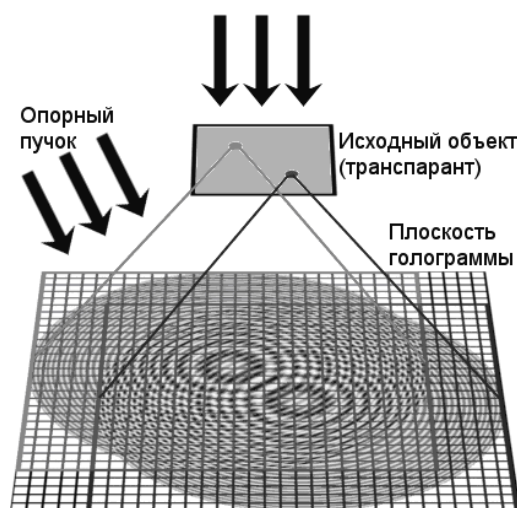


**С.Н. Корешев,
О.В. Никаноров, Д.С. Смородинов**

**КОМПЬЮТЕРНЫЙ СИНТЕЗ ГОЛОГРАММ И
ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ИХ ИЗОБРАЖАЮЩИЕ
СВОЙСТВА**



**Санкт-Петербург
2016**

Министерство образования и науки Российской Федерации

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**С.Н. Корешев,
О.В. Никаноров, Д.С. Смородинов**

**КОМПЬЮТЕРНЫЙ СИНТЕЗ ГОЛОГРАММ И
ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ИХ ИЗОБРАЖАЮЩИЕ
СВОЙСТВА**

Учебное пособие

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург

2016

Корешев С.Н., Никаноров О.В., Смородинов Д.С. Компьютерный синтез голограмм и его влияние на их изображающие свойства. – СПб: Университет ИТМО, 2016. – 113 с.

Приведены результаты исследования влияния дискретности синтезированных и цифровых голограмм на их изображающие свойства. Установлены требования, предъявляемые к соотношениям между параметрами синтеза, или регистрации дискретной голограммы. Рассмотрены основные методы компьютерного синтеза голограмм-проекторов Френеля и голограмм сфокусированного изображения, приведено описание программного комплекса, предназначенного для осуществления операции синтеза голограмм-проекторов.

Пособие предназначено научным работникам, преподавателям и студентам, обучающимся по направлениям подготовки 12.04.02 «Оптотехника» (профиль подготовки «Компьютерная оптика») и 01.04.02 «Прикладная математика и информатика».

Рекомендовано федеральным Учебно-методическим объединением в системе высшего образования по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки 12.00.00 Фотоника, приборостроения, оптические и биотехнические системы и технологии в качестве учебного пособия для реализации образовательных программ высшего образования магистратуры по направлению подготовки 12.04.02 «Оптотехника», протокол № 1 от 14 декабря 2016 г.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2016

© Корешев С.Н., Никаноров О.В., Смородинов Д.С., 2016

Оглавление

| | |
|--|----|
| Введение..... | 5 |
| 1. Изображающие свойства дискретных голограмм | 7 |
| 1.1. Влияние дискретности голограммы на восстановленное с ее помощью изображение | 7 |
| 1.2. Влияние модификации структуры голограммы и высокой, превышающей частоту Найквиста, несущей пространственной частоты голограммной структуры на восстановленное изображение | 15 |
| 1.3. Экспериментальное подтверждение возможности безабберационного восстановления дискретных синтезированных голограмм при углах падения восстанавливающей волны, отличных от углов падения опорной волны при синтезе голограммы | 23 |
| 2. Влияние метода представления объекта на изображающие свойства синтезированных голограмм..... | 28 |
| 2.1. Метод представления объекта, основанный на пространственно-частотном анализе дискретной голограммы..... | 29 |
| 2.2. Метод представления объекта, основанный на критерии разрешения Рэля | 33 |
| 3. Влияние нелинейности синтезированных голограмм на их изображающие свойства..... | 39 |
| 3.1. Анализ влияния метода штамповки на зависимость интенсивности восстановленного изображения от размера исходного объекта | 40 |
| 3.2. Экспериментальное исследование возможности обеспечения равной интенсивности в восстановленных изображениях разновеликих объектов путем подбора соответствующего уровня бинаризации синтезированных голограмм-проекторов | 44 |
| 4. Методы компьютерного синтеза голограмм-проекторов | 48 |
| 4.1. Разработка моделей процессов синтеза и восстановления голограмм-проекторов и создание специализированного программного комплекса для их реализации | 48 |
| 4.2. Программный комплекс для синтеза и цифрового восстановления голограмм-проекторов | 50 |
| 4.3. Метод синтеза голограмм-проекторов, основанный на разбиении объекта на типовые элементы его структуры..... | 57 |
| 4.4. Программный комплекс синтеза и восстановления голограмм-проекторов, реализующий метод синтеза голограмм, основанный на разбиении объекта на типовые элементы его структуры | 60 |
| 4.5. Проверка работоспособности разработанных метода синтеза голограмм и программного комплекса | 62 |

| | |
|---|-----|
| 5. Экспериментальное исследование влияния условий освещения объекта и параметров синтеза голограмм-проекторов на качество восстанавливаемого с их помощью изображения | 66 |
| 5.1. Влияние учитываемой апертуры дифрагированного на объекте излучения на качество изображения, восстановленного с помощью голограммы-проектора Френеля..... | 66 |
| 5.2. Влияние диффузной подсветки объекта на качество изображения, восстановленного с помощью голограммы-проектора Френеля..... | 69 |
| 6. Синтез голограмм-проекторов для фотолитографии на неплоских поверхностях..... | 73 |
| 6.1. Метод синтеза голограмм-проекторов Френеля для фотолитографии на неплоских поверхностях | 73 |
| 6.2. Глубина резкости | 74 |
| 6.3. Влияние особенностей структуры голограмм-проекторов на глубину резкости восстанавливаемого изображения..... | 75 |
| 6.4. Демонстрация пригодности синтезированных голограмм-проекторов для формирования изображения на неплоских поверхностях..... | 78 |
| 7. Метод синтеза голограмм-проекторов сфокусированного изображения и программный комплекс на его основе | 80 |
| 7.1. Влияние проекционного объектива на выбор периодов дискретизации фотошаблона, входного и выходного зрачков оптической системы и голограммы | 81 |
| 7.2. Метод синтеза голограммы-проектора сфокусированного изображения на основе составления таблицы соответствия | 84 |
| 7.3. Программный комплекс синтеза и цифрового восстановления СГСИ.... | 88 |
| 7.4. Сравнительный анализ методов проекционной голографической фотолитографии, основанных на голограммах-проекторах Френеля и сфокусированного изображения..... | 92 |
| 8. Коррекционные возможности голограмм-проекторов сфокусированного изображения..... | 95 |
| 8.1. Экспериментальное определение допустимых отклонений геометрических параметров схемы восстановления голограмм-проекторов от параметров схемы их синтеза..... | 95 |
| 8.2. Определение коэффициента коррекции aberrаций оптической системы голограммой-проектором сфокусированного изображения | 97 |
| 9. Мировой опыт создания высокоразрешающих проекционных систем с рельефно-фазовыми синтезированными голограммами-проекторами для субмикронной и нанолитографии | 104 |
| Литература | 110 |

Введение

Учебное пособие представляет собой совокупность систематизированных и адаптированных для включения в учебный процесс результатов НИР «Разработка и исследование принципов построения и изображающих свойств голограмм-проекторов, предназначенных для высокоразрешающей голографической фотолитографии в коротковолновой области спектра». В нем рассмотрены вопросы разработки и оптимизации методов получения голограмм-проекторов, предназначенных для формирования дифракционно ограниченных, действительных изображений объектов. Такие голограммы-проекторы могут найти применение в голографической проекционной нано- и микрофотолитографии, реализуемой, в том числе, и в коротковолновой УФ области спектра.

В пособии основное внимание уделено синтезу голограмм-проекторов Френеля и сфокусированного изображения. В нем сформулированы и научно обоснованы принципы математического моделирования процессов синтеза голограмм-проекторов. Показано, что наиболее подходящей для синтеза голограмм-проекторов является модель, основанная на методе таблиц соответствия. Этот метод сочетает в себе высокую точность расчета структуры синтезируемой голограммы с возможностью существенного сокращения числа математических операций, проводимых непосредственно на этапе синтеза голограмм-проекторов.

Описан разработанный на базе модифицированного варианта этого метода специализированный программный комплекс синтеза и восстановления голограмм-проекторов Френеля, оптимизированный с точки зрения временных и ресурсных затрат. Содержатся сведения о результатах проверки его работоспособности, выполненной в ходе проведения сравнительного анализа изображающих свойств голограмм, синтезируемых двумя различными методами: традиционным и разработанным нами на основе таблиц соответствия.

В пособии рассмотрено влияние условий освещения объекта и параметров синтеза голограмм-проекторов на качество восстанавливаемого с их помощью изображения. Показано, что для восстановления полностью идентичного объекту изображения с предельным для метода разрешением достаточно при синтезе голограммы-проектора учитывать лишь часть дифрагировавшего на объекте излучения, соответствующую главному максимуму дифракционной картины. Описан характер влияния уровня бинаризации синтезированной голограммы на распределение интенсивности в восстановленных изображениях разновеликих элементах структуры объекта. Сформулированы и обоснованы рекомендации по выбору уровня бинаризации, обеспечивающего равномерное распределение интенсивности.

1. Изображающие свойства дискретных голограмм

Развитие информационных технологий и вычислительной техники обуславливают перманентный рост интереса исследователей к синтезированным и цифровым голограммам. Отметим, что под синтезированными голограммами обычно понимаются рассчитанные с помощью компьютера и отображенные на носителе голограммы, предназначенные для непосредственного физического восстановления в когерентном излучении. В свою очередь, цифровыми называются голограммы, зарегистрированные в когерентном излучении с помощью ПЗС-матриц или каких-либо иных электронных приборов и предназначенные для цифрового восстановления в виртуальном пространстве. Объединяет эти виды голограмм использование цифровых технологий в процессе формирования или регистрации голограммной структуры, обуславливающее сохранение информации о синтезируемом или регистрируемом голографическом поле в виде массива чисел. Следовательно, и цифровые, и синтезированные голограммы принципиально дискретны, что, как известно, обуславливает существенные особенности их изображающих свойств по сравнению со свойствами обычных голограмм [1, 2]. Проанализируем эти особенности. Для этого воспользуемся пространственно-частотным анализом поля, восстанавливаемого с помощью дискретной голограммы.

1.1. Влияние дискретности голограммы на восстановленное с ее помощью изображение

Анализ будем проводить применительно к случаю амплитудной дискретной голограммы, формируемой с помощью наклонно падающей плоской опорной волны и объектной волны, распространяющейся по нормали к плоскости регистрации или синтеза голограммы. Отметим, что выбор именно такого объекта исследования не приводит к потере общности получаемых результатов, поскольку амплитудный тип модуляции голограммы сказывается лишь на ее линейности и дифракционной эффективности, не внося существенных изменений в обусловленные дискретностью особенности ее изображающих свойств. При этом с целью упрощения анализа ограничимся рассмотрением одномерного случая и будем исходить из того, что запись голограммы линейна и, следовательно, функция ее амплитудного пропускания $t(x)$ имеет вид

$$t(x) = t_0 - kI(x), \quad (1.1)$$

где $I(x)$ – функция распределения интенсивности голографического поля в плоскости регистрации; t_0 – начальный уровень пропускания, k – коэффициент пропорциональности [3].

Если бы запись голограммы осуществлялась в аналоговой форме, то в рассматриваемом нами случае наклонно падающей плоской опорной волны распределение интенсивности голографического поля имело бы вид

$$I(x) = A(x)A^*(x) + r^2 + A(x)r \exp(-2\pi i \xi_r x) + A^*(x)r \exp(2\pi i \xi_r x), \quad (1.2)$$

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; θ – угол падения опорной волны относительно нормали к плоскости голограммы; λ – рабочая длина волны.

При восстановлении записанной таким образом голограммы опорной волной, использовавшейся при записи или синтезе голограммы, распределение комплексной амплитуды восстановленного излучения в плоскости голограммы, сразу за голограммой можно было бы описать следующим выражением:

$$W(x) = R(x)t(x) = t_0 r \exp(2\pi i \xi_r x) - kI(x)r \exp(2\pi i \xi_r x), \quad (1.3)$$

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 распределение интенсивности голографического поля $I_d(x)$, отображаемое на носителе или вводимое в память компьютера в случае цифровой голограммы, будет отличаться от распределения, описываемого выражением (1.3), и будет иметь следующий вид

$$I_o(x) = \left(I(x) \sum_{n=-N}^N \delta(x - nd) \right) \otimes \text{rect}\left(\frac{x}{a}\right), \quad (1.4)$$

где d – период дискретизации голограммы; a – диаметр пятна генератора изображений; создающего синтезированную голограмму, или размер пикселя ПЗС-матрицы в случае цифровой голограммы; $2N+1$ – число элементов дискретизации голограммы [2]. Подставив (1.2) в (1.4) и полученный результат в (1.3), получим выражение, описывающее распределение амплитуды изображения, восстановленного с помощью дискретной синтезированной голограммы в плоскости самой голограммы:

$$\begin{aligned}
W_d(x) &= t_0 r \exp(2\pi i \xi_r x) - k r \exp(2\pi i \xi_r x) \left[\left(I(x) \sum_{n=-N}^N \delta(x - nd) \right) \otimes \text{rect}\left(\frac{x}{a}\right) \right] = \\
&= t_0 r \exp(2\pi i \xi_r x) - k r \exp(2\pi i \xi_r x) \left[\left(\{A(x)A^*(x) + r^2 + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + A(x)r \exp(-2\pi i \xi_r x) + A^*(x)r \exp(2\pi i \xi_r x) \} \sum_{n=-N}^N \delta(x - nd) \right) \otimes \text{rect}\left(\frac{x}{a}\right) \right] \quad (1.5)
\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
U_d(\xi) &= t_0 F\{r \exp(2\pi i \xi_r x)\} - k F\{r \exp(2\pi i \xi_r x)\} \otimes \left\{ \left(\{F\{A(x)A^*(x)\} + F\{r^2\} + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + F\{A(x)r \exp(-2\pi i \xi_r x)\} + F\{A^*(x)r \exp(2\pi i \xi_r x)\} \right) \otimes \sum_{n=-N}^N \delta(\xi - \xi_n) \right\} a \frac{\sin(\pi \xi a)}{\pi \xi a} \quad (1.6)
\end{aligned}$$

Далее сделаем допущение, что число дискретных элементов на голограмме настолько велико, что сумму $\sum_{n=-N}^N \delta(x - n \cdot d)$ можно считать равной сумме $\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - n \cdot d)$. Фурье-образ этой бесконечной суммы дельта-функций, как известно, равен $\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(\xi - \xi_n)$ [4].

Рассмотрим выражение (1.6), состоящее из двух слагаемых. Входящее в его состав первое слагаемое, обусловленное средним пропусканием голограммы, полностью аналогично первому слагаемому соответствующего выражения (1.3), описывающего спектр непрерывной голограммы. Имеющая место во втором слагаемом (1.6) свертка выражения, описывающего спектры трех основных порядков дифракции непрерывной голограммы, с суммой дельта функций описывает обусловленное дискретной структурой голограммы периодическое повторение спектра поля, восстанавливаемого с помощью непрерывной голограммы. При этом период мультипликации спектра оказывается равным $\xi_n = 1/d_d$, где d_d – период дискретизации голограммы.

Содержащееся во втором слагаемом выражения (1.6) произведение мультиплицированного спектра с функцией $\frac{\sin(\pi \xi a)}{\pi \xi a}$, свидетельствует о наличии некой модуляции спектра восстановленного поля, зависящей от размера фокального пятна генератора изображения в случае синтезированной голограммы, или фил-фактора ПЗС-матрицы в случае цифровой голограммы. Отметим, что максимум этой модулирующей функции соответствует пространственной частоте восстанавливающей волны. На рис.1 схематично

представлен спектр амплитуды поля, восстанавливаемого с помощью дискретной голограммы, в случае объекта, характеризующегося полосой пространственных частот $\pm\Delta/2$. Отметим, что изображенные на нем пики шириной 2Δ соответствуют интермодуляционным помехам, более узкие пики шириной Δ – спектрам изображений, восстанавливаемых в ± 1 порядках дифракции голограммы, а стрелки – дельта-функциям, описывающим периодическое повторение спектра восстанавливающей волны, вызванное дискретизацией голограммы.

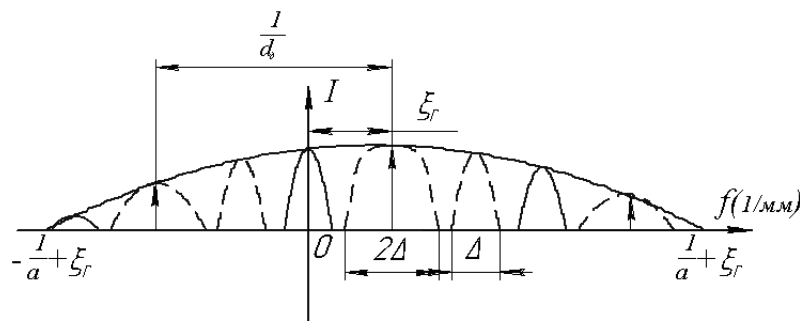


Рисунок 1. Спектр поля, восстановленного с помощью дискретной голограммы

Представленный спектр свидетельствует о возможности оптимизации параметров дискретизации с целью формирования такой структуры голограммы, которая бы обеспечила пространственное разделение компонентов восстановленного поля при соблюдении максимально возможной ширины пространственного спектра объекта и сохранении минимального уровня помех. Так, выполнение соотношения

$$a = d_d, \quad (1.7)$$

т.е. выбор периода дискретизации голограммы, равного диаметру фокального пятна генератора изображения или пикселя ПЗС-матрицы, обеспечивает подавление обусловленной дискретизацией голограммы мультипликации спектра восстанавливающей волны путем совмещения узлов огибающей с положениями мультиплицированных спектров восстанавливающей волны. При этом требование обеспечения пространственного разделения компонентов поля, восстанавливаемого с помощью голограммы, обуславливает необходимость ограничения ширины спектра регистрируемого объекта, т.е. необходимость обеспечения выполнения неравенства

$$\Delta \leq \frac{1}{4d_d}, \quad (1.8)$$

а также выбор пространственной частоты опорной волны, равной

$$|\xi_r| = \frac{\sin|\theta|}{\lambda} = 1,5\Delta_{\max}, \quad (1.9)$$

где $\Delta_{\max} = \frac{1}{4d_d}$.

Отсюда получим условие выбора оптимального угла падения опорной волны:

$$\sin|\theta| = \frac{1,5\lambda}{4d_d}. \quad (1.10)$$

Из (1.10) следует ограничение, накладываемое на длину волны восстановления дискретной голограммы. Поскольку $\sin|\theta|$ не может превышать единицы, рабочая длина волны восстановления синтезированной голограммы-проектора не может превышать величины, равной 2,7 периодов дискретизации голограммы.

Выражение (1.8), описывающее связь ширины спектра объекта с периодом дискретизации голограммы, позволяет сформулировать требования к максимальной пространственной частоте объекта $\xi_{o\max}$, возникающие вследствие влияния дискретной структуры голограммы:

$$|\xi_{o\max}| = \frac{\Delta_{\max}}{2} = \frac{1}{8d_d}. \quad (1.11)$$

Из (1.11) следует ограничение, накладываемое дискретной структурой голограммы на минимальный размер элемента структуры объекта a_i :

$$a_i \geq \frac{1}{2|\xi_{o\max}|} = 4d_d. \quad (1.12)$$

Из (1.10) с учетом (1.12) следует, что минимальный размер элемента структуры объекта, обеспечивающий пространственное разделение порядков дифракции голограммы должен быть равен как минимум $1,5\lambda$ при условии регистрации на голограмме лишь боковой полосы спектра объекта. Для голографической регистрации всего спектра необходимо обеспечить регистрацию информации в более широкой полосе частот:

$$\xi_{\max} \leq 2\Delta_{\max} = 4|\xi_{o\max}|. \quad (1.13)$$

Из (1.13) воспользовавшись условием формирования бегущей незатухающей волны [3], получим:

$$4|\xi_{o,\max}|\lambda \leq 1, \quad (1.14)$$

$$|\xi_{o,\max}| \leq \frac{1}{4\lambda}. \quad (1.15)$$

Отсюда получим, что условием регистрации на дискретной голограмме всего спектра объекта при пространственном разделении порядков дифракции голограммы будет выполнение неравенств:

$$a_i \geq 2\lambda \text{ и } d_a \geq \frac{\lambda}{2}. \quad (1.16)$$

Отметим, что традиционно определяемый в оптике из дифракционных ограничений минимальный размер элемента структуры изображения равен λ . Следовательно, дискретность голограммы обуславливает, как минимум, 1,5-кратное, а то и двукратное увеличение размера минимального элемента восстановленного изображения.

Справедливость полученных выражений проиллюстрируем приведенными на рис. 2 – 5 результатами экспериментов, выполненных с помощью программного комплекса синтеза и восстановления голограмм-проекторов Френеля, описанного в работе [5]. На них представлены изображения тест-объекта, восстановленные в виртуальном пространстве с помощью синтезированных бинарных фазовых голограмм, полученных при различных значениях угла падения опорной волны и при различных размерах пикселей объекта и голограммы. Синтез этих голограмм осуществлялся для рабочей длины волны 13,5 нм при размере объекта 23×23 пикселя размером 80×80 нм² каждый (рис. 2 – 4) и 24×24 нм² (рис. 5) при минимальной ширине элемента структуры объекта в 1 пиксель. Размер пикселя голограммы при этом составлял 20×20 нм² (рис. 2 – 4) и 6×6 нм² (рис. 5), а расстояние между объектом и голограммой выбиралось равным 20,3 мкм (рис. 2 – 4) и 0,67 мкм (рис. 5).

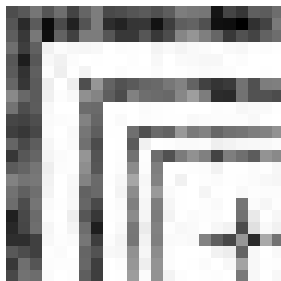


Рисунок 2. Изображение, восстановленное при угле падения опорной волны $14,7^\circ$

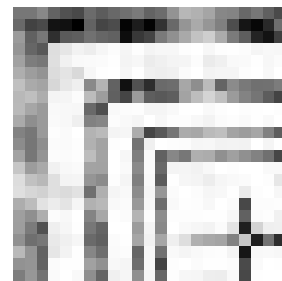


Рисунок 3. Изображение, восстановленное при угле падения опорной волны 10°

На рис. 2 представлено изображение тест-объекта, полученное при оптимальном, рассчитанном с помощью выражения (1.10), угле падения опорной волны, равном $14,7^{\circ}$, а на рис. 3 – изображение, полученное при угле падения опорной волны 10° .

Изображение, представленное на рис. 3, отличается большим, по сравнению с рис. 2, уровнем помех, обусловленных наложением нулевого порядка дифракции голограммы на восстановленное изображение объекта. Применение процедуры пороговой обработки к изображениям, представленным на рис. 2 и 3, позволяет заключить, что оптимизация угла падения опорной волны при синтезе или формировании голограммы позволяет получать идентичные объекту изображения (рис. 4), при уровнях порога, лежащих в пределах 32 – 86 градаций при 256-уровневой шкале градаций яркости [6].

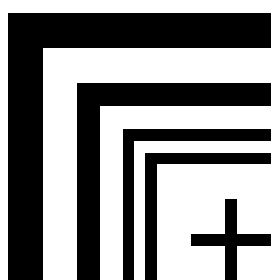


Рисунок 4. Прошедшее пороговую обработку изображение, восстановленное при угле падения опорной волны $14,7^{\circ}$

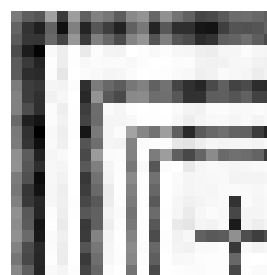


Рисунок 5. Не прошедшее пороговую обработку изображение тестового объекта, характеризующегося минимальным размером элемента структуры, равным $1,8$ длины волны восстанавливающего излучения

При этом применение пороговой обработки к изображению, представленному на рис 3, ни при каких уровнях порога не позволяет получить восстановленное изображение, тождественное исходному объекту.

Рис. 5 иллюстрирует справедливость соотношений, описываемых неравенствами (1.15). На нем представлено не прошедшее пороговую обработку изображение тестового объекта, характеризующегося минимальным размером элемента структуры, равным $1,8\lambda$. Изображение было получено с помощью дискретной голограммы, синтезированной при размере пикселя голограммы, равном $0,5\lambda$. Пороговая обработка этого изображения позволяет получить изображение, идентичное исходному объекту при уровнях порога, лежащих в пределах 68 градаций серого. Справедливость неравенств (1.15) подтверждается и экспериментально установленным фактом невозможности восстановления с помощью дискретной голограммы изображения объекта с минимальным размером элемента структуры, равным $1,3\lambda$.

Вернемся к выражению (1.12) и покажем, что условие пространственного разделения порядков дифракции голограммы может быть получено и исходя из несколько иных рассуждений. Рассмотрим 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 располагаемым параллельно голограмме так, что геометрический центр транспаранта совпадает с нормалью, восстановленной из центра голограммы. При этих условиях числовая апертура пучка, продифрагировавшего на минимальном по размеру элементе структуры фотошаблона, может быть описана с помощью следующего выражения:

$$A = n \sin \alpha = \frac{\lambda}{a_t}, \quad (1.17)$$

где: A – числовая апертура пучка; n – показатель преломления среды между объектом и голограммой (в нашем случае $n = 1$); α – апертурный угол дифрагировавшего излучения; λ – рабочая длина волны; a_t – характеристический размер объекта, т.е. минимальный размер элемента его структуры.

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 θ 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:

$$T_{\min} \leq \frac{\lambda}{2 \sin \alpha}. \quad (1.18)$$

Из (1.13) и (1.14) с учетом теоремы Котельникова (теоремы отсчетов) можно получить выражение, описывающее зависимость требуемого периода дискретизации голограммы d_d от характеристического размера фотошаблона a_t :

$$d_d \leq \frac{1}{2} T_{\min} \leq \frac{a_t}{4}. \quad (1.19)$$

Из (1.19) следует, что период дискретизации голограммы, а, значит, и диаметр рабочего фокального пятна генератора изображения или размер пикселя ПЗС-матрицы должен быть, как минимум, в 4 раза меньше характеристического размера объекта. Отметим, что выражение (1.19) полностью соответствует выражению (1.12), полученному в ходе частотного анализа изображения, восстановленного с помощью дискретной голограммы.

Таким образом, в ходе проведенного исследования выявлен характер зависимости изображающих свойств цифровых и синтезированных голограмм от параметров их дискретизации. Установлено, что дискретная структура голограммы обуславливает периодическое повторение спектра поля, восстанавливаемого с помощью непрерывной голограммы. При этом период мультипликации этого спектра равен $\xi_n = \frac{1}{d_d}$, где d_d – период дискретизации голограммы. При этом произведение мультиплицированного спектра с функцией $\frac{\sin(\pi \xi a)}{\pi \xi a}$ свидетельствует о наличии зависящей от размера фокального пятна генератора изображений, или, в случае цифровой голограммы, фил-фактора ПЗС-матрицы, модуляции спектра восстановленного поля. Исходя из требования пространственного разделения порядков дифракции голограммы, установлены предельно допустимые полосы частот объектной волны и голограммы в целом. Сформулировано условие пространственного разделения порядков дискретной голограммы, сводящееся к необходимости обеспечения размера пикселя голограммы, составляющего не более 1/4 от размера минимального элемента структуры объекта. Установлена принципиальная невозможность регистрации и восстановления дискретных голограмм объектов, характеризующихся минимальным размером элементов их структуры, не превышающим величины $1,5\lambda$, где λ – рабочая длина волны.

1.2. Влияние модификации структуры голограммы и высокой, превышающей частоту Найквиста, несущей пространственной частоты голограммной структуры на восстановленное изображение

Принципиальная дискретность синтезированных и цифровых голограмм обуславливает особенности их изображающих свойств, приводящие к специфическим ограничениям, накладываемым, в частности, на минимальный размер элемента структуры объекта. Так дискретность структуры голограммы приводит к непрерывному периодическому повторению спектра поля, который восстанавливался бы с помощью непрерывной голограммы. При этом период мультипликации этого спектра

равен $\xi_n = \frac{1}{d_d}$, где d_d – период дискретизации голограммы, а его огибающая,

описываемая функцией $\frac{\sin(\pi \xi a)}{\pi \xi a}$, зависит лишь от размера фокального пятна

генератора изображений в случае синтезированной голограммы, или, в случае цифровой голограммы, фил-фактора ПЗС-матрицы. Указанная мультипликация накладывает ограничения на допустимую, ширину спектра объекта и, тем самым, обуславливает невозможность регистрации на дискретной голограмме объектов, характеризующихся минимальным размером структуры менее 1,5 длин волн используемого излучения. Кроме того она приводит к необходимости, с точки зрения пространственного разделения порядков, обеспечения размера пикселя голограммы, составляющего не более 1/4 от размера минимального элемента структуры объекта [7]. Перечисленные выше ограничения, в ряде случаев, могут быть существенно ослаблены или сняты путем использования специальной математической обработки для модификации структуры голограммы.

Относительная легкость и доступность компьютерной обработки цифровых и синтезированных голограмм обуславливает возможность модификации их структуры, направленной на совершенствование их изображающих свойств. Так например, в работе [9] предлагается подавлять нулевой порядок дифракции голограммы за счет одновременной обработки нескольких голограмм одного и того же объекта, полученных при различных начальных фазовых сдвигах объектной волны. В работах [8, 10, 11] описана модификация структуры цифровой голограммы, направленная на минимизацию интермодуляционных помех, восстанавливаемых в нулевом порядке дифракции голограммы. Эта модификация сводится к уменьшению функции, описывающей распределение интенсивности голографического поля на величину квадрата модуля амплитуды объектной волны, реализуемой в плоскости регистрации, или синтеза, голограммы.

Такая операция, которую довольно просто осуществить в случае цифровой или синтезированной голограммы, приводит к устранению интермодуляционных помех из восстановленного с помощью дискретной голограммы поля. При ее реализации следует иметь в виду необходимость обеспечения положительных значений интенсивности голографического поля для всех пикселей апертуры голограммы. Если комплексные амплитуды объектной $A(x)$ и опорной $R(x)$ волн представить в виде

$$A(x) = a(x) \exp[i\varphi_a(x)], R(x) = r \exp[i\varphi_r(x)], \quad (1.20)$$

то выражение, описывающее распределение интенсивности голографического поля преобразуется к виду [3]

$$\begin{aligned}
I &= a^2 + r^2 + ar \exp[i(\varphi_a - \varphi_r)] + ar \exp[-i(\varphi_a - \varphi_r)] = \\
&= a^2 + r^2 + 2ar \cos(\varphi_a - \varphi_r)
\end{aligned}
\tag{1.21}$$

После модификации структуры голограммы распределение интенсивности в ее плоскости I' будет описываться следующим выражением:

$$I' = r^2 + 2ar \cos(\varphi_a - \varphi_r). \tag{1.22}$$

Из (1.22) получим выражение, описывающее минимальное значение интенсивности в плоскости модифицированной голограммы I'_{min} и потребуем, чтобы оно не принимало отрицательных значений

$$I'_{min} = r^2 - 2ar \geq 0. \tag{1.23}$$

Положим $r^2 = ma^2$, где m – соотношение интенсивностей формирующих голограмму пучков. Тогда из (1.23) получим:

$$ma^2 - 2\sqrt{ma^2}a \geq 0. \tag{1.24}$$

Из (1.24) следует, что равное, или превышающее 4-кратную величину, соотношение интенсивностей формирующих голограмму пучков обеспечивает возможность модификации ее структуры без получения отрицательных значений интенсивности голографического поля по всей поверхности апертуры голограммы. Следовательно, рассматриваемая модификация структуры возможна лишь в случае обеспечения интенсивности опорного пучка, как минимум, в 4 раза превышающей интенсивность объектного пучка лучей.

Устранение интермодуляционных помех дискретной голограммы оказывает существенное влияние на структуру спектра восстановленного поля и приведет ее к виду, представленному на рис. 6. На нем схематично представлен спектр амплитуды поля, восстанавливаемого с помощью дискретной голограммы с модифицированной структурой в случае объекта, характеризующегося полосой пространственных частот $\pm\Delta/2$. Отметим, что изображенные на нем пики шириной Δ соответствуют спектрам изображений, восстанавливаемых в ± 1 порядках дифракции голограммы, а стрелки – дельта-функциям, описывающим обусловленное дискретизацией голограммы периодическое повторение спектра восстанавливаемой волны.

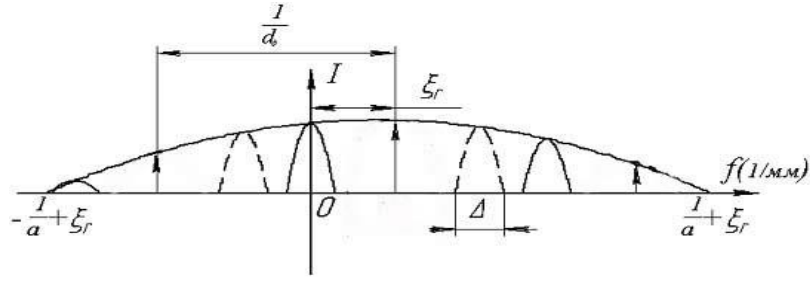


Рисунок 6. Спектр поля, восстановленного с помощью модифицированной дискретной голограммы

Из рисунка видно, что отсутствие помех позволяет существенно увеличить, по сравнению со случаем не модифицированной голограммы (рис. 1), допустимую ширину спектра объекта, регистрируемого на дискретной голограмме и довести ее до величины

$$\Delta_m \leq \frac{1}{2d_d}. \quad (1.25)$$

Сравнение выражения (1.25) с соответствующим выражением в работе [7], описывающим допустимую для случая не модифицированной голограммы ширину спектра объекта, свидетельствует о возможности двукратного увеличения допустимой, с точки зрения обеспечения пространственного разделения порядков дифракции, ширины спектра объекта за счет модификации структуры голограммы. Из рис. 6 следует, что в случае модификации структуры голограммы оптимальным, с указанной точки зрения, будет выбор угла падения плоской опорной волны, равного

$$\sin |\theta_m| = \frac{\lambda}{4d_d}. \quad (1.26)$$

Из (1.26) получим выражение, описывающее минимально возможный размер пикселя модифицированной дискретной голограммы $d_{dm \min}$:

$$d_{dm \min} \geq \frac{\lambda}{4}. \quad (1.27)$$

Выражение (1.25), описывающее связь ширины спектра объекта с периодом дискретизации голограммы, позволяет сформулировать ограничения, накладываемые дискретностью голограммы на максимальную пространственную частоту объекта $\xi_{om \max}$:

$$|\xi_{om \max}| = \frac{\Delta_{m \max}}{2} = \frac{1}{4d_d}. \quad (1.28)$$

Из (1.28) следует ограничение, накладываемое дискретной структурой голограммы на минимальный размер элемента структуры объекта a_{tm} :

$$a_m \geq \frac{1}{2|\xi_{om,max}|} = 2d_d. \quad (1.29)$$

Из (1.28) и (1.29) следует, что рассматриваемая модификация структуры дискретной голограммы позволяет снять ограничение в $1,5\lambda$, накладываемое дискретностью голограммы на минимально достижимый размер элемента структуры восстановленного изображения и позволяет довести его до величины $0,5\lambda$. Отметим, что дифракционные ограничения на размер минимального отображаемого элемента остаются в силе и, следовательно, реализуемый минимальный размер элемента структуры изображения не может быть менее λ .

Следует заметить, что модификация структуры никоим образом не влияет на приведенные в [7] соотношения, описывающие условия пространственного разделения порядков дифракции голограммы. По-прежнему, несмотря на модификацию структуры голограммы, условием пространственного разделения порядков голограммы будет 4-кратное превышение размера пикселя объекта, по сравнению с размером пикселя голограммы. Отметим, что при этом, как следует из (1.29), минимальный допустимый размер элемента структуры восстановленного изображения будет равен λ , т.е. длине волны используемого излучения. Таким образом, рассмотренная модификация структуры дискретной голограммы позволяет, как минимум в 1,5 раза, уменьшить допустимый минимальный размер элемента структуры объекта и довести его для типичного для оптики предела в λ .

Невыполнение требования о четырехкратном превышении размера пикселя объекта по сравнению с размером пикселя голограммы приводит к появлению интерференционной картины, накладывающейся на восстановленное изображение объекта. Это иллюстрирует рис. 7, на котором представлено не прошедшее пороговую обработку изображение тестового объекта с размером пикселя 20 нм, равным минимальному размеру элемента структуры объекта. Приведенное изображение восстановлено с помощью специализированного программного комплекса [5] в виртуальном пространстве на длине волны 13,5 нм с помощью модифицированной амплитудной голограммы с размером пикселя 40 нм, синтезированной при соотношении интенсивностей опорного и объектного пучков 4:1. Угол падения опорной волны при синтезе голограммы выбирался оптимальным для голограммы с модифицированной структурой и был принят равным $9,7^\circ$, а расстояние от объекта до голограммы составляло 10 мкм.



Рисунок 7. Изображение, восстановленное с помощью голограммы с модифицированной структурой при $a_t = 2d_d$

На представленном изображении отчетливо видна наложенная на объект картина интерференции восстанавливающего и восстановленного пучков лучей. Помимо увеличения допустимой ширины спектра объекта и доведения минимального размера элемента восстанавливаемого изображения до длины волны используемого излучения, рассмотренная модификация структуры голограммы обеспечивает снижение уровня помех в восстановленном изображении и, как следствие этого, позволяет осуществлять регистрацию или синтез дискретных голограмм при существенно меньших значениях угла падения опорной волны.

Отметим, что этот факт имеет очень большое значение при регистрации цифровых голограмм, как правило, осуществляемой с помощью ПЗС-матриц с относительно невысокой разрешающей способностью. В качестве иллюстрации такой возможности на рис. 8 представлено прошедшее пороговую обработку изображение тестового объекта. Оно было восстановлено в виртуальном пространстве с помощью амплитудной голограммы с модифицированной структурой, синтезированной при рассчитанном с помощью выражения (1.26) угле падения опорной волны, равном $9,7^\circ$. Соотношение интенсивностей опорного и объектного пучков при синтезе голограммы было выбрано равным 4:1. Рабочая длина волны была равна 13,5 нм. Размер объекта составлял 23×23 пикселя размером 80×80 нм². Минимальная ширина элемента структуры объекта была равна 1 пикселю. Размер пикселя голограммы составлял 20×20 нм², а расстояние между объектом и голограммой выбиралось равным 20,3 мкм. Для сравнения на рис. 9 представлено изображение того же объекта, восстановленного при тех же условиях с помощью голограммы, структура которой не была модифицирована.



Рисунок 8. Изображение, восстановленное с помощью голограммы с модифицированной структурой



Рисунок 9. Изображение, восстановленное с помощью голограммы без модификации структуры

Структура изображения, представленного на рис. 8, точно соответствует структуре исходного объекта и остается подобной ей при изменении уровня пороговой обработки в пределах 8 градаций шкалы серого. Этого нельзя сказать об изображении, представленном на рис. 9. Из него следует, что гало, свойственное голограмме с не модифицированной структурой, привело к обрезанию правой части восстановленного изображения.

Отметим, что все вышеприведенные рассуждения и результаты экспериментов, свидетельствующие о положительном влиянии рассмотренной модификации структуры на изображающие свойства дискретных голограмм, относились к случаю линейной записи голограммной структуры. Нелинейная запись голограмм, например, принципиальная нелинейность имеющих наибольшее практическое значение фазовых голограмм, обуславливает, как известно, появление значительного числа ложных изображений (помех) в плоскости восстановленного изображения [3] и, как следствие этого, приводит к отсутствию положительного эффекта от модификации структуры таких дискретных голограмм. Об этом свидетельствуют и результаты проведенных экспериментов, свидетельствующие о невозможности восстановления неискаженного изображения с помощью фазовых голограмм, зарегистрированных или синтезированных при углах падения опорной волны, определяемых в соответствии с выражением (1.26).

Тем не менее, рассмотренная модификация структуры дискретной голограммы может быть весьма полезна при регистрации цифровых голограмм, поскольку она позволяет существенно снизить несущую пространственную частоту регистрируемой структуры и обеспечить регистрацию голограммы при больших размерах пикселя приемника излучения. Отметим, что поскольку восстановление цифровых голограмм осуществляется, как правило, с помощью численных методов в виртуальном пространстве, то вид голограммы, т.е. тот факт, амплитудная она или фазовая, практического значения не имеет.

Характерная для монохроматического излучения «проблема 2π » и дискретность структуры цифровых и синтезированных голограмм приводят к известному эффекту подмены регистрируемых частот [11]. Это обуславливает определенную трудность в рассуждениях о предельно допустимой для них частоте голографической записи. Проанализируем возможность регистрации цифровых голограмм Фурье с пространственной частотой, превышающей частоту Найквиста, определяемой исходя из теоремы отсчетов как $|F_n| = 1/2d_d$, т.е. дискретных голограмм с пространственными частотами, превышающими по модулю $1/2d_d$. Сделаем это на примере дискретной голограммы двух плоских волн, одна из которых характеризуется равной нулю пространственной частотой, т.е. падает на плоскость регистрации голограммы по нормали, а другая – некоторой пространственной частотой ξ_r . В этом случае распределение разности фаз объектной и опорной волн в плоскости регистрации голограммы $\Delta\varphi(n)$, где n – порядковый номер пикселя приемника излучения может быть описано с помощью следующего выражения:

$$\Delta\varphi(n) = 2\pi\xi_r n d_d. \quad (1.30)$$

Пространственную частоту опорной волны ξ_r представим в виде

$$\xi_r = 2mF_n + \xi = \frac{2m}{2d_d} + \xi, \quad (1.31)$$

где $m = 0, 1, 2, \dots$. Здесь $2m$ – округленное до ближайшего четного целого числа частное от деления ξ_r на частоту Найквиста, а ξ – разность пространственных частот ξ_r и $2mF_n$. Отметим, что ξ может принимать как положительные, так и отрицательные значения, а ее модуль $|\xi| \leq |F_n|$. Тогда, подставив (1.31) в (1.30), получим

$$\Delta\varphi(n) = 2\pi n d_d (2mF_n + \xi) = 2\pi m + 2\pi n d_d \xi. \quad (1.32)$$

Отметим, что, поскольку m и n – целые числа, то дискретная голограмма с пространственной частотой ξ_r , описываемая разностью фаз (1.32), будет полностью эквивалентна голограмме, характеризующейся пространственной частотой ξ , не превышающей по модулю частоту Найквиста. Следовательно, здесь мы сталкиваемся с типичным случаем подмены частот и принципиальной невозможностью регистрации дискретных голограмм с пространственными частотами, превышающими частоту Найквиста. Таким образом, попытка дискретной записи голограммы с пространственной частотой, превышающей по модулю частоту Найквиста, приводит к уменьшению модуля пространственной частоты получаемой дискретной голограммы на величину $2mF_n$ и к регистрации голограммы,

характеризующейся частотой, не превышающей по модулю частоту Найквиста. Иначе говоря, запись дискретных голограмм с частотами, превышающими по модулю частоту Найквиста, невозможна.

Свойственный дискретной голографической записи эффект подмены пространственных частот обуславливает возможность преодоления ограничений, накладываемых на конструкции стенов записи и восстановления дискретных голограмм относительно низкой допустимой несущей пространственной частотой таких голограмм и, следовательно, относительно малым углом схождения опорного и объектного пусков. Так, можно осуществлять регистрацию цифровых голограмм с помощью опорных волн, падающих под большим углом на плоскость регистрации голограммы, т.е. с помощью волн, пространственная частота которых существенно превышает частоту Найквиста используемого матричного приемника излучения. При этом дискретная структура приемника обусловит снижение эффективной пространственной частоты голограммы до частоты, не превышающей частоту Найквиста.

Аналогичная операция может быть полезна и при восстановлении дискретных синтезированных голограмм. Она позволяет осуществлять безабберационное восстановление синтезированных голограмм при углах падения восстанавливающей волны, существенно превышающих угол падения опорной волны при синтезе голограммы.

1.3. Экспериментальное подтверждение возможности безабберационного восстановления дискретных синтезированных голограмм при углах падения восстанавливающей волны, отличных от углов падения опорной волны при синтезе голограммы

Рассмотренные выше периодическое повторение спектра поля, восстанавливаемого с помощью непрерывной голограммы, и эффект подмены частот позволяют восстанавливать безабберационное изображение объекта при большем, по сравнению с опорным пучком, угле падения на голограмму опорного и восстанавливающего пучков лучей. Таким образом, они предоставляют возможность сокращения габаритов и упрощения конструкции устройств регистрации и восстановления дискретных голограмм за счет использования высших порядков дифракции излучения на периодической структуре дискретной голограммы. Особенно это актуально для синтезированных отражательных голограмм-проекторов.

Из (1.31) получим выражение (1.33), описывающее зависимость угла падения опорной, или восстанавливающей волны, обеспечивающего формирование безабберационного изображения объекта в высших порядках дифракции θ' от угла падения опорной волны при синтезе голограммы, периода дискретизации голограммы и номера используемого порядка дифракции n :

$$\frac{\sin(\theta')}{\lambda} = \frac{\sin(\theta)}{\lambda} \pm n \frac{1}{d_d}, \quad (1.33)$$

где $n = 0, 1, 2, 3, \dots$. Отсюда следует, что при восстановлении дискретных голограмм безабберационность восстановленного изображения будет достигаться при углах падения опорной или восстанавливающей волны, описываемых следующим выражением:

$$\theta' = \arcsin \left(\sin(\theta) \pm n \frac{\lambda}{d_d} \right), \quad (1.34)$$

где $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

Экспериментальное подтверждение выявленной возможности безабберационного восстановления синтезированных дискретных голограмм в высших порядках дифракции проводилось путем компьютерного моделирования процессов синтеза и восстановления голограмм-проекторов и в ходе практической реализации фотолитографического процесса, основанного на использовании синтезированной рельефно-фазовой отражательной голограммы-проектора Френеля для формирования на покрытой тонким слоем фоторезиста подложке изображения структуры изготавливаемого изделия.

Для проведения компьютерного моделирования процессов синтеза и восстановления голограмм-проекторов применялся специализированный программный комплекс, описанный в работе [6]. С его помощью при использовании параметров синтеза голограммы, выбранных в соответствии с результатами работы [13], была синтезирована отражательная рельефно-фазовая бинарная голограмма-проектор Френеля, предназначенная для работы в излучении с длиной волны λ , равной 13,5 нм. При этом в качестве объекта использовалось бинарное изображение стандартного тест-объекта «уголки», представленное на рис. 10 и обладающее характеристическим размером 80 нм. Размер синтезированной голограммы-проектора составлял 436×436 пикселей, имеющих размер $d = 20$ нм, расстояние между плоскостью объекта и плоскостью регистрации голограммы h было принято равным 20,3 мкм, а угол падения опорного пучка рассчитывался исходя из соотношения (1.35), в соответствии с работой [13]:

$$\sin|\theta| = \frac{1,5\lambda}{4d} \quad (1.35)$$

и составлял $\theta \approx 14,7^\circ$. На рис. 10 представлены изображения тест-объекта и его бинарной синтезированной голограммы.



Рисунок 10. Изображения тест–объекта и его голограммы

Восстановление синтезированной бинарной рельефно-фазовой отражательной голограммы осуществлялось в виртуальном пространстве с помощью ранее указанного специализированного программного комплекса, который использовался в режиме алгоритма, основанного на преобразовании Френеля. При этом в качестве угла падения восстанавливающей волны использовались все его возможные значения, удовлетворяющие выражению (1.34), а именно: $14,7^{\circ}$, $68,1^{\circ}$ и $25,0^{\circ}$.

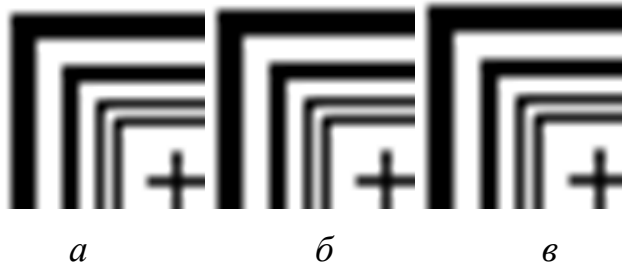


Рисунок 11. Изображения тест–объекта, восстановленные при углах падения восстанавливающей волны: $14,7^{\circ}$ (а), $68,1^{\circ}$ (б) и $25,0^{\circ}$ (в).

Отметим, что, поскольку мы восстанавливаем отражательную рельефно-фазовую голограмму-проектор на обращение, т.е. стремимся сформировать действительное изображение объекта, то традиционный случай восстановления безабберационного действительного изображения объекта соответствует углу падения восстанавливающей волны, равного по модулю углу падения опорной волны, но отличающемуся от него по знаку, т.е. равного $14,7^{\circ}$ [13]. На рис. 11 представлены восстановленные для каждого из указанных выше углов падения восстанавливающей волны изображения тест-объекта, прошедшие пороговое преобразование, имитирующее реакцию фоторезиста на засветку актиничным излучением [6].

Хорошее качество представленных изображений свидетельствует о возможности восстановления дискретных синтезированных голограмм-проекторов при углах падения восстанавливающей волны, существенно превышающих, по модулю, угол падения опорной волны при синтезе голограммы. Справедливость выявленного и приведенного выше условия безабберационного восстановления отражательных рельефно-фазовых синтезированных голограмм-проекторов была также экспериментально

подтверждена в ходе практической реализации процесса голографической проекционной фотолитографии, осуществляемой с помощью синтезированной голограммы-проектора Френеля.

Для этого с помощью специализированного программного комплекса для синтеза и цифрового восстановления голограмм-проекторов [6] была синтезирована бинарная отражательная рельефно-фазовая голограмма «креста», т.е. голограмма пересечения двух линий шириной 4 мкм каждая. Размер минимального элемента ее структуры составлял 1 мкм, что соответствовало возможности использования для отображения голограммы на носителе лазерного генератора изображения с диаметром фокального пятна 1 мкм. Размеры голограммы составляли 4848×4848 пикселей при диаметре одного пикселя 1 мкм. Расстояние от объекта до голограммы было выбрано равным 15,8 мм, что при минимальном размере элемента структуры объекта 4 мкм и указанных выше размерах апертуры голограммы позволяло использовать ее на длине волны 0,488 мкм для формирования изображения «креста», состоящего из линий длиной 0,3 мм. Угол падения опорной волны при синтезе голограммы принимался равным $10,5^{\circ}$ [13].

Общий вид синтезированной голограммы представлен на рис. 12. Отображенная на поверхности фоторезиста голограмма-проектор покрывалась в вакуумной камере тонким слоем алюминия, что позволяло преобразовать ее в отражательную голограмму. Восстановление полученной подобным образом голограммы осуществлялось на обращение параллельным восстанавливающим пучком при рассчитанном в соответствии с (1.34) угле его падения на плоскость голограммы, равным $17,7^{\circ}$. Отметим, что величина этого угла отличается от величины угла падения опорной волны при синтезе голограммы-проектора.

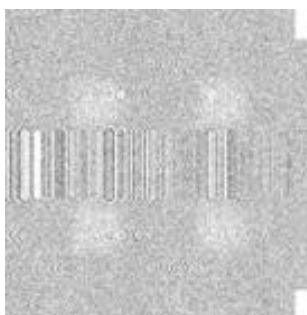


Рисунок 12. Общий вид синтезированной бинаризованной голограммы «креста»

Регистрация восстановленного с помощью синтезированной голограммы-проектора изображения «креста» производилась методом проекционной голографической фотолитографии на плоской стеклянной пластине, покрытой слоем хрома, поверх которого был нанесен тонкий слой ХСП, т.е. негативного неорганического фоторезиста (рис.13).

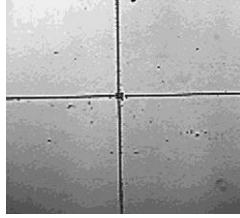


Рисунок 13. Изображение «креста», полученное методом фотолитографии с помощью синтезированной голограммы-проектора на слое хрома, нанесенном на стеклянную подложку

Качество приведенного изображения, позволяет сделать вывод о его беспыльной структуре, а также о возможности и перспективности использования в голографической проекционной фотолитографии действительных изображений фотошаблонов, формируемых с помощью синтезированных голограмм-проекторов френелевского типа, восстанавливаемых, в том числе, и при углах падения восстанавливающей волны, превышающих угол падения опорной волны при синтезе голограммы.

2. Влияние метода представления объекта на изображающие свойства синтезированных голограмм

Принципиальная особенность синтезированных и цифровых голограмм заключена в дискретности структуры, оказывающей существенное влияние на их изображающие свойства [7, 8]. Кроме того, синтезированные голограммы, представляющие собой отображенное на носителе распределение интенсивности голографического поля, рассчитанное по определённым алгоритмам, создаются без использования реального объекта, что следует считать определённым преимуществом данного типа голограмм. Роль реального объекта в процессе синтеза голограммы играет его математическая модель, т.е. заданное тем или иным методом распределение комплексной амплитуды объектной волны в плоскости объекта. Так, например, в задачах голографической фотолитографии, для решения которых наиболее хорошо подходят синтезированные голограммы, объект, как правило, представляется в виде модели бинарного двумерного транспаранта, работающего на пропускание.

Цифровой характер процесса синтеза голограмм приводит к необходимости описания распределения комплексной амплитуды объектной волны в плоскости объекта в виде совокупности дискретных отсчетов. Таким образом, можно сказать, что синтезированная голограмма представляет собой дискретную голограмму дискретного объекта. В связи с этим её структура имеет определённые характерные отличия от структуры голограммы, регистрируемой традиционными методами физической записи. Метод представления объекта, т.е. используемые параметры его дискретизации, не может не оказывать влияния на изображающие свойства синтезированных голограмм.

Очевидно, что качество восстановленного изображения увеличивается по мере приближения расчётной структуры к реальной, т.е. идеальное качество будет обеспечиваться при бесконечно большом числе используемых отсчетов комплексной амплитуды объектной волны. В то же время проведение подобного расчёта в реальности потребует бесконечно большого времени синтеза голограммы. Именно поэтому понимание характера влияния метода представления объекта на изображающие свойства синтезированных голограмм является очень важным фактором, позволяющим оптимизировать процесс их синтеза с точки зрения затрачиваемых временных и аппаратных ресурсов. Определим его для случая освещения бинарного двумерного объекта нормально падающей на его поверхность плоской волной и нормального падения главного луча объектного пучка на плоскость синтеза голограммы. При этом рассмотрим два метода представления объекта: метод, основанный на пространственно-частотном анализе дискретной голограммы и метод, основанный на критерии разрешения Рэлея.

2.1. Метод представления объекта, основанный на пространственно-частотном анализе дискретной голограммы

Ранее в работах [7, 13], исходя из проведенного пространственно-частотного анализа дискретной голограммы, было установлено, что для успешного восстановления изображения дискретного объекта, период дискретизации синтезированной голограммы должен быть как минимум в 4 раза меньше периода дискретизации самого объекта, т.е. должны выполняться следующие соотношения:

$$|\xi_{o\max}| = \frac{\Delta_{\max}}{2} = \frac{1}{8d_d}, \quad (2.1)$$

$$a_t \geq \frac{1}{2|\xi_{o\max}|} = 4d_d, \quad (2.2)$$

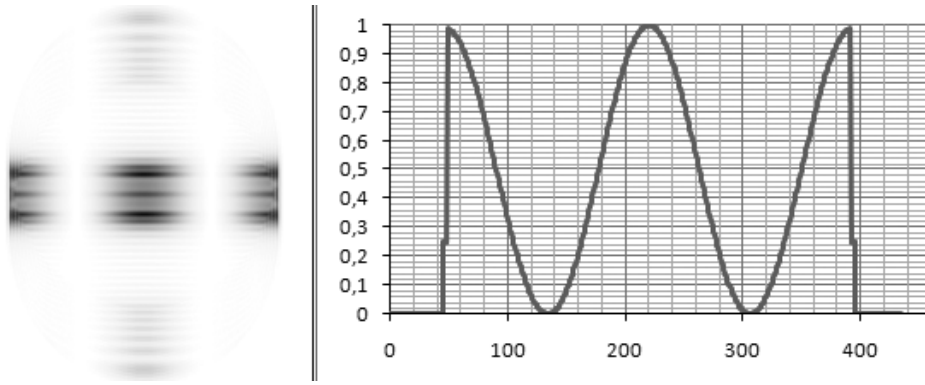
где $\xi_{o\max}$ – максимальная пространственная частота объекта; Δ_{\max} – максимально допустимая ширина спектра объекта; d_d – период дискретизации голограммы; a_t – период дискретизации объекта, полагающийся равным размеру пиксела объекта. Метод представления объекта, основанный на выполнении соотношений (2.1) и (2.2), позволяет синтезировать голограммы-проекторы, пригодные с учетом некоторых ограничений, о которых речь пойдет далее, для применения в фотолитографическом процессе в случае использования фоторезистов с разрешением, не превышающим a_t . Аналогичное заключение может быть сделано и для случая совместного использования синтезированной голограммы с матричным ПЗС-фотоприемником для регистрации восстановленного изображения с размером пиксела равным или превышающим a_t . В случаях же использования фоторезистов или ПЗС-приемников с большим разрешением, т.е. с меньшим размером пикселя, восстановленное изображение будет казаться состоящим из совокупности отдельно стоящих точек. Отметим, что использование при восстановлении синтезированных голограмм регистраторов восстановленного изображения с размером пикселя, меньшим a_t не приводит к уменьшению минимального размера элемента структуры объекта, отображаемого в восстановленном изображении. Он, по-прежнему, в соответствии с работой [7], определяется апертурой голограммы и периодом ее дискретизации и равен a_t .

Отображение восстановленного изображения в виде совокупности отдельно стоящих точек обусловлено нарушением критерия разрешения Рэля. В соответствии с ним, для того, чтобы изображения этих отдельно стоящих точек сливались в непрерывную линию, расстояния между ними должны быть меньше расстояния от максимума до первого минимума интенсивности каждой отдельно стоящей точки [14]. В данном случае это

означает, что расстояние между отдельными точками не должно превышать величины, равной половине размера пикселя, т.е. $a_t/2$. Однако в рассматриваемом случае оно получается равным a_t . Таким образом, метод представления объекта, основанный на пространственно-частотном анализе дискретной голограммы, реализует случай, при котором точки (пиксели), из которых состоит изображение, воспринимаются как отдельно стоящие.

Несмотря на это обстоятельство, данный метод представления объекта имеет право на использование, поскольку обеспечивает минимальное количество ресурсов, необходимых для синтеза голограммы. Проведенное экспериментальное исследование показало, что он может быть успешно использован при нелинейной регистрации восстановленного изображения для объектов сложной структуры и объектов относительно малых размеров, – например, состоящих из отрезков шириной не более, чем в 1 пиксель. В случае если объект представляет собой совокупность более широких отрезков (шириной в 2-3 пикселя и более) применение этого метода представления нежелательно. Причина этого состоит в том, что рассчитываемая в процессе синтеза голограммы картина распределения комплексной амплитуды объектной волны (дифракционная картина) в плоскости голограммы в этом случае будет соответствовать картине дифракции на нескольких параллельных щелях [14], а не на одной щели, как это происходит в реальности.

Данный факт иллюстрирует рис. 14, на котором представлены распределение интенсивности объектной волны, рассчитанное для отрезка шириной в 2 пикселя (а), и его горизонтальное сечение (б). Приведённые на рис. 14 данные получены с помощью программного комплекса для синтеза и цифрового восстановления голограмм, описанного в работах [5, 6]. На представленном графике по оси абсцисс отложена координата X плоскости голограммы в пикселях, по оси ординат – нормированное на максимум значение интенсивности объектной волны. Результат был получен при следующих параметрах синтеза голограммы. Размер минимального элемента структуры объекта (1 пикселя) $a_t = 80$ нм; период дискретизации голограммы $d_a = 20$ нм; период дискретизации объекта – 80 нм; длина волны используемого излучения $\lambda = 13,5$ нм; расстояние между плоскостями объекта и голограммы $R_h = 20,35$ мкм; угол падения плоской опорной волны $\alpha = 14,67^\circ$. Наблюдаемое на рисунке «обрезание» распределения интенсивности объектной волны по краям графика связано с ограниченным размером площади синтеза голограммы.

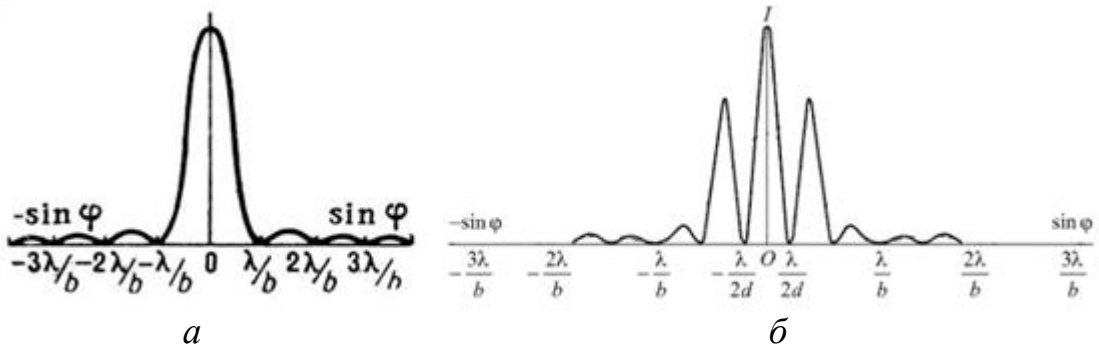


а

б

Рисунок 14. Распределение комплексной амплитуды объекта (а) и его сечение (б) для отрезка толщиной в 2 пикселя (160 нм)

Для сравнения на рис. 15 приведены типичные виды дифракционных картин при дифракции света на одной (а) и двух (б) параллельно расположенных щелях. Здесь: b – ширина щели, d – расстояние между щелями, φ – величина разности фаз, λ – рабочая длина волны.



а

б

Рисунок 15. Дифракционная картина при дифракции света на одной (а) и двух щелях (б)

Из сравнения рисунков 14 и 15 можно сделать вывод о близости рассчитанного распределения интенсивности объектной волны, представленного на рис. 14, к распределению интенсивности в картине дифракции излучения на двух щелях, представленной на рис. 15 (б). Возможность использования рассматриваемого представления объекта для синтеза голограмм-проекторов сложных объектов, предназначенных для формирования изображения на поверхности фоторезиста, обладающего разрешающей способностью, не превышающей размер минимального элемента объекта (точки) a_t , иллюстрирует рис. 16. На нем представлены изображение исходного объекта, состоящего из отрезков различной ширины, (а) и изображения, полученные при цифровом восстановлении синтезированной голограммы при различных разрешениях регистратора изображения a_t (б) и $a_t/4$ (в), соответственно.

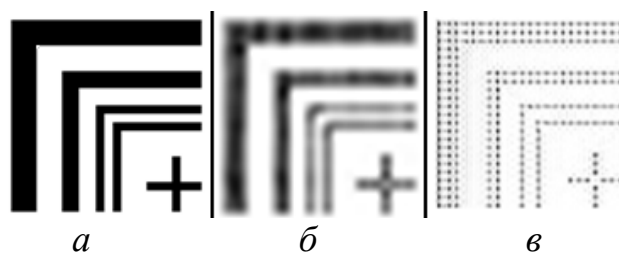


Рисунок 16. Сложный объект (а) и его изображение, восстановленное с различным разрешением: стандартным (б) и увеличенным в 4 раза (в)

Из представленных изображений следует, что 4-кратное увеличение разрешения регистратора восстановленного изображения, т.е. уменьшение размера его пикселя с 80 нм до 20 нм, приводит к появлению в восстановленном изображении дополнительной тонкой структуры, реально отсутствующей у объекта, т.е. фактически приводит к распаду гладкого непрерывного изображения на совокупность отдельно стоящих точек. Заметим, что представленное на рис. 16 (в) восстановленное изображение, в принципе, может быть сведено к изображению, приведенному на рис. 16 (б), путем уменьшения разрешающей способности регистрирующей его среды, либо путем увеличения экспозиции при его регистрации за счет использования нелинейного участка характеристической кривой регистрирующей среды.

Таким образом, использование при синтезе голограмм метода представления объекта, основанного на пространственно-частотном анализе дискретных голограмм, приводит к распаду восстановленного изображения на совокупность отдельно стоящих точек и не позволяет, за исключением отдельных случаев, получать синтезированные голограммы, пригодные для формирования изображений, идентичных по структуре исходному объекту. Наиболее ярко недостатки этого метода представления объекта проявляются при его использовании для синтеза голограмм изображения, состоящего из линий, ширина которых превышает ширину отдельного элемента разрешения объекта.

При использовании этого метода для синтеза голограмм сложных объектов, т.е. объектов, состоящих из линий различной ширины, свойственные ему недостатки, а именно, представленный на рис. 14 (а) рост интенсивности первых побочных максимумов картины дифракции излучения на объекте и эффект распада изображения на отдельно стоящие точки могут быть смягчены. С этой целью можно для регистрации восстановленного изображения использовать регистрирующую среду или фотоприемное устройство с относительно невысоким разрешением, т.е. с разрешением, сравнимым с размером элемента разрешения объекта. Другой путь устранения или существенного смягчения указанных выше ограничений состоит в использовании альтернативного метода представления объекта, например, метода, основанного на критерии разрешения Рэлея.

2.2. Метод представления объекта, основанный на критерии разрешения Рэля

Согласно критерию разрешения Рэля точки, составляющие изображение объекта, воспринимаются, как отдельно стоящие точки, если провал в распределении интенсивности в изображении двух соседних точек превышает 20% [14]. Иначе говоря, точки будут визуальнo восприниматься отдельно стоящими, если центральный максимум распределения интенсивности в изображении одной точки располагается от центрального максимума распределения интенсивности изображения другой точки на расстоянии, равном или превышающем расстояние от центрального максимума до первого минимума распределения интенсивности в изображении точечного объекта (рис. 17).

Исходя из критерия разрешения Рэля, сформулируем условие выбора метода представления объекта при синтезе голограмм, гарантирующего отсутствие нарушений в структуре восстановленного изображения, т.е. гарантирующего непрерывность отрезков, составляющих изображение.

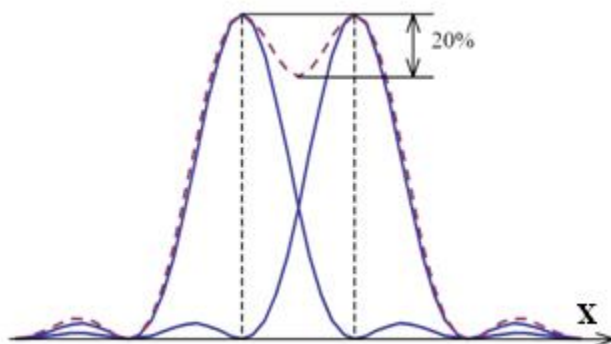


Рисунок 17. Критерий разрешения Рэля

Распределение света в дифракционной картине изображения точки представляет собой диск Эйри [14]. Таким образом, согласно Рэлею, расстояние между соседними светящимися точками должно быть меньше радиуса диска Эри

$$R = 1,22 \frac{\lambda}{2A}, \quad (2.3)$$

где A – числовая апертура, λ – рабочая длина волны. Учитывая, что

$$A = \frac{\lambda}{p}, \quad (2.4)$$

где p – диаметр минимального элемента объекта (точки), получим:

$$R = 0,61p. \quad (2.5)$$

Учитывая, что в соответствии с представлениями о дискретности, все соотношения между периодами должны быть кратны двум, получим итоговое требование к расстоянию между соседними точками, т.е. периоду дискретизации объекта: $R \leq 0,5p$.

Таким образом, условие выбора метода представления, сводится к тому, что при синтезе голограммы необходимо использовать период дискретизации объекта, который был бы более чем в 2 раза меньше расчётного периода дискретизации. Он, в свою очередь, определяется исходя из пространственно-частотного анализа дискретной голограммы. Также необходимо отметить, что с точки зрения временных и аппаратных ресурсов, потребляемых при синтезе голограмм, необходимо стремиться к использованию метода представления объекта, характеризующегося максимально возможным с точки зрения качества восстанавливаемого изображения периодом дискретизации объекта. Это следует из того, что чем меньше отсчетов функции пропускания объекта используется при синтезе голограммы, тем меньше выполняемый объем математических операций.

Оптимальный с точки зрения требуемых для синтеза голограмм ресурсов и качества восстановленного изображения период дискретизации объекта может быть определен экспериментально. С этой целью необходимо синтезировать несколько голограмм-проекторов, отличающихся друг от друга величиной использованного периода дискретизации объекта, который при указанных ниже параметрах синтеза голограммы составляет 80 нм (период, рассчитанный в соответствии с результатами работы [7]), 40 нм и 20 нм. Остальные параметры синтеза для всех голограмм могут быть одинаковыми: период дискретизации голограммы $d_d = 20$ нм; длина волны используемого излучения $\lambda = 13,5$ нм; расстояние между плоскостями объекта и голограммы $R_h = 20,35$ мкм; угол падения плоской опорной волны $\alpha = 14,67^\circ$.

На рис. 18 представлены изображения двух объектов, восстановленные с помощью синтезированных голограмм-проекторов при размере элемента разрешения регистратора изображения в 10 нм – т.е. дополнительно уменьшенным по сравнению с минимальным периодом дискретизации объекта. Первый из них (верхний ряд рис. 14) представлял собой совокупность пересекающихся отрезков разных длин и толщин (от 1 до 3 точек), второй (нижний ряд) – вертикальный отрезок шириной в 2 точки.

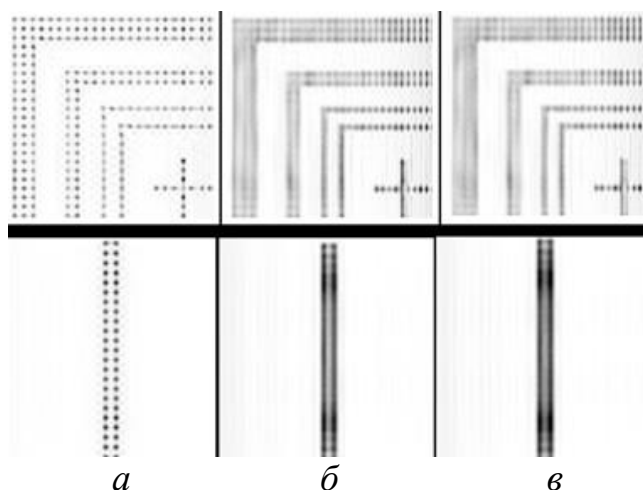


Рисунок 18. Изображения различных объектов, полученные при восстановлении голограмм, синтезированных при периодах дискретизации объекта, равных: 80 нм (а), 40 нм (б), 20 нм (в)

Из представленных рисунков видно, что наилучшее качество изображения реализуется в случае использования при синтезе голограмм-проекторов метода представления объекта, характеризующегося периодом дискретизации объекта, в 4 раза меньшим по сравнению с периодом, считавшегося оптимальным исходя из пространственно-частотного анализа дискретных голограмм. Стоит заметить, что, несмотря на то, что разница между верхними изображениями 18 (б) и 18 (в) практически незаметна, в случае простых объектов (например, тонких линий, как в нижнем ряду рис. 18) при двукратном увеличении периода дискретизации в изображении всё-таки сохраняются заметные искажения.

Также отметим, что видимые в правых частях рисунков из верхнего ряда 18 (б, в) заметны помехи определённого вида – вертикальные прямые линии, контраст которых растёт по мере приближения к правому краю рисунка. Их наличие вызвано наличием интерференции нулевого и первого порядков дифракции голограммы-проектора.

Один из возможных методов устранения этих помех заключается в увеличении расстояния между объектом и голограммой-проектором при ее синтезе. С целью проверки такой возможности был синтезирован и восстановлен ряд голограмм-проекторов, отличающихся друг от друга расстоянием между объектом и голограммой. В результате проведенного исследования было установлено, что полностью свободное от указанных помех изображение тестового объекта может быть восстановлено с помощью голограммы, синтезированной при расстоянии между плоскостью объекта и голограммой, равным $R_{hmod} = 40,4$ мкм (т.е. примерно в 2 раза большем, по сравнению с заданным значением). На рис. 19 (а) представлено изображение, восстановленное с помощью голограммы, синтезированной при вышеуказанных условиях.

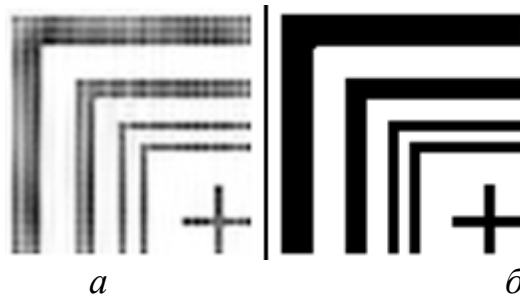


Рисунок 19. Восстановленное изображение до (а) и после (б) пороговой обработки

Оно получено при размере пикселя регистратора изображения 20 нм, периоде дискретизации голограммы $d_d = 20$ нм; длине волны используемого излучения $\lambda = 13,5$ нм и угле падения плоской опорной волны $\alpha = 14,67^\circ$. Из рисунка видно, что изображение практически свободно от помех и по виду состоит из сплошных линий (а не из совокупности отдельно стоящих точек). После проведения пороговой обработки (рис. 19б) данное изображение становится практически полностью соответствующим исходному объекту.

В качестве еще одного подтверждения эффективности использования метода представления объекта, основанного на критерии разрешения Рэля, для синтеза голограмм, в том числе и голограмм-проекторов, предназначенных для использования в фотолитографическом процессе, на рис. 20 представлено рассчитанное при периоде дискретизации объекта 20 нм распределение интенсивности объектной волны в плоскости синтеза голограммы, порожденное объектом, имеющим вид отрезка шириной в 160 нм. Отметим, что эта ширина соответствует размеру двух минимальных элементов структуры объекта, которые могут быть восстановлены с помощью синтезированной голограммы.

Сравнивая приведенное распределение интенсивности объектной волны с результатами аналогичного эксперимента, проведенного при периоде дискретизации объекта 80 нм (рис. 14), нетрудно заметить, что полученное после уменьшения периода дискретизации объекта распределение интенсивности практически полностью соответствует реальной картине дифракции на щели (рис. 15а). Отметим, что представленное ранее на рис. 14 распределение интенсивности, порожденное объектом той же ширины, соответствовало картине дифракции на 2 щелях.

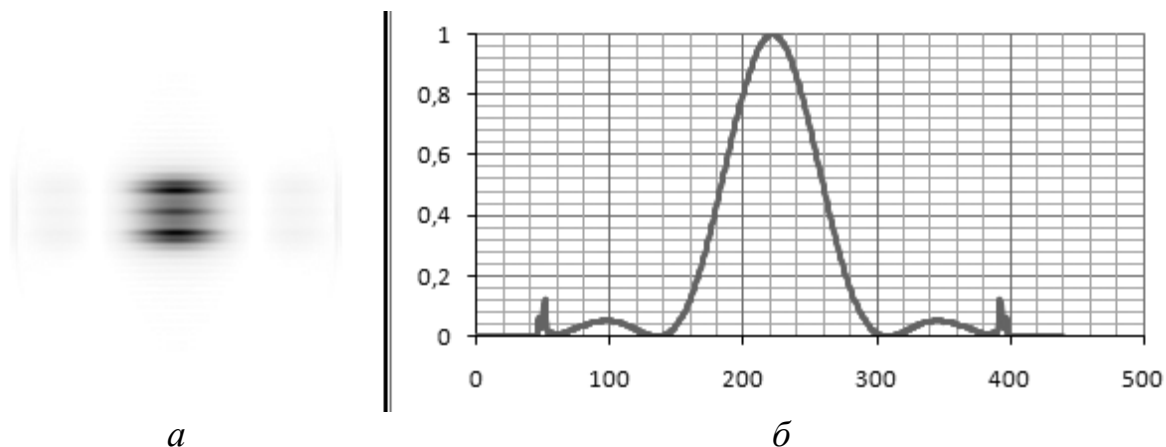


Рисунок 20. Распределение интенсивности объектной волны в плоскости голограммы (а), рассчитанное при уменьшенном периоде дискретизации объекта, и его сечение (б) для отрезка толщиной в 2 пикселя (160 нм)

Таким образом, необходимо при синтезе голограммы использовать, как минимум, 4 отсчета функции пропуска объекта на каждый разрешаемый элемент структуры объекта. Вернёмся к упомянутому выше требованию минимизации аппаратных и временных затрат на проведение синтеза голограммы. Несмотря на то, что, на первый взгляд, уменьшение периода дискретизации объекта в 4 раза должно привести к 16-кратному (т.к. уменьшение периода происходит вдоль обеих координатных осей) увеличению временных затрат на процесс синтеза голограммы, этого не происходит. Дело в том, что наиболее эффективным методом синтеза голограмм может считаться метод, основанный на использовании таблиц соответствия («look-up table»), называемый методом «штамповки» [5]. В соответствии, с этим методом при синтезе голограммы-проектора фактически складываются элементарные поля объектных волн, сформированные типовыми элементами структуры объекта – отдельными точками, отрезками и т.д. Соответственно, для реализации описанного в данной работе, метода представления объекта, необходимо всего лишь внести определённые изменения в алгоритм формирования отдельного штампа. Если ранее штамп представлял собой распределение комплексной амплитуды, порожденное точечным источником, то теперь он должен представлять собой распределение комплексной амплитуды, порожденное в плоскости голограммы матрицей из 16 (4×4) точечных источников. Таким образом, общее время синтеза голограммы при использовании метода представления объекта, основанного на критерии разрешения Рэля, увеличится ненамного – ровно на столько, сколько необходимо потратить на расчёт нового штампа.

Таким образом, в данном подразделе показано существенное влияние метода представления объекта, т.е. периода его дискретизации, на

изображающие свойства синтезированных голограмм. Установлено, что использование при синтезе голограмм метода представления объекта, основанного на пространственно-частотном анализе дискретной голограммы, приводит к появлению нарушений в структуре восстановленного изображения, а именно к отображению восстановленного изображения в виде совокупности отдельно стоящих точек.

С целью устранения выявленных искажений предлагается использовать при синтезе голограмм период дискретизации объекта, в 4 раза меньший, по сравнению с периодом, определенным исходя из пространственно-частотного анализа дискретной голограммы. Показано, что использование предложенного метода представления объекта не приводит к существенному увеличению времени синтеза голограммы.

3. Влияние нелинейности синтезированных голограмм на их изображающие свойства

Важная особенность пригодных для практического использования синтезированных голограмм состоит в том, что они всегда являются бинарными. Это требование связано с тем, что существующие на сегодняшний день лазерные и электронно-лучевые генераторы изображений могут обеспечить точную передачу лишь двух градаций коэффициента пропускания синтезируемой голограммы по амплитуде [15, 16]. До бинаризации синтезированная голограмма обычно рассчитывается и представляется в виде полутонного транспаранта, имеющего 256 градаций серого цвета, лежащих в интервале от черного цвета (0) до белого (255) в соответствии с так называемой «серой шкалой». При бинаризации последовательно перебираются все ячейки матрицы, в которой хранится информация о распределении интенсивности голографического поля синтезируемой голограммы и, в зависимости от выбранного в пределах 0 до 255 уровня бинаризации t , значение интенсивности в каждой из них заменяется либо на 0, либо на 255.

Такой метод позволяет синтезировать как амплитудные, так и фазовые голограммы-проекторы, пригодные для формирования действительных изображений двумерных объектов высокого разрешения. Вместе с тем, он не свободен от ряда недостатков, существенно осложняющих его практическое использование. Наиболее существенный из них состоит в относительно большой ресурсоемкости метода, связанной с необходимостью расчета распределения амплитуды и фазы сферических волн, порождаемых каждой из точек исходного объекта при синтезе голограммы и каждой из точек голограммы при ее цифровом восстановлении. Причем с увеличением размера и сложности объекта ресурсные и временные затраты растут в геометрической прогрессии.

Ранее уже отмечалось, что практически все известные из литературы методы ускорения и облегчения процесса синтеза голограмм предлагают решение данной проблемы с помощью использования так называемых методов таблиц соответствия («look-up table» методов). Их суть состоит в предварительном разбиении структуры объекта на некоторые типовые элементы – такими элементами могут быть, например, как отдельные точки объекта [17 – 19], так и входящие в его состав отрезки, или закрашенные прямоугольные области-полигоны [20]. Затем вычисляется амплитуда каждого из голографических полей, порожденных отдельными элементами структуры объекта, после чего амплитуды рассчитанных элементарных полей складываются.

Заложенная в описанный выше метод синтеза голограмм-проекторов идея сложения голографических полей представляется достаточно сложной

для практического использования. В связи с этим более перспективным, с нашей точки зрения, является метод, изложенный в работе [5]. В соответствии с ним при синтезе голограммы-проектора предлагается складывать не элементарные голографические поля, а элементарные поля объектных волн, сформированные каждым из типовых элементов структуры объекта в плоскости синтеза голограммы. Распределение амплитуды в таком элементарном поле авторы работы назвали «штампом», а сам метод – методом штамповки. Опорная волна при реализации этого метода «накладывается» на финальном этапе синтеза голограммы-проектора после расчета амплитуды объектной волны на всей поверхности голограммы.

Метод штамповки позволяет существенно сократить временные и ресурсные затраты на синтез голограмм-проекторов, так как рациональное разбиение объекта на типовые элементы приводит к заметному сокращению объема вычислений при синтезе голограмм. Вместе с тем он не свободен и от собственных недостатков. Основной из них заключается в нарушении линейности записи голограммы. Строго говоря, фазовые бинарные голограммы уже являются нелинейными, но штамповка усугубляет их нелинейность еще больше. Результатом такого нарушения линейности становится появление зависимости интенсивности восстановленного изображения объекта от его размера, т.е. при применении этого метода синтеза голограмм восстановленные изображения объектов разных размеров характеризуются различной интенсивностью, зависящей в конечном итоге от размеров исходного объекта.

Наиболее очевидным способом решения проблемы нарушения линейности кажется искусственная нормировка амплитуды поля, соответствующего каждому штампу. Этот метод был подробно рассмотрен в работе [21]. Но, как выяснилось в дальнейшем, его реализация требует значительно замедляющего процесс синтеза голограммы расчета коэффициента этой нормировки, который в общем случае будет зависеть от размера объекта. Поэтому имеет смысл допускать на этой стадии нелинейность, а меры к ее устранению принимать уже после применения штамповки.

3.1. Анализ влияния метода штамповки на зависимость интенсивности восстановленного изображения от размера исходного объекта

С целью установления зависимости интенсивности восстановленного изображения от размера объекта сравним интенсивности восстановленных изображений двух объектов – точки (1 пикселя) и прямоугольника размером $m \times n$ пикселей. Отметим, что в соответствии с методом штамповки поле объектной волны прямоугольника складывается из штампов отдельных точек. Будем считать эти штампы идентичными. Тогда максимальные

значения интенсивности объектных волн в плоскости голограммы для этих объектов соответственно равны $I_p = 1$ для точки и $I_{mn} = m^2 n^2$ для прямоугольника.

Для простоты расчетов будем считать, что все штампы имеют прямоугольную форму. Тогда, как следует из работы [13], площадь штампа точки S_p можно считать равной

$$S_p \approx \frac{4\lambda^2 R_h^2}{p^2}, \quad (3.1)$$

где R_h – расстояние между плоскостями объекта и голограммы; λ – длина используемой волны; p – линейный размер пикселя.

Соответственно, для объекта размером $m \times n$ пикселей стороны участка апертуры голограммы, занимаемого объектной волной, будут равны:

$$l_{p-m} = \frac{2\lambda R_h}{pm} + mp, \quad (3.2)$$

$$l_{p-n} = \frac{2\lambda R_h}{pn} + np.$$

При этом площадь рассматриваемого участка апертуры голограммы S_{mn} можно считать равной

$$S_{mn} = \frac{4\lambda^2 R_h^2 + 2\lambda p^2 R_h (m^2 + n^2) + p^4 m^2 n^2}{p^2 mn}. \quad (3.3)$$

Определим интенсивность i_{mn} изображения, восстанавливаемого при освещении синтезированной голограммы плоской волной, идентичной опорной волне, использованной при ее синтезе. Она будет зависеть от соотношения площадей исходного объекта S_o и участка апертуры голограммы S_{mn} , а также дифракционной эффективности голограммы η , и может быть определена с помощью следующего выражения:

$$i_{mn} = \frac{S_{mn}}{S_o} \eta_{mn}, \quad (3.4)$$

где η_{mn} – дифракционная эффективность голограммы, которую будем считать равной для всего рассматриваемого участка ее апертуры. Подставив в эту формулу выражение (3.1), получим:

$$i_{mn} = \eta_{mn} \frac{4\lambda^2 R_h^2 + 2\lambda p^2 R_h (m^2 + n^2) + p^4 m^2 n^2}{p^4 m^2 n^2}. \quad (3.5)$$

В случае, если объект является отдельной точкой, т.е. $m = n = 1$, то интенсивность восстановленного изображения i_p будет определяться следующим выражением:

$$i_p = \eta_p \frac{4\lambda^2 R_h^2 + 4\lambda p^2 R_h + p^4}{p^4}. \quad (3.6)$$

Отсюда можно определить наблюдаемое в восстановленном изображении различие в интенсивностях восстановленных изображений отдельной точки и объекта размером $m \times n$ пикселей:

$$\frac{i_{mn}}{i_p} = \frac{\eta_{mn}}{\eta_p} \cdot \frac{(2\lambda R_h + p^2 mn)^2 + 2\lambda p^2 R_h (m - n)^2}{m^2 n^2 (2\lambda R_h + p^2)^2}. \quad (3.7)$$

Из (3.7) следует, что интенсивности двух восстановленных изображений рассмотренных объектов будут равны в том случае, если соотношение дифракционных эффективностей двух соответствующих им участков голограмм составит:

$$\frac{\eta_{mn}}{\eta_p} = \frac{m^2 n^2 (2\lambda R_h + p^2)^2}{(2\lambda R_h + p^2 mn)^2 + 2\lambda p^2 R_h (m - n)^2}. \quad (3.8)$$

Таким образом, например, для случая объекта в виде отрезка с $m = 10$, $n = 1$ и параметров синтеза $p = 80$ нм; $\lambda = 13,5$ нм; $R_h = 20,345$ мкм; дифракционная эффективность участка голограммы, хранящего информацию об изображении отрезка, η_{10} , по сравнению с дифракционной эффективностью участка апертуры голограммы, на котором записано изображение отдельной точки η_p , должна быть равна: $\eta_{10} \approx 288,62\eta_p$.

Отдельно стоит рассмотреть крайний случай, при котором значения $m, n \rightarrow \infty$. В этом случае формула (3.8) приобретает следующий вид:

$$\frac{\eta_{mn}}{\eta_p} \approx \frac{m^2 n^2 (2\lambda R_h + p^2)^2}{p^4 m^2 n^2} \approx \frac{4\lambda^2 R_h^2}{p^4}. \quad (3.9)$$

Из (3.9) следует, что при достаточно больших размерах объекта, т.е. при таких размерах, позволяющих пренебречь дифракционными эффектами и считать размер участка апертуры голограммы, на котором записано изображение объекта, равным размеру самого объекта, зависимость интенсивности восстановленного изображения от размера объекта исчезает. Отметим, что следующее из (3.9) при указанных выше параметрах синтеза, соотношение дифракционных эффективностей объекта и точки для достижения ими одинаковых интенсивностей должно быть равно: $\eta_{mn} \approx 7268,82\eta_p$.

Каким же способом мы можем обеспечить рассчитанные выше соотношения дифракционных эффективностей различных участков синтезированной голограммы? Для этого воспользуемся результатами работы [22], из которых следует, что дифракционная эффективность отражательной дискретной бинарной рельефно-фазовой голограммы помимо высоты рельефа и рабочей длины волны зависит от скважности голограммной структуры, причем эта зависимость описывается следующим выражением:

$$\eta = \frac{4}{\pi^2} \sin^2(\pi S) \cdot \sin^2\left(\frac{2}{\lambda} \pi h\right), \quad (3.10)$$

где S – скважность голограммы, h – высота её рельефа. Если значение высоты рельефа принять оптимальным, с точки зрения достижения максимальной дифракционной эффективности отражательной рельефно-фазовой голограммы, т.е. положить $h = \frac{\lambda}{4}$ [5], то (2.10) приобретет вид:

$$\eta = \frac{4}{\pi^2} \sin^2(\pi S). \quad (3.11)$$

Из (3.11) следует, что единственным параметром, влияющим на значение дифракционной эффективности бинарной отражательной рельефно-фазовой голограммы при заданных величинах рабочей длины волны и высоты рельефа, является ее скважность. В свою очередь, величина скважности определяется выбранным уровнем бинаризации голограммы. Это иллюстрирует рис. 21, на котором представлено распределение интенсивности голографического поля голограммы двух разновеликих объектов до ее бинаризации. Если такая голограмма будет бинаризована по уровню, отмеченному чертой, то скважности левого и правого участков апертуры бинаризованной голограммы S_1 и S_3 будут равны, соответственно:

$$S_1 = \frac{a_1}{d_1} \quad \text{и} \quad S_3 = \frac{a_3}{d_3},$$

где d_1 и d_3 – локальные пространственные периоды голограммы.

Исходя из вышеизложенного, с учетом относительно слабой, по сравнению с S_1 , зависимости скважности S_3 от выбранного уровня бинаризации голограммы можно сделать вывод о возможности влияния на относительную интенсивность восстановленных изображений путем изменения уровня бинаризации голограммы. То есть, чтобы получить изображение, приближенное к исходному объекту, следует подобрать подходящий уровень бинаризации голограммы. При этом, как следует из рис. 21, таких уровней может быть два.

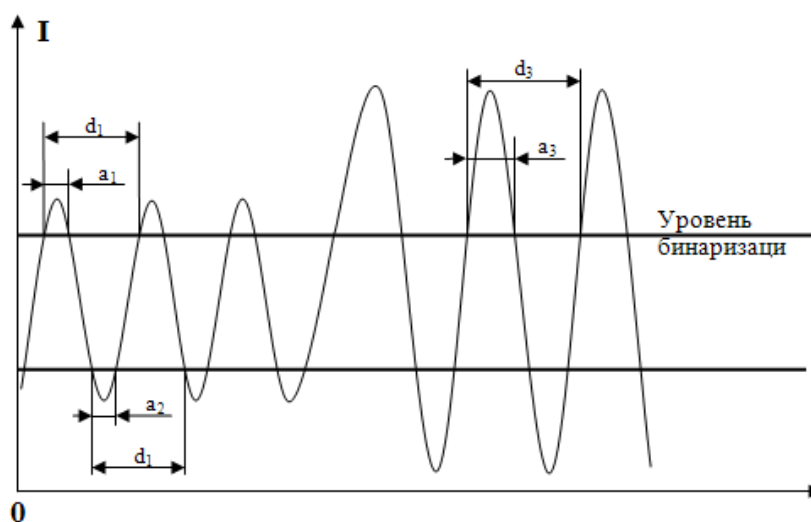


Рисунок 21. Распределение интенсивности голографического поля голограммы двух разновеликих объектов. Показана зависимость скважности от уровня бинаризации

При этом для разных объектов оптимальный уровень бинаризации будет, естественно, различным. Определить его с достаточной для практики точностью, обеспечивающей заданный разброс интенсивностей изображений объектов различного размера, проще всего экспериментальным путем, используя для этой цели, например, специализированный комплекс синтеза и цифрового восстановления голограмм-проекторов [5].

3.2. Экспериментальное исследование возможности обеспечения равной интенсивности в восстановленных изображениях разновеликих объектов путем подбора соответствующего уровня бинаризации синтезированных голограмм-проекторов

Возможности обеспечения равной интенсивности в восстановленных изображениях разновеликих объектов была продемонстрирована экспериментально применительно к следующим параметрам синтеза отражательных рельефно-фазовых голограмм-проекторов: размер минимального элемента структуры объекта $p = 80$ нм; длина волны используемого излучения $\lambda = 13,5$ нм; расстояние между плоскостями объекта и голограммы $R_h = 20,345$ мкм; угол падения плоской опорной волны $\alpha = 14,67^\circ$. Все голограммы синтезировались для случая освещения бинарного двумерного объекта нормально падающей на его поверхность плоской волной и нормального падения главного луча объектного пучка на плоскость синтеза голограммы. При этом высота рельефа синтезированной голограммы принималась равной $h = \frac{\lambda}{4}$, т.е. обеспечивающей сдвиг фаз,

равный π . При проведении экспериментов использовались два различных тест-объекта одинакового размера 23×23 пикселя, изображения которых представлены на рис. 22.

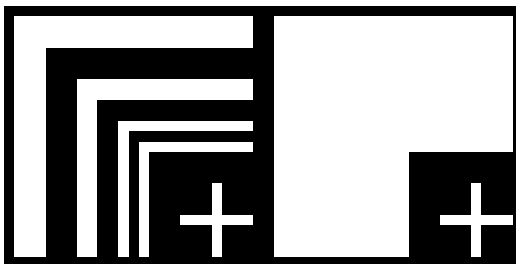


Рисунок 22. Объекты «уголки» (слева); «крест и уголок» (справа)

Объект I, называемый «уголки», характеризовался размером линий креста 1×7 пикселей. Два ближайших к кресту уголка были составлены из отрезков толщиной 1 пиксель, расстояние между ними также было равно 1 пикселю. Далее следовал промежуток шириной в 2 пикселя, за которым располагался третий уголок, ширина которого составляла 2 пикселя. Ширина четвертого уголка была равна 3 пикселям. При этом расстояние между третьим и четвертым уголками также составляло 3 пикселя. Объект II («крест и уголок») был получен из первого объекта «закрашиванием» пространства между уголками. Ширина полученного большого уголка была равна 13 пикселям.

Методика исследований включала в себя синтез голограмм-проекторов описанных выше объектов и последующий поиск уровней бинаризации этих голограмм, обеспечивающих равенство интенсивности в восстановленных изображениях. В качестве критерия качества восстановленных изображений принимался интервал градаций при пороговой обработке полученного изображения, обеспечивающий полное соответствие структуры восстановленного изображения структуре исходного объекта [6]. При этом оптимальным считался уровень бинаризации, обеспечивающий максимальную величину этого интервала. Результаты проведенных экспериментов отображены в виде графиков, представленных на рис. 23. Вдоль оси абсцисс на этом рисунке отложены значения уровней бинаризации голограммы, а вдоль оси ординат – найденные нами допустимые интервалы градаций восстановленного изображения, обеспечивающие полное соответствие структуры восстановленного изображения структуре исходного объекта. Кривая 1 на рис. 23 получена для объекта «уголки» при соотношении максимальных интенсивностей опорной и объектной волн 1:1. Кривая 2 на этом же рисунке соответствует этому же объекту и получена при соотношении интенсивностей опорной и объектной волн 3: 1.

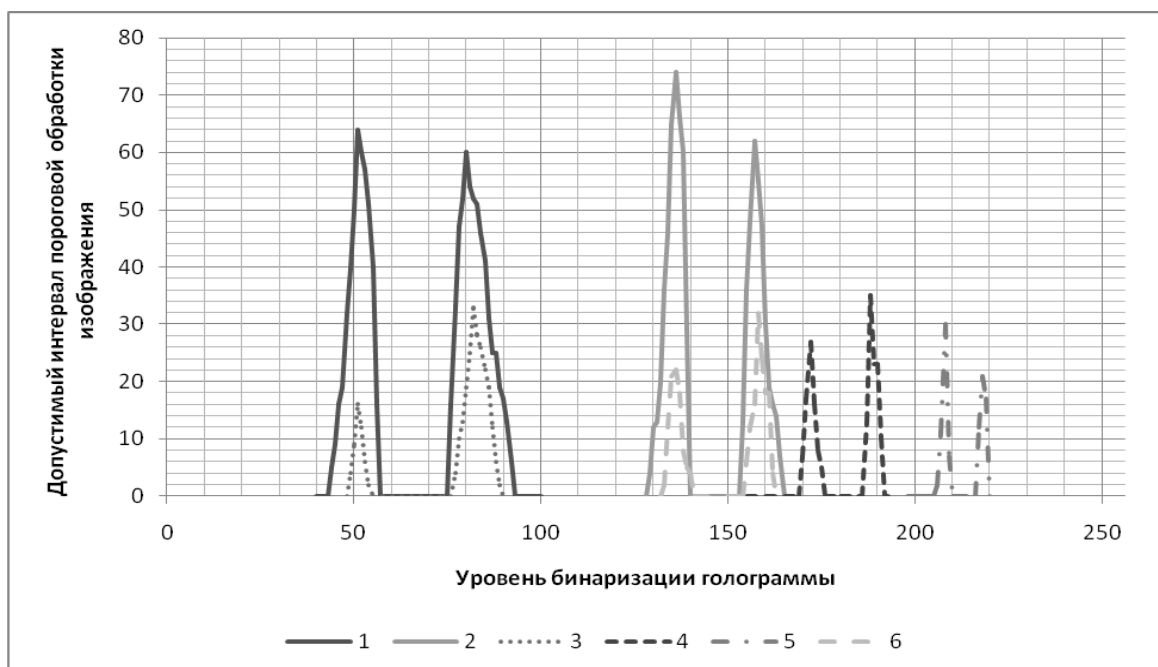


Рисунок 23. Зависимость допустимого интервала пороговой обработки изображения от уровня бинаризации голограммы для разных типов объектов и голограмм

Остальные кривые получены для объекта «крест и уголок», при различных соотношениях интенсивностей опорной и объектной волн: 1:1 (кривая 3), 5:1 (кривая 4), 10:1 (кривая 5) и 3:1 (кривая 6). Как видно из представленных графиков самый большой допустимый интервал пороговой обработки соответствует объекту 1 и уровням бинаризации $t_1 = 51$ и $t_2 = 80$. При этом наибольший допустимый интервал пороговой обработки реализуется при соотношении интенсивности опорной и объектной волн 3:1. Представленные кривые свидетельствуют о том, что максимальное значение допустимого интервала слабо зависит от соотношения интенсивностей опорной и объектной волн, в то время как оптимальный уровень бинаризации в каждом из исследованных случаев свой. Сравнение между собой кривых 1 и 3, 2 и 6, полученных для разных объектов при одинаковом соотношении интенсивностей волн (1:1 и 3:1 соответственно) позволяет сделать вывод о близости оптимальных уровней бинаризации для каждой из указанных пар кривых.

В качестве иллюстрации влияния уровня бинаризации синтезированных голограмм-проекторов на качество восстановленных изображений разновеликих объектов на рис. 24 приведены восстановленные изображения обоих объектов, каждое из которых было получено с помощью двух различных голограмм-проекторов. Одна из этих голограмм была бинаризована при среднем уровне бинаризации $t = 128$, вторая – при экспериментально определенном уровне, оптимальном с точки зрения

обеспечения равной интенсивности в восстановленных изображениях разновеликих объектов.

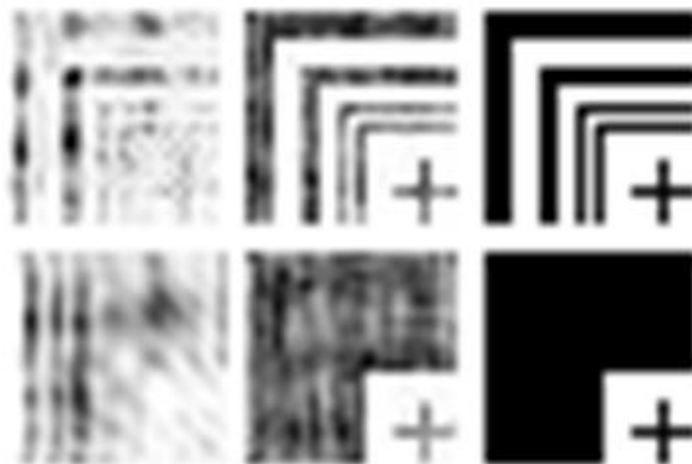


Рисунок 24. Изображения объектов, восстановленные с голограмм, бинаризованных при среднем уровне бинаризации (слева) и при оптимальном: до пороговой обработки (по центру) и после нее (справа)

Таким образом, в настоящем подразделе продемонстрировано влияние нелинейности голограмм-проекторов, синтезированных методом штамповки, на зависимость интенсивности восстановленных с их помощью изображений от размера последних. Показано, что такая зависимость имеет место в случаях, когда участок апертуры голограммы, содержащий информацию об объекте, превышает по своим размерам размер самого объекта. В случае равенства указанных выше размеров, т.е. в случае справедливости лучевого приближения, рассматриваемая зависимость отсутствует. В других случаях ее можно ослаблять путем выбора уровня бинаризации синтезированных голограмм, обеспечивающего требуемое различие дифракционных эффективностей участков апертуры голограммы, содержащих информацию об объектах различного размера. Оптимальный, с точки зрения равенства интенсивности, уровень бинаризации голограмм-проекторов предложено для каждого объекта определять экспериментальным путем с помощью специализированного программного комплекса синтеза и восстановления голограмм-проекторов.

4. Методы компьютерного синтеза голограмм-проекторов

Современные тенденции развития оптоэлектроники, плазменных и жидкокристаллических дисплеев направлены не столько на уменьшение размера единичного пикселя изображения, сколько на увеличение общей площади устройств. В сложившейся ситуации особо актуальной становится задача разработки методов высокоразрешающей проекционной фотолитографии, обеспечивающих одномоментное экспонирование относительно большого участка заготовки дисплея.

Традиционный метод проекционной фотолитографии, основанный на использовании дорогостоящих проекционных объективов, обладает существенными ограничениями по площади одновременно экспонируемого участка фоторезиста, обусловленными невозможностью полной коррекции полевых аберраций проекционных оптических систем. Особенно катастрофичная, в этом плане, ситуация будет складываться в коротковолновой УФ и экстремально коротковолновой УФ областях спектра. Производители микросхем и дисплеев обычно компенсируют недостаточность мгновенных полей современных проекционных объективов путем использования сканирующего и пошагового экспонирования. При этом, как нетрудно подсчитать из приведенных выше данных, изготовление, например, процессора размером $50 \times 50 \text{ мм}^2$ требует выполнения более 600 операций экспонирования и совмещения рисунка. Здесь необходимо отметить, что точность совмещения рисунка при пошаговом экспонировании не должна быть хуже 0,1 характеристического размера отображаемой структуры. Поскольку операция совмещения в традиционном фотолитографическом оборудовании сложна и трудоёмка, то возникает необходимость его замены альтернативными «большепольными» системами проекционной фотолитографии. При этом наиболее перспективной основой для разработки таких систем представляется метод голографии, характеризующийся возможностью формирования полностью свободных от аберраций, в том числе и полевых аберраций, действительных изображений зарегистрированного объекта. Особый интерес с этой точки зрения представляет разработка высокоразрешающих голографических проекционных систем, в том числе систем, основанных на использовании синтезированных высокоразрешающих голограмм-проекторов.

4.1. Разработка моделей процессов синтеза и восстановления голограмм-проекторов и создание специализированного программного комплекса для их реализации

Суть процесса синтеза голограммы-проектора заключена 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 актиночного излучения с материалом носителя голограммы на 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 бинарная 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 обуславливается 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 физическом носителе голограмм-проекторов, предназначенных для использования в фотолитографическом процессе, наибольший интерес вызывают работы [5, 23 – 25]. Отметим, что первая реальная демонстрация фотолитографического процесса, реализованного с помощью синтезированной голограммы-проектора Френеля, была описана в [25]. Синтез использованной при этом голограммы-проектора Френеля осуществлялся с помощью разработанного авторами специализированного комплекса синтеза и восстановления голограмм-проекторов Френеля [6]. 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. После чего,

рассчитанная для каждого пикселя голограммы амплитуда объектной волны складывается с соответствующей этому пикселю комплексной амплитудой опорной волны. Полученная сумма амплитуд возводится по модулю в квадрат и таким образом получается готовое распределение интенсивности голографического поля, соответствующего синтезируемой голограмме-проектору. Восстановление голограмм в соответствии с этим методом осуществляется аналогично и сводится к суммированию для каждого пикселя плоскости восстановленного изображения комплексных амплитуд полей, сформированных в этом пикселе каждой точкой голограммы, рассматриваемой в этом случае в качестве точечного источника излучения.

4.2. Программный комплекс для синтеза и цифрового восстановления голограмм-проекторов

Если отображение голограммы на носителе предполагает применение уже имеющихся в наличии и используемых для других целей лазерных и электронно-лучевых генераторов изображений [13], то процесс синтеза голограмм-проекторов требует использования специализированного программного комплекса, способного решать задачи, как синтеза, так и цифрового восстановления голограмм. Необходимость включения в комплекс инструментов не только синтеза голограмм, но и их восстановления объясняется, во-первых, 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. Кроме того, проведение физических экспериментов по синтезу голограмм и исследованию их изображающих свойств отличается особой дороговизной и сложностью, особенно при работах в коротковолновой области спектра.

Такой комплекс состоит из двух основных блоков: блока собственно синтеза голограмм-проекторов и блока цифрового восстановления синтезированных голограмм. Реализованный в нем алгоритм синтеза моделирует физический процесс формирования голографического поля. Его суть сводится к вычислению для каждой точки голограммы комплексной амплитуды поля формируемого всеми точками исходного объекта [20]. При разработке алгоритма считалось, что виртуальный объект – фотошаблон, представляющий собой работающий на пропускание бинарный двумерный транспарант, 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 соответствует параллельному пучку излучения, падающему под углом θ на плоскость синтеза голограммы. Следовательно, распределение фаз в ней на поверхности голограммы φ_{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 опорной волны и излучения, прошедшего через транспарант, получаем массив комплексных амплитуд голографического поля в плоскости синтеза голограммы. Возведение каждого его элемента в квадрат по модулю позволяет сформировать массив значений интенсивности этого поля, необходимого для отображения структуры голограммы-проектора на соответствующем носителе. Так, если синтезируемую голограмму предполагается отображать в виде амплитудной дифракционной структуры, 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-проектора. Невозможность обеспечения современными устройствами отображения голограмм на носителях точного соответствия модулируемых параметров голограммы, т.е. ее коэффициента пропускания или толщины, рассчитанным пространственным вариациям интенсивности голографического поля, обуславливает введение в алгоритм синтеза голограмм-проекторов операции их бинаризации.

Восстановление синтезированных голограмм-проекторов в рассматриваемом программном комплексе может осуществляться двумя

методами. Один из них основан на том же алгоритме что и синтез голограмм, т.е. основан на использовании принципа Гюйгенса – Френеля, а второй метод основан на преобразовании Френеля. Отметим, что оба указанных выше метода восстановления предполагают восстановление действительного изображения объекта и реализованы в настоящее время, как для амплитудных, так и для рельефно-фазовых отражательных голограмм. Заложённая в комплекс возможность использования двух методов цифрового восстановления одних и тех же голограмм-проекторов 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.

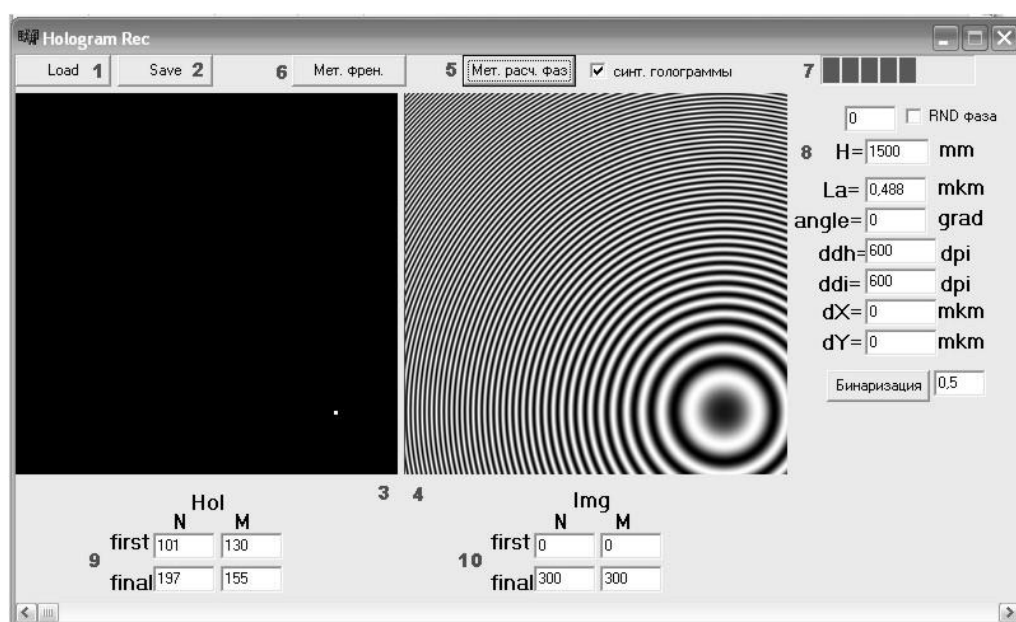


Рисунок 25. Интерфейс программного комплекса

Описываемый программный комплекс имеет простой интуитивно понятный интерфейс, позволяющий легко задавать основные параметры синтеза и восстановления голограмм (рис. 25). Среди них: области координатного пространства, занимаемые объектом и синтезированной голограммой, расстояние от голограммы до объекта, рабочая длина волны, периоды дискретизации объекта и голограммы, порог бинаризации голограммы, угол падения опорной и восстанавливающей волн, глубина случайной модуляции фазы при имитации диффузной подсветки фотошаблона и выбранный метод восстановления голограммы.

Работоспособность программного комплекса проверялась в ходе синтеза и восстановления голограмм бинарного амплитудного транспаранта, представляющего собой набор полосок шириной 4, 8 и 12 мкм. Работа выполнялась при основных параметрах синтеза и восстановления, выбранных в соответствии с рекомендациями, приведенными в [13] для

лазерного генератора изображений. То есть при угле падения опорной волны 10^0 и при расстоянии от объекта до голограммы 0,8 мм, что при размере апертуры голограммы $0,3 \times 0,3 \text{ мм}^2$, длине волны 0,488 мкм, размере объекта $0, \times 0,1 \text{ мм}^2$ и периодах дискретизации голограммы и объекта 1 и 4 мкм, соответственно, соответствовало дифракционному ограничению размера восстанавливаемого изображения $2,6 \div 4 \text{ мкм}$ 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 полутонном виде представлены на рис 26 и 27.

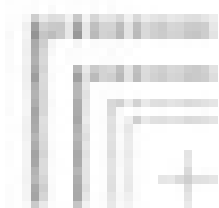


Рисунок 26. Изображение, восстановленное с помощью преобразования Френеля

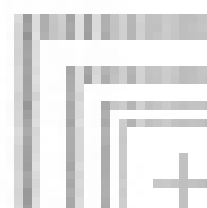


Рисунок 27. Изображение, восстановленное на основе принципа Гюйгенса – Френеля

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. Эти помехи когерентны основному изображению. Обусловленная ими модуляция интенсивности в светлых участках изображения существенно превышает ту, что реализуется в его темных участках. На рис. 28 и рис. 29 представлены этих же изображения, но прошедшие осуществляемое с помощью графического редактора Adobe Photoshop пороговое преобразование, имитирующее реакцию фоторезиста на засветку актиничным излучением [13].



Рисунок 28. Изображение, восстановленное с помощью преобразования Френеля при пороговом преобразовании



Рисунок. 29 Изображение, восстановленное на основе принципа Гюйгенса – Френеля, после порогового преобразования

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. 29, 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 восстанавливаемого изображения. Сравнение изображений, представленных на рис. 26 и 27, 28 и 29, 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. В качестве иллюстрации влияния расстояния от плоскости синтеза голограммы до объекта на эффективность того или иного алгоритма восстановления голограммы на рис. 30 и 31 представлены прошедшие пороговое преобразование изображения, полученные исследуемыми нами методами восстановления с помощью полутонной голограммы, синтезированной на расстоянии 4 мм от объекта. Сравнение структуры этих изображений позволяет сделать вывод о том, что при восстановлении голограммы, полученной при расстоянии от объекта до плоскости синтеза 4 мм, оба испробованных нами алгоритма дают совершенно одинаковые результаты. Даже интервал уровней порога, соответствующий наилучшему качеству изображения, получился одинаковым, лежащим в пределах 237 – 247 градаций.



Рисунок 30. Изображение, восстановленное при расстоянии от объекта до голограммы 4 мм с помощью преобразования Френеля при пороговом преобразовании



Рисунок 31. Изображение, восстановленное при расстоянии от объекта до голограммы 4 мм на основе принципа Гюйгенса – Френеля при пороговом преобразовании

Следовательно, при относительно маленьких расстояниях от плоскости синтеза голограммы до объекта, не превышающих 10 размеров голограммы,

наиболее целесообразно при восстановлении пользоваться алгоритмом, основанным на использовании принципа Гюйгенса – Френеля. Отметим, что имеющий место в рассматриваемом случае недостаточный для 4 мм расстояния от плоскости синтеза голограммы до восстановленного изображения размер аппретуры голограммы обусловил хорошо наблюдаемое на рис. 30 и 31 искажение структуры восстановленного изображения – первые два «уголка» разрушились, и пропал промежуток между ними. Полученные результаты свидетельствуют о работоспособности программного комплекса и возможности его использования для синтеза и восстановления голограмм двумерных бинарных объектов.

Возможность использования разработанного программного комплекса для оптимизации параметров синтеза голограмм-проекторов проверялась в ходе экспериментального исследования зависимости качества восстанавливаемого изображения от размера голограммы, от угла падения опорной волны на плоскость синтеза голограммы и от соотношения выбранных периодов дискретизации объекта и голограммы. Это исследование проводилось для длины волны восстанавливающего излучения 0,488 мкм и для полутонной амплитудной голограммы с периодом дискретизации 1 мкм, т.е. применительно к случаю отображения голограммы на носителе с помощью доступного нам лазерного генератора изображений. В качестве объекта при этом использовался описанный выше бинарный пропускающий транспарант размером $0,1 \times 0,1$ мм² с минимальной шириной прозрачных штрихов 4 мкм и таким же минимальным расстоянием между штрихами. Излучение всех точек объекта в его плоскости при синтезе голограммы считалось синфазным.

Методика работы включала в себя использование выражений, приведенных в [13] для расчета оптимальных параметров синтеза голограммы-проектора и дальнейшую оценку качества изображения, восстанавливаемого с использованием преобразования Френеля в виртуальном пространстве с помощью голограмм, синтезированных как при теоретически оптимальных, так и при отличающихся от них параметрах синтеза. В качестве критерия качества восстановленного изображения здесь, по-прежнему, использовался интервал градаций серого, которые могли бы быть выбраны в качестве порога при пороговой обработке восстановленного изображения и обеспечивали бы его максимальное сходство с объектом. Указанные выше рабочая длина волны, размеры объекта и периоды дискретизации объекта и голограммы обусловили следующие значения оптимальных параметров синтезируемой голограммы-проектора: расстояние между синтезируемой голограммой и объектом – 1,5 мм; угол падения плоской опорной волны на плоскость синтеза – $10,6^{\circ}$; размер голограммы – $0,471 \times 0,471$ мм². Качество изображения, восстанавливаемого с помощью голограммы-проектора, синтезированной при указанных выше параметрах, иллюстрируют рис. 32 и 33, на которых представлено восстановленное

изображение до и после его пороговой обработки, соответственно. Интервал градаций серого, который мог бы быть использован в качестве порога при обработке изображения, представленного на рис. 8, был равен 47 градациям.

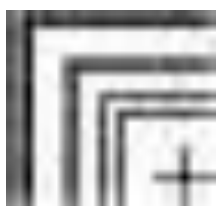


Рисунок 32. Восстановленное изображение до пороговой обработки



Рисунок 33. Восстановленное изображение после пороговой обработки

Результаты проведенных нами экспериментов по изменению параметров синтеза голограммы-проектора показали следующее. Уменьшение, равно, как и увеличение линейной апертуры синтезированной голограммы, по сравнению с апертурой, рассчитываемой в соответствии с [13], приводит к уменьшению интересующего нас интервала градаций серого. Так уменьшение размера голограммы до $0,4 \times 0,4$ мм² привело к уменьшению допустимого диапазона уровней порога до 16 градаций. Дальнейшее уменьшение размера голограммы обусловило еще и потерю разрешения в восстановленном с ее помощью изображении. Увеличение апертуры голограммы до $0,6 \times 0,6$ мм² также сопровождалось уменьшением допустимого диапазона порога до 13 градаций. По всей видимости, это можно объяснить увеличением доли площади голограммы, на которой пространственные частоты голограммной структуры превышают значения, определяемые теоремой отсчетов [4]. Выявленный в ходе проведенных исследований характер зависимости качества восстановленного изображения от угла падения опорной волны свидетельствует о том, что наибольший допустимый диапазон градаций серого, которые могут быть приняты за порог при обработке восстановленных изображений, равный примерно 50, соответствует диапазону углов падения опорной волны $10 - 14^{\circ}$. Отметим, что при используемых в настоящей работе параметрах дискретизации голограммы и ее рабочей длине волны угол падения опорной волны 15° соответствует для центра голограммы-проектора предельной несущей пространственной частоте, определяемой в соответствии с теоремой отсчетов [4].

Полученные экспериментальные данные и их хорошее соответствие результатам теоретического анализа, приведенным в работе [13], подтверждают справедливость приведенных в ней рекомендаций, а также свидетельствуют о работоспособности разработанного программного комплекса и о возможности и перспективности его использования для оптимизации параметров синтеза голограмм-проекторов.

Рассмотренный метод синтеза и цифрового восстановления голограмм-проекторов отличается относительно высокой точностью математического описания физических процессов записи и восстановления голограмм. Вместе с тем он несвободен 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 необходимость разработки 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 позволяет использовать основное достоинство кластерных систем, заключающееся в параллелизме вычислений. Метод предполагает расчет голограммы по частям на независимых друг от друга кластерах – компьютерах, что обеспечивает еще большее сокращение временных затрат на синтез и восстановление голограмм.

4.3. 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 «look-up table» методов, т.е. методов, основанных на предварительном разбиении объекта на типовые элементы, вычислении структуры голографического поля, сформированного этим типовым элементом в плоскости синтеза голограммы и последующее сложение голографических полей, порожденных этими типовыми элементами [17 – 20]. В качестве типовых элементов в этих методах обычно используются либо отдельные точки объекта [18 – 20], либо его прямоугольные области – полигоны [17]. Лежащая в основе этих методов идея сложения голографических полей, т.е. полей, сформированных в результате суперпозиции объектной и опорной волн, сложна в реализации.

Кроме того она представляется идеей, не отвечающей физической сути процессов регистрации и восстановления голограмм-проекторов. В связи с этим в основу рассматриваемого метода синтеза голограмм положен принцип сложения не голографических полей, а полей объектных волн, порожденных типовыми элементами структуры объекта.

Разработчики метода исходили из того, что до момента наложения опорной волны одинаковые элементы структуры объекта формируют одинаковую картину распределения комплексных амплитуд в 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 было условно названо «штампом», а основанный на его использовании метод синтеза голограмм назван методом «штамповки». В соответствии с ним процесс синтеза голограмм сводится к последовательному наложению штампов в соответствующие области голограммы. В областях пересечения штампов производится сложение комплексных амплитуд парциальных волновых полей, порожденных типовыми элементами структуры объекта (см. рис. 34).

Описываемый метод расчета амплитуды объектной волны существенно сокращает время синтеза голограммы при увеличении сложности объекта, так как суммарный объем вычислений распределения комплексной амплитуды сокращается до минимума.

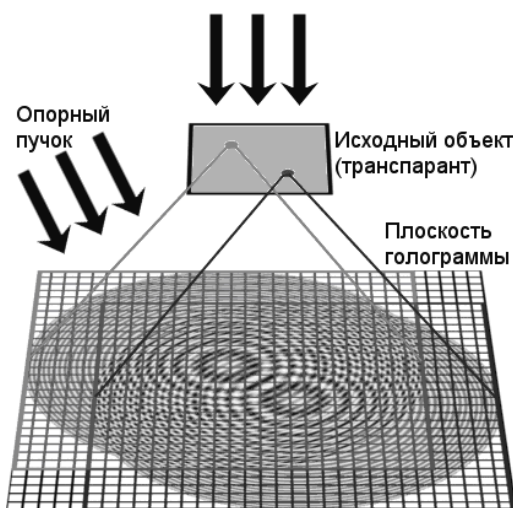


Рисунок 34. Разбиение исходного объекта на типовые элементы, и представление результирующей голограммы, как совокупность штампов.

Проведем грубую оценку производительности традиционного и рассматриваемого методов синтеза голограмм. С этой целью выделим две наиболее ресурсоемких операции процесса синтеза голограммы одной светящейся точки: a – расчет штампа, т.е. расчет распределения в плоскости синтеза голограммы комплексной амплитуды объектной волны, порожденной типовым элементом структуры объекта, и b – запись «штампа»

в матрицу, в которой и осуществляется синтез голограммы. Тогда, количество операций, необходимое для синтеза голограммы объекта, состоящего из N пикселей, при использовании традиционного метода синтеза составляет $(a + b) \cdot N$. Метод «штамповки» позволяет обойтись в этом случае $a + bN$ операциями. Следовательно, использование этого метода синтеза голограмм позволяет в $k = (a + b) \cdot N / (a + bN)$ 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 и тогда: $k \rightarrow (a + b) \cdot N / (bN) = a/b + 1$.

В рассматриваемом случае плоская опорная волна считается падающей под углом 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 рассчитывался размер голограммы 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 примитивов-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. 35. 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.

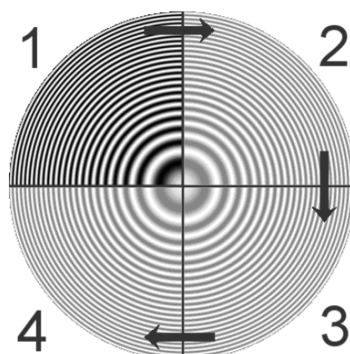


Рисунок 35. Порядок расчета штампа элемента с центральной симметрией

В компьютерном представлении картина распределения комплексных амплитуд штампа рассчитывается и хранится в двумерной матрице. 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.

4.4. Программный комплекс синтеза и восстановления голограмм-проекторов, реализующий метод синтеза голограмм, основанный на разбиении объекта на типовые элементы его структуры

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 производить исследования пользователями уровня «пользователь ПК»;

- позволять производить 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 платформы;
- представлять собой профессиональный программный продукт, пригодный для использования сторонними разработчиками.

Разработка комплекса включала в себя создание репозитория, т.е. хранилища исходных кодов, позволяющего использовать в ходе работы над комплексом систему контроля версий, что обеспечивало возможность одновременной работы над проектом нескольких программистов. При проектировании архитектуры комплекса был принят вариант его модульной системы, заключающейся в разбиении будущего исходного кода на независимые модули, отвечающие за конкретные задачи, такие, как:

- 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;
- пользовательский интерфейс и др.

В результате применения такого подхода, в частности в ОС Windows, отдельные функциональные модули комплекса собираются в отдельные разделяемые библиотеки (*dll*), в которые заключены реализации алгоритмов синтеза и восстановления голограмм. В дальнейшем, эти библиотеки легко могут быть 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, таких, как: 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 [5] позволяет синтезировать и восстанавливать голограммы, содержащие примерно $4,4 \times 10^9$ пикселей. Реальный же предельный размер синтезируемой голограммы может быть получен из выше приведенного 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.

4.5. Проверка работоспособности разработанных метода синтеза голограмм и программного комплекса

Работоспособность описанных выше метода синтеза голограмм-проекторов и программного комплекса была проверена экспериментально [5]. Для этого, с помощью ранее разработанного [6] и нового программных комплексов были синтезированы и восстановлены в виртуальном пространстве две отражательные рельефно-фазовые бинарные голограммы Френеля, предназначенные для работы в излучении с длиной волны 13,5 нм. Синтез осуществлялся при использовании параметров, выбранных в соответствии с [13]. В качестве тест-объекта при синтезе использовалось бинарное изображение «уголков» размером 23×23 пикселя, представленное на рис. 36, и обладающее характеристическим размером 80 нм (ширина самой тонкой линии на рис. 36).



Рисунок 36. Изображение исходного объекта

Размер синтезированных голограмм-проекторов составлял 435×435 пикселей, 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. 37 представлены изображения бинаризованных голограмм, синтезированных с помощью нового и старого программного комплекса.

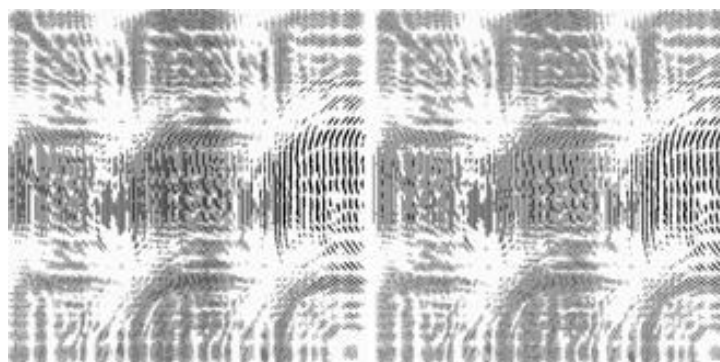


Рисунок 37. Бинарные голограммы, синтезированные с помощью старого (слева) и нового программного комплекса (справа)

Легко заметить, что структура голограмм практически идентична, что свидетельствует о работоспособности предложенного нами метода синтеза голограмм-проекторов – метода «штамповки». 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. 38 и рис. 39. Изображения на рис. 39 также прошли пороговую обработку, имитирующую нелинейность характеристической кривой фоторезиста [8].



Рисунок 38. Восстановленные изображения, полученные при восстановлении голограмм, синтезированных с помощью старого (слева) и нового (справа) программных комплексов



Рисунок 39. Прошедшие пороговую обработку восстановленные изображения, полученные при восстановлении голограмм, синтезированных с помощью старого (слева) и нового (справа) программных комплексов

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 разработанного программного 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. 40 представлены изображения голограммы и восстановленных изображений, до пороговой обработки и после нее, полученные с помощью разработанного программного комплекса.



Рисунок 40. Бинаризованная голограмма и ее восстановленные изображения, до и после пороговой обработки, полученные при восстановлении голограмм синтезированных с моделированием диффузной подсветки с диапазоном набега фаз (0 – π)

Отметим, что синтез голограммы во всех случаях проводился при одинаковых параметрах, указанных выше в описании предыдущих

экспериментов. Однако фаза волны, проходящей через каждый пиксель объектного транспаранта, при этом принималась случайной, распределенной по нормальному закону в интервале $0 - \pi$. Таким образом, в описываемом случае нами имитировалась диффузная подсветка объекта, осуществляемая 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. 41.



Рисунок 41. Восстановленные изображения, полученные с помощью отражательных рельефно-фазовых голограмм с различной высотой поверхностного рельефа (слева - направо: 0 ; $0,02\lambda$; $0,2\lambda$; $0,25\lambda$; $0,3\lambda$; $0,48\lambda$; $0,5\lambda$)

Также следует заметить, что характер представленных на рис. 41 изображений полностью согласуется с известной зависимостью дифракционной эффективности отражательных рельефно-фазовых голограмм от высоты рельефа их поверхности.

5. Экспериментальное исследование влияния условий освещения объекта и параметров синтеза голограмм-проекторов на качество восстанавливаемого с их помощью изображения

Методика исследования влияния условий освещения объекта и параметров синтеза голограмм-проекторов на качество восстанавливаемого с их помощью изображения включала в себя экспериментальное исследование влияния учитываемой апертуры дифрагировавшего на объекте излучения и характера подсветки объекта при синтезе голограммы-проектора Френеля на качество восстановленного изображения, а также анализ влияния уровня бинаризации синтезированной голограммы-проектора на распределение интенсивности в изображениях разновеликих объектов.

5.1. Влияние учитываемой апертуры дифрагированного на объекте излучения на качество изображения, восстановленного с помощью голограммы-проектора Френеля

Известно, что спектр излучения, продифрагировавшего на структуре объекта, описывается функцией, представляющей собой Фурье-образ функции амплитудного пропускания объекта. В случае типичных для фотолитографии объектов, т.е. линий, кругов, полигонов и т.д. спектр продифрагировавшего на них излучения занимает бесконечно широкую полосу пространственных частот. При этом, естественно, что чем большая часть этого спектра будет зарегистрирована на голограмме, тем выше будет качество восстанавливаемого изображения. В аналоговой физической голографии эта регистрируемая полоса пространственных частот ограничивается, как правило, линейным размером голограммы и оказывает влияние на разрешение и отношение сигнал-шум в восстановленном изображении. При этом для достижения требуемого разрешения считается достаточным зарегистрировать на голограмме лишь часть дифрагированного на объекте излучения, распространяющуюся в пределах основного максимума картины дифракции. Излучением, дифрагировавшим в побочные максимумы, как правило, пренебрегают. Аналогичная ситуация наблюдается и в вычислительной оптике. В ней при лучевых расчетах оптических систем под апертурой дифрагировавшего излучения понимается величина, равная отношению длины волны используемого излучения к размеру элемента структуры объекта.

К сожалению, в опубликованной к настоящему времени литературе не содержится рекомендаций по выбору апертуры объектного пучка, учитываемой при синтезе голограммы. Если пойти по пути аналоговой

физической голографии и учитывать вклад каждой точки объекта в голографическое поле, формируемое в каждой точке голограммы, то это приведет к чрезвычайно большому времени расчета структуры голограммы. Если ограничиться учетом лишь небольшого участка спектра дифрагированного на объекте излучения, то можно существенно сократить время синтеза голограммы, но потерять информацию о структуре объекта.

Исследование, результаты которого приведены в настоящем подразделе пособия, имели своей целью определение той доли спектра дифрагированного излучения, учет которой при синтезе голограммы не приводил бы к существенному росту объема требуемых вычислений и при этом позволял бы синтезировать голограммы-проекторы, формирующие изображения, полностью идентичные исходным объектам. Оно выполнялось с помощью описанного в предыдущем разделе специализированного программного комплекса синтеза и восстановления голограмм-проекторов. Методика исследования включала в себя синтез голограмм-проекторов Френеля тестовых объектов при различных значениях учитываемой апертуры дифрагировавшего на структуре объекта излучения, их цифровое восстановление и последующее определение интервала уровней пороговой обработки, в пределах которого структура восстановленного изображения была идентична структуре исходного объекта [6].

В исследовании использовались тестовые объекты трех типов. Объект первого типа (стандартные «уголки») представлен на рис. 42.



Рисунок 42. Изображение тестового объекта первого типа

Он представлял собой бинарный амплитудный транспарант размером 23×23 пикселя, состоящий из полосок шириной в 1, 2 и 3 пикселя. Отметим, что синтез голограмм-проекторов в ходе этого исследования проводился для длины волны восстанавливающего излучения 13,5 нм при размере пикселя объекта 80×80 нм². Размер пикселя голограммы при этом принимался равным 20×20 нм², расстояние от голограммы до объекта – 20,3 мкм, угол падения опорной волны выбирался исходя из соображений, описанных в [13] и составлял $14,67^\circ$.

Объекты второго и третьего типа (узкий и широкий) были подобны объекту первого типа, но все составляющие их структуру линии имели ширину в 1 и 3 пикселя, соответственно. Отметим, что в ходе данной работы величина учитываемой при синтезе голограммы-проектора апертуры задавалась в относительных единицах. При этом за единицу принималась

апертура, определяемая как арксинус частного от деления длины волны излучения на минимальный размер элемента структуры объекта.

Таким образом, за единицу апертуры принималось ее значение, соответствующее половине углового размера главного максимума картины дифракции излучения объектной волны на минимальных элементах структуры объекта, т.е. типичное значение для задач вычислительной оптики. Изменение учитываемой апертуры в ходе исследования осуществлялось с шагом 0,25 в пределах от 0,75 до 2,75. Как и следовало ожидать, голограмма-проектор, синтезированная при учитываемой апертуре 0,75, не позволила восстановить точное изображение структуры объекта ни при каких уровнях его пороговой обработки. Т.е. синтезированная при этих условиях голограмма-проектор обладала разрешающей способностью, недостаточной для отображения структуры тестового объекта. При цифровом восстановлении остальных голограмм, полученных при значениях учитываемой апертуры, равных и превышающих единицу всегда находился некоторый интервал уровней пороговой обработки изображения, позволяющий получать изображения, структура которых была идентична структуре исходного объекта. На рис. 43 представлены графики зависимости допустимого интервала уровней пороговой обработки от величины учитываемой апертуры для всех использованных в работе типов тестовых объектов.

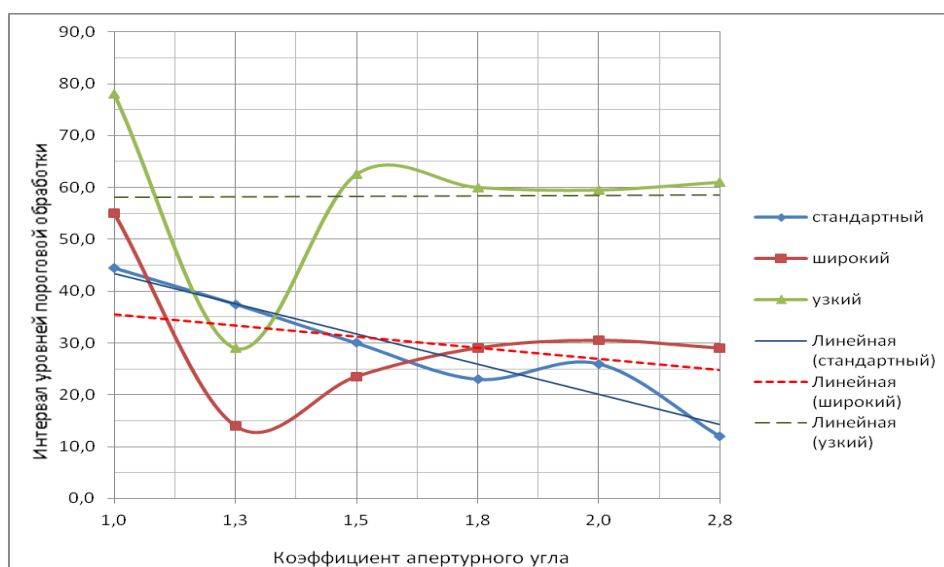


Рисунок 43. Зависимость ширины допустимого интервала уровней пороговой обработки изображения от величины учитываемой апертуры для всех использованных в работе типов тестовых объектов

На этом рисунке также представлены графики линейной аппроксимации экспериментально полученных зависимостей. Из представленных графиков следует, что наибольший интервал допустимых уровней пороговой обработки реализуется при единичной апертуре.

Следовательно, при синтезе голограмм, как и при расчете оптических систем достаточно ограничиться учетом излучения, соответствующего главному максимуму картины дифракции излучения на объекте. Уменьшение интервала допустимых уровней пороговой обработки при увеличении учитываемой при синтезе апертуры объектного пучка можно объяснить ростом помех, обусловленных методом синтеза голограммы. Дело в том, что в случае дифракции реального пучка на элементе изображения объекта с ростом угла дифракции уменьшается и амплитуда дифрагированного излучения. В использованном же нами методе синтеза голограмм, основанном на принципе Гюйгенса – Френеля, элемент структуры объекта размером в 1 пиксель представлялся в виде точечного источника, равномерно излучающего в пределах полусферы. Этой же причиной можно объяснить и зависимость влияния учитываемой апертуры объектного пучка на структуру восстановленного изображения от размера элементов его структуры. Действительно, в случае дифракции излучения на элементах структуры объекта, превышающих по размеру 1 пиксель, взаимная интерференция дифрагированного излучения в плоскости голограммы должна обусловить преимущественную локализацию дифрагированного излучения на участке поверхности голограммы размером $2\lambda D/a$, где D – расстояние от объекта до голограммы, a – размер элемента структуры объекта. В использованном же нами методе синтеза голограммы-проектора, когда мы принимали за точечный источник элемент структуры объекта размером в 1 пиксель, возникала ошибка в расчете амплитуды интерференционной картины, соответствующей объектной волне. Причем, чем больший размер имеет элемент структуры объекта, то тем больший вклад вносит в помехи в восстановленном изображении учет излучения дифрагировавшего на объекте и распространяющегося в пределах апертуры, превышающей 1. Следовательно, в рамках применяющейся нами модели формирования голографического поля, основанной на принципе Гюйгенса-Френеля, вполне достаточным и оптимальным будет учет при синтезе голограммы лишь части дифрагированного излучения, локализованного в главном максимуме картины дифракции излучения на структуре объекта.

5.2. Влияние диффузной подсветки объекта на качество изображения, восстановленного с помощью голограммы-проектора Френеля

Использование диффузной подсветки объекта при записи голографических дисплеев в ряде случаев представляется весьма полезным, поскольку позволяет повысить равномерность распределения амплитуды объектной волны по апертуре голограммы. При этом также устраняется зависимость апертуры объектной волны от размера элементов структуры объекта. Апертура объектной волны в этом случае будет полностью

определяться элементом структуры диффузора, обеспечивающего подсветку объекта. Реализуемый при этом случайный сдвиг фаз излучения, прошедшего через соседние элементы структуры диффузора обеспечивает избыточность голографической записи и, как следствие этого, наличие спеклов в восстановленном изображении.

В данном подразделе пособия описаны результаты экспериментального исследования влияния диффузной подсветки объекта на качество изображения, восстановленного с помощью голограммы-проектора Френеля. Проведенное исследование включало синтез голограмм-проекторов Френеля при значениях пределов случайного изменения фазы проходящей через объект волны, равных π , 2π и $\pi/2$, цифровое восстановление этих голограмм-проекторов и последующее выявление зависимости числа допустимых уровней пороговой обработки от пределов случайного изменения фазы. Работа выполнялась для тех же тестовых объектов, которые были описаны ранее (см. подраздел 5.2) и при тех же параметрах синтеза и восстановления голограмм. Ее результаты представлены на рис. 44 – 46. Пределы изменения фазы подсвечивающего объект излучения в каждом из экспериментов составляли, соответственно, $(0 - \pi)$; $(0 - 2\pi)$ и $(0 - \pi/2)$.

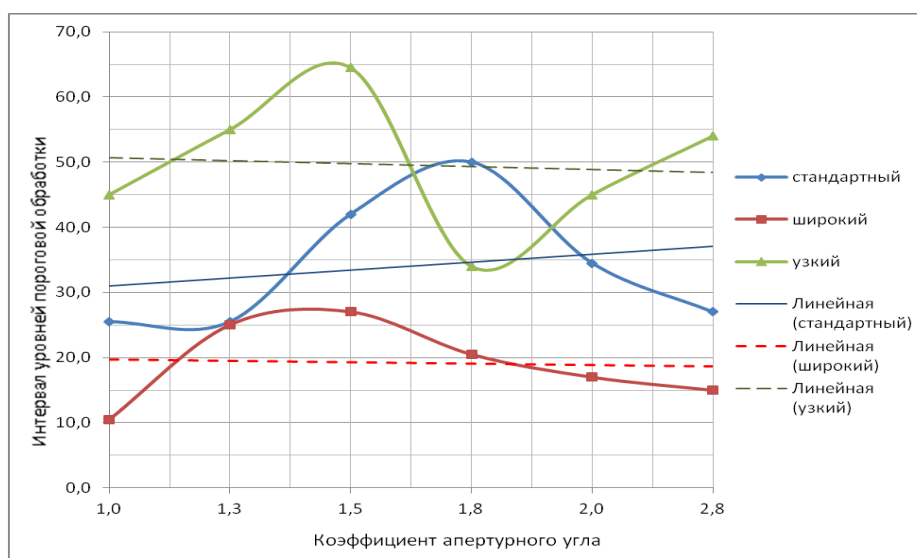


Рисунок 44. Зависимость допустимого интервала уровней пороговой обработки от величины учитываемой апертуры объектного пучка при случайном изменении фазы подсвечивающего объект излучения в пределах от 0 до π

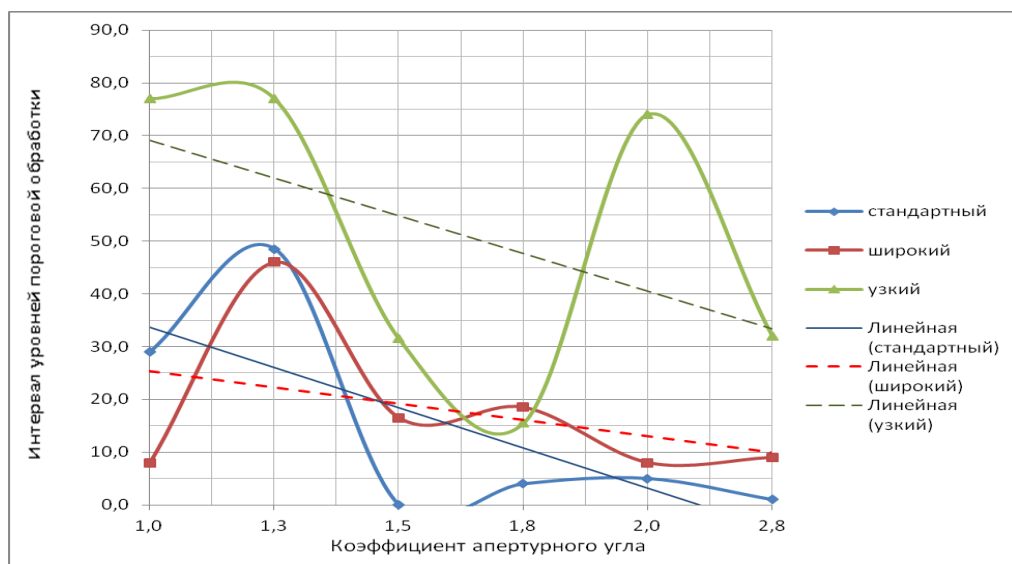


Рисунок 45. Зависимость допустимого интервала уровней пороговой обработки изображения от величины учитываемой апертуры изменения при случайном изменении фазы подсвечивающего объект излучения в пределах от 0 до 2π

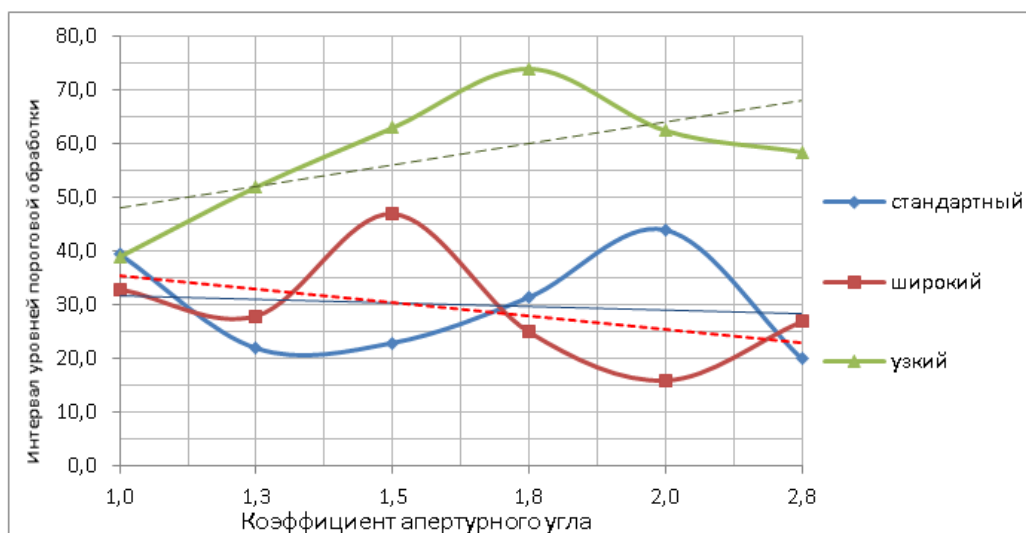


Рисунок 46. Зависимость допустимого интервала уровней пороговой обработки изображения от величины учитываемой апертуры изменения при случайном изменении фазы подсвечивающего объект излучения в пределах от 0 до $\pi/2$

Из представленных графиков видно, что применение диффузной подсветки объекта при синтезе голограмм-проекторов оказало наименьшее влияние на изображение тестового объекта, состоящего из узких линий, шириной в один пиксель. Так оно и должно быть, поскольку диффузная подсветка в этом случае приводит, в основном, лишь к изменению начальной фазы отдельных точек объекта.

Иной результат наблюдается при анализе изображений тестовых

объектов второго и третьего типов. В этих случаях информационная избыточность голограммы практически нивелировала рассмотренный в предыдущем подразделе эффект уменьшения допустимого интервала уровней пороговой обработки с ростом учитываемой апертуры объектного пучка.

Особенно наглядно это проявляется при случайном изменении фазы подсвечивающего объект излучения в пределах от 0 до π . Из анализа можно сделать вывод о том, что случайная модуляция фазы прошедшего через объект излучения, осуществляемая в пределах от 0 до π , может быть полезна при синтезе голограмм-проекторов разновеликих объектов, т.е. объектов, содержащих различные по размерам элементы их структуры. В остальных случаях ее использование при синтезе голограмм нецелесообразно. Еще одним чрезвычайно интересным результатом этого исследования является демонстрация беспылевой структуры изображений, восстанавливаемых с помощью голограмм-проекторов Френеля, синтезированных при диффузной подсветке объекта. По-видимому, этот эффект обусловлен избранным в настоящей работе методом моделирования процесса формирования голографического поля.

6. Синтез голограмм-проекторов для фотолитографии на неплоских поверхностях

Традиционный метод повышения разрешающей способности оптической системы основан на увеличении ее апертуры и уменьшении рабочей длины волны. Его применение, как правило, приводит к уменьшению глубины резкости оптической системы и к уменьшению размеров одномоментно отображаемого участка изготавливаемого изделия. Из этого следует практическая невозможность использования традиционных фотолитографических систем для получения больших по площади изображений с высоким разрешением на неплоских поверхностях. В качестве примеров таких криволинейных поверхностей можно привести полусферу, конус, параболоид, гиперболоид и другие поверхности, которые используются при изготовлении разнообразных оптических элементов, электротехнических разводов проводников, сеток, шкал, экранов и т.д.

Используемые в настоящее время технологии получения структур на подобных поверхностях весьма трудоемки и обладают целым рядом ограничений, среди которых можно отметить невозможность одновременного экспонирования значительного по площади участка поверхности изделия и сложность обеспечения равномерного освещения неплоских шаблонов. В связи с этим весьма перспективным представляется использование для этих целей голограмм-проекторов.

6.1. Метод синтеза голограмм-проекторов Френеля для фотолитографии на неплоских поверхностях

Разработка метода синтеза голограмм-проекторов Френеля для фотолитографии на неплоских поверхностях осуществлялась в рамках модели внеосевой голограммы с плоской опорной волной, падающей под углом на плоскость синтеза голограммы. При этом объект, т.е. фотошаблон, освещаемый падающим по нормали к нему параллельным пучком света, представлялся в виде совокупности двумерных амплитудных бинарных транспарантов, расположенных параллельно плоскости синтеза голограммы, на разном удалении от нее так, что геометрический центр каждого из них считается лежащим на нормали, восстановленной из центра голограммы. При таком взаимном расположении объекта и голограммы штамп объектного поля, т.е. математическое описание пространственного распределения 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, при этом центр типового элемента объекта считается лежащим на нормали, восстановленной из центра штампа. Его

размер может быть рассчитан тем же способом, что и размер голограммы исходя из габаритов типового элемента и параметров схемы синтеза. После завершения процесса штамповки, рассчитанная для каждой точки плоскости синтеза голограммы амплитуда объектной волны складывается с соответствующей амплитудой опорной волны.

Полученная таким образом сумма амплитуд возводится по модулю в квадрат и, тем самым, рассчитывается распределение интенсивности голографического поля, соответствующего синтезируемой голограмме-проектору. Поскольку здесь речь идет о синтезе и восстановлении голограмм объектов, представляющих собой не плоские транспаранты, а транспаранты, выполненные на некой криволинейной поверхности, то при синтезе голограмм-проекторов осуществляется разбиение виртуального объекта на набор плоских транспарантов, расстояние между которыми не должно превышать глубину резкости голограммы.

6.2. Глубина резкости

Глубина резкости представляет собой один из важнейших параметров фотолитографических проекционных систем [26]. Определим ее для описанного выше случая внеосевой голограммы с плоской опорной волной, падающей под углом на плоскость синтеза голограммы. При этих условиях числовая апертура излучения, дифрагировавшего на минимальном по размеру элементе структуры фотошаблона, может быть описана с помощью следующего выражения:

$$A = n \sin \alpha = \frac{\lambda}{a_t}, \quad (6.1)$$

где A – числовая апертура пучка; n – показатель преломления среды между фотошаблоном и голограммой (для воздуха $n = 1$); α – апертурный угол дифрагировавшего излучения; λ – рабочая длина волны; a_t – характеристический размер фотошаблона, т.е. минимальный размер элемента его структуры. Из интерференционной теории формирования изображения [27] следует, что глубина резкости формируемого изображения не может превышать значения, описываемого выражением:

$$|b| \ll \frac{2\lambda n}{A^2}. \quad (6.2)$$

В свою очередь, в оптике при расчете значения глубины резкости реальных оптических систем традиционно пользуются более строгим выражением [28]:

$$b = \pm \frac{\lambda n}{2A^2}. \quad (6.3)$$

Из представленных выражений видно, что чем больше числовая апертура, а соответственно и разрешающая способность проекционной системы, тем меньше глубина резкости получаемого изображения, и, следовательно, чаще должны располагаться плоские транспаранты при синтезе голограммы объекта, представляющего собой изображение, нанесенное на криволинейную поверхность.

6.3. Влияние особенностей структуры голограмм-проекторов на глубину резкости восстанавливаемого изображения

Важной особенностью синтезированных голограмм-проекторов, пригодных для практического использования в фотолитографическом процессе, является то, что для обеспечения работы в коротковолновой области спектра они должны быть рельефно-фазовыми и отражательными. При этом сложность, а в ряде случаев и невозможность, отображения требуемой формы профиля рельефа обуславливает необходимость бинаризации голограмм перед их отображением на носителе.

С целью исследования влияния бинаризации на глубину резкости изображения, с помощью разработанного ранее программного комплекса [5] были синтезированы и численно восстановлены отражательные рельефно-фазовые голограммы-проекторы Френеля, предназначенные для работы в излучении с длиной волны 13,5 нм. Синтез осуществлялся при использовании параметров, выбранных в соответствии с результатами работы [13]. В качестве тест-объекта использовалось представленное на рис. 47 бинарное изображение объекта «уголки» размером 23×23 пикселя, обладающее характеристическим размером (ширина самой тонкой линии) 80 нм.



Рисунок 47. Изображение исходного объекта

Размер синтезированных голограмм-проекторов был равен 435×435 пикселей, угол падения опорного пучка составлял $14,67^{\circ}$, расстояние между плоскостью объекта и плоскостью регистрации голограммы было принято равным 20,35 мкм. Глубина резкости восстановленного изображения при таких параметрах синтеза, в соответствии с выражением (6.3), должна быть равна ± 237 нм.

В ходе настоящего исследования сравнивались изображения, полученные с помощью полутонковой голограммы и голограмм,

бинаризованных при двух оптимальных, с точки зрения качества восстановленного изображения, уровнях бинаризации 0,33 и 0,22, а также при заведомо неоптимальном уровне 0,35 [29]. Расчет распределения интенсивности восстановленного изображения проводился для плоскостей, располагающихся параллельно голограмме на расстоянии 50 нм друг от друга. Расстояние от первой из указанных поверхностей до плоскости голограммы было на 400 нм меньше расстояния от плоскости голограммы до объекта, использовавшегося при синтезе голограммы. Расстояние от голограммы до последней поверхности на 400 нм превышало его. В качестве критерия качества изображения, восстановленного в каждой из указанных плоскостей, принималось, как обычно, число допустимых уровней пороговой обработки восстановленного изображения. Результаты исследования представлены на рис. 48 в виде графиков зависимости числа допустимых уровней пороговой обработки, отнесенных к максимальному числу уровней, достигаемому при данных параметрах синтеза и восстановления голограммы, от величины дефокусировки.

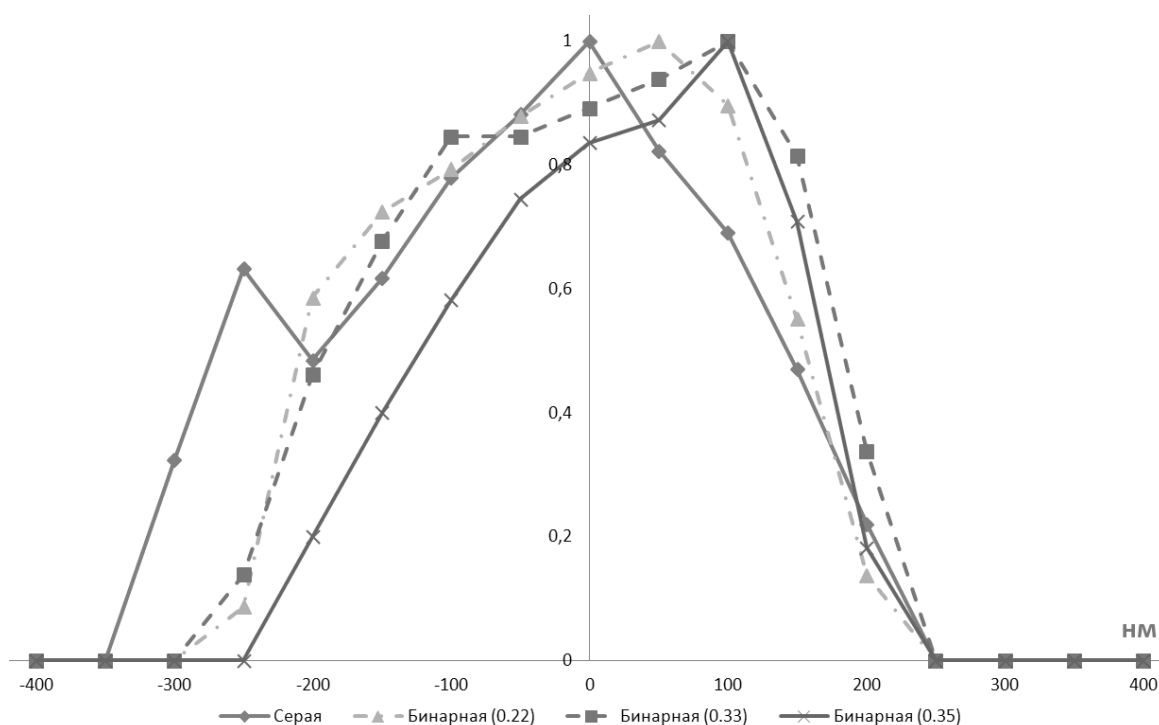


Рисунок 48. График зависимости качества изображения от величины дефокусировки при восстановлении бинарных голограмм. 1 – полутонная голограмма, 2–4 – голограммы, бинаризованные при уровнях бинаризации 0,22, 0,33 и 0,35 соответственно

Под дефокусировкой в данном случае подразумевается расстояние между плоскостью, в которой проводится анализ и плоскостью наилучшей фокусировки изображения, располагающейся на том же расстоянии от голограммы, что и объект при ее синтезе. Из представленных графиков

следует, что бинаризация синтезированной голограммы практически не оказывает влияния на глубину резкости восстанавливаемого изображения. Наблюдаемые же небольшие отличия в форме представленных на рис. 48 кривых связаны с общим ухудшением качества изображения при переходе от полутоновой голограммы к бинарным.

Исследование характера влияния диффузной подсветки объекта на глубину резкости синтезированных голограмм осуществлялось путем синтеза и последующего цифрового восстановления голограмм-проекторов Френеля при 6 различных значениях пределов случайного изменения фазы проходящей через объект волны ($0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, 3\pi/2$ и 2π). Цифровое восстановление этих голограмм-проекторов, осуществлялось для значений расстояния от объекта до голограммы, отличавшихся от расстояния, использовавшегося при синтезе, на величины от -400 до 400 нм. Шаг изменения расстояния был выбран равным 50 нм. Работа выполнялась для того же тестового объекта и при тех же параметрах синтеза и восстановления голограмм, которые были использованы в предыдущем эксперименте.

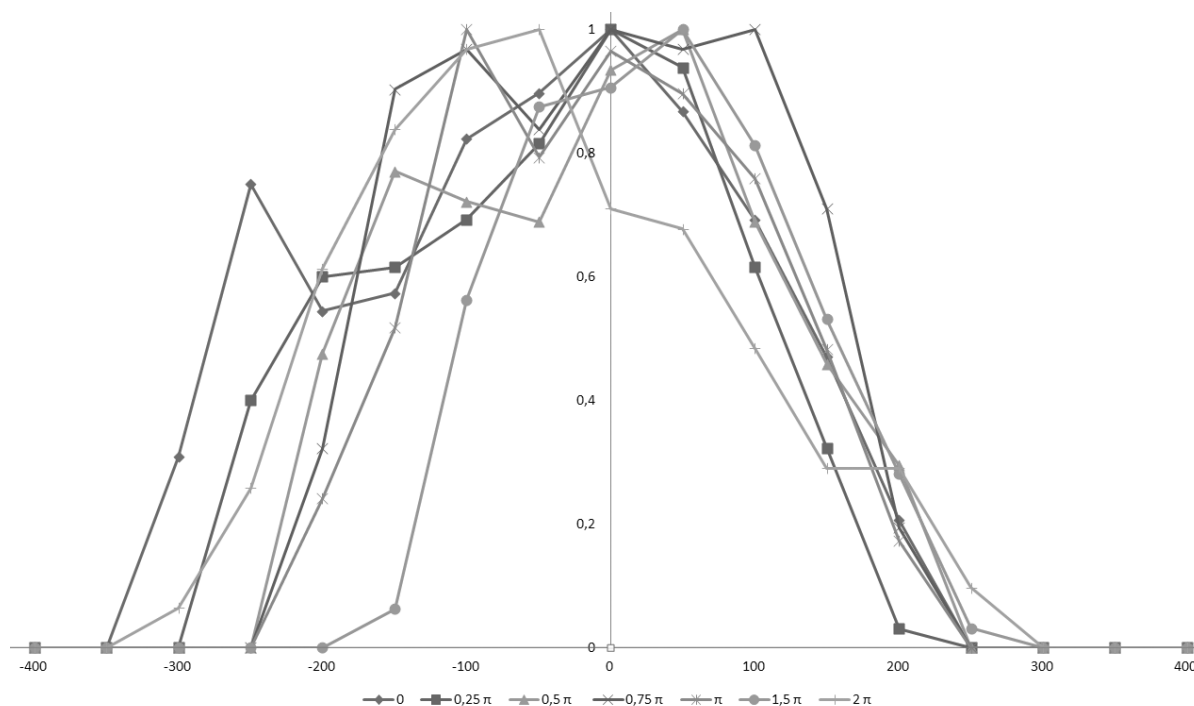


Рисунок 49. График зависимости качества изображения от величины дефокусировки для разных значений диапазона диффузной подсветки $\Delta\varphi$:

1 – $\Delta\varphi = 0$, 2 – $\Delta\varphi = 0,25\pi$, 3 – $\Delta\varphi = 0,5\pi$, 4 – $\Delta\varphi = 0,75\pi$, 5 – $\Delta\varphi = \pi$, 6 – $\Delta\varphi = 1,5\pi$, 7 – $\Delta\varphi = 2\pi$

Результаты исследования, нормированные по максимальному числу градаций, представлены на рис. 49.

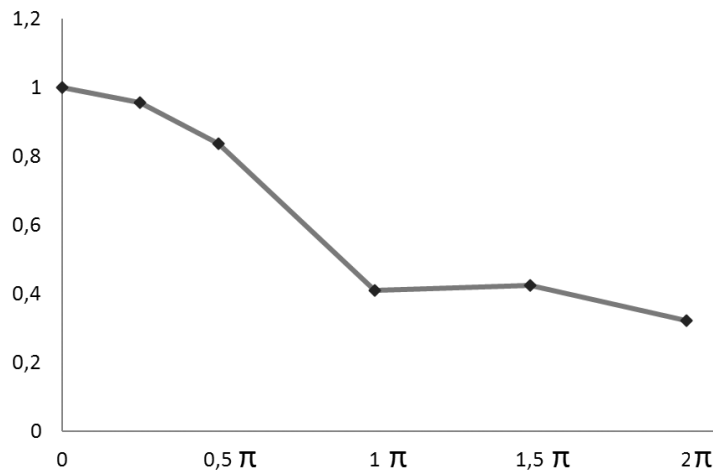


Рисунок 50. График зависимости качества изображения от величины диапазона диффузной подсветки

Необходимо заметить, что на представленном графике также не наблюдается значительных отличий глубины резкости при восстановлении голограмм с разными вариантами диффузной подсветки, а уменьшение диапазона допустимых уровней пороговой обработки связано с общим ухудшением качества изображения при увеличении диапазона случайного изменения фазы. Качество изображения, получаемого с помощью исследуемых голограмм при отсутствии дефокусировки, иллюстрирует рис. 50.

6.4. Демонстрация пригодности синтезированных голограмм-проекторов для формирования изображения на неплоских поверхностях

Рассмотренный выше метод синтеза голограмм-проекторов для фотолитографии на неплоских поверхностях предполагает разбиение виртуального криволинейного объекта на набор плоских транспарантов, расстояние между которыми не превышает глубину резкости голограммы-проектора. Возможность и эффективность такого представления объекта при синтезе голограммы-проектора была продемонстрирована экспериментально. С этой целью были синтезированы голограммы объекта, представляющего собой два пространственно разнесенных изображения перекрестий, расположенных на различных расстояниях от голограммы. Разница расстояний от голограммы до первого и второго перекрестий изменялась от голограммы к голограмме и лежала в пределах от 200 до 700 нм, с шагом 100 нм. Работа выполнялась при тех же параметрах синтеза и восстановления голограмм, которые были использованы в предыдущих экспериментах. Восстановление каждой голограммы проводилось для двух значений расстояния между ней и плоскостью регистрации изображения (h_1 и h_2), каждое из которых обуславливало наилучшее восстановление изображения соответствующего транспаранта. Результаты проведенного исследования

представлены на рис. 51. Необходимо отметить, что расчётная глубина резкости голограмм при выбранных параметрах их синтеза в соответствии с выражением (6.3) составляла ± 237 нм. Из приведенных результатов видно, что пока расстояние между транспарантами не превышает рассчитанную величину глубины резкости, изображения обоих перекрестий остаются достаточно чёткими, что и отображено на рис. 51 (а – в). На рис. 51 (б, в) заметно, что у границы глубины резкости изображение начинает расплываться, но структура перекрестия все ещё сохраняет различимые границы.

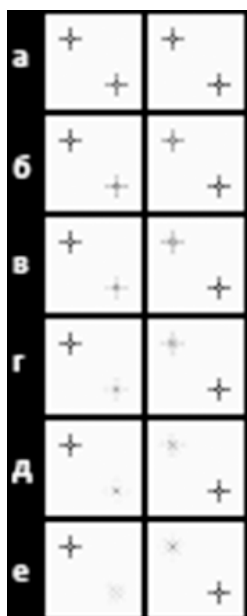


Рисунок 51. Изображения, восстановленные в плоскостях, удаленных от голограммы на расстояния h_1 (слева) и h_2 (справа) при различном расстоянии между транспарантами Δh при синтезе голограммы. $\Delta h = 200$ нм (а), $\Delta h = 300$ нм (б), $\Delta h = 400$ нм (в), $\Delta h = 500$ нм (г), $\Delta h = 600$ нм (д), 700 нм (е)

Дальнейшее увеличение расстояния между транспарантами, как показывают рис. 51 (г – е), приводит к значительному ухудшению качества изображения.

Таким образом, в настоящем подразделе пособия описаны особенности алгоритма и программы синтеза голограмм-проекторов Френеля, формирующих изображения на неплоских поверхностях. Сообщается об адаптации специализированного программного комплекса синтеза и восстановления голограмм-проекторов Френеля под синтез голограмм-проекторов для фотолитографии на неплоских поверхностях. Рассмотрена глубина резкости восстанавливаемого изображения и влияние на нее бинаризации и диффузной подсветки транспаранта.

7. Метод синтеза голограмм-проекторов сфокусированного изображения и программный комплекс на его основе

Еще на заре развития оптической голографии были попытки создания фотолитографических систем на ее основе [3]. 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 [31, 32].

В работе [32] рассматриваются две системы, которые, по нашему мнению, являются наиболее интересными для дальнейшего применения в современном фотолитографическом процессе, работающем в области дальнего ультрафиолетового диапазона спектра. Первая система основана на применении отражательных рельефно-фазовых голограмм-проекторов Френеля. Она не требует применения проекционного объектива и вообще каких-либо пропускающих оптических элементов. Во второй системе, основанной на голограммах-проекторах сфокусированного изображения, объектив выполняет лишь силовую функцию «собираения» излучения, в то время как изображающим элементом является голограмма-проектор. 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 происходит в два этапа. На первом этапе происходит запись голограммы-проектора с реального фотошаблона, выполненного в масштабе 1:1 по отношению к формируемому изображению. На втором этапе голограмма-проектор освещается пучком излучения, сопряженным с опорным пучком, и восстанавливает безабберационное изображение исходного объекта.

Дальнейшим развитием этих голографических систем является переход от аналоговых голограмм-проекторов, записываемых с реального фотошаблона, к голограммам-проекторам, синтезированным на компьютере и изготовленным при помощи лазерного или электронного генератора изображений. Применение синтезированных голограмм-проекторов в описанных выше схемах голографической фотолитографии позволяет отказаться от изготовления исходного фотошаблона, что зачастую является сложной и трудоемкой операцией и снижает эффективность от использования данных схем.

Подход к решению задачи синтеза, в обеих рассмотренных выше схемах основан на компьютерном моделировании физического процесса записи голограммы [33]. Такая математически рассчитанная голограмма

изготавливается при помощи лазерного или электронного генератора изображений. Восстановление голограммы-проектора происходит аналогично, как в случае систем на основе аналоговых голограмм. При этом следует учитывать, что дискретный характер синтезированной голограммы накладывает ограничения на параметры синтеза и средства отображения голограммы-проектора на подложке.

Сравнительный анализ параметров синтеза и размера фокального пятна генератора изображений для систем с синтезированными голограммами-проекторами Френеля [13] и голограммами-проекторами сфокусированного изображения [34] показал, что голографические системы на основе синтезированных голограмм-проекторов Френеля не могут формировать изображение объекта с минимальным характеристическим размером элемента меньше чем 1,5 длины волны восстанавливающего излучения. Кроме того, размер фокального пятна генератора изображений, применяемого для отображения таких голограмм-проекторов 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 голограмму-проектор 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 [5, 6, 25] рассматриваются программные комплексы синтеза и восстановления голограмм-проекторов Френеля, а так же эксперимент по восстановлению реальной голограммы-проектора синтезированной с его помощью. Проблемам синтеза СГСИ посвящены работы [34 – 36]. Рассмотрим эти проблемы поподробнее.

7.1. 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 [13] для голограмм-проекторов Френеля.

В простейшем случае одномерной дискретной голограммы, регистрируемой с наклонным параллельным опорным пучком, числовая

апертура пучка, протифрагировавшего на самом маленьком элементе структуры транспаранта, будет описываться выражением:

$$A = n \sin \alpha = \lambda / a_t, \quad (7.1)$$

где A – числовая апертура пучка; n – показатель преломления среды между объектом и проекционным объективом; α – апертурный угол дифрагировавшего пучка излучения; λ – рабочая длина волны; a_t – характеристический размер объекта, т.е. минимальный размер элемента структуры фотошаблона. Угол α в выражении (7.1) можно считать максимальным апертурным углом оптической системы. В этом случае максимальная числовая апертура пучка в пространстве изображений оптической системы может быть описана выражением:

$$A' = n' \sin \alpha' = A / \beta, \quad (7.2)$$

где A' – числовая апертура пучка в пространстве изображений оптической системы; n' – показатель преломления среды между объективом и голограммой; α' – задний апертурный угол; β – линейное увеличение оптической системы.

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

$$T_{min} \leq \frac{\lambda}{2 \sin \alpha'} \leq \frac{\lambda \beta}{2 \sin \alpha}. \quad (7.3)$$

Из выражений (7.1) – (7.3) 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:

$$d \leq \frac{1}{2} T_{min} \leq \frac{a_t \beta}{4}. \quad (7.4)$$

Из (7.4) 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 голограммы-проектора, минимальные пространственные периоды функции, описывающей распределение комплексных амплитуд объектного пучка в плоскости входного или выходного зрачка, зависят от максимальных телесных углов α и α' , в пределах которых распространяется излучение,

продифрагировавшее на объекте или голограмме. Следовательно, они могут быть определены исходя из следующих неравенств:

$$T_{d \min} \leq \frac{\lambda}{2 \sin \alpha}, \quad (7.5)$$

$$T'_{d \min} \leq \frac{\lambda}{2 \sin \alpha'}. \quad (7.6)$$

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

$$d_d \leq \frac{1}{2} T_{d \min} \leq \frac{\lambda}{4 \sin \alpha} \leq \frac{a_t}{4}, \quad (7.7)$$

$$d'_d \leq \frac{1}{2} T'_{d \min} \leq \frac{\lambda}{4 \sin \alpha'} \leq \frac{a_t \beta}{4}. \quad (7.8)$$

Для передачи информации о комплексной амплитуде объектного пучка оптическая система должна обеспечить «захват» излучения, распространяющегося в направлении плоскости голограммы в пределах телесного угла α , 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 (рис. 52), эти значения соответственно равны:

$$D_d = R \operatorname{tg} \left[\arcsin \left(\frac{\lambda}{a_t} \right) \right], \quad (7.9)$$

$$D'_d = R' \operatorname{tg} \left[\arcsin \left(\frac{\lambda}{a_t \beta} \right) \right], \quad (7.10)$$

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:

$$M_d = 1 + D_d / d_d, \quad (7.11)$$

$$M'_d = 1 + D'_d / d'_d. \quad (7.12)$$

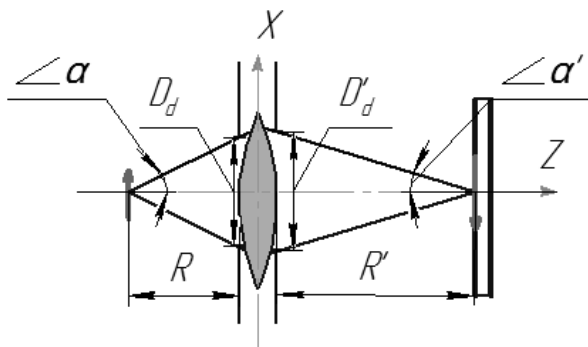


Рисунок 52. Формирование оптической системой увеличенного изображения объекта в плоскости регистрации голограммы

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 размером 1 мкм при длине волны 0,488 мкм, с использованием оптической системы, расположенной на расстоянии 50 мм от объекта, формирующей изображение с линейным увеличением $-4\times$, согласно (7.11), необходимо вычислить комплексную амплитуду поля объектной волны в плоскости входного зрачка как минимум в 12300 узловых точках.

7.2. 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. Отметим также, 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 «look-up table», хорошо зарекомендовавший себя в тех областях науки и техники, где требуется выполнять многократные однотипные вычисления [35].

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 голограммы-проектора. Пучок лучей ограничивается конусом равным двум апертурным углам, а количество лучей, равномерно распределенных внутри конуса, 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. 53 показана графическая визуализация такой ячейки.

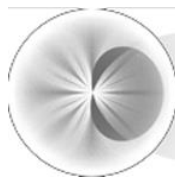


Рисунок 53. Графическое представление элементарной ячейки таблицы соответствия для точки на краю поля тестового объектива.

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, т.к. 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:

$$A(x, y) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n O(i, j) U_{i,j}(x, y), \quad (7.13)$$

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 в

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

Пусть полярные координаты двух точек плоскости объекта отличаются только на некоторый угол φ . 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 φ , на который отличаются координаты рассматриваемых точек.

Исходя из этого свойства, для сокращения избыточной информации на первом этапе синтеза достаточно производить 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 φ . С учетом сдвига системы координат и преобразования матрицы поворота, вычисление новых координат точек массива-ячейки может быть произведено в соответствии со следующим выражением:

$$\begin{cases} x' - x_0 = (x - x_0) \cos \varphi - (y - y_0) \sin \varphi \\ y' - y_0 = (x - x_0) \sin \varphi + (y - y_0) \cos \varphi \end{cases} \quad (7.14)$$

где φ – 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 голограммы-проектора 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, обеспечивает 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 φ 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:

$$\begin{aligned} x_{0d} &= \left\lfloor \frac{x_0}{d} + 0,5 \right\rfloor = \lfloor 3,94 \rfloor = 3, \\ y_{0d} &= \left\lfloor \frac{y_0}{d} + 0,5 \right\rfloor = \lfloor 5,3 \rfloor = 5. \end{aligned} \quad (7.15)$$

Здесь и далее символом $\lfloor \cdot \rfloor$ обозначено округление в меньшую сторону, т.е. выражение $\lfloor x + 0,5 \rfloor$ 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 (7.14) новые целочисленные координаты луча будут равны:

$$\begin{aligned} x_{d1} &= \lfloor (x_{0d} \cos \varphi - y_{0d} \sin \varphi) + 0,5 \rfloor \approx \lfloor 0,6 \rfloor = 0, \\ y_{d1} &= \lfloor (x_{0d} \sin \varphi + y_{0d} \cos \varphi) + 0,5 \rfloor \approx \lfloor 6,33 \rfloor = 6. \end{aligned} \quad (7.16)$$

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

$$\begin{aligned} x_{d1} &= \left\lfloor \frac{(x_0 \cos \varphi - y_0 \sin \varphi)}{d} + 0,5 \right\rfloor \approx \lfloor 1,08 \rfloor = 1, \\ y_{d1} &= \left\lfloor \frac{(x_0 \sin \varphi + y_0 \cos \varphi)}{d} + 0,5 \right\rfloor \approx \lfloor 6,376 \rfloor = 6. \end{aligned} \quad (7.17)$$

Из сравнения результатов вычислений (7.16) и (7.17) 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 таких ошибок, целесообразно хранить в памяти компьютера максимально точные значения координат луча на плоскости синтеза голограммы. 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:

$$\begin{cases} x' = x \cos \varphi - y \sin \varphi \\ y' = x \sin \varphi + y \cos \varphi \end{cases} \quad (7.18)$$

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, т.к. 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 голографического поля является наложение опорной волны на плоскость регистрации голограммы. В данной работе рассматривается плоская опорная волна, падающая на поверхность голограммы под углом θ к нормали. Следовательно, распределение фаз комплексной амплитуды на плоскости голограммы φ_{on} может быть описано следующим выражением:

$$\varphi_{on} = \frac{2 \cdot \pi \cdot x \cdot \sin \theta}{\lambda} \quad (7.19)$$

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 голограммы-проектора, необходимого для отображения ее структуры на носителе.

7.3. 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 голограммы-проектора 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 необходимо ввести в программу габаритные и конструктивные параметры этой системы. На основании введенных данных производится автоматический расчет оптимальных, с точки зрения качества восстанавливаемого изображения, значений основных параметров синтеза голограммы-проектора. 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 требуемым увеличением и апертурой.

Синтез голограмм-проекторов 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 голограммы-проектора или восстановленного изображения могут быть сформированы в виде текстового файла с распределением интенсивности поля, либо в виде полутонового изображения в формате .bmp. Такой вывод данных обеспечивает возможность быстрой визуальной оценки полученных результатов перед их дальнейшей обработкой. На рисунке 3 представлен пример изображаемого объекта и соответствующей ему СГСИ, полученной при помощи простого трехлинзового объектива, подобного тому, что рассматривался в работе [37].

ИТМО

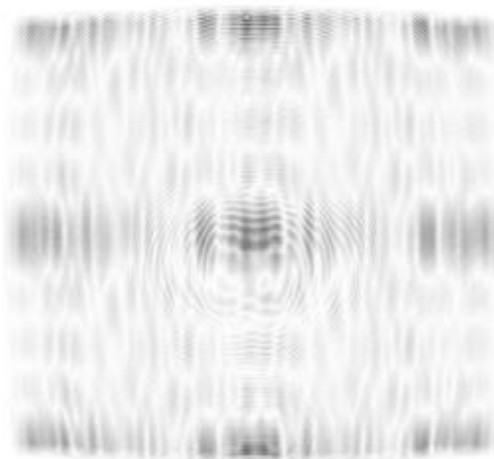


Рисунок 54. Объект и соответствующая ему синтезированная голограмма-проектор сфокусированного изображения

Испытание работоспособности программного комплекса осуществлялось путем цифрового восстановления голограммы и визуального сравнения сформированного ей изображения с исходным объектом. Исследование проводилось для двух тест-объектов. Первый из них был показан на рисунке 54. Его минимальный характеристический размер составлял 0,4 мкм. Структура второго объекта, с характеристическим размером 2 мкм, представлена на рис. 55. В этих случаях, при номинальном значении длины волны равному 193 нм, числовая апертура излучения составляла 0,5 и 0,1 соответственно.



Рисунок 55. Исходный тест-объект с характеристическим размером 2 мкм

Как и в работе [6], посвященной исследованию изображающих свойств синтезированных голограмм-проекторов Френеля, в данной работе изображение, восстановленное с помощью голограммы-проектора, подвергалось пороговой обработке в графическом редакторе Adobe Photoshop. Такая обработка изображения является имитацией реакции фоторезиста на экспонирующее излучение [38]. 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, которые накладываются на основное и искажают 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.



Рисунок 56. Восстановленное изображение до и после пороговой обработки

Результат цифрового восстановления первого тест-объекта представлен на рис. 56. Относительно высокий уровень помех на изображении до порогового преобразования объясняется остаточными помехами дискретизации. Тем не менее, уровень полезного сигнала достаточен 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. 57 показано восстановленное изображение 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].



Рисунок 57. Восстановленное изображение тест-объекта

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

7.4. Сравнительный анализ методов проекционной голографической фотолитографии, основанных на голограммах-проекторах Френеля и сфокусированного изображения

С целью демонстрации перспективности применения голографических систем на основе синтезированных голограмм-проекторов сфокусированного изображения в проекционном фотолитографическом процессе был проведен сравнительный анализ данного голографического метода с методом на основе синтезированных голограмм-проекторов Френеля. Работа проводилась с помощью программных комплексов, предназначенных для синтеза голограмм-проекторов Френеля и голограмм сфокусированного изображения.

Параметры синтеза соответствовали рекомендациям, приведенным в работах [5, 6] и [13]. Согласно им, изображаемый тест-объект, показанный на рис. 58, представлял собой набор светлых «уголков» с минимальным характеристическим размером 4 мкм. Синтез голограмм-проекторов в обоих случаях проводился на длине волны 0,488 мкм. При синтезе голограммы Френеля, её период дискретизации составлял 1 мкм, расстояние между объектом и голограммой – 1,5 мм, а угол падения опорной волны – $10,6^\circ$. Синтез голограммы сфокусированного изображения осуществлялся с использованием проекционного объектива, строящего увеличенное в 4 раза действительное изображение исходного объекта. Период дискретизации голограммы был равен 4 мкм. Угол падения опорной волны на плоскость голограммы составлял $1,8^\circ$, что, при расстоянии между объективом и голограммой равном 123,8 мм, обеспечивало разделение компонентов поля восстанавливаемого излучения.

На рис. 58 представлен исходный объект, а также изображения, восстановленные обоими методами.

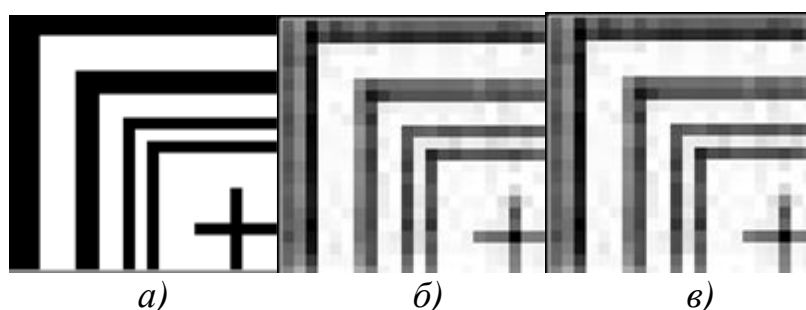


Рисунок 58. Исходный объект (а) и его изображения, восстановленное синтезированной голограммой Френеля (б) и синтезированной голограммой сфокусированного изображения (в)

Критерием качества, как и ранее, служил максимальный интервал порогового преобразования. Для приведенного на рис. 58 (б) изображения, восстановленного синтезированной голограммой-проектором Френеля, этот

интервал составил 47 единиц. Для рис. 58 (в), сформированного при помощи синтезированной голограммы-проектора сфокусированного изображения, данный интервал составил 61 единицу. Близкие значения максимального интервала порогового преобразования говорят о возможности формирования изображения при данных параметрах синтеза обоими методами.

Вместе с тем, для практической реализации более перспективным является голографический метод на основе синтезированных голограмм сфокусированного изображения. Это связано с тем, что диаметр фокального пятна генератора изображений, используемого для отображения синтезированной голограммы-проектора Френеля на подложке, должен быть как минимум в четыре раза меньше минимального характеристического размера элемента изображаемой структуры. В системах с синтезированной голограммой-проектором сфокусированного изображения эти требования смягчаются в количество раз, равное линейному увеличению проекционного объектива. Так, в данном эксперименте при использовании проекционного объектива, характеризующегося линейным увеличением $4\times$, период дискретизации голограммы, а, следовательно, и размер фокального пятна генератора изображений, составлял в 4 раза меньшую величину, чем период дискретизации голограммы Френеля, синтезированной для того же объекта.

В таблице приведено сравнение предельных значений основных характеристик, которые могут быть достигнуты при использовании голографических систем Френеля и систем с голограммами сфокусированного изображения при длине волны 0,488 мкм и увеличении объектива $4\times$.

Таблица 1. Сравнение характеристик, которые могут быть достигнуты системами на основе синтезированных голограмм Френеля и голограмм сфокусированного изображения

| Характеристика | Предельное значение при $\lambda = 0,488$ мкм и $\beta = -4\times$ | |
|--|--|---|
| | голограммы Френеля | голограммы сфокусированного изображения |
| Минимальный характеристический размер элемента a_t , мкм | 0,732 | 0,488 |
| Размер фокального пятна генератора изображений d , мкм | 0,183 | 0,488 |

Как можно видеть из таблицы, благодаря переложению силовой функции «собираения» излучения с голограммы на проекционный объектив, метод на основе синтезированных голограмм-проекторов сфокусированного изображения обладает лучшими характеристиками по сравнению с синтезированными голограммами Френеля. Кроме того, он позволяет формировать изображения с предельным для оптики характеристическим размером элемента равным длине волны восстанавливающего излучения.

8. Коррекционные возможности голограмм-проекторов сфокусированного изображения

Качество изображения, восстанавливаемого при помощи синтезированной голограммы-проектора сфокусированного изображения в реальной голографической схеме, зависит от двух основных факторов. Первый из них связан с дискретным характером синтезированной голограммы. Влияние этого фактора, а также рекомендации по выбору основных параметров синтеза, обеспечивающих подавление помех дискретизации, рассмотрены в настоящем пособии ранее. Вторым фактором, влияющим на качество изображения, является невозможность обеспечения точного соответствия между реальной голографической схемой восстановления голограммы-проектора и её виртуальным аналогом, для которого производится синтез. Ошибки изготовления проекционной оптической системы, неточность установки синтезированной голограммы, отображенной на носителе, отклонение длины волны рабочего излучения, используемого при восстановлении, обуславливают появление остаточных, не скомпенсированных аберраций оптической системы, приводящих к искажению изображения, формируемого голографической системой.

Необходимость оценки влияния данного фактора обуславливает проведение работы по установлению предельных отклонений геометрических параметров схемы восстановления, при которых не происходит разрушения структуры восстанавливаемого изображения, а также анализа коррекционных возможностей голограмм-проекторов сфокусированного изображения, работающих совместно с проекционным объективом невысокого качества.

8.1. Экспериментальное определение допустимых отклонений геометрических параметров схемы восстановления голограмм-проекторов от параметров схемы их синтеза

Методика этого исследования заключалась в синтезе голограммы-проектора 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 голограммы-проектора в плоскости синтеза перпендикулярно оптической оси проекционного объектива Δx , отклонение длины волны восстанавливающего излучения $\Delta\lambda$. Отметим, что конструктивные параметры используемой оптической системы в данной работе считались точно соответствовавшими 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 голограммы-проектора. Предельным значением исследуемого параметра считалось его максимальное значение, при котором интервал уровней порога был больше нуля.

На рис. 59 показаны изображения второго тест-объекта при отклонениях исследуемых параметров, составляющих $\Delta x = 20$ мкм по смещению голограммы в плоскости перпендикулярной оптической оси объектива, $\Delta\alpha = 50''$ по несоответствию угла падения восстанавливающего излучения и $\Delta\lambda = 0,8$ 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 тестового объекта. Поэтому данные значения отклонений можно считать максимально допустимыми для исследуемого объекта.

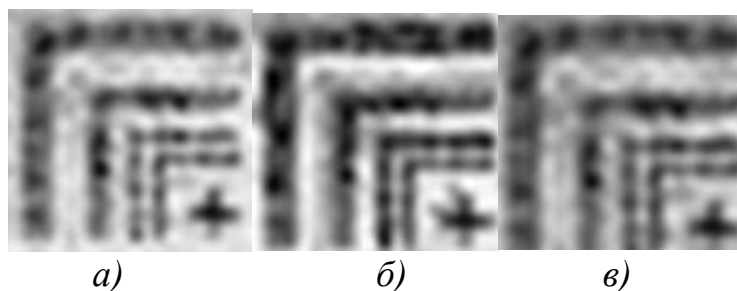


Рисунок 59. Восстановленные изображения тест-объекта при максимальном допустимом отклонении поперечного смещения голограммы (а); угла падения восстанавливающей волны (б); длины волны рабочего излучения (в)

Отметим, что в случае первого тест-объекта (рис. 55) величину допустимых отклонений определить не удалось, т.к. даже малое отклонение от номинальных значений приводило к появлению некомпенсируемых искажений структуры изображения.

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

Таким образом, в настоящем разделе пособия описан специализированный программный комплекс синтеза и цифрового восстановления голограмм-проекторов сфокусированного изображения с учетом реальных aberrаций оптической системы. Примененный в работе комплекса алгоритм синтеза, основанный на модифицированном методе составления таблиц соответствия, позволил более чем в 4 раза сократить

время синтеза голограммы по сравнению с традиционными методами формирования оптического изображения без существенной потери точности вычислений.

Результаты исследования изображающих свойств синтезированных голограмм-проекторов данного типа позволили сделать вывод о корректности работы алгоритма синтеза и о перспективности использования данного программного комплекса для задач проекционной фотолитографии. Кроме того 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. Установлено, что величина допустимых отклонений сильно зависит от апертуры излучения объектного пучка лучей.

8.2. Определение коэффициента коррекции aberrаций оптической системы голограммой-проектором сфокусированного изображения

Оценка остаточной волновой aberrации и коэффициента коррекции проводилась в соответствии с анализом, рассмотренным в работе [39] для голографических фотолитографических систем с аналоговыми голограммами-проекторами сфокусированного изображения. В частности, там рассматривается голографическая система, состоящая из проекционного объектива, строящего в плоскости Гаусса увеличенное в 4 раза действительное изображение миры Фуко. Запись отражательной рельефно-фазовой голограммы производилась параллельным опорным пучком в плоскости изображения. В соответствии с принципом оптического проекционного преобразования [40], для такой системы волновую aberrацию W в выходном зрачке проекционного объектива, соответствующую какой-либо произвольной точке изображения, можно записать в виде:

$$W \approx Sx^4 + Cx^3 + Ax^2 + Fx^2 + Dx, \quad (8.1)$$

где S , C , A , F и D – коэффициенты соответствующих aberrаций: сферическая aberrация и кома 3-го порядка, астигматизм, кривизна поля и дисторсия соответственно. При переходе от линейной координаты к угловой, x можно представить в виде:

$$x = z_o \operatorname{tg} \omega + x_o, \quad (8.2)$$

где x_o – координата некоторой точки изображения. В этом случае (8.1) можно переписать в виде:

$$W \approx S_1 \operatorname{tg}^4 \omega + C_1 \operatorname{tg}^3 \omega + A_1 \operatorname{tg}^2 \omega + F_1 \operatorname{tg}^2 \omega + D_1 \operatorname{tg} \omega. \quad (8.3)$$

При этом для параксиального приближения $\operatorname{tg} \omega$ можно записать в виде:

$$tg\omega_l = tg\alpha_c + \frac{\lambda_c}{\lambda_r}(tg\omega - tg\alpha_r), \quad (8.4)$$

где ω_l – угол, образованный лучом восстановленного волнового фронта и нормалью к плоскости голограммы; λ_r и λ_c – длины волн рабочего излучения при записи и восстановлении соответственно; α_r и α_c – углы падения параллельных пучков опорного и восстанавливающего излучения на плоскость регистрации голограммы соответственно. Приращение тангенса угла наклона восстановленного луча $d(tg\omega_l)$, вызванное отклонением длины волны восстанавливающего излучения λ_c на некоторую величину $d\lambda$, а также неравенством углов падения референтных пучков при условии $\lambda_c \approx \lambda_r = \lambda$ и $\alpha_r = -\alpha_c$, может быть описано следующим выражением:

$$d(tg\omega_l) \approx \frac{d\lambda}{\lambda}(tg\omega - tg\alpha_r) + \frac{d\alpha_c}{\cos^2\alpha_r}. \quad (8.5)$$

Максимальное значение некомпенсированной волновой аберрации dW на краю апертуры голограммы соответствует случаю, при котором углы α_r и ω равны по модулю и противоположны по знаку, т.е. условию:

$$tg\omega - tg\alpha_r \approx 2tg\omega. \quad (8.6)$$

Отсюда для $d(tg\omega_l)$ вблизи $\omega = \omega_l$ можно записать:

$$d(tg\omega) \approx 2tg\omega \left(\frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{d\alpha_c}{\sin 2\omega} \right). \quad (8.7)$$

Тогда некомпенсируемый остаток аберрации dW будет описываться выражением:

$$\begin{aligned} dW \approx & 8S_1 \left(\frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{d\alpha_c}{\sin 2\omega} \right) tg^4\omega + 6C_1 \left(\frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{d\alpha_c}{\sin 2\omega} \right) tg^3\omega + \\ & + 4A_1 \left(\frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{d\alpha_c}{\sin 2\omega} \right) tg^2\omega + 4F_1 \left(\frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{d\alpha_c}{\sin 2\omega} \right) tg^2\omega + \\ & + 2D_1 \left(\frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{d\alpha_c}{\sin 2\omega} \right) tg\omega. \end{aligned} \quad (8.8)$$

Соответственно, по типам аберраций выражение (8.8) можно разложить на следующие составляющие:

1. Сферическая аберрация 3-го порядка.

$$dW_c \approx 8C_1 \left(\frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{d\alpha_c}{\sin 2\omega} \right) tg^4\omega. \quad (8.9)$$

Степень компенсации сферической аберрации голограммой-проектором K_s можно определить в виде отношения:

$$K_s = \frac{dW_s}{W_s} \approx 8 \left(\frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{d\alpha_c}{\sin 2\omega} \right). \quad (8.10)$$

2. Кома 3-го порядка.

$$\begin{aligned} dW_c &\approx 6C_1 \left(\frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{d\alpha_c}{\sin 2\omega} \right) \text{tg}^3 \omega \\ K_c &\approx 6 \left(\frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{d\alpha_c}{\sin 2\omega} \right) \end{aligned} \quad (8.11)$$

3. Астигматизм и кривизна поля.

$$\begin{aligned} dW_A &\approx 4A_1 \left(\frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{d\alpha_c}{\sin 2\omega} \right) \text{tg}^2 \omega \\ K_A &\approx 4 \left(\frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{d\alpha_c}{\sin 2\omega} \right) \end{aligned} \quad (8.12)$$

$$\begin{aligned} dW_F &\approx 4F_1 \left(\frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{d\alpha_c}{\sin 2\omega} \right) \text{tg}^2 \omega \\ K_F &\approx 4 \left(\frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{d\alpha_c}{\sin 2\omega} \right) \end{aligned} \quad (8.13)$$

4. Дисторсия.

$$\begin{aligned} dW_D &\approx 2D_1 \left(\frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{d\alpha_c}{\sin 2\omega} \right) \text{tg} \omega \\ K_D &\approx 2 \left(\frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{d\alpha_c}{\sin 2\omega} \right) \end{aligned} \quad (8.14)$$

Аналогичным образом можно определить остаточную волновую аберрацию при смещении голограммы перпендикулярно оптической оси. Для этого следует записать выражение (8.3) в виде:

$$\begin{aligned} W &\approx S(z_0 \text{tg} \omega + x_0)^4 + C(z_0 \text{tg} \omega + x_0)^3 + \\ &A(z_0 \text{tg} \omega + x_0)^2 + F(z_0 \text{tg} \omega + x_0) + D(z_0 \text{tg} \omega + x_0) \end{aligned} \quad (8.15)$$

Отсюда, для края апертуры голограммы, т.е. при условии $z_0 \text{tg} \omega + x_0 \approx \frac{1}{2} D$, где D – световой диаметр проекционного объектива, можно получить

выражения для коэффициентов коррекции при поперечном смещении голограммы:

$$K_{SX} \approx 8 \frac{dx_0}{D}; K_{CX} \approx 6 \frac{dx_0}{D}; K_{AX} \approx 4 \frac{dx_0}{D}; K_{FX} \approx 4 \frac{dx_0}{D}; K_{DX} \approx 2 \frac{dx_0}{D}. \quad (8.16)$$

Подставляя выражение (8.16) в (8.10) – (8.14) получаем соотношения, описывающие коррекционные возможности голограммы-проектора сфокусированного изображения с учетом спектральной ширины источника восстанавливающего излучения и ошибок геометрических параметров при воспроизведении голографической схемы:

$$K^S = K_s + K_{SX} \approx 8 \left(\frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{d\alpha_c}{\sin 2\omega} + \frac{dx_0}{D} \right), \quad (8.17)$$

$$K^C = K_c + K_{CX} \approx 6 \left(\frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{d\alpha_c}{\sin 2\omega} + \frac{dx_0}{D} \right), \quad (8.18)$$

$$K^A = K_A + K_{AX} \approx 4 \left(\frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{d\alpha_c}{\sin 2\omega} + \frac{dx_0}{D} \right), \quad (8.19)$$

$$K^F = K_F + K_{FX} \approx 4 \left(\frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{d\alpha_c}{\sin 2\omega} + \frac{dx_0}{D} \right), \quad (8.20)$$

$$K^D = K_D + K_{DX} \approx 2 \left(\frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{d\alpha_c}{\sin 2\omega} + \frac{dx_0}{D} \right). \quad (8.21)$$

Итоговое значение коэффициента коррекции волновой аберрации оптической системы может быть получено в виде суммы всех коэффициентов по отдельным типам аберраций, то есть:

$$K = K^S + K^C + K^A + K^F + K^D. \quad (8.22)$$

Данные выражения позволяют определить величину остаточной некомпенсированной волновой аберрации при известных значениях λ , $d\lambda$, $d\alpha_c$ и dx_0 , а также коэффициент коррекции аберраций оптической системы голограммой-проектором сфокусированного изображения.

Соотношения, полученные в результате такого анализа, справедливы также и для голографических фотолитографических систем на основе синтезированных голограмм-проекторов. Согласно (8.17) – (8.22) коэффициенты коррекции волновой аберрации по отдельным параметрам $d\lambda$, $d\alpha_c$ и dx_0 можно записать в виде:

$$\begin{aligned}
K_{\lambda} &= 20 \left(\frac{d\lambda}{\lambda} \right), \\
K_{\alpha} &= 20 \left(\frac{d\alpha_c}{\sin 2\omega} \right), \\
K_x &= 20 \left(\frac{dx_0}{D} \right).
\end{aligned}
\tag{8.23}$$

Подстановка в (8.23) полученных ранее критических значений параметров схемы позволяет вычислить теоретические значения коэффициентов при заданных апертурах излучения. Для апертуры 0,1 коэффициенты коррекции по трем рассматриваемым параметрам составили $K_x = 0,0638$, $K_{\alpha} = 0,0943$, $K_{\lambda} = 0,0829$. Для апертур 0,25 и 0,5 ввиду невозможности получения практических величин допустимых отклонений, вместо критических значений были взяты максимальные значения несоответствия параметров схемы, для которых структура изображения еще была различима. Таким образом, для апертуры 0,25 полученные теоретические коэффициенты равны $K_x(15\text{мкм}) = 0,0193$; $K_{\alpha}(19'') = 0,0128$; $K_{\lambda}(0,47\text{нм}) = 0,0487$. Для апертуры 0,5 аналогичные значения составили: $K_x(9\text{мкм}) = 0,0060$; $K_{\alpha}(6'') = 0,001531$; $K_{\lambda}(0,3\text{нм}) = 0,0310$.

Определение реальных значений коэффициентов коррекции производилось путем расчета остаточной волновой аберрации в выходном зрачке оптической системы в ходе процесса восстановления голограммы.

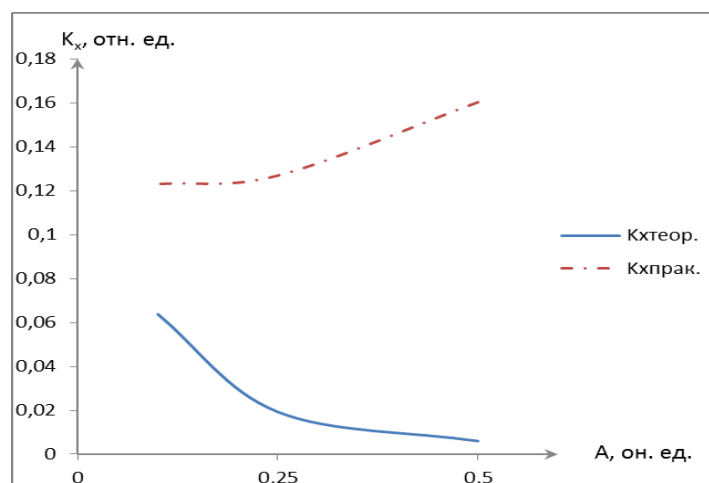


Рисунок 60. Графики зависимости теоретических и практических коэффициентов коррекции K_x от апертуры излучения при поперечном смещении голограммы

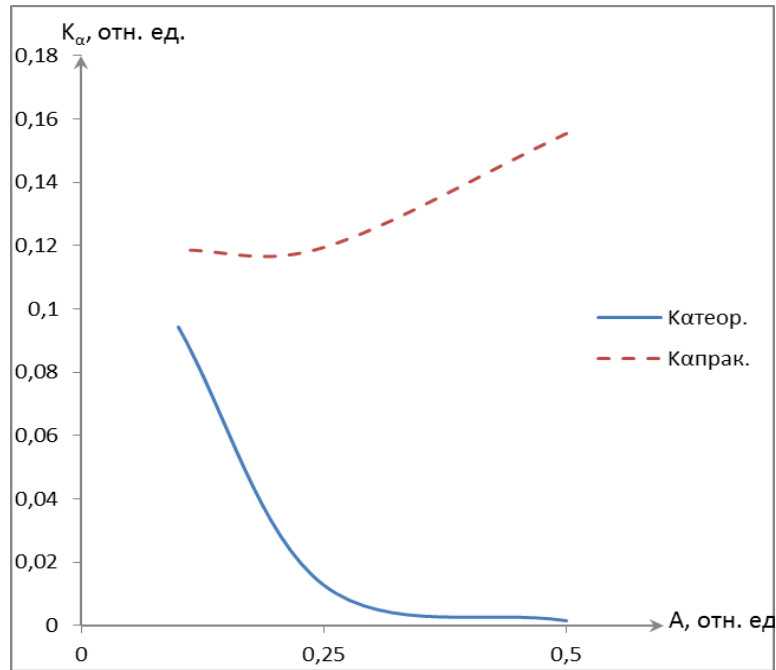


Рисунок 61. Графики зависимости теоретических и практических коэффициентов коррекции K_{α} от апертуры излучения при несоответствии угла падения восстанавливающей волны

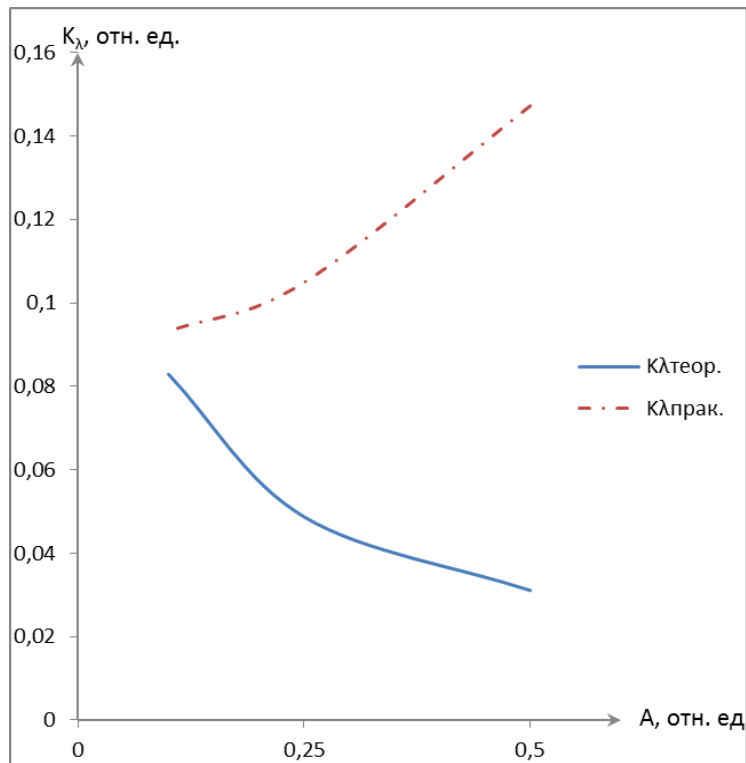


Рисунок 62. Графики зависимости теоретических и практических коэффициентов коррекции K_{λ} от апертуры излучения при несоответствии длины волны восстанавливающего излучения

Восстановление производилось при тех же критических значениях параметров $d\lambda$, $d\alpha_c$, dx_0 и тех же апертурах, что и ранее, при вычислении теоретических коэффициентов. Сравнение теоретических и практических значений коэффициентов коррекции волновой аберрации голограммой-проектором приведены на графиках, представленных на рис. 60 – 62.

Недостаточная корреляция теоретических и практических результатов при больших апертурах излучения обусловлена тем, что выражения (8.23) описывают коэффициенты коррекции волновой аберрации в параксиальном приближении, исходя из теории аберраций 3-го порядка. Вместе с тем, при больших значениях апертур большое влияние начинают оказывать аберрации высших порядков, что приводит к ухудшению качества восстанавливаемого изображения и необходимости введения более жестких ограничений на параметры схемы восстановления. Исходя из анализа практических и теоретических коэффициентов коррекции, можно сделать вывод о том, что допуски на отклонение геометрических параметров схемы при больших апертурах излучения, т.е. при больших значениях исходной волновой аберрации оптической системы, должны быть значительно меньше, чем их теоретические значения. Так, например, при апертуре излучения равной 0,5 допуск на поперечное смещение голограммы должен быть примерно в 15 раз жестче, чем его величина, полученная из выражений (8.23).

9. Мировой опыт создания высокоразрешающих проекционных систем с рельефно-фазовыми синтезированными голограммами-проекторами для субмикронной и нанофотолитографии

В современной литературе, имеются сведения о разработках голографических фотолитографических систем на основе практически всех известных видов голограмм, в частности, голограмм Френеля [46, 47], голограмм сфокусированного изображения [39, 48] и синтезированных голограмм [6, 36]. 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 УФ и рентгеновском диапазонах спектра.

Суть процесса синтеза голограммы заключается в следующем: в компьютер вводится то изображение, голограмму которого мы хотим получить. Процесс формирования голографического поля (интерференции опорной и объектной волны) математически моделируется и рассчитывается с помощью специальной программы. Результатом расчетов будет распределение интенсивности в плоскости 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 актиничного излучения с материалом носителя голограммы в точно заданных участках рабочего поля устройства. Высокая точность синтеза топологии элементов достигается благодаря использованию прецизионных систем управления перемещениями. 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 отражающая рельефно-фазовая голограмма-проектор. Она восстанавливается опорным пучком, и формирует действительное изображение на поверхности полупроводниковой пластины, покрытой слоем фоторезиста.

При практической реализации этого метода основные трудности вызывают процессы, как синтеза, так и отображения на носителе рассчитанной голограммной структуры. Сложность синтеза голограмм-проекторов обуславливается, 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 восстанавливаемых с их помощью изображений. Сложность же отображения синтезированных голограмм-проекторов связана с более высокими требованиями, предъявляемыми к используемым для этой цели генераторам изображений, по сравнению с требованиями, предъявляемыми к ним при изготовлении соответствующих фотошаблонов.

Из имеющихся в литературе данных о синтезе, и отображении голограмм-проекторов, предназначенных для использования в фотолитографическом процессе, несомненный интерес вызывают работы сотрудников Нью-Йоркского университета [23] и Национальной лаборатории Беркли [24]. Компьютерное моделирование, проведенное в США в Нью-Йоркском университете, показало возможность использования голографической проекционной фотолитографии в рентгеновском диапазоне спектра для изготовления структур с характеристическим размером 0,06 мкм и глубиной резкости 6 мкм. Длина волны используемого излучения при этом составляла 5 нм, расстояние от голограммы до фоторезиста было выбрано равным 0,2 мм, а сама голограмма считалась пропускающей, выполненной из пластины углерода толщиной 0,1 мм.

Основываясь на трудности отображения голограмм на носителях, специалисты Нью-Йоркского университета считали перспективным использование схемы Габора и рельефно-фазовых пропускающих голограмм, выполненных из модулированных по толщине пластин углерода, кремния и вольфрама. Недопустимые в фотолитографическом процессе нулевой порядок дифракции и сопряженное изображение предлагалось подавлять при этом с помощью известных в цифровой голографии приемов. Синтез самой голограммной структуры предлагалось осуществлять по следующему сценарию. Сначала по заданному распределению интенсивности в плоскости фоторезиста определяется соответствующее ему распределение амплитуды. Фаза изображения при этом не имеет значения и считается нулевой. Затем по известной комплексной амплитуде восстановленного изображения рассчитывается голографическое поле в плоскости голограммы. Опорный пучок при этом считается плоским, падающим по нормали на плоскость регистрации голограммы.

По результатам расчета голографического поля рассчитывается требуемая функция модуляции толщины голограммы. После этого указанная функция корректируется в соответствии с технологическими возможностями обработки и свойствами материала синтезируемой голограммы. Затем по откорректированной структуре голограммы осуществляется расчет интенсивности восстанавливаемого с ее помощью изображения и производится еще одна, последняя, корректировка голограммной структуры, направленная на достижение максимально возможной ее дифракционной эффективности. Отображение рассчитанных структур на углеродных,

кремниевых и вольфрамовых пластинах предлагалось осуществлять методом электронно-лучевой литографии.

Работоспособность описанного процесса проверялась методом компьютерного моделирования для голограмм, изготавливаемых из всех трех вышеназванных материалов. В частности, для длины волны 1,8 нм и 1,5 мкм расстояния между поверхностями голограмм и фоторезиста были промоделированы процессы синтеза и восстановления голограммы из германия с максимальной глубиной рельефа 1,35 мкм. Структура голограммы представляла собой 16 уровневый киноформ и состояла из 256×256 элементов размером 0,1 мкм² каждый. Отношение h/d голограммы составляло 9:1. Требуемая точность отображения структуры голограммы составляла 5% по случайным ошибкам и 20% по систематическим ошибкам. Проведенные исследования эффективности использования того или иного материала для изготовления голограмм показали, что для области спектра вблизи 1,8-4 нм германий является оптимальным выбором материала для изготовления голограмм. В длинноволновой области рентгеновского диапазона лучше использовать углерод. Общим условием выбора материала голограммы является минимальность отношения глубины его амплитудной модуляции к глубине фазовой при записи информации в виде поверхностного рельефа.

Для отображения синтезированных голограмм на носителе ими предлагалось использовать электронно-лучевой литограф, либо сканирующий электронный микроскоп. При этом отмечалось, что использование сканирующего микроскопа менее желательно, поскольку реализуемый в нем растровый способ отображения голограммной структуры приводит к значительным ошибкам позиционирования штрихов и их глубины. Одним из наиболее пригодных для целей отображения синтезированных голограмм устройств, специалисты Нью-Йоркского университета называют литограф JBX-600FS, изготавливаемый Bells Laboratories. Он имеет Zr/O/W эмиссионный источник. Его поле составляет 80×80 мкм при точности позиционирования 5 нм.

Метод проекционной голографической фотолитографии предполагает использования источников рентгеновского излучения с высокой степенью временной и пространственной когерентности. Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют ондуляторы. Например, синхротронные ондуляторы, излучающие в 5 нм рентгеновском диапазоне, характеризуются более чем 500 кратным отношением средней длины волны излучения к его спектральной ширине. Отметим, что по данным американских ученых характеристический размер в 63 нм может быть реализован в проекционной голографической рентгеновской литографии с пропускающей голограммой Габора при радиусе корреляции излучения в 10 мкм и отношении λ к $\Delta\lambda > 47$.

По мнению специалистов Национальной лаборатории Беркли, голограммные оптические элементы в экстремально коротковолновой

фотолитографии, реализуемой в диапазоне длин волн 13 – 16 нм, прежде всего, найдут применение в устройствах формирования пучка лучей, просвечивающего фотошаблон. Дело в том, что в соответствии с работами Камона наиболее эффективной в этом диапазоне спектра, т.е. обеспечивающей наибольшую глубину резкости при высоком разрешении, является кольцевая подсветка фотошаблона. Формирующие такую подсветку кольцевые осветители обычно строятся на основе различного вида диафрагм, размещаемых в плоскости зрачка осветителя, что приводит к существенным потерям энергии излучения.

С целью уменьшения этих потерь Химель предложил осуществлять формирование кольцевой подсветки с помощью дифракционных или синтезированных голограммных оптических элементов. Голограммные элементы для кольцевых осветителей, работающих в экстремально коротковолновой УФ области спектра, могут быть пропускающими или отражательными. Оптимальным для изготовления пропускающих голограмм является молибден. При его использовании в излучении с длиной волны 13,5 нм для обеспечения сдвига фазы проходящего излучения на π приходится мириться с 60% вариациями коэффициента пропускания голограммы по интенсивности. Такая неравномерность коэффициента пропускания голограммы по апертуре не позволяет игнорировать амплитудную составляющую модуляции проходящего через голограмму излучения и препятствует изготовлению чисто фазовой голограммы пропускающего типа. Кроме того, такая голограмма, выполненная пусть даже на самой тонкой молибденовой подложке, будет характеризоваться не более 50% коэффициентом пропускания для самых тонких участков ее апертуры.

Приведенные энергетические характеристики пропускающих голограмм свидетельствуют о перспективности использования в задачах экстремально коротковолновой УФ фотолитографии синтезированных фазовых голограмм, работающих на отражение. Простейший вариант такой голограммы может представлять собой совокупность тонких полосок молибдена, нанесенных на отражающую поверхность. Ее дифракционная эффективность теоретически может достигать 60%.

При этом голограмма, по-прежнему, не может быть выполнена в чисто фазовом варианте из-за остаточного поглощения молибдена. Стремление к получению чисто фазовых голограмм объясняется их способностью к полному подавлению нулевого порядка дифракции на стадии восстановления при выборе оптимальной глубины рельефа голограммы. Чисто фазовые отражательные голограммы могут быть изготовлены лишь путем соответствующей модуляции толщины какого либо носителя с последующем нанесением на поверхность голограммы многослойного отражающего покрытия. Модуляция толщины носителя голограммы может осуществляться методом электронно-лучевой литографии с помощью электронно-лучевых генераторов изображения. Дифракционная эффективность полученных таким

образом голограмм может достигать 40% от коэффициента отражения используемого отражающего покрытия. Практическую реализацию этого варианта предполагается осуществлять по следующей схеме. Сначала на кремниевую подложку наносится тонкий защитный слой хрома. Поверх него методом магнетронного распыления наносится тонкий слой кремния, толщиной 3-4 нм. Затем идет слой фоторезиста. Методом электронно-лучевой литографии на соответствующих участках апертуры голограммы в фоторезисте формируют окна, через которые ионно-плазменной обработкой удаляют кремний с поверхности хрома. Таким путем получают рельефную голограммную структуру с шероховатостью поверхности менее 0,25 нм по RMS.

Последующее покрытие полученной рельефной структуры многослойным диэлектрическим покрытием с 63% коэффициентом отражения по энергии позволяет получить рельефно-фазовую голограмму с дифракционной эффективностью 23%. По этому методу в Национальной лаборатории Беркли был изготовлен синтезированный голограммный оптический элемент, формирующий в дальней зоне дифракции изображение логотипа лаборатории. Расчет структуры голограммного элемента проводился в соответствии с итерационным алгоритмом. Исходными данными для синтеза являлись амплитуда объектной волны и максимальная глубина модуляции толщины голограммы. По этим данным была определена квазинепрерывная фазовая функция пропускания транспаранта, формирующего в дальней зоне дифракции требуемое распределение освещенности. Чрезвычайная сложность отображения такой квазинепрерывной функции на голограмме обусловила необходимость добавления к ней несущей и ее бинаризации. Несущий период для голограммы, предназначенной для работы на длине волны 13,5 нм, был выбран равным 392 нм, что соответствовало углу падения плоской опорной волны, равному 2 градусам. Числовая апертура в первом порядке дифракции составляла $0,042 \times 0,026$. Структура голограммы представляла собой совокупность субапертур размером 200×200 мкм², каждая из которых состояла из 2048×2048 пикселей, размером 98×98 нм² каждый. Полный размер голограммы составлял 1×1 мм².

Восстановление голограммы осуществлялось квазипараллельным пучком излучения синхротронного источника с $\lambda/\Delta\lambda = 1400$. С целью определения дифракционной эффективности изготавливаемых по этой технологии голограммных оптических элементов исследователями по той же методике была изготовлена и исследована рельефно-фазовая голографическая дифракционная решетка с вдвое меньшей пространственной частотой, равной 5000 мм⁻¹. Результаты проведенных измерений свидетельствовали о достижении 22% дифракционной эффективности, что с учетом 65% коэффициента отражения покрытия решетки свидетельствовало

о достижении абсолютной, т.е. соответствующей единичному коэффициенту отражения, дифракционной эффективности равной 35%.

Работа, проведенная специалистами Национальной лаборатории Беркли, является первым свидетельством реальности синтеза и изготовления рельефно–фазовых голограммных оптических элементов, пригодных для использования в экстремально коротковолновом УФ диапазоне спектра (рабочая длина волны 13,5 нм). Вместе с тем, наблюдаемое на приведенных в литературе фотографиях изображения, восстановленного с помощью рассматриваемой синтезированной голограммы, большое количество спеклов, свидетельствует о невозможности применения этого голограммного элемента в задачах проекционной фотолитографии без дальнейшей существенной доработки технологии его изготовления.

Литература

1. Голография. Методы и аппаратура. Под ред. Гинзбург В.М. и Степанова Б.М. - М.: Сов.радио, 1974, 376с.
2. Корешев С.Н., Семенов Г.Б. Дифракционная эффективность и некоторые особенности спектров дискретных амплитудных бинарных голограмм // Оптика и спектроскопия. 1976. Т.41. №2. С. 310 – 313.
3. Кольер Р., Беркхард К., Лин Л. Оптическая голография – М.: Мир, 1973, 686с.
4. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. – М.: Мир, 1970, 364с.
5. 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.
6. 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.
7. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Смородинов Д.С. Изображающие свойства дискретных голограмм. I. Влияние дискретности голограммы на восстановленное изображение // Оптический журнал. 2014. Т.81. №3. С. 14 – 19.
8. Корешев С.Н., Смородинов Д.С., Никаноров О.В. Изображающие свойства дискретных голограмм. II. Влияние модификации структуры голограммы и высокой, превышающей частоту Найквиста, несущей пространственной частоты голограммной структуры на восстановленное изображение // Оптический журнал. 2014. Т.81. №4. С. 48 – 53.
9. Zhang Y., Lu Q., Ge B. Elimination of zero-order diffraction in digital off-axis holography // Optics communications. 2004. V.240. №4 – 6. P. 261 – 267.
10. Chen G., Lin C., Kuo M., Chang C. Numerical suppression of zero-order image in digital holography. Optics Express. 2007. Vl. 15. №14. P. 8851 – 8856.
11. Гребенюк А.А., Гребенюк К.А., Рябухо В.П. Восстановление изображения с цифровой фурье-голограммы в условиях превышения частоты найквиста. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. №2(78). С. 24 – 27.
12. Хованова Н.А., Хованов И.А. Методы анализа временных рядов: Саратов, ГосУНЦ Колледж, 2001, 120 с.

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.
14. Ландсберг Г.С. Оптика. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003, 848 с.
15. Slinger C., Cameron C., Coomber S., etc. Recent developments in computer-generated holography, SPIE-IS&T. – 2004. – Vol. 5209. – P. 27 – 41.
16. Lohmann A.W. Computer Holography and Communications Theory // IEEE-Nerem 3 (part 2) – 1973. – P.148.
17. Lucente M. Interactive Computation of holograms using a Look-up Table // J. Electron. Imaging 2, 28 – 34 (1993).
18. Kim S.C. and Kim E.S. Effective generation of digital holograms of three-dimensional objects using a novel look-up table method // Appl. Opt. 47, D55 – D62 (2008).
19. Kim S.C. and Kim E.S. Fast computation of hologram patterns of a 3D object using run-length encoding and novel look-up table methods // Appl. Opt. 48, 1030 – 1041 (2009).
20. 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. Vol. 18. No. 19. P. 19504- 19509.
21. Смородинов Д.С. Поиск путей обеспечения равной интенсивности в изображениях разновеликих объектов, восстанавливаемых с помощью синтезированных голограмм-проекторов Френеля // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых, выпуск 2. СПб: НИУ ИТМО, 2012. С. 53.
22. Корешев С.Н. Дифракционная эффективность дискретных бинарных фазовых голограмм // Оптика и спектроскопия. 1978. Т. 44. №1. С. 39 – 42.
23. 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.
24. 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.
25. 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 // Оптика и спектроскопия. 2011. Т.111. №1. С. 156 – 161.
26. Данилина Т.И. Технология тонкопленочных микросхем. Учебное пособие. Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007, 21с.

27. Франсон М. Оптика спеклов. - М.: Мир, 1980, 172 с.
28. Цуканова Г.И., Карпова Г.В., Багдасарова О.В., Карпов В.Г., Кривоустова Е.В., Ежова К.В., под редакцией профессора Шехонина А.А. Прикладная оптика. Часть 2. Учебно-методическое пособие. СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2003, С.32.
29. Корешев С.Н., Смородинов Д.С., Громов А.Д., Никаноров О.В. Обеспечение равной интенсивности элементов изображений бинарных объектов, восстанавливаемых с помощью синтезированных голограмм-проекторов // Оптика и спектроскопия. 2013. Т. 114. №2. С. 150 – 155.
30. 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.
31. Ehbets 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. Vol. 34. № 8. P. 2377 – 2383.
32. Koreshev S.N., Ratushnyi V.P. Holographic method for obtaining images with limiting high resolution for extreme shot-wave lithography problems // Proc. SPIE. 2004. Vol. 5290. P. 221 – 232.
33. 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.
34. С.Н. Корешев, И.Н. Корепин. Выбор параметров синтеза голограмм-проекторов сфокусированного изображения. // Оптический журнал. 2011. Т.78, №9. с. 44 – 49.
35. С.Н. Корешев, И.Н. Корепин. Методы синтеза голограмм сфокусированного изображения. // Оптический журнал. 2013. Т.80, №10. С. 37 – 43.
36. С.Н. Корешев, И.Н. Корепин, М.С. Вахнин. Метод синтеза голограмм-проекторов сфокусированного изображения и программный комплекс на его основе. // Оптический журнал. 2016. Т.83, №2. С. 40 – 48.
37. 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.
38. Моро У. Микролитография. - М.: Мир, 1990, 1240 с.
39. Корешев С.Н., Ратушный В.П. Голограммы сфокусированного изображения в задаче высокоразрешающей проекционной голографической фотолитографии // Оптика и спектроскопия. 2006, Т.101, №6, С. 1038 – 1042.
40. Бобров С.Т. Оптика дифракционных элементов и систем / С.Т. Бобров, Г.И. Грейсх, Ю.Г. Туркевич. – Л.: Машиностроение, 1986, 224 с.

41. 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.
42. Koreshev S.N., Ratushnyi V.P. Holographic method for obtaining images with limiting high resolution for extreme shot-wave lithography problems // Proc. SPIE. 2004. Vol. 5290. – P. 221 – 232.
43. Clube F., Gray S., Struchen D., Tisserand J., Malfoy S., Darbellay Y. Holographic microlithography. Opt. Eng. 1995. Vol. 34. № 9. P. 2724 – 2730.

Миссия университета – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИКИ

Кафедра прикладной и компьютерной оптики - одна из крупнейших кафедр российских ВУЗов, занимающихся задачами современной оптической науки.

Кафедра возникла при слиянии двух кафедр оптического факультета: теории оптических приборов и кафедры оптических приборов и компьютерной оптики. Поэтому на кафедре учат специалистов, имеющих самое широкое представление об оптике в целом, от проектирования оптических систем самого разного назначения до компьютерной обработки изображений и интерферограмм.

Овладение такими разнообразными знаниями невозможно без практической работы с приборами, и кафедра имеет в своем составе несколько учебно-исследовательских лабораторий.

В лаборатории оптических измерений и контрольно-измерительных приборов студенты получают знания и навыки в области метрологии, учатся измерять характеристики оптических систем и параметры деталей и материалов.

Лаборатория микроскопов и медицинских оптических приборов знакомит с различными типами микроскопов (поляризационными, биологическими, металлографическими), методами наблюдения микрообъектов и т.п., а также с приборами, применяемыми офтальмологами для диагностики зрения.

Лаборатория геодезических приборов позволяет получить начальные навыки работы с теодолитами, дальномерами и другими приборами, применяемыми в геодезии и картографии, узнать особенности проектирования различных их узлов и конструкции.

В лабораториях компьютерных средств контроля оптики и исследования качества оптического изображения занимаются проблемами контроля качества оптических поверхностей оптической системы в целом, а также компьютеризации и автоматизации этих процессов.

В учебном процессе используются научный потенциал и лабораторная база крупнейшего в России научного центра в области оптики - ВНЦ ГОИ им. С.И.Вавилова, ведущего оптического предприятия - ОАО «ЛОМО».

Достижения кафедры отмечены двумя Ленинскими премиями, пятью Государственными премиями, премией Совета Министров, премией французской Академии Наук. Кроме того, работы, выполненные на кафедре, отмечались многочисленными медалями и дипломами международных и российских выставок, медалями С.П.Королева, Ю.А.Гагарина, премиями Минвуза.

За период существования кафедры было подготовлено более 150 кандидатов наук, из них 30 иностранцев, а также 16 докторов наук. Большинство научных и производственных подразделений в области прикладной оптики в России, а также многие в США, Израиле и Китае возглавляют ученики нашей научной школы.

В настоящее время кафедра прикладной и компьютерной оптики факультета Оптико-информационных систем и технологий является одним из крупнейших подразделений Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, ориентированным на выпуск высококвалифицированных специалистов в области оптотехники.

С информацией о кафедре можно ознакомиться на сайте: aco.ifmo.ru.

Корешев Сергей Николаевич
Никаноров Олег Викторович
Смородинов Денис Сергеевич

**Компьютерный синтез голограмм и его влияние на
их изображающие свойства**

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49