

# Влияние параметров планарного волновода на качество двумерного изображения, записанного на волноводной голограмме

И.В.Густомясов, А.Н.Путинин, А.В.Чернопяттов

*Рассмотрена схема записи и воспроизведения «рельефных» волноводных фурье-голограмм двумерных объектов. Проведен анализ искажений, возникающих при воспроизведении объекта волноводной модой. Построена компьютерная модель, позволяющая качественно и количественно оценить влияние различных параметров схемы записи – воспроизведения, а также параметров волновода на качество восстановленного изображения двумерного объекта. Показано влияние вида регистрируемого двумерного изображения на уровень шумов при волноводном воспроизведении.*

**Ключевые слова:** интегральная оптика, голография, волноводная голография, оптические запоминающие устройства.

## 1. Введение

Цель настоящей работы заключается в изучении влияния затухания волноводной моды на качество изображения, восстанавливаемого волноводной голограммой, которая записана на поверхности планарного волновода; рассмотрена также зависимость качества изображения от параметров схемы записи и условий проявления регистрирующей среды.

При экспериментах с записью волноводных голограмм двумерных объектов в восстановленном изображении часто возникает ряд специфических искажений, источники которых, как правило, объясняют ошибками в эксперименте, однако многократное повторение вида искажений натолкнуло нас на мысль о более детальном исследовании влияния факторов именно волноводного способа воспроизведения на линейность процесса записи – проявления – воспроизведения.

Ранее были исследованы геометрические искажения волноводных голограмм [1] и влияние затухания мощности волноводной моды при воспроизведении волноводных фокусирующих решеток (линз) на качество изображения [2]. В результате вывода мощности излучения на голографической решетке по мере распространения волны в волноводе восстанавливающий пучок по распределению интенсивности существенно отличается от опорного при записи, что вызывает значительное ухудшение качества восстановленного изображения. С другой стороны, при уменьшении коэффициента вывода излучения волновода распределение интенсивности в восстановленном пучке ближе к исходному, но это приводит к низкой выводимой световой мощности волноводной голограммы, что делает её малоэффективной. Моделирование данных процессов позволяет выявить тип и характер дефектов, возникающих в изображении, а также впоследствии

сконструировать компенсационную маску, подавляющую нежелательные эффекты.

## 2. Запись и воспроизведение волноводных фурье-голограмм

В нашей работе рассматриваются «рельефные» волноводные голограммы, общая схема записи – воспроизведения которых такова. Запись голограммы осуществляется с помощью оптической системы так, что в плоскости «записываемого» волновода сходятся два пучка – опорный и предметный, содержащий фурье-спектр объекта. На поверхность волновода наносится фоточувствительная эмульсия, с помощью которой фиксируется интерференционная картина. В результате процесса травления на поверхности волновода формируется структура гофра. Глубина гофра в конкретной точке определяется интенсивностью интерференционной картины в этой точке. При воспроизведении голограммы в качестве опорной волны берётся волна, распространяющаяся по волноводу и дифрагирующая на гофре.

Волноводные голограммы Фурье двумерных объектов записывались He–Cd-лазером (0.442 мкм), пространственная несущая частота решеток лежала в пределах 2000 – 2500 лин./мм [3]. Запись осуществлялась в двуслойных волноводных структурах ионнообменный волновод – пленка халькогенидного полупроводника или фоторезиста; халькогенид (фоторезист) служил также регистрирующей средой. После экспозиции для обеспечения селективного травления экспонированных участков халькогенид (фоторезист) проявлялся в водном растворе NaOH с добавлением ПАВ и буферных солей. Дифракционная эффективность измерялась при восстановлении изображения волноводной модой по изменению мощности моды в волноводе от входного сечения голограммы к выходному; измерялось также соотношение эффективности вывода излучения в подложку и в пространство над волноводом. Обычно эффективность вывода в подложку и в воздух была примерно одинаковой, поскольку регистрирующие среды представляли собой тонкие рельефные голограммы с минимальной угловой селективно-

И.В.Густомясов, А.Н.Путинин, А.В.Чернопяттов. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53

Поступила в редакцию 22 июля 2002 г, после доработки – 18 октября 2002 г.

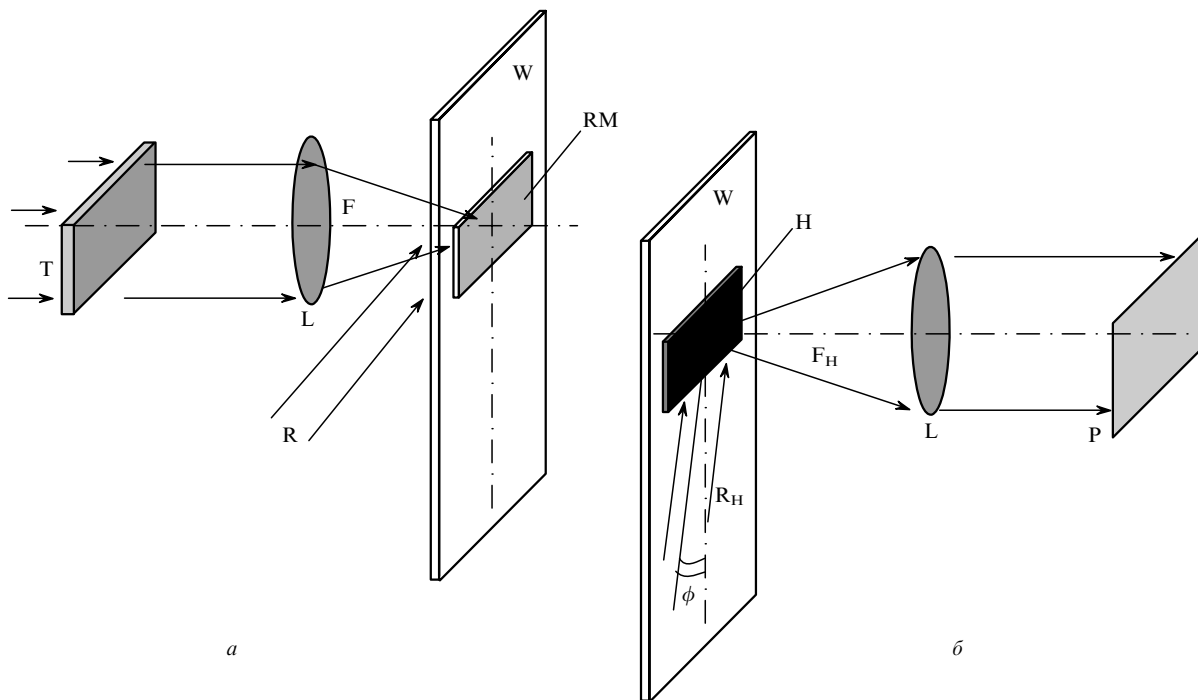


Рис.1. Схема записи (а) и воспроизведения (б) волноводных голограмм двумерных объектов: Т – транспарант, модулирующий амплитуду объектного пучка; L – линза; W – планарный волновод; F – объектный пучок; R – опорный пучок (плоская волна); RM – фоторезист; H – голограмма, записанная на фоторезисте; R<sub>H</sub> – волноводная мода, используемая в качестве восстанавливающего пучка; φ – угол между направлением распространения волны в волноводе и осью, вдоль которой расположена записанная голограмма; F<sub>H</sub> – восстановленный объектный пучок; P – матрица фотодетекторов.

стью, что было необходимо для более точного соответствия модельному расчету на ЭВМ. Воспроизведение осуществлялось He-Ne-лазером, суммарная дифракционная эффективность голограмм при записи периодических решеток и голограммы площадью 1 мм<sup>2</sup> могла достигать 80 %. Схема записи голограмм приведена на рис.1, записывались голограммы фурье-изображений бинарных и полутоновых объектов. Информационная ёмкость не превышала 10<sup>3</sup> бит/мм<sup>2</sup> и была намного меньше предельной для голограмм такого типа.

При записи волноводных голограмм для ряда прикладных задач (оптическая согласованная фильтрация, голографическая память, дисплейные голограммы и др.) часто наблюдались очень сильное зашумление изображений, а порой и полная потеря записанных данных, хотя видимых ошибок в экспериментах не было. Анализ особенностей волноводного воспроизведения голограмм показал, что на качество изображения влияет дополнительная нелинейность. При росте дифракционной эффективности голограммы решетка начинает влиять не только на мнимую часть постоянной распространения света в волноводе (утечка света из волновода), но и на её действительную часть, что приводит к возникновению мультипликативных шумов и к потере разрешения в восстановленных изображениях. Взаимодействие волноводной го-

лограммы и волноводной моды является пространственно распределённым, и различные участки голограммы могут вообще не воспроизводиться, если свет до них не доходит.

На фотографиях (рис.2) приведены характерные шумы волноводного воспроизведения голограмм тестовых объектов. Особенностью волноводного воспроизведения является и то, что дифракционная эффективность голограмм и соответственно уровень шумов зависят от направления падения волноводной моды на голограмму, что особенно проявляется при несимметричном виде фурье-спектра.

Все эти особенности записи волноводных голограмм довольно трудно учесть и описать, поэтому мы решили построить компьютерную модель для прояснения ряда вопросов волноводного воспроизведения голограмм.

### 3. Моделирование волноводных голограмм на ЭВМ

Для оценки качества воспроизводимых изображений при разных параметрах волновода была построена компьютерная модель процесса записи – воспроизведения изображения. Разработка программного обеспечения осуществлялась в среде математического моделирова-

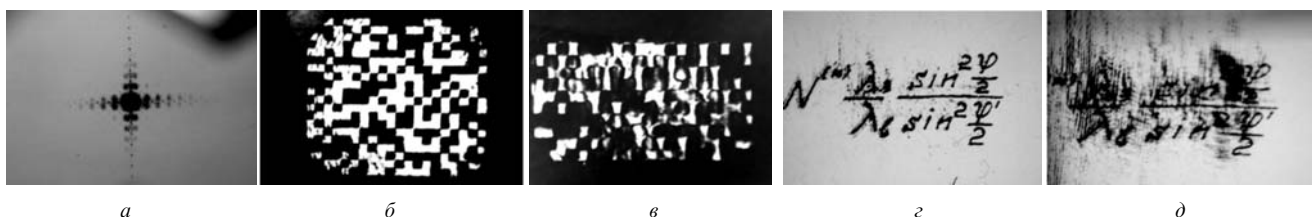


Рис.2. Фурье-спектр двумерного объекта (а), бинарное изображение, воспроизведённое объемной волной (б) и волноводной модой (в), полутоновое изображение, воспроизведённое объемной волной (г) и волноводной модой (д).

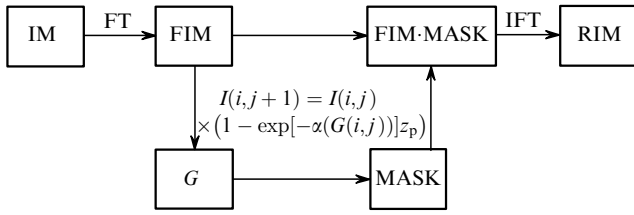


Рис.3. Компьютерная модель процесса записи–воспроизведения волноводной голограммы:

IM – исходное изображение; FIM – фурье-спектр IM, полученный путем дискретного преобразования Фурье;  $I(i, j)$  – амплитуда поля волноводной моды на элементе фоторезиста  $(i, j)$  при воспроизведении волноводной голограммы; MASK – матрица, отражающая распределение амплитуды волноводной моды в области волноводной голограммы при ее воспроизведении; RIM – выходное изображение, обладающее дефектами вследствие неравномерного распределения света в волноводе;  $\alpha(G(i, j))$  – коэффициент вывода мощности в зависимости от глубины решётки  $G$  на элементе  $(i, j)$ ;  $G(i, j)$  – усредненная глубина волноводной решетки на элементе  $(i, j)$ ; FT – преобразование Фурье; IFT – обратное преобразование Фурье.

ния Matlab 6.0 с использованием пакета Image Processing Toolbox.

Объектами исследования служили бинарные и полутоновые дискретные изображения. Результатами расчётов по данной модели являлись представления этих объектов с искажениями, вносимыми волноводными голограммами. Упрощённая схема модели приведена на рис.3. Рассмотрим процесс записи волноводной голограммы, используемой в модели.

Исходное изображение  $IM(z, y)$  подаётся на вход системы. Затем оно подвергается дискретному преобразованию Фурье, что эквивалентно преобразованию, осуществляемому над объектным пучком при прохождении им линзы, которая расположена на фокусном расстоянии как от транспаранта, так и от волновода. Интерференционная картина, возникающая при совмещении объектного пучка с опорным (плоская волна) в плоскости фоторезиста, отражается в глубине решетки, получаемой при последующем травлении. Вследствие того, что рассматриваемая регистрирующая среда является квадратичным фотоприёмником, глубина решётки  $G_0(z, y)$  пропорциональна квадрату амплитуды поля объектного пучка, т. е.

$$G_0(z, y) = T(\text{FIM})^2(z, y), \tag{1}$$

где  $T$  – коэффициент травления, который учитывает химический свойства фоторезиста, влияние веществ-реагентов, времени экспозиции, реакций травления и пр. Предполагается, что значения данного показателя могут варьироваться в достаточно широком диапазоне. Площадь волновода в области голограммы разбивается на конечное число элементов  $N \times M$ , где  $N$  и  $M$  – число отсчетов в записываемом спектре;  $i = 1, 2, \dots, N$ ;  $j = 1, 2, \dots, M$ ,  $G(i, j)$  – постоянная в пределах элемента  $(i, j)$  глубина решётки, которая является усреднённым значением на этом участке исходной решетки  $G_0(z, y)$ . Размеры площадки составляют  $1.25 \times 1.25$  мм, и при  $N$  и  $M$  менее 500 размер отдельного элемента в несколько раз больше периода интерференционной картины, что необходимо для правильного расчета.

Процесс воспроизведения волноводной голограммы в модели в целом аналогичен процессу записи, за исключением возникающей при волноводном воспроизведении

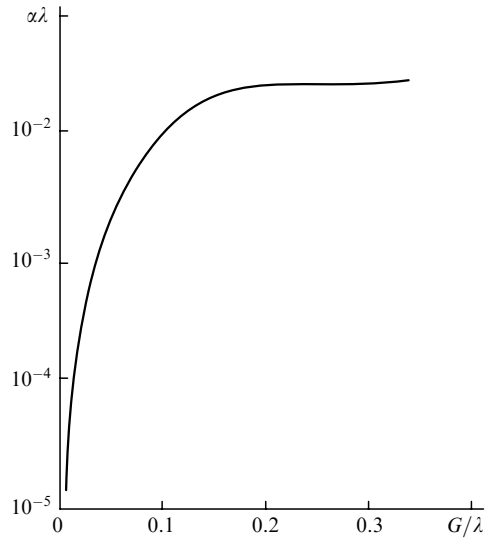


Рис.4. Зависимость  $\alpha\lambda$  от нормированной глубины решетки  $G/\lambda$ .

неоднородности освещения голограммы. Пусть свет в волноводе распространяется вдоль оси  $z$ . Тогда процесс затухания волны вследствие вывода света на гофре описывается следующим выражением:

$$I = I_0 \exp[-\alpha(z, y)z], \tag{2}$$

где  $I_0$  – интенсивность волноводной моды на входе голограммы;  $\alpha$  – коэффициент вывода мощности. При этом предполагается, что часть энергии излучения на участке выводится в направлении первого порядка дифракции в подложку. Остальная часть выводимой из волновода энергии излучения в данном случае не рассматривается, т. к. она направлена в подложку и является зеркальной копией излучения, идущего в первый порядок дифракции, с теми же искажениями.

Для нашего разбиения регистрирующей среды на элементы вышедшая из элемента  $(i, j)$  энергия излучения, участвующая в формировании изображения, примет следующий вид:

$$I_d(i, j) = 0.5I(i, j)\{1 - \exp[-\alpha(G(i, j))]z_p\}, \tag{3}$$

где  $\alpha(G(i, j))$  – коэффициент вывода мощности, зависящий от глубины решётки на элементе  $(i, j)$  (рис.4);  $z_p$  – размер элемента фоторезиста вдоль оси  $z$ .

Зависимость  $\alpha(G(i, j))$  была получена в экспериментах с записью периодических решеток и описана в работах [4, 5]; там же показано достаточно хорошее совпадение этих данных с расчётными по методу связанных волн. Как видно из рис.4, эта зависимость носит существенно нелинейный характер при больших глубинах решётки.

Таким образом, световое распределение в волноводе в области записанной решётки может быть представлено с помощью некоторой матрицы MASK с размерами  $N \times M$  ( $\text{MASK}(i, j) = I_d(i, j)/I_0$ ). Поскольку свет, вносящий вклад в формируемое в дальней зоне изображение, дополнительно промодулирован искажающим сигналом MASK, распределение амплитуды поля в пучке, выходящем из волновода, может быть выражено как произведение амплитуды записанного на голограмме сигнала и сигнала MASK. Проведя обратное преобразование Фурье, получим конечное изображение RIM.

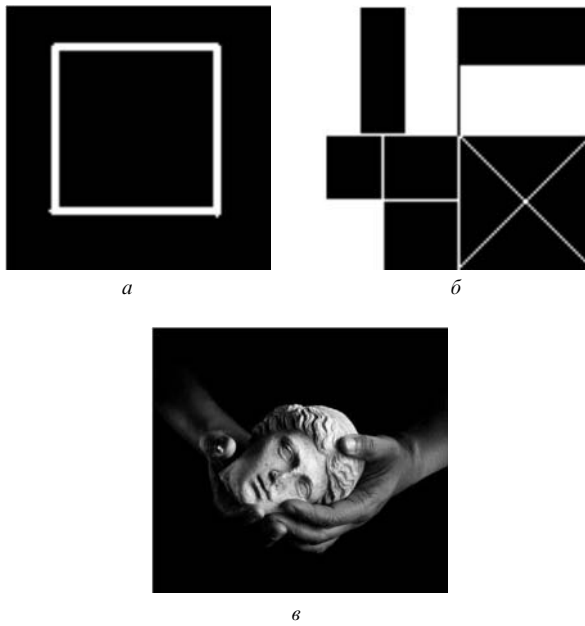


Рис.5. Бинарное изображение 1, 100 × 100 точек (а), бинарное изображение 2, 100 × 100 точек (б) и полутоновое изображение 3, 468 × 414 точек (в).

#### 4. Оценка качества воспроизводимого изображения

Оценка качества воспроизводимого изображения проводилась в два этапа. На первом этапе исследовалась зависимость качества от изменения коэффициента травления  $T$ , на втором рассматривалось влияние размеров и взаимного расположения элементов исходного изображения на качество реконструируемого. В обоих случаях

оценкой качества служила среднеквадратичная ошибка MSE [6–8], определяемая следующей формулой:

$$MSE(RIM - IM) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (RIM(i,j) - IM(i,j))^2 / \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M IM(i,j)^2 \quad (4)$$

Этап 1. На этом этапе в качестве тестируемых изображений использовались бинарные изображения 1, 2 и полутоновое (256 уровней серого) изображение 3 (рис.5).

Зависимости MSE от коэффициента травления  $T$  приведены на рис.6. Хорошо прослеживается резкий рост ошибки в области  $10^{-12}$  для изображений 1, 2 и в области  $10^{-20}$  для изображения 3. В дальнейшем наблюдается стабилизация ошибки, что связано с насыщением коэффициента рассеяния  $\alpha$  и с выходом за линейный участок условий воспроизведения.

На рис.7 приведена зависимость дифракционной эффективности  $\eta$  волноводной голограммы от коэффициента травления  $T$ . Видно, что для всех тестируемых изображений характерно следующее поведение  $\eta$ : линейный рост при малых значениях коэффициента  $T$ , а затем переход в насыщение при  $\eta = 1$ . Сравнивая рис.6 и 7, можно отметить, что для снижения ошибки в реконструируемом сигнале необходимо уменьшать коэффициент  $T$ , тогда как для повышения эффективности вывода света из волновода  $T$  необходимо повышать, т. е. увеличивать глубину гофра. Если в качестве допустимой ошибки в реконструируемом изображении принять значение MSE, равное  $10^{-2} - 10^{-3}$ , то дифракционная эффективность для тестируемых бинарных изображений 1 и 2 составит 1 %–5 % и 0.1 %–1 % соответственно, а для полутонового изображения 3 величина  $\eta = 0.001\% - 0.01\%$ .

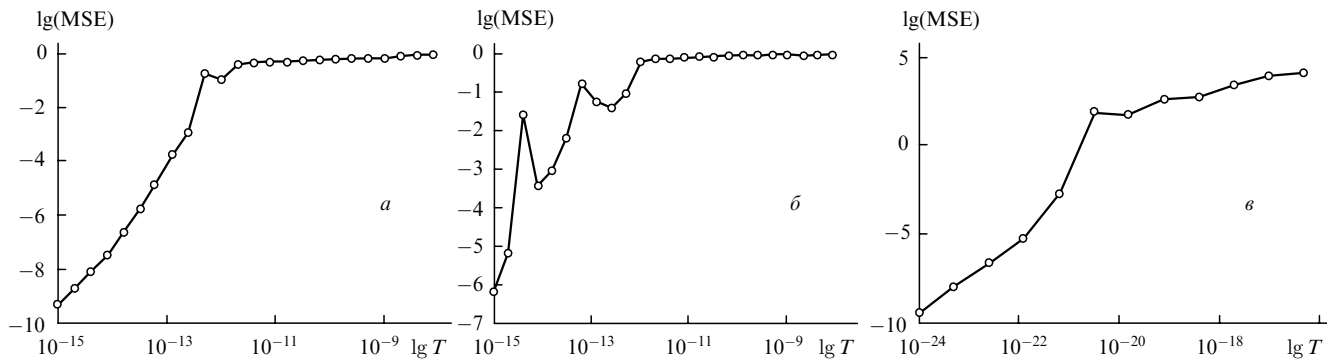


Рис.6. Зависимость ошибки MSE от коэффициента травления  $T$  для бинарных изображений 1 (а), 2 (б) и полутонового изображения 3 (в).

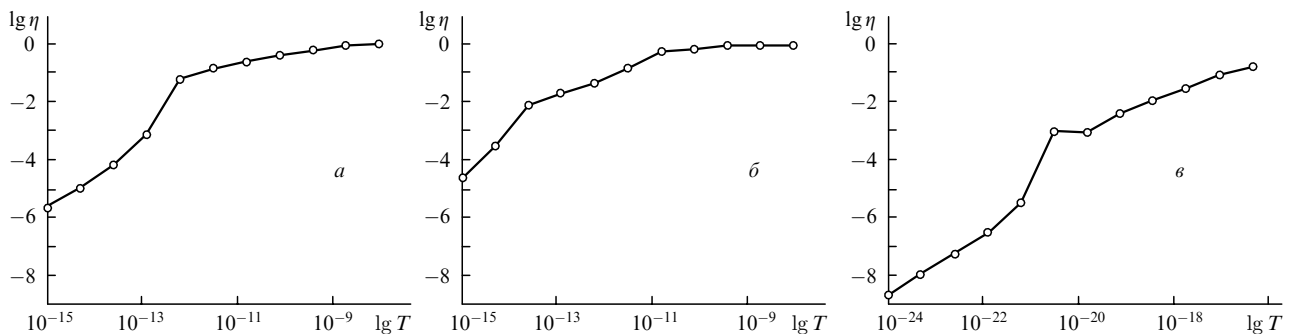


Рис.7. Зависимость дифракционной эффективности  $\eta$  волноводной голограммы от коэффициента травления  $T$  для бинарных изображений 1 (а), 2 (б) и полутонового изображения 3 (в).

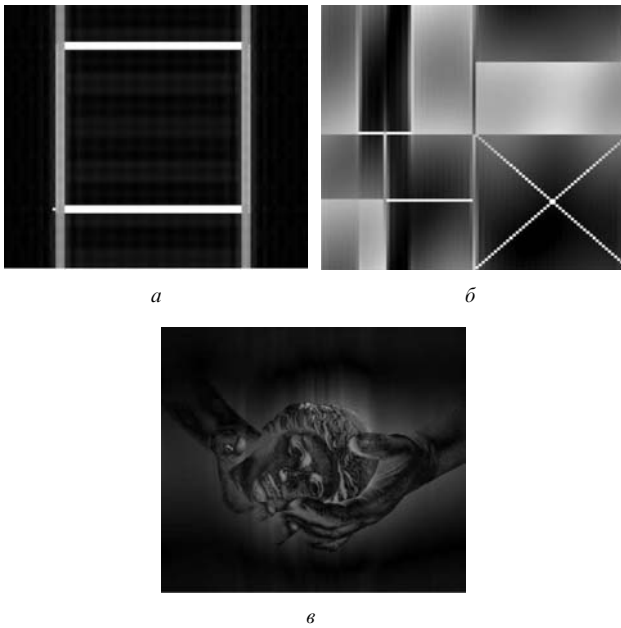


Рис.8. Восстановленные изображения 1 (а), 2 (б) и 3 (в).

Как видно из приведенных оценок, изображение 3 (256 уровней серого) обладает гораздо большим уровнем шумов и меньшей дифракционной эффективностью по сравнению с бинарными изображениями. Следовательно, при работе с подобными изображениями приемлемого качества показатели дифракционной эффективности волноводной голограммы будут относительно невысокими.

На рис.8 приведены примеры восстановленных изображений 1, 2 и 3. Хорошо просматривается характер искажений, возникающих при волноводном способе их воспроизведения. Для изображения 1 характерно появление полос вдоль сторон квадрата, перпендикулярных направлению распространения волноводной моды. При увеличении коэффициента вывода мощности полосы начинают уширяться и расщепляться, при этом качество изображения сторон квадрата, параллельных направлению распространения волноводной моды, остается приемлемым при довольно высоких значениях  $\alpha$ . Для изображения 2 характерно появление ложных линий, а также существенное нелинейное изменение интенсивности в отдельных областях изображения; подобные искажения можно заметить и на фотографии, приведенной на рис.2,д. При использовании «бинарных» фотодетекторов такие искажения могут привести к ложному детектированию отдельных участков. При восстановлении полутонного изображения 3 возникает сильный ореол вокруг его информативных участков. Кроме того, сильно подавляются низкие пространственные частоты, в результате чего происходит обращение части изображения (выглядит как негатив). Следует отметить, что на всех рассмотренных изображениях наблюдалось появление высокочастотного шума, уровень которого возрастал с увеличением  $\alpha$ .

Эксперименты по исследованию зависимости качества реконструируемого изображения от угла  $\phi$  падения волноводной моды на голограмму показали, что этот параметр существенно влияет на характер шумов, наблюдаемых в восстановленном изображении, особенно при асимметричном спектре Фурье.

**Этап 2.** При разработке планарных голографических запоминающих устройств особое значение приобретает

выбор геометрии модулятора света, формирующего изображение при записи волноводной голограммы, поскольку нами обнаружена сильная зависимость качества изображения от параметров записываемой информации. Для изучения влияния размеров и взаимного расположения элементов пространственно-временного модулятора света (ПВМС), формирующего исходное изображение, на качество реконструируемого была выбрана следующая нормировка для коэффициента травления  $T$ :

$$\max [|TFIM(i,j)|^2 / \lambda] = 0.3, \tag{5}$$

где  $\lambda$  – длина волны записывающего света (в настоящей работе  $\lambda = 0.6 \times 10^{-6}$  м). Выбор такой нормировки обусловлен зависимостью коэффициента  $\alpha$  от глубины решетки  $G$  (см. рис.4) (при  $G/\lambda > 0.3$  качество восстанавливаемого изображения сильно падает, т.к. записываемая информация теряется вследствие насыщения на кривой травления). Для использованных на первом этапе изображений 1, 2, 3 коэффициент травления  $T = 3.3 \times 10^{-13}$ ,  $1.3 \times 10^{-14}$  и  $5.9 \times 10^{-21}$  соответственно. При этих значениях качество воспроизводимого изображения является удовлетворительным (см. рис.6).

На этом этапе в качестве рабочих были использованы бинарные изображения, состоящие из квадратов и кругов, центры которых находятся в узлах наложенной на изображение сетки, что соответствует конфигурации типичных ПВМС. Вероятность появления в узле сетки фигуры равна 0.8. Фигуры во всех узлах сетки имеют одинаковые геометрические параметры. Размер тестируемых

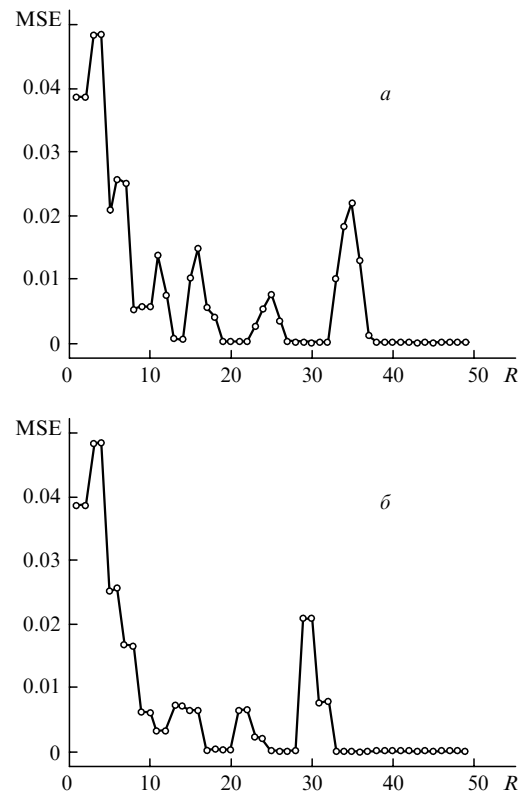


Рис.9. Зависимости ошибки MSE от размера элемента  $R$  в узле наложенной сетки с шагом 50 точек (вероятность появления элемента в узле сетки равна 0.8) для круга радиусом  $R$  (а) и квадрата со стороной  $R$  (б).

изображений составляет  $500 \times 500$  точек, шаг сетки по вертикали и горизонтали – 50 точек. Выбор подобных изображений обуславливается попыткой оценить влияние геометрических размеров, формы и взаимного расположения «активных» ячеек ПВМС на качество воспроизводимого изображения. Данная оценка, проведенная для конкретного записываемого двумерного объекта (в эксперименте он взят случайным образом), поможет определить оптимальную структуру ПВМС записывающей системы.

Исследовалась зависимость среднеквадратичной ошибки MSE от размеров фигур, находящихся в узлах решетки. Для кругов радиус  $R$  изменялся в диапазоне 1 – 50 точек, сторона квадрата изменялась в том же диапазоне. С целью уменьшения паразитных шумов в реконструированном изображении обработка разностного изображения осуществлялась в узлах решетки в области используемой фигуры текущего размера (круга радиусом  $R$  или квадрата). Полученные зависимости приведены на рис.9.

Как видно из рис.9, MSE, а следовательно, и отношение сигнал/шум, падает с ростом  $R$  и, начиная с некоторого значения ( $R = 38$  точек для кругов и  $R = 33$  точки для квадратов), стремится к нулю. Однако при определенном отношении  $R/R_{\max}$  ( $R_{\max} = 50$ ) наблюдается значительное увеличение шума, поэтому не следует использовать ПВМС с такими параметрами. С другой стороны, при достаточно большом отношении  $R/R_{\max}$  может возникнуть проблема физической компоновки фотодетекторов, применяемых для приёма изображения (предполагается, что области детектирования отдельного фотодетектора и используемого элемента совпадают); в то же время при меньших значениях  $R$  существуют точки с низким MSE. Их использование позволяет решить проблему физичес-

кой компоновки фотодетекторов. Однако для нахождения подобных точек требуется предварительный анализ класса обрабатываемых изображений.

## 5. Выводы

Таким образом, проведенные исследования показали, что вид регистрируемой двумерной информации оказывает сильное влияние на уровень шумов в восстановленном изображении, поскольку мощность воспроизводящей волноводной моды неравномерно распределена по записанному на голограмме фурье-спектру.

Повышение дифракционной эффективности голограмм неодинаково влияет на воспроизведение высоких и низких пространственных спектральных составляющих записываемого изображения, что вызывает его характерные искажения. Запись полутонных изображений наиболее чувствительна к нелинейностям волноводного воспроизведения голограмм.

Значительно снизить нелинейные шумы голограмм можно с помощью оптимизации схемы записи и применения фазовых масок для перемешивания спектральных составляющих регистрируемой информации по площади голограммы.

1. Putilin A.N., Miler M. *Photonics and Optoelectronics*, **2**, 21 (1994).
2. Shariv I., Amitai Y., Friesem A.A. *Opt. Lett.*, **18**, 1268 (1993).
3. Putilin A.N. *Proc.SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1621**, 93 (1994).
4. Тамир.Т. *Интегральная оптика* (М.: Мир, 1978 ).
5. Yamamoto Y., Kamiya T., Yanai H. *IEEE J. Quantum Electron.*, **14**, 245 (1978) .
6. Колфильд Г. *Оптическая голография* (М.: Мир, 1982).
7. Lukosz W., Wuthrich A. *Opt. Commun.*, **19**, 272 (1976).
8. Lukosz W., Wuthrich A. *Appl. Phys.*, **21**, 562 (1980).