

М Ф И З И К И И Т Е Х Н И К И

С.Б. Одинокоев

Методы и оптико–
электронные приборы
для автоматического
контроля подлинности
защитных голограмм



ТЕХНОСФЕРА

УДК 681.7.06
ББК 22.343.4
О42

О42 Одиноков С.Б.

Методы и оптико-электронные приборы для автоматического контроля подлинности защитных голограмм.

Москва: Техносфера, 2013. – 176 с. + 2 с. цв. вклейки
ISBN 978-5-94836-348-6

Данная книга обобщила оригинальные научно-технические результаты в области разработки и создания оптико-электронных средств идентификации и контроля подлинности защитных голограмм, полученные автором в рамках выполнения прикладных исследований, проводимых в рамках целевых программ Министерства образования и науки РФ, по заданиям государственных и коммерческих организаций.

Книга открывает перспективы для дальнейших исследований в области применения, проектирования и исследования оптико-электронных и лазерных систем автоматического контроля подлинности документов с нанесенными на них защитными голограммами.

Издание будет полезно как для ученых и специалистов, работающих в сфере голографических технологий, защиты от подделки и контроля подлинности документов, ценных бумаг, денежных знаков и другой продукции, так и для студентов и молодых специалистов, обучающихся и желающих работать в данной области науки и техники.

УДК 681.7.06
ББК 22.343.4

© 2013, С.Б. Одиноков
2013, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-348-6

Содержание

Введение	10
Глава 1. Классификация видимых и скрытых оптических элементов и изображений защитных голограмм	22
1.1. Общие сведения о методах получения защитных голограмм	22
1.1.1. Аналоговый метод получения защитных голограмм на основе радужных голограмм Бентона	22
1.1.2. Цифровой метод получения защитных голограмм по технологии дот-матрикс	23
1.1.3. Цифровой метод получения защитных голограмм по технологии электронно-лучевой литографии	25
1.1.4. Основные этапы серийной технологии изготовления защитных голограмм	26
1.2. Основные типы элементарных дифракционных и голограммных оптических элементов, используемых при получении защитных голограмм	28
1.3. Основные типы видимых изображений, восстанавливаемых с защитных голограмм при визуальном наблюдении	31
1.3.1. Двумерные (плоские) изображения типа 2D	31
1.3.2. Двухплановые стереоизображения типа 2D/3D	31
1.3.3. Трехмерные изображения типа 3D	32
1.3.4. Двухракурсные изображения типа 2D/3D с эффектом переключения	32
1.3.5. Изображения в псевдонатуральных цветах	32
1.3.6. Изображения, воспроизводящие динамические эффекты псевдодвижения отдельных элементов и деталей (кинеграммы)	32
1.4. Основные типы скрытых изображений, восстанавливаемых с защитных голограмм с помощью оптических приборов для визуального наблюдения	33
1.4.1. Скрытые изображения в виде микротекстов и нанотекстов	34
1.4.2. Скрытое изображение в виде линзы Френеля	34
1.4.3. Скрытые изображения, воспроизводимые лазерными оптическими приборами для визуального наблюдения	36
Глава 2. Методы кодирования–декодирования скрытых изображений, получаемых в виде дополнительных субголограмм на защитных голограммах	40
2.1. Оптический аналоговый метод кодирования–декодирования скрытых изображений с помощью амплитудно-фазовых масок при получении субголограмм	40

2.1.1. Оптическая схема получения субголограмм амплитудно-фазовой кодирующей маской в предметной ветви	44
2.1.2. Оптическая схема получения субголограмм с амплитудно-фазовой кодирующей маской в опорной ветви	48
2.1.3. Анализ влияния погрешности позиционирования амплитудно-фазовой кодирующей маски при восстановлении с субголограмм скрытых кодированных изображений	50
2.2. Оптико-цифровой метод кодирования—декодирования скрытых изображений с помощью амплитудного транспаранта при получении субголограмм	56
2.2.1. Классификация скрытых кодированных бинарных изображений, получаемых в виде дополнительных субголограмм на защитных голограммах	59
2.2.2. Цифровой метод формирования и обработки входного и эталонного скрытых кодированных бинарных изображений, восстановленных с субголограмм	60
Глава 3. Оптические и оптико-электронные приборы для визуального контроля подлинности защитных голограмм со скрытыми изображениями	63
3.1. Оптические и оптико-электронные приборы российских производителей	63
3.2. Оптические и оптико-электронные приборы зарубежных производителей	70
Глава 4. Обобщенная структурная схема оптико-электронного прибора для автоматического контроля подлинности защитных голограмм со скрытыми кодированными изображениями	77
4.1. Идентификация и контроль подлинности защитных голограмм методом сравнения входного и эталонного скрытых кодированных изображений	79
4.2. Структурная схема оптико-электронного прибора для автоматического контроля подлинности защитных голограмм с внутренним эталонным скрытым изображением	81
4.2.1. Структурно-функциональная схема оптико-электронного прибора контроля подлинности защитных голограмм с внутренними входным и эталонным скрытыми кодированными бинарными изображениями	82

4.3. Структурно-функциональная схема опико-электронного прибора для автоматического контроля подлинности защитных голограмм с вводом эталонного скрытого кодированного бинарного изображения из внешней памяти и базы данных	84
Глава 5. Теория модифицированного когерентно-оптического коррелятора с совместным преобразованием Фурье для автоматического контроля подлинности защитных голограмм со скрытыми кодированными изображениями	87
5.1. Математическая модель и анализ преобразования сигналов в оптической схеме получения матрицы нескольких субголограмм со скрытыми кодированными изображениями	89
5.1.1. Математическая модель оптического тракта получения матрицы нескольких субголограмм Фурье со скрытыми кодированными изображениями	89
5.1.2. Математическая модель оптического тракта получения матрицы нескольких субголограмм Фраунгофера со скрытыми кодированными изображениями	97
5.2. Математическая модель и анализ преобразования сигналов в оптическом тракте при восстановлении скрытых кодированных изображений	103
5.2.1. Анализ преобразования сигналов в оптическом тракте МКОК СПФ в плоскости восстановления входного и эталонного СКБИ	104
5.3. Отношение сигнал—шум и вероятность идентификации в модифицированном когерентно-оптическом корреляторе контроля подлинности защитных голограмм со скрытыми кодированными изображениями	109
5.3.1. Анализ влияния нелинейности экспозиционной характеристики рельефно-фазовой регистрирующей среды на коэффициент пропускания субголограммы	110
5.3.2. Анализ влияния нелинейности субголограммы на параметры корреляционных пиков в выходной плоскости МКОК СПФ	113
Глава 6. Когерентно-оптические корреляторы для контроля подлинности защитных голограмм со скрытыми кодированными изображениями	116
6.1. Когерентно-оптический коррелятор «Голокор-2» со скрытыми кодированными изображениями, восстановленными с субголограмм Фурье	116

6.2. Когерентно-оптический коррелятор «Голокор-3» с цифровой обработкой скрытых кодированных изображений, восстановленных с субголограмм Френеля	120
Глава 7. Теория когерентно-оптического спектроанализатора для автоматического контроля подлинности защитных голограмм со скрытыми изображениями	123
7.1. Математическая модель и анализ преобразования сигналов в оптической схеме когерентно-оптического спектроанализатора для обработки скрытых изображений	124
7.1.1. Математическая модель пространственно-частотного спектра СБИ, восстановленного с субголограммы	125
7.1.2. Компьютерное моделирование пространственно- частотного спектра скрытого изображения, восстановленного с субголограммы	130
7.2. Анализ параметров и характеристик пространственно- частотного спектра скрытого изображения, восстановленного с субголограммы	132
7.2.1. Интегральные параметры пространственно-частотного спектра скрытого изображения, восстановленного с субголограммы	133
7.2.2. Точечные параметры пространственно-частотного спектра скрытого изображения, восстановленного с субголограммы	135
7.2.3. Комбинированные интегрально-точечные характеристики пространственно-частотного спектра скрытого изображения, восстановленного с субголограммы	136
7.3. Математическое описание процесса контроля подлинности защитных голограмм методом сравнения параметров пространственно-частотных спектров входного и эталонного скрытых изображений, восстановленных с субголограмм	137
7.3.1. Корреляционный алгоритм контроля подлинности защитных голограмм по массивам интегральных параметров пространственно-частотных спектров входного и эталонного скрытых изображений	138
7.3.2. Корреляционный алгоритм контроля подлинности защитных голограмм по массивам КИТ-параметров входного и эталонного скрытых изображений	139
Глава 8. Оптические спектроанализаторы для контроля подлинности защитных голограмм	145
8.1. Когерентно-оптический спектроанализатор «Голоспектр-1»	146

8.2. Экспериментальные исследования макета некогерентно-оптического спектроанализатора «Голоспектр-2»	151
8.2.1. Оценка размытия ПЧС входного изображения при некогерентном освещении	152
8.3. Экспериментальные исследования макета некогерентно-оптического спектроанализатора «Голоспектр-2»	158
8.4. Компьютерное моделирование процесса идентификации ЗГ по массиву КИТ-параметров ПЧС входного и эталонного СБИ	162
8.4.1. Компьютерное моделирование процесса идентификации ЗГ на основе алгоритма прямого сравнения массивов ИС-параметров ПЧС входного и эталонного СБИ	164
8.4.2. Компьютерное моделирование процесса идентификации ЗГ корреляционным алгоритмом по массиву КИТ-параметров ПЧС входного и эталонного СБИ	165
Заключение	168
Литература	171

ГЛАВА I

КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДИМЫХ И СКРЫТЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗАЩИТНЫХ ГОЛОГРАММ

1.1. Общие сведения о методах получения защитных голограмм

В зависимости от используемых технологических установок и физического способа записи на регистрирующую среду интерференционных картин, элементарных дифракционных решеток (ЭДР), макро-, микро- и наноизображений различают следующие методы получения защитных голограмм [21–23, 33–34, 36–41, 46, 56, 68]:

- 1) **аналоговый метод**, при котором интерференционные картины, элементарные дифракционные решетки и другие элементы формируются методом интерференции двух когерентных лазерных пучков света и записываются на фоточувствительных регистрирующих материалах, при этом используются специализированные лазерно-оптические стенды и установки;
- 2) **цифровой метод**, при котором интерференционные картины, элементарные дифракционные решетки и другие элементы рассчитываются методами математического моделирования, формируются методами компьютерного синтеза, а затем записываются на фоточувствительных регистрирующих материалах с помощью лазерно-оптических стендов или на электронно-чувствительных регистрирующих материалах с помощью электронно-лучевых установок.

1.1.1. Аналоговый метод получения защитных голограмм на основе радужных голограмм Бентона

В начале 70-х годов Стефан Бентон изобрел тонкую (плоскую) радужную голограмму [14, 21, 33, 34], качественное изображение с которой может быть восстановлено в белом свете. Радужные голограммы представляют собой особый вид голограмм, получаемых с помощью интерференции света, в которых для уменьшения требований к когерентности восстанавли-

ливающего источника параллакс исключается в вертикальном направлении и остается в горизонтальном направлении. Бентоном был разработан двухступенчатый процесс получения радужной голограммы. Позже были разработаны одноступенчатые процессы получения радужных голограмм [34].

Главными достоинствами радужных голограмм являются:

- 1) возможность восстановления яркого и качественного голографического изображения при освещении источниками некогерентного белого света (лампами);
- 2) получение радужных голограмм в виде тонких рельефно-фазовых структур позволило разработать технологию их массового тиражирования (миллионами и более штук) способом горячего тиснения на специальных тонкопленочных материалах с использованием специального рольного оборудования [5–9, 21, 24];
- 3) готовая продукция выполняется в виде самоклеящихся этикеток или фольги горячего тиснения (по аналогии с полиграфической фольгой), позволяющих наносить радужные голограммы на бумажные, пластиковые или любые другие носители [5–9, 21, 24].

1.1.2. Цифровой метод получения защитных голограмм по технологии дот-матрикс

Цифровой метод оригинации ЗГ заключается в том, что физическое присутствие объекта на стенде не требуется, при этом элементарные дифракционные решетки и другие элементы рассчитываются в процессе математического моделирования, формируются методами компьютерного синтеза, вводятся в оптический тракт с помощью пространственных модуляторов света (ПМС-ЖК) и записываются на фоточувствительном материале с помощью лазерно-оптических станков, называемых технологическими установками типа дот-матрикс, выпускаемых под торговыми марками Sparckle и Kinemax [42–47]. Защитные голограммы, изготовленные по технологии дот-матрикс, состоят из множества мельчайших голопикселей, заполненных элементарными дифракционными решетками с различными периодами и угловой ориентацией (рис. 1.1). При освещении такой структуры белым светом происходит дифракция на решетках, в результате чего в направлении наблюдателя от каждой точки под требуемыми углами идут лучи света с различными длинами волн, формирующие объемные или плоские цветные изображения наблюдаемые глазами человека. Получаемый цвет зависит от углов падения белого света и наблюдения, периода и ориентации элементарной дифракционной решетки в голопикселе. Такие защитные голограммы имеют широкий угол обзора, повышенную яркость, имеют возможность введения различных дифракционных и голограммных оптических элементов и скрытых изображений (например эффекты движения).

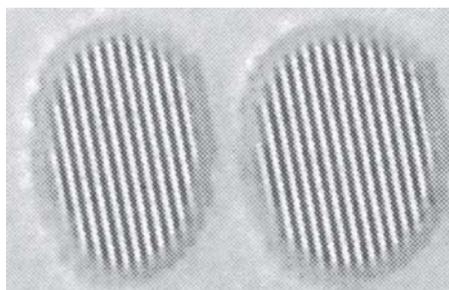


Рис. 1.1. Элементарная дифракционная решетка, полученная цифровым дот-матрикс-методом на лазерной установке типа Sparkle

Защитные голограммы, изготовленные по технологии дот-матрикс, позволяют получить больше разнообразных защитных элементов по сравнению с аналоговыми радужными голограммами и могут комбинироваться с ними. Размеры голопикселей в технологии дот-матрикс изменяются от 10×10 до 300×300 мкм, внутри которых формируются решетки с пространственными частотами от 600 до 1500 мм^{-1} (рис. 1.1). Стоимость получения мастер-оригиналов защитных голограмм по технологии дот-матрикс выше, чем при аналоговой технологии, но ниже, чем в технологии электронно-лучевой литографии.

В настоящее время основными мировыми производителями оборудования для производства ЗГ по технологии дот-матрикс являются компания OptoElectronic, модель Sparkle-I, II (Тайвань) [www.sparkle.com] и компания Polska Holography, модель Kinemax (Польша) [www.kinemax.com].

Сравнение особенностей голопикселей, получаемых по технологии дот-матрикс на установках этих производителей, позволяет выделить следующие различия.

Признак	Sparkle	Kinemax
Форма голопикселя	Овал	Прямоугольник (квадрат)
Граница голопикселей	Размытая	Более четкая
Распределение интенсивности света внутри голопикселя	По гауссовому закону	Квазиравномерно
Диапазон периодов в ЭДР	$0,6 \div 2$ мкм	$0,6 \div 2$ мкм
Характерные размеры голопикселей	От 25×25 мкм до 250×250 мкм	От 10×10 мкм до 500×500 мкм
Погрешность сшивки (стыковки) зон сканирования (рис 1.2б)	$\pm 1,5$ мкм	$\pm 0,5$ мкм
Зона одновременного формирования голопикселей (экран)	1 голопиксель, минимальным размером 10×10 мкм	270×210 мкм
Максимальный размер записываемой ЗГ	100×100 мм	100×100 мм

В установках Sparkle геометрическая форма голопикселя обусловлена особенностями формы и распределения интенсивности света в поперечном сечении лазерных пучков, а в установках Kinetaх геометрическая форма голопикселя корректируется с помощью апертурной диафрагмы, установленной в лазерных пучках.

В установке Kinetaх имеется возможность одновременного формирования голопикселей с помощью системы «ПМС-ЖК – проекционный высокоразрешающий объектив (0,4 мкм)», что наблюдается при микроскопических исследованиях в виде зон с голопикселями без погрешностей шивки (стыковки) максимальным размером 270×210 мкм.

1.1.3. Цифровой метод получения защитных голограмм по технологии электронно-лучевой литографии

В электронно-лучевой литографии (ЭЛЛ) в качестве регистрирующей среды используется электронно-чувствительный резист, нанесенный на хромированную стеклянную пластинку [21–23, 36–39]. Технической основой ЭЛЛ является использование сканирующего остросфокусированного электронного луча, движением и модуляцией интенсивности которого управляет компьютер. Подобный подход позволяет реализовать большую гибкость технологического процесса с точки зрения оперативности изменения топологии рисунка. В отличие от дифракционных ограничений фотолитографии, в ЭЛЛ элемент разрешения составляет величину 0,1–0,2 мкм, что в десятки раз меньше размеров голопикселя в технологии дот-матрикс, а сами голопиксели имеют очень плотную упаковку. Типовая микроструктура элементарных дифракционных решеток для ЭЛЛ показана на рис. 1.4. В этой структуре элементарных дифракционных решеток отсутствует типичный для лазерной технологии спекл-шум («пятенная» микроструктура) и имеет место плотная упаковка пикселей, заполненных элементарными дифракционными решетками. Кроме того, геометрическая форма и конфигурация пикселей может быть любая – квадратно-прямоугольная, шестигранная и др. [8]. В технологии ЭЛЛ используются очень дорогостоящие электронно-лучевые литографы, установленные на виброизолированном фундаменте в чистых помещениях с системами очистки воздуха и термостабилизации. Стоимость получения мастер-оригиналов защитных голограмм по технологии ЭЛЛ достаточно высокая.

В настоящее время основными мировыми производителями оборудования для производства ЗГ по технологии электронно-лучевой литографии являются:

- компания CarlZeissJena (ГДР, 1980–1991), выпускающая модели ZBA-20, 21, 30, 31, X; наиболее часто для оригинации ЗГ цифровым методом используется установка ZBA-21;
- компания Joel (Япония) – модели JBX-5500FS;

– компания Zeiss (Германия) – модель MA-10 с литографической головкой Raith (RAITH150-TWO), а также компанией Leitz (Германия).

Электронные литографы выпускаются также и другими компаниями в США. Сравнение особенностей голопикселей, получаемых по технологии электронно-лучевой литографии на установках этих производителей, позволяет выделить следующие различия.

Признак	ZBA-21	JBX-5500FS; RAITH150-TWO
Форма голопикселя	Квадратно-прямоугольная, шестигранная, в виде фигур Эшера	Квадратно-прямоугольная, шестигранная, в виде фигур Эшера
Граница голопикселей	Четкая	Четкая
Распределение интенсивности света внутри голопикселя	Квазиравномерно	Квазиравномерно
Разрешающая способность при записи ЗГ	Не менее 0,4 мкм (на лучших образцах установок)	Joel – 0,09 мкм, Leitz – 0,10 мкм, Zeiss – 0,10 мкм
Зона сканирования электронным пучком (штамп)	300 × 300 мкм	Joel – 300 × 300 мкм, Leitz – 150 × 150 мкм, Zeiss – 100 × 100 мкм
Погрешность сшивки (стыковки) зон сканирования (рис. 1.4)	±0,15 мкм	Joel – ±0,01 мкм, Leitz – ±0,01 мкм, Zeiss – ±1 мкм
Максимальный размер записываемой ЗГ	90 × 90 мм	20 × 20 мм

1.1.4. Основные этапы серийной технологии изготовления защитных голограмм

Основные этапы серийной технологии получения защитных голограмм включают [21, 36–41]:

1 этап. Оригинация – изготовление мастер-оригинала голограммы одним из перечисленных выше способов на фотоматериале, нанесенном на стеклянную подложку, при котором формируется рельефно-фазовая голограмма с глубиной поверхностного рельефа в пределах 0,1–0,5 мкм;

2 этап. Мастеринг – изготовление с мастер-оригинала голограммы с помощью гальванического процесса металлической (обычно никелевой) мастер-матрицы, полностью повторяющей полученный поверхностный микрорельеф;

3 этап. Эмбоссирование – процесс переноса поверхностного рельефа, отвечающего за формирование голографического изображения, с металлизированной мастер-матрицы в соответствующий поверхностный рельеф на одном из слоев голографического материала методом горячего тиснения;

4 этап. Выполнение финишных операций, включающих в себя нанесение клеевого слоя, вырубку этикеток требуемого размера, разрезание на

рулоны нужной ширины или фреймы (листы) необходимого размера и многое другое.

Опτικο-физические методы и технология получения ЗГ создают у них **особые защитные свойства** [21, 36–42], главными из которых являются:

1 свойство – нано-микрометрические размеры элемента разрешения ЭДР в микроструктуре защитных голограмм.

Типовой диапазон размера элемента разрешения ЭДР в микроструктуре защитных голограмм изменяется в пределах от 2 до 0,2 мкм, что соответствует высокочастотному диапазону их пространственных частот в пределах от 500 до 5000 мм⁻¹;

2 свойство – оптико-физические эффекты голографических изображений.

Защитные голограммы при восстановлении могут создавать большое число разнообразных оптико-физических эффектов в голографических изображениях. Среди них следует отметить [21, 42–45, 47, 63] видимые изображения (плоские, трехмерные, цветные и др. изображения), наблюдаемые визуально глазами, и скрытые изображения (микротексты, микролинзы, микроизображения, изображения, восстанавливаемые в лазерном свете, и др.), не видимые невооруженным глазом, которые составляют основу защитных свойств голограмм;

3 свойство – технологические материалы.

При изготовлении и тиражировании ЗГ используются специальные многослойные пленочные материалы, содержащие отдельные слои для формирования ЗГ, клеевые слои с избирательным эффектом приклеивания, промежуточные восковые слои для защиты поверхности голограмм от царапин, слои, содержащие УФ- и ИК-краски, светящиеся всеми цветами, и т.д. Комбинация таких материалов и слоев приводит к тому, что возникают следующие варианты изготовления голограмм [42, 46, 57, 59]:

- 1) в виде самоклеящейся этикетки;
- 2) в виде фольги горячего тиснения (подобно полиграфической фольге).

При этом обеспечивается разрушаемость ЗГ: а) в случае самоклеящейся этикетки лавсановая основа (подложка) отрывается полностью или частично от голографического слоя, разрушая голографическое изображение; б) в случае фольги горячего тиснения слой с голограммой глубоко проникает в структуру документа (в микрорельеф и поры бумаги), а при попытке отделения приводит к полному разрушению голографического изображения. В обоих случаях любая попытка отделения (отрыва) ЗГ от документа приводит к тому, что ЗГ разрушается и это становится видно невооруженным глазом.

Таким образом, указанные выше, **1–3 свойства** позволяют говорить о **защитных голограммах** [5–8, 11, 21, 37, 42, 56].

1.2. Основные типы элементарных дифракционных и голограммных оптических элементов, используемых при получении защитных голограмм

При получении ЗГ внутри голограммы формируется микроструктура, содержащая следующие основные элементы [8, 21, 36–40]:

- 1) элементарные дифракционные решетки (ЭДР);
- 2) дифракционные и голограммные оптические элементы (ДОЭ, ГОЭ);
- 3) комбинированные дифракционно-голографические решетчатые структуры (ДГРС).

Под **элементарными дифракционными решетками (ЭДР)** понимаются дифракционные решетки, сформированные аналоговым или цифровым методами и зарегистрированные на фоточувствительном материале, имеющие микроразмерные периоды, макро- и микроразмеры пикселей квадратной или прямоугольной геометрической формы (голопиксели) [8, 21, 36–40].

В ЗГ используются два типа ЭДР:

- 1) высокочастотные ЭДР, имеющие следующие типовые параметры:
 - диапазон размеров элементов разрешения от 0,5 до 2 мкм;
 - диапазон пространственных частот от 2000 до 500 мм⁻¹ соответственно;
 - размеры пикселей от 10 × 10 до 100 × 100 мкм.
- 2) низкочастотные ЭДР, имеющие следующие типовые параметры:
 - диапазон размеров элементов разрешения от 5 до 100 мкм;
 - диапазон пространственных частот от 200 до 10 мм⁻¹ соответственно;
 - размеры пикселей от 100 × 100 до 1000 × 1000 мкм.

Для получения высокочастотных ЭДР с периодом, равным 0,2 мкм, необходимо, чтобы при изготовлении элемент разрешения был равен 0,1 мкм. Такие параметры элементов разрешения выполняются аналоговым методом с помощью интерференционных установок или цифровым методом с помощью лазерно-оптических установок дот-матрикс и электронно-лучевых литографов. На рис. 1.2, 1.3, 1.4 показаны фотографии ЭДР, выполненные различными методами и технологиями.

Под **голограммными оптическими элементами (ГОЭ)** понимаются элементы с макро- и микрометрическими размерами, выполненные на основе ЭДР и зарегистрированные на фоточувствительном материале, преобразовывающие входные простые и сложные волновые фронты пучков света в выходные сложные волновые фронты [21, 36–41]. Характерным примером ГОЭ являются голографические диффузоры, преобразовывающие сферический волновой фронт от лазера в сложный волновой фронт рассеянного пучка света.

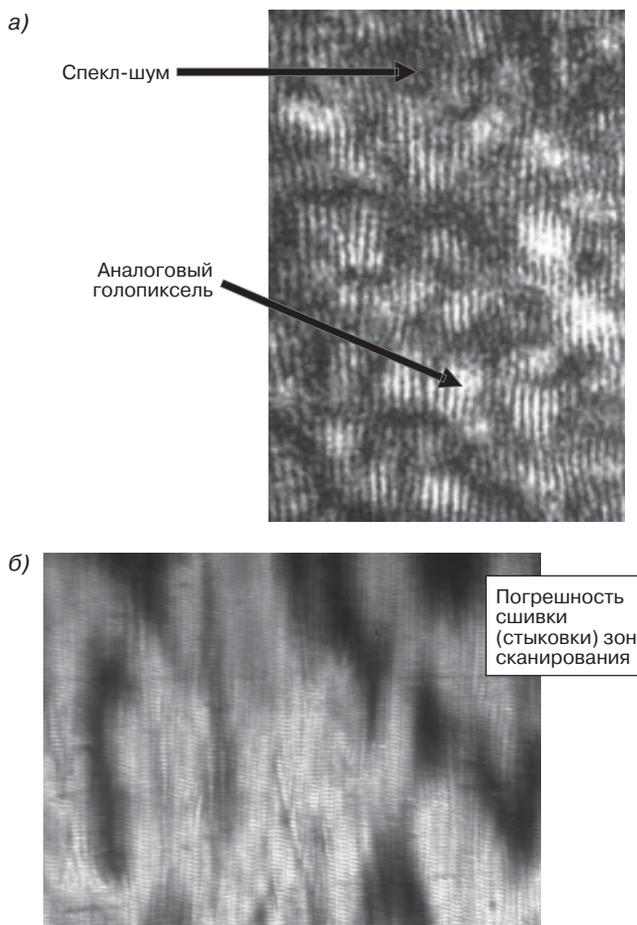


Рис. 1.2. Фотографии элементарных дифракционных решеток, полученных аналоговым методом интерференции света, со спекл-шумом (а); без спекл-шума (б)

Под **дифракционными оптическими элементами (ДОЭ)** понимаются элементы с макро- и микрометрическими размерами, выполненные на основе ЭДР и зарегистрированные на фоточувствительном материале, преобразовывающие входные простые волновые фронты пучков света в выходные простые волновые фронты [21, 36–41]. Характерными примерами ДОЭ являются микролинзы Френеля, преобразовывающие входной плоский волновой фронт в сферический волновой фронт, а также дифракционные «светоделители-отклонятели», разделяющие и отклоняющие по направлению простые волновые фронты.

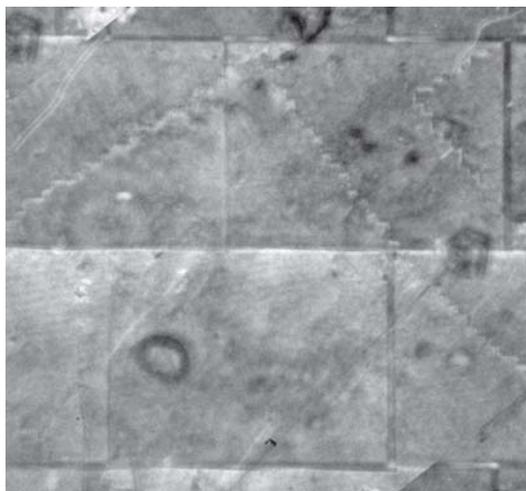


Рис. 1.3. Микрофотографии увеличенного участка ГОЭ-ДОЭ, изготовленного по технологии дот-матрикс, на установке типа Kinemax

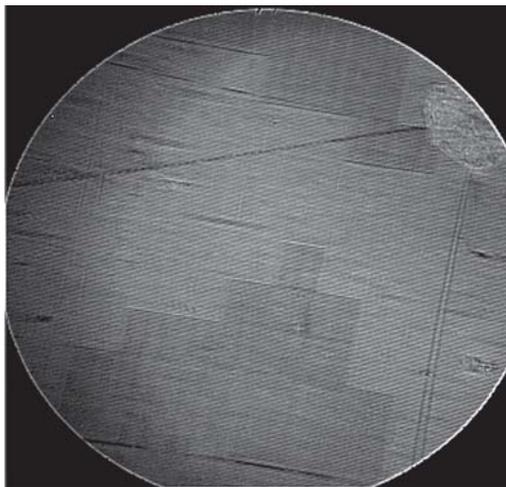


Рис. 1.4. Элементарная дифракционная решетка, полученная с помощью электронно-лучевого литографа

Под **комбинированными дифракционно-голографическими решетчатыми структурами (ДГРС)** понимаются элементы, выполненные на основе ЭДР, ДОЭ, ГОЭ и зарегистрированные на фоточувствительном материале, восстанавливающие с голограммы сложные волновые фронты пучков света в виде голографических видимых и скрытых изображений различных типов.

С помощью ЭДР, ГОЭ, ДОЭ, ДГРС в защитных голограммах формируются два основных типа голографических изображений:

- 1) видимые изображения, т.е. визуально наблюдаемые глазами плоские, трехмерные (объемные) и другие изображения;
- 2) скрытые изображения, т.е. невидимые невооруженным глазом изображения.

Далее рассмотрим их классификацию отдельно.

Такая совокупность видимых и скрытых изображений является основой современных ЗГ, значительно усложняет их технологию изготовления, приводит к повышению защитных свойств и степени защищенности ЗГ.

1.3. Основные типы видимых изображений, восстанавливаемых с защитных голограмм при визуальном наблюдении

Под **видимыми изображениями**, восстановленными с ЗГ, понимаются изображения, визуально наблюдаемые глазами человека-оператора.

Основными типами видимых изображений являются [8, 11, 21, 24, 36–41]:

- 1) двумерные (плоские) изображения типа 2D;
- 2) двух- или многоплановые разнесенные по глубине плоские стереоизображения типа 2D/3D;
- 3) трехмерные (объемные) изображения типа 3D;
- 4) двухракурсные изображения типа 2D/3D с эффектом переключения.

Каждое из этих изображений может иметь:

- цветные элементы или плавно изменяемую цветовую гамму;
- ахроматизированные (черно-белые) элементы, включая градации серого;
- кинеграммы, т.е. участки изображения, воспроизводящие эффекты динамики или движения отдельных элементов при повороте или наклоне голограммы;
- раздельно наблюдаемые участки при различных углах наблюдения (свитч-эффект переключения).

1.3.1. Двумерные (плоские) изображения типа 2D

Двумерные (плоские) изображения типа 2D (Two dimensional) представляют собой традиционные плоские изображения, получаемые и восстанавливаемые непосредственно в плоскости ЗГ.

1.3.2. Двухплановые стереоизображения типа 2D/3D

Двухплановые стереоизображения типа 2D/3D (Two dimensional/Three dimensional) представляют собой совокупность из двух (или более) плос-

ких изображений, расположенных друг за другом по глубине, т.е. выделяются тем, что с точки зрения наблюдателя изображение второго плана должно выглядеть «заглубленным» по отношению к изображению первого плана.

1.3.3. Трехмерные изображения типа 3D

Трехмерные изображения 3D (Three dimensional) представляют собой объемные изображения, восстановленные с ЗГ. Они получают аналоговым или цифровым методами с помощью интерференционных установок, лазерно-оптических установок дот-матрикс и электронно-лучевых литографов. Наиболее перспективным в настоящее время является цифровой метод, при котором трехмерные 3D-изображения синтезируются с помощью компьютерных технологий в виде трехмерных моделей, например в прикладной программе 3D Max-Studio.

1.3.4. Двухракурсные изображения типа 2D/3D с эффектом переключения

Двухракурсные изображения представляют собой плоские, двухплановые или трехмерные изображения типа 2D/3D, восстанавливаемые с ЗГ и наблюдаемые раздельно при изменении угла наблюдения в пределах $\pm(30-45)$ градусов относительно нормали к голограмме. Этот эффект называют эффектом переключения (switch-effect). Эффекты переключения очень привлекательны для визуального контроля голограмм. В одном и том же месте голограммы под разными углами можно наблюдать различные изображения. Причем переключения возможны при наклоне голограммы в горизонтальной и вертикальной плоскостях, а также при ее повороте в плоскости на ± 90 градусов [8, 21, 24].

1.3.5. Изображения в псевдонатуральных цветах

В этом случае цветное изображение формируется с помощью ЭДР аналоговым или цифровым методом. При этом цвета изображения несколько отличаются от оригинального изображения, что позволяет их оценивать как псевдоцвета.

1.3.6. Изображения, воспроизводящие динамические эффекты псевдодвижения отдельных элементов и деталей (кинеграммы)

Эти изображения характеризуются тем, что при наклоне ЗГ наблюдатель видит, как какой-либо объект «движется» от одного края к другому и обратно, при этом он может менять размер и форму. В зарубежной литературе этот эффект имеет также название «кинеграмма» (кинеграммный эффект) [8, 21, 24]. Часто кинематические эффекты применяются при создании гильоширных сеток. Структура такой сетки рассчитывается по