

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ М.В.ЛОМОНОСОВА**

---

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР**

На правах рукописи

**ГОНЧАРСКИЙ АНТОН АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СИНТЕЗА НАНООПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ 2D И 3D ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Специальности:

1.3.6. Оптика

1.2.2. Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

**ДИССЕРТАЦИЯ**

**на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук**

Москва – 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Актуальность темы исследования.....	5
Степень разработанности темы .....	6
Цели и задачи работы .....	11
Научная новизна .....	12
Теоретическая и практическая значимость работы .....	13
Положения, выносимые на защиту .....	14
Степень достоверности результатов .....	16
Апробация результатов .....	16
Личный вклад автора .....	17
Структура и объем диссертации .....	18
<b>Глава 1. Бинарные компьютерно-синтезированные нанооптические защитные элементы для формирования 2D-изображений с кинетическими эффектами движения.....</b>	<b>20</b>
Некоторые сведения о фазовых плоских дифракционных оптических элементах.....	20
1.1. Плоский оптический элемент – киноформ.....	22
1.2. Постановка задачи синтеза нанооптических элементов для формирования 2D-изображений с кинематическими эффектами движения .....	26
1.3. Метод расчёта диаграммы направленности в элементарных областях.....	30
1.4. Пример реализации нанооптического элемента, формирующего 2D-изображение с кинематическими эффектами движения .....	33
1.5. Постановка обратной задачи синтеза нанооптических элементов на основе бинарных линз Френеля, формирующих визуальные кинетические эффекты в 2D-изображениях .....	35
1.6. Выводы .....	41
<b>Глава 2. Многоградационные компьютерно-синтезированные нанооптические защитные элементы с эффектом смены изображения при повороте на 180 градусов .....</b>	<b>43</b>
2.1. Постановка обратной задачи компьютерного синтеза нанооптического защитного элемента с эффектом смены изображений при повороте на 180 градусов и метод её решения.....	43
2.2. Пример реализации нанооптического защитного элемента с эффектом смены изображений при повороте на 180 градусов. ....	50
2.3. Постановка обратной задачи компьютерного синтеза нанооптического защитного элемента с эффектом потери цветности при повороте на 180 градусов. ....	51
2.4. Пример реализации нанооптических элементов, формирующих эффект смены цветности изображений при повороте на 180 градусов.....	56

2.5. Электронно-лучевая технология изготовления микрорельефа плоских элементов в оптическом диапазоне.....	57
2.6. Выводы.....	62
<b>Глава 3. Обратные задачи синтеза нанооптических элементов для формирования 2D-изображений с полным параллаксом. ....</b>	<b>64</b>
3.1. Идея синтеза нанооптических защитных элементов для формирования 2D-изображений с полным параллаксом.....	64
3.2. Примеры реализации нанооптических элементов, формирующих 2D-изображения с кинетическими эффектами движения с полным параллаксом в выделенных областях.....	69
3.3. Нанооптические элементы, формирующие 2D-изображения с кинетическими эффектами движения на всей области оптического элемента.....	72
3.4. Примеры реализации многоградационных нанооптических элементов с кинематическими эффектами движения на всей области оптического элемента.....	94
3.5. Выводы.....	97
<b>Глава 4. Задачи компьютерного синтеза нанооптических защитных элементов для формирования 2D-изображений с кинетическими эффектами движения фрагментов по одной из координат.....</b>	<b>99</b>
4.1. Постановка и методы решения обратной задачи компьютерного синтеза нанооптических элементов для формирования 2D-изображений с кинетическими эффектами движения фрагментов по одной из координат.....	99
4.2. Пример реализации нанооптического элемента для формирования 2D-изображений с кинетическими эффектами движения фрагментов по одной из координат.....	115
4.3. Выводы.....	116
<b>Глава 5. Разработка методов синтеза нанооптических элементов для формирования 3D-изображений с полным параллаксом.....</b>	<b>118</b>
5.1. Обратные задачи синтеза нанооптических элементов для формирования 3D-изображений.....	118
5.2. Постановка обратной задачи и методы расчёта микрорельефа бинарных нанооптических элементов для формирования 3D-изображений с полным параллаксом.....	121
5.3. Пример реализации бинарного нанооптического элемента для формирования 3D-изображений с полным параллаксом.....	127
5.4. Постановка задачи синтеза многоградационных нанооптических элементов для формирования 3D-изображений нулевого порядка и методы ее решения.....	130
5.5. Пример реализации многоградационного нанооптического элемента для формирования 3D-изображения нулевого порядка.....	137
5.6. Выводы.....	139
<b>Глава 6. Разработка методов синтеза нанооптических элементов для формирования эффекта смены двух 3D-изображений.....</b>	<b>141</b>

6.1. Постановка задачи синтеза нанооптических элементов для формирования эффекта смены двух 3D-изображений .....	141
6.2. Методы расчета и технология синтеза нанооптических элементов, формирующих эффект смены двух 3D-изображений .....	144
6.3. Пример реализации нанооптического элемента для формирования эффекта смены двух 3D-изображений .....	147
6.4. Выводы .....	149
<b>Глава 7. Разработка методов синтеза нанооптических элементов для формирования 3D-изображений на цилиндрической поверхности .....</b>	<b>151</b>
7.1. Постановка обратной задачи и методы расчёта микрорельефа нанооптического элемента на цилиндрической поверхности для формирования 3D-изображения.....	151
7.2. Пример реализации нанооптического элемента для формирования 3D-изображения на цилиндрической поверхности .....	156
7.3. Выводы .....	158
<b>Глава 8. Разработка нанооптических элементов для визуального и автоматизированного контроля с помощью смартфона .....</b>	<b>160</b>
8.1. Постановка обратной задачи синтеза и методы её решения .....	160
8.2. Автоматизированный контроль подлинности защитных нанооптических элементов с помощью смартфона.....	168
8.3. Выводы .....	170
<b>Глава 9. Разработка многоградационных нанооптических элементов и портативных приборов для автоматизированного контроля.....</b>	<b>172</b>
9.1. Выбор основных технических решений и разработка принципиальной оптической схемы прибора автоматизированного контроля .....	172
9.2. Разработка спец. признака для распознавания на основе сформированного CLR-изображения.....	181
9.4. Тестирование изготовленных образцов нанооптических элементов на стенде .....	188
9.5. Разработка алгоритмов распознавания образов для процедуры идентификации и их тестирование на стенде на базе персонального компьютера.....	192
9.6. Блок-схема прибора автоматизированного контроля .....	194
9.7. Элементы конструкции прибора автоматизированного контроля .....	195
9.8. Проведение итоговых испытаний прибора автоматизированного контроля .....	200
9.9. Выводы .....	202
<b>Заключение .....</b>	<b>202</b>
<b>Рекомендации по использованию результатов.....</b>	<b>205</b>
<b>Список литературы .....</b>	<b>209</b>

# ВВЕДЕНИЕ

## Актуальность темы исследования

*В данной главе используются материалы, опубликованные в статьях [A1], [A2].*

В 1819 году французская Академия Наук присудила премию Огюсту Френелю Гран-при за цикл работ по дифракции света и разработке плоских оптических элементов [1]. В работах Френеля был не только сформулирован принцип формирования плоских оптических элементов, но и разработан математический аппарат, описывающий дифракцию света в приближении, которое впоследствии получило название скалярной волновой модели Френеля. До настоящего времени модель Френеля является одной из основных математических моделей, используемых в оптике. Диссертация посвящена разработке методов синтеза плоских нанооптических элементов для формирования 2D и 3D изображений. Одним из основных приложений разработанных методов синтеза являются защитные оптические технологии.

Разработка методов синтеза защитных оптических элементов в настоящее время является актуальной темой. Первые защитные оптические элементы в больших тиражах появились более 30 лет назад [2]. Плоские рельефные голограммы украшают карты VISA и до сих пор, хотя уже давно не относятся к защитным элементам. Оригинал голограммы был записан аналоговым образом. Аналоговая запись голограмм достигла за 30 лет высокого уровня. Достаточно отметить, что площадь записанных аналоговыми методами на оптических столах оригиналов голограмм может превосходить 1 м<sup>2</sup> при очень высоком качестве.

Однако, наиболее быстро развивается направление, связанное с компьютерным синтезом защитных оптических элементов. Именно в этом направлении получены основные результаты в диссертации. Оптические защитные элементы можно контролировать визуально. Экспертный контроль предполагает использование дополнительного оборудования. Кроме визуального и экспертного контроля, хотелось бы иметь и приборы автоматизированного контроля защитных оптических элементов. Сформулируем основные требования, предъявляемые к признакам для визуального контроля защитных оптических элементов:

1. Защитные признаки должны быть легко контролируемы визуально
2. Оптический элемент должен быть надежно защищен от подделок
3. Оптические элементы должны допускать массовое тиражирование, что обеспечивает их низкую цену при массовом изготовлении

Диссертация посвящена разработке новых элементов оптической защиты банкнот, ценных бумаг, паспортов, ID, пластиковых карт, акцизных марок, брендов. В диссертации разработки новых оптических элементов ориентированы на использование электронно-лучевой

технологии формирования микрорельефа. Эта технология является наукоемкой и нераспространенной. Оборудование для электронно-лучевой технологии является очень дорогостоящим. Среди сотен компаний, работающих в области производства оптических защитных элементов, всего несколько могут позволить себе использование электронно-лучевой технологии для формирования микрорельефа. Точность формирования микрорельефа в разработанных в диссертации оптических элементах составляет 10 нм. По этой причине разработанные оптические защитные элементы получили название «нанооптических».

В диссертации разработаны не имеющие аналогов нанооптические элементы для визуального и экспертного контроля. Впервые в мире разработаны нанооптические элементы для автоматизированного контроля подлинности. Впервые разработан портативный прибор автоматизированного контроля весом не более 80 г, осуществляющий автоматизированный контроль. Ошибка правильной верификации составляет не более 0.1%.

### **Степень разработанности темы**

Первые плоские оптические элементы были предложены Огюстом Френелем в середине 19-го века. Плоский оптический элемент фокусировал свет в точку и получил название зонной пластинки Френеля. До середины прошлого века кроме дифракционных решеток и линз Френеля других плоских оптических элементов, по сути, разработано не было. Дело в том, что все задачи синтеза плоских оптических элементов относятся к обратным. По заданному изображению необходимо рассчитать фазовую функцию оптического элемента. Методы решения обратных задач получили развитие только в 70-х годах прошлого века.

Основные результаты в теории решения обратных задач были получены в работах российских математиков. К основополагающим результатам относятся работы академика Тихонова. Школе академика Тихонова принадлежат выдающиеся результаты, полученные в теории решения обратных задач. С математической точки зрения задача состоит в том, чтобы рассчитать приближенное значение разрывной функции, когда ее аргумент задан приближенно. Аргумент функции и ее значения принадлежат заданным функциональным пространствам. Следуя Тихонову такие задачи получили название некорректно поставленных. Сформулировано понятие регуляризирующего оператора как способа приближенного решения некорректных задач [3,4,5]. Разработаны численные методы решения широкого круга прикладных некорректно поставленных задач как линейных, так и нелинейных [6,7,8]. К числу последних относятся итерационные методы решения нелинейных операторных уравнений. В работах сибирских ученых получены фундаментальные результаты в области решения коэффициентных обратных задач [9-16].

Разработанные методы решения некорректно поставленных обратных задач позволили получить прорывные результаты в различных направлениях науки и техники [17], в том числе и в оптике тонких покрытий [18-23].

Важнейшим понятием в обратных задачах являются математические модели и математическое моделирование. В диссертации для решения обратных задач используются хорошо известные в оптике модель геометрической оптики и модель Френеля. С точки зрения последней, элемент называется плоским, если преобразование фазы падающего излучения происходит за счет дифракции света на его микрорельефе, глубина которого меньше или порядка длины волны света. Именно такие рельефные плоские оптические элементы изучаются в диссертации.

Важные результаты в области решения обратных задач синтеза плоских оптических элементов для формирования 2D изображений в когерентном свете относятся ко второй половине прошлого века. Первые работы по постановке задач синтеза плоских оптических элементов для фокусировки лазерного излучения появились в 80-х годах 20 века [24,25,26]. В это же время в модели геометрической оптики были разработаны методы синтеза плоских оптических элементов для фокусировки лазерного излучения в отрезок прямой с любой заданной интенсивностью сфокусированного излучения. Построенная фазовая функция является гладкой. При фокусировке в кривую фазовая функция является гладкой везде кроме быть может множества меры ноль [27,28].

Разработанные элементы нашли применение в задачах маркировки изделий, лазерной закалке, в коррекции волновых фронтов [29, A1, A2]. Элементы дифракционной оптики широко используются в обработке изображений, для формирования пучков ИК лазеров, для изготовления устройств на базе плоских микрооптических линз [30-39]. Плоская дифракционная оптика используется для формирования вихревых оптических пучков [40, 41]. Плоские оптические элементы используются также для регистрации волновых фронтов [42,43], для систем оптического зрения [44], в устройствах голографической памяти [45].

Во второй половине прошлого столетия в оптике появился новый оптический элемент— киноформ, который широко используется в плоской оптике для формирования 2D и 3D изображений. Элемент тесно связан с решением обратных задач оптики в скалярной волновой модели Френеля. В последней, волновое поле в плоскости оптического элемента и плоскости изображения связаны линейным образованием Френеля. Как правило в обратных задачах оптики мы знаем только модуль и не знаем фазу волнового поля в плоскости изображения, что приводит к тому, что обратная задача сводится к решению нелинейного интегрального уравнения. В работе Лизема [46] был предложен итерационный процесс для решения этой нелинейной

обратной задачи. Позднее в литературе метод получил название ИГТА или Гершберг-Сакстон алгоритм [47].

Киноформ как новый оптический элемент широко используется в приложениях. С математической точки зрения метод предложенный Лиземом является эффективным релаксационным методом и представляет один из вариантов градиентного итерационного алгоритма приближенного решения нелинейного операторного уравнения Фредгольма первого рода. Для синтеза 2D изображений широко используются и дифракционные решетки [48]. Методы расчета дифракции света на дифракционных решетках хорошо изучены [49].

Плоские оптические элементы позволяют формировать не только 2D, но и 3D изображения. В 1971 году Нобелевская премия была вручена Денишу Габору за разработку и развитие 3D голограмм [50]. В дальнейшем аналоговая запись 3D изображений была продолжена в работах [51,52]. Российским ученым Денисюком была разработана технология записи цветных объемных голограмм [53,54]. Аналоговые 3D голограммы широко используются не только для создания арт дизайнов, но и для большого числа приложений [55]. Однако, в последние 15 лет наибольшее развитие получили компьютерно-синтезированные голограммы.

В области компьютерного синтеза 3D голограмм существует несколько направлений. Остановимся на нескольких наиболее популярных. С точки зрения приложений наибольший интерес представляют плоские рельефные оптические элементы. Преимуществом таких элементов по сравнению с объемными голограммами является возможность их массового тиражирования. Глубина микрорельефа таких элементов составляет порядка половины микрона. Остановимся на публикациях в области синтеза плоских рельефных оптических элементов для формирования 3D изображений. Наибольшее число публикаций посвящено технологии, которая близка к традиционной аналоговой записи 3D голограмм. В простейшем случае 3D объект разбивается на пиксели, каждый из которых рассматривается как источник волны. Даже если число излучателей составляет десятки миллионов, рассчитать суммарное волновое поле на современных ЭВМ не представляет существенной проблемы [56]. Для ускорения расчетов, которые можно с большой эффективностью производить параллельно, можно использовать суперкомпьютер. Остается рассчитать результат интерференции с опорной волной и получить фазовую функцию плоского оптического элемента. Для простых объектов такая технология синтеза вполне приемлема, однако по мере нарастания сложности объекта нарастают и проблемы.

Другой традиционный подход к синтезу плоских элементов для формирования 3D изображений — polygon based технологии [57]. В простейшем случае поверхность объекта аппроксимируется многогранником с очень большим числом граней, размер которых меньше разрешения глаза человека. Суммарное отраженное поле от всех видимых наблюдателю граней



складывается с опорной волной, что в итоге, позволяет определить фазовую функцию плоского оптического элемента.

Для формирования рельефа плоских оптических элементов широко распространена оптическая запись с помощью излучения лазеров, основанная на принципе интерференции [58,59]. Основным недостатком такой технологии является невозможность формирования многоградационных микрорельефов. По сути дела, с помощью таких методов записи оригиналов можно формировать лишь бинарные. Последнее значительно ограничивает возможности синтеза оптических элементов. Другое направление лазерной записи микрорельефа — прямая запись сфокусированным лазерным пучком. Существует большое количество вариантов таких устройств [60,61], но всех их объединяет не очень высокое разрешение более одного микрона. Альтернативной технологией является электронно-лучевая технология формирования микрорельефа. Разрешение современных электронно-лучевых литографов достигает сотых долей микрона [62]. Но наиболее важным является то, что с ее помощью можно с высокой точностью формировать многоградационный микрорельеф, который обеспечивает высокую эффективность плоского оптического элемента.

В последнее время появились публикации, посвященные синтезу нанооптических элементов, в научном направлении получившем название плазмоны. Для формирования плазмонных структур используют различные технологии, например, электронно-лучевую литографию [63, 64]. В работах [65, 66, 67] для формирования плазмонных структур используется коллоидная литография. Изготовленные таким образом плазмонные структуры имеют различные оптические свойства, например, позволяют менять спектральный состав отраженного излучения при наклоне оптического элемента [68]. В работах [69, 70, 71] исследуются свойства волн, распространяющихся в металлодиэлектрических структурах с меняющейся высотой и периодом порядка 200 нанометров. Такие элементы можно пытаться использовать, например, для повышения эффективности солнечных батарей. Плазмонные технологии вызывают большой интерес, как с научной точки зрения, так и с точки зрения возможных приложений.

Остановимся на одном важном применении плоских нанооптических элементов, которому посвящена настоящая диссертация. Начиная с 90-х годов, одним из основных приложений становятся защитные оптические технологии. Первый защитный элемент на пластиковой карте VISA появился более 25 лет назад. Оригинал был записан аналоговым образом и представлял собой рельефную 3D голограмму. Первый защитный оптический элемент на банкноте появился в 1988 году [72]. В настоящее время плоские защитные элементы защищают банкноты, ценные бумаги, паспорта, ID документы, акцизные марки и т. п. В области разработки и изготовления новых оптических защитных элементов работают сотни компаний в

Америке, Европе и Азии. За 30 лет удалось разработать уникальные технологии массового тиражирования рельефных оптических элементов и различные технологии нанесения оптических защитных элементов на бумажный и пластиковый носитель. Вместе с этим сложилась ситуация, когда практически все разработчики оригиналов оптических элементов ориентированы на оптические методы записи оригиналов, что существенно ограничивало возможности разработки новых оптических защитных технологий.

Первый защитный элемент, изготовленный с помощью электронно-лучевых литографов, появился на банкноте в 1988 году и был изготовлен фирмой Kurz с оригинала, разработанного австралийской фирмой CSIRO [73]. Оригинал представлял собой бинарный оптический элемент и состоял из набора дифракционных решеток. Прошло более 30 лет. Количество публикаций с использованием электронно-лучевой технологии для синтеза защитных оптических элементов незначительно. В публикациях практически отсутствуют новые защитные признаки, сформированные на базе электронно-лучевой технологии. Тем не менее, необходимо отметить, что современная электронно-лучевая технология формирования микрорельефа имеет очень широкие возможности. Особенностью электронно-лучевой технологии является возможность синтеза асимметричного микрорельефа с высокой точностью, достигающей 10 нанометров.

Особенностью технологии является то, что она является наукоемкой и нераспространенной. Стоимость современных литографов составляет несколько миллионов долларов. Последнее можно считать недостатком, но только не для защитных технологий. Все это ограничивает распространение технологии.

Количество публикаций, посвященных синтезу рельефных плоских оптических элементов для формирования 3D изображений, также невелико. Можно перечислить лишь несколько публикаций [74]. В этой работе сделана попытка использовать для формирования микрорельефа оптического элемента электронный микроскоп. Несмотря на огромные трудности из-за предельно малой области экспонирования авторам удалось синтезировать нанооптический элемент для формирования 3D изображения. В работе [75] с использованием электронно-лучевого литографа синтезирован нанооптический элемент для формирования 3D изображения хорошего качества. Для расчета фазовой функции была использована технология, заимствованная из аналоговой записи 3D. Микрорельеф оптического элемента является симметричным.

Резюмируя обзор по методам синтеза плоских оптических защитных элементов, можно отметить, что важные результаты были получены в конце прошлого столетия в области когерентной оптики. С начала 2000-х годов центр приложений плоской оптики сместился в защитные технологии, в которых удалось разработать уникальные технологии массового тиражирования рельефных оптических элементов. Слабым звеном технологии разработки

плоских защитных элементов оказалось формирование оригиналов с помощью лазерного излучения. В связи с этим обозначился интерес к электронно-лучевой технологии формирования микрорельефа оптического элемента, которая не только значительно превосходит оптические методы записи по разрешению, но и позволяет формировать асимметричный микрорельеф с точностью порядка 10 нанометров. Нанооптические элементы уже зарекомендовали себя в защитных технологиях. Возникла необходимость в разработке новых методов синтеза защитных нанооптических элементов на базе электронно-лучевой технологии.

## **Цели и задачи работы**

Целью работы является получение новых результатов в области синтеза плоских нанооптических элементов для формирования 2D и 3D изображений, их регистрации и обработки. Нанооптические элементы предназначены для визуального, экспертного и автоматизированного контроля подлинности банкнот, ценных бумаг, паспортов, ID, пластиковых карт, акцизных марок, брендов.

Задачами диссертации являются:

1. Разработка эффективных методов расчета фазовых функций бинарных и многоградационных нанооптических защитных элементов, формирующих 2D изображения с кинетическими эффектами движения при наклоне оптического элемента.
2. Разработка эффективных методов расчета фазовых функций бинарных и многоградационных нанооптических защитных элементов, формирующих 3D-изображения
3. Разработка защитных признаков для визуального контроля нанооптических элементов, формирующих 2D и 3D изображения в белом свете.
4. Разработка методов записи микрорельефа бинарных и многоградационных нанооптических элементов для формирования 2D и 3D изображений с использованием электронно-лучевой литографии.
5. Разработка защитных признаков для автоматизированного контроля с использованием когерентного излучения.
6. Разработка портативного прибора автоматизированного контроля подлинности нанооптических защитных элементов.

## **Объект и предмет исследования**

Объектом исследования являются плоские нанооптические элементы, микрорельеф которых, при его освещении белым или когерентным светом, формирует визуальные 2D и 3D изображения. Предметом исследования являются методы синтеза нанооптических элементов, которые включают решение обратных задач синтеза нанооптических элементов с использованием скалярной волновой модели и модели геометрической оптики, а также методы прецизионного формирования микрорельефа элементов плоской оптики для видимого диапазона длин волн.

## **Методология исследования**

В диссертации используются математическое моделирование и методы решения обратных задач синтеза плоских рельефных оптических элементов для видимого диапазона длин волн. Для решения прямых задач дифракции волн на микрорельефе плоских оптических элементов используется как скалярная волновая модель Френеля, так и модель геометрической оптики. Для расчета фазовых функций нанооптических элементов использованы методы решения обратных задач синтеза. Рассматриваемые в диссертации обратные задачи являются нелинейными и для их решения используются итерационные численные алгоритмы. Для формирования микрорельефа нанооптических используется электронно-лучевая литография позволяющая формировать микрорельеф с точностью 10 нанометров по глубине.

## **Научная новизна**

1. Впервые разработаны методы расчета микрорельефа бинарных нанооптических защитных элементов, формирующих 2D изображения с кинематическими эффектами движения. Для синтеза нанооптических элементов использованы киноформы и внеосевые линзы Френеля.

2. Впервые разработаны многоградационные компьютерно-синтезированные нанооптические защитные элементы для формирования эффекта смены изображения при повороте на  $180^\circ$

3. Впервые разработаны методы синтеза многоградационных нанооптических элементов для формирования 2D изображений с кинематическими эффектами движения с полным параллаксом. Разработанные нанооптические элементы имеют фазовую функцию равную сумме киноформа, формирующего изображение символа, и поверхности второго порядка, определяющей характер движения символа.

4. Впервые разработаны методы синтеза многоградационных нанооптических элементов для формирования 2D-изображений с кинематическими эффектами движения фрагментов по одной из координат.

5. Впервые разработаны методы синтеза бинарных и многоградационных нанооптических элементов для формирования 3D-изображений с полным параллаксом.

6. Впервые разработаны методы синтеза нанооптических элементов для формирования эффекта смены двух 3D-изображений.

7. Впервые разработаны методы синтеза нанооптических элементов для формирования 3D-изображений на цилиндрической поверхности.

8. Впервые разработаны нанооптические элементы для автоматизированного контроля подлинности с помощью смартфона.

9. Впервые разработаны нанооптические элементы и портативные приборы для автоматизированного контроля.

## Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в том, что впервые предложен метод расчета фазовых функций нанооптических элементов, формирующих 2D изображения с различными кинематическими эффектами и 3D изображения. В основе метода лежит физическое представление формируемых изображений как набора 2D кадров, которые наблюдатель видит в области оптического элемента под разными углами наблюдения. Область оптического элемента разбивается на элементарные области, размер которых меньше разрешения глаза человека. Центральным моментом является физическое представление, что каждая элементарная область видна наблюдателю как точка определенной яркости и цвета. Каждая элементарная область может участвовать в формировании всех кадров изображений.

Метод расчета фазовой функции оптического элемента состоит из двух этапов. На первом этапе для каждой элементарной площадки в модели геометрической оптики с использованием всех кадров изображений рассчитывается диаграмма направленности рассеянного элементарной области света. На втором этапе для каждой элементарной области рассчитывается фазовая функция по заданной диаграмме направленности. Эта задача является типичной обратной задачей, которая сводится к решению нелинейного операторного уравнения Фредгольма первого рода. Разработаны эффективные итерационные методы расчета фазовой функции нанооптических элементов как для формирования 2D изображения с различными кинематическими эффектами, так и для формирования различных 3D изображений. Используя этот подход, в диссертации разработаны методы синтеза нанооптических элементов для решения различных задач формирования 2D и 3D изображений.

Разработаны методы синтеза нанооптических элементов на основе киноформов и внеосевых пересекающихся линз Френеля для формирования 2D изображений, фрагменты которых перемещаются друг относительно друга при наклонах оптического элемента.

Предложены новые защитные признаки для визуального контроля подлинности нанооптических элементов при повороте оптического элемента на 180 градусов. Разработаны методы синтеза многоградационных нанооптических элементов для смены изображений при повороте оптического элемента на 180 градусов.

Предложены методы синтеза нанооптических элементов для формирования 2D изображений с полным параллаксом. В основе метода лежит представление фазовой функции оптического элемента как суммы киноформа, формирующего изображение символа, и гладкой поверхности второго порядка, определяющей характер движения символов при наклоне оптического элемента.

Предложены методы синтеза нанооптических защитных элементов для формирования 2D-изображений с кинетическими эффектами движения фрагментов по одной из координат.

Разработаны методы синтеза нанооптических элементов для формирования 3D изображений с полным параллаксом. Для формирования 3D изображений в первом порядке дифракции используются бинарные киноформы. Для формирования 3D изображений в нулевом первом порядке дифракции используются многоградационные киноформы.

Предложены методы синтеза нанооптических элементов формирования эффектов смены двух 3D-изображений. Разработаны методы синтеза нанооптических элементов на неплоских поверхностях.

Разработанные методы синтеза нанооптических элементов ориентированы на использование электронно-лучевой литографии. Научность технологии синтеза и нераспространенность технологии формирования микрорельефа обеспечивает надежную защиту разработанных в диссертации нанооптических защитных элементов от подделок.

В диссертации впервые предложен защитный признак инвариантный относительно сдвига и поворота оптического элемента для автоматизированного контроля. Специально для задач автоматизированного контроля разработаны многоградационные нанооптические элементы. Разработан портативный прибор для автоматизированного контроля плоских оптических элементов.

Разработанные методы синтеза и нанооптические элементы для формирования 2D и 3D изображений предназначены для защиты от подделок банкнот, ценных бумаг, паспортов, ID, пластиковых карт, акцизных марок, брендов.

Разработанные в диссертации методы синтеза защитных плоских оптических элементов используются в продукции АО «Тознак» с 2010 года по настоящее время.

Разработанные в диссертации методы расчета фазовых функций нанооптических элементов для формирования 3D изображений могут быть использованы в 3D проекторах.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Разработаны эффективные методы расчета фазовых функций бинарных нанооптических элементов на основе киноформов для формирования 2D изображений с кинетическими эффектами движения при наклонах оптического элемента. Разработаны методы синтеза бинарных нанооптических элементов на основе внеосевых линз Френеля с параболическими и седлообразными фазовыми функциями. Для синтеза таких элементов оптимальным является использование пересекающихся линз Френеля при их пересечении на

половину диаметра. Оптимальный размер линз Френеля лежит в пределах 0.5 - 2.0 мм, размер минимальной зоны линз Френеля составляет 1 микрон.

2. Разработаны методы расчета и синтеза нанооптических элементов, формирующих эффект смены 2D изображений при повороте элемента на 180 градусов. Для формирования таких элементов необходимо использовать многоградационный микрорельеф с точность формирования 10 нанометров по глубине.

3. Разработаны методы синтеза многоградационных нанооптических элементов для формирования 2D изображений с полным параллаксом. В основе метода лежит представление фазовой функции оптического элемента как суммы киноформа, формирующего изображение символа, и гладкой поверхности второго порядка, определяющей характер движения символов при наклоне оптического элемента.

4. Разработаны методы синтеза многоградационных нанооптических элементов, формирующих кинетические эффекты движения по одной из координат. Для формирования микрорельефа нанооптического элемента используются фрагменты многоградационных линз Френеля и дифракционных решеток. С помощью математического моделирования определены оптимальные параметры структуры нанооптического элемента. Оптимальный размер линз Френеля лежит в пределах 50-100 микрон. Периоды дифракционных решеток не превышают 0.7 микрон.

5. Разработаны методы расчета фазовых функций бинарных нанооптических элементов для формирования 3D изображений с полным параллаксом в первом порядке дифракции. Трехмерное изображение наблюдается при освещении источником белого света в широком диапазоне углов наклона оптического элемента ( $\pm 15$  градусов по вертикали и горизонтали).

6. Разработаны методы синтеза нанооптических элементов для формирования эффекта смены двух 3D изображений. Для пространственного разделения двух 3D изображений используются многоградационные структуры с точность формирования 10 нанометров по глубине.

7. Разработаны методы синтеза нанооптических элементов для формирования 3D изображений на неплоской поверхности. Эффективность метода продемонстрирована на примере расчета фазовой функции и синтеза нанооптического элемента на цилиндрической поверхности, формирующего 3D изображение с полным обзором на 360 градусов.

8. Разработаны методы расчета и синтеза многоградационных нанооптических элементов для формирования 3D изображений с полным параллаксом в нулевом порядке дифракции. 3D изображение наблюдается в диапазоне  $\pm 25$  градусов в окрестности нулевого порядка дифракции, при этом сформированное 3D изображение сохраняется при повороте оптического элемента в диапазоне углов поворота от 0 до 360 градусов.

9. Разработаны методы формирования микрорельефа нанооптических защитных элементов для формирования 2D и 3D изображений с использованием электронно-лучевой литографии с глубиной микрорельефа до 300 нанометров и с точностью формирования микрорельефа 10 нанометров по глубине.

10. Разработаны и изготовлены многоградационные нанооптические элементы для автоматизированного контроля. Сформулирован инвариантный относительно сдвига и поворота признак для автоматизированной верификации подлинности.

11. Разработаны и изготовлены портативные приборы автоматизированного контроля подлинности нанооптических защитных элементов с использованием когерентного излучения с длиной волны 650 нанометров. Регистрация изображений осуществляется кольцевыми детекторами. Процедура верификации подлинности защитного элемента осуществляется микропроцессором с помощью разработанного алгоритма распознавания менее чем за 10 миллисекунд. Вес портативного прибора 80 граммов.

### **Степень достоверности результатов**

Достоверность изложенных результатов обуславливается использованием для их получения основных теоретических положений оптики, фундаментальных принципов математического моделирования и современных методов решения обратных задач математической физики. Достоверность результатов подтверждается изготовлением образцов нанооптических элементов, формирующих 2D изображения с кинетическими эффектами движения и 3D-изображения. Также, достоверность результатов подтверждается публикациями в реферируемых журналах, в том числе в журналах с высоким импакт-фактором и докладами на международных конференциях по оптическим защитным технологиям. Разработанные методы синтеза нанооптических элементов защищены девятью международными патентами. Разработанные нанооптические элементы предназначены для защиты банкнот, ценных бумаг, документов, акцизных марок. Разработанные в диссертации методы синтеза защитных плоских оптических элементов используются в продукции АО “Гознак” с 2010 года по настоящее время.

### **Апробация результатов**

Результаты, полученные в настоящей работе, доложены и обсуждены на следующих международных и всероссийских конференциях:

- Обратные задачи компьютерного синтеза нанооптических элементов для формирования 3D изображений на цилиндрической поверхности. Ломоносовские чтения. Москва, Россия, 2020.



- 3D изображение нулевого порядка: расчет и синтез микрорельефа. HOLOEXPO 2020, Москва, Россия, 2019.
- Modern possibilities of electron-beam lithography for synthesis of computer-generated holograms. The Holography Conference. Афины, Греция, 2016.
- Nano-optical Security Technology: Modern State and Perspectives of Development (Приглашенный) The Holography Conference. Варшава, Польша, 2016.
- Последние достижения в области электронно-лучевой технологии изготовления оригиналов оптических защитных элементов. (Приглашенный) HOLOEXPO-2016. Ярославль, Россия, 2016.
- Automatic Control of Nano-Optical Elements and Devices for their Implementation. The Pan European High Security Printing Conference. Milano, Italy, Италия, 2013.
- Компьютерный синтез оптических элементов с эффектом двух 3D изображений, видимых при разных углах наблюдения. Ломоносовские чтения. Москва, Россия, 2013.
- Об одной задаче синтеза защитных изображений для визуального контроля. Ломоносовские чтения. Москва, Россия, 2012.
- High Security Holograms – Covert and Overt Security Features. 10-th Asian High Security Printing Conference. Delhi, India, 2011.
- Обратные задачи синтеза плоских нанооптических элементов. Ломоносовские чтения. Москва, Россия, 2011.
- Nanotechnology for automatic examination of optical protection elements. Holo-print Holo-pack conference. Las-Vegas, USA, 2011.

## **Публикации**

Основные результаты диссертации изложены в 32 печатных работах, в том числе 17 статьях в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих Положению о присуждении ученых степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова, 9 патентах, 1 статье в другом рецензируемом научном журнале, 1 книге и 4 публикациях в сборниках трудов. Список авторских публикаций представлен в конце диссертации перед списком литературы [А1-А32].

## **Личный вклад автора**

В диссертацию включены положения и результаты, полученные лично автором, либо при его определяющем участии. Личный вклад автора состоит в постановке обратных задач синтеза нанооптических элементов, разработке эффективных методов их решения, реализации численных методов расчёта фазовых функций нанооптических элементов для формирования 2D

и 3D изображений, разработке методов формирования микрорельефа нанооптических элементов с помощью электронно-лучевой технологии, изготовлении образцов нанооптических элементов для визуального, экспертного и автоматизированного контроля, а также, в разработке нанооптических элементов для автоматизированного контроля, а также в разработке основных технических решений, заложенных в конструкцию прибора автоматизированного контроля.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из Введения, 9 Глав, Заключения и Списка литературы. Полный объём диссертации составляет 220 страниц текста со 193 иллюстрациями, список литературы содержит 156 наименований.

## **Содержание диссертации**

Во введении обоснована актуальность темы исследований, изложены цели диссертационной работы, степень разработанности темы, приведено краткое содержание работы, отмечена научная новизна и практическая значимость проведённых исследований, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации результатов работы.

В первой главе диссертации осуществлена постановка обратных задач синтеза нанооптических элементов для формирования 2D изображений с кинетическими эффектами движения при изменении положения оптического элемента относительно наблюдателя. Предложены эффективные методы расчета и синтеза бинарных нанооптических элементов на основе использования киноформов и внеосевых линз Френеля.

Во второй главе диссертации рассмотрены задачи синтеза многоградационных нанооптических элементов для формирования эффекта смены изображений при повороте нанооптического элемента на 180 градусов. Для синтеза нанооптических элементов используется электронно-лучевая литография с точностью формирования микрорельефа порядка 10 нанометров по глубине.

В третьей главе диссертации предложен новый плоский оптический элемент, фазовая функция которого является суммой гладкой функции и многоградационного киноформа, формирующего 2D изображение. Показано как с помощью этой идеи можно синтезировать нанооптические элементы, формирующие эффект движения нескольких символов по всей области оптического элемента.

В четвертой главе рассматривается задача синтеза многоградационных нанооптических элементов для формирования 2D изображений с кинетическими эффектами движения фрагментов по одной из координат. Такие элементы могут быть эффективно использованы в защитных банкнотных нитях.

В пятой главе рассмотрены обратные задачи синтеза нанооптических элементов для формирования 3D изображений с эффектом полного параллакса. Для формирования 3D изображений в первом порядке дифракции используются бинарные киноформы. Для формирования 3D изображений в нулевом порядке дифракции используются многоградационные структуры с точностью формирования микрорельефа 10 нанометров по глубине.

В шестой главе диссертации осуждаются вопросы синтеза нанооптических элементов для формирования эффекта смены двух 3D изображений при наклоне оптического элемента. Для обеспечения высокого качества 3D изображений используются как бинарные, так и многоградационные структуры.

Седьмая глава диссертации посвящена разработке методов синтеза нанооптических элементов на неплоских поверхностях. Синтезирован нанооптический элемент, формирующий 3D изображение на цилиндрической поверхности с углом обзора 360 градусов.

В главе восемь диссертации обсуждаются возможности автоматизированного контроля подлинности нанооптических элементов с помощью смартфона. Для регистрации изображений используется либо камера смартфона, либо специальная увеличивающая приставка.

Девятая глава диссертации посвящена разработке многоградационных нанооптических элементов и прибора автоматизированного контроля подлинности таких элементов. Сформулирован специальный инвариантный признак для автоматизированного контроля. Разработан компактный прибор автоматизированного контроля, вес которого не превышает 100 гр. Для регистрации изображений используется кольцо оптических детекторов и лазерный диод с длиной волны излучения 650 нанометров. Процедура идентификации подлинности осуществляется микропроцессором, время распознавания не превышает 10 мс.

# Глава 1. Бинарные компьютерно-синтезированные нанооптические защитные элементы для формирования 2D изображений с кинетическими эффектами движения

В данной главе используются материалы, опубликованные в статьях [A2], [A13], патентах [A18], [A19], A[23], A[25], книге A[28], сборнике трудов A[30].

## Некоторые сведения о фазовых плоских дифракционных оптических элементах

В настоящее время плоские дифракционные оптические элементы широко используются для защиты от подделок банкнот, паспортов, ID, акцизных марок, брендов. Впервые плоские оптические элементы для защиты пластиковых карт VISA были использованы более 30 лет назад. В диссертации обсуждаются фазовые плоские оптические элементы, в которых превращение волнового фронта осуществляется за счет дифракции на микрорельефе оптического элемента. Глубина микрорельефа составляет десятые доли микрона. Пусть  $u(\xi, \eta, 0-0)$  – волновое поле падающее на оптический элемент, а  $u(\xi, \eta, 0+0)$  – отраженное волновое поле. В скалярно-волновой модели комплексные функции  $u(\xi, \eta, 0-0)$  и  $u(\xi, \eta, 0+0)$  связаны соотношением:

$$u(\xi, \eta, 0+0) = u(\xi, \eta, 0-0)T(\xi, \eta). \quad (1.1)$$

Здесь  $T(\xi, \eta)$  – комплексная передаточная функция. Если дифракционный оптический элемент не поглощает излучение, то модуль  $T(\xi, \eta) = 1$ . В этом случае  $T(\xi, \eta)$  представляют в виде:  $T(\xi, \eta) = \exp(ik \varphi(\xi, \eta))$ . Функция  $\varphi(\xi, \eta)$  называется фазовой функцией оптического элемента. Фазовая функция оптического элемента однозначно определяет глубину микрорельефа  $h(\xi, \eta)$  в точке  $(\xi, \eta)$ . В случае нормального падения излучения на элемент  $h(\xi, \eta) = 0,5\varphi(\xi, \eta)$ .

В диссертации обсуждаются проблемы синтеза защитных плоских оптических элементов. Перечислим некоторые наиболее типичные плоские дифракционные оптические элементы, используемые для защиты банкнот. Широко распространены оптические защитные нити с регулярным оконным выходом. Обычно ширина таких нитей составляет от 2 до 10 мм. Кроме нитей для защиты банкнот используются оптические элементы, которые наносятся на банкноту методом горячего тиснения. Ширина таких оптических защитных элементов составляет от 10 до 20 мм. Для защиты паспортов от подделок используются разные виды защитного ламината, размер оптического защитного элемента на паспорте равняется странице паспорта и составляет 125 x 80 мм. Паспортный ламинат представляет собой прозрачный оптический защитный элемент, который частично может быть металлизированным. Оптические защитные элементы используются для защиты ID карт. Размер таких элементов составляет обычно 85,6 мм x 53,9 мм.

Для защиты ценных бумаг и акцизных марок используются голографические страйпы – полосы голографической фольги, которая наносится на документ горячим тиснением.

Существуют различные технологии изготовления защитных оптических элементов. Разработанные в диссертации нанооптические элементы являются плоскими, однослойными оптическими элементами, микрорельеф которых при освещении светом формирует изображения, используемые для визуального экспертного или автоматизированного контроля. Большая часть защитных элементов работает на отражение, когда источник света и наблюдатель находятся по одну сторону от оптического элемента. Глубина микрорельефа в этом случае не превышает 0,3 микрона. Прозрачный защитный ламинат (например, паспортный) также может работать на отражение. В этом случае отражение происходит от границы с разными показателями преломления. Глубина микрорельефа в этом случае также не превышает 0,3 микрона. Прозрачные «окна» на банкнотах могут работать как на отражение, так и на прохождение. В схеме наблюдения на прохождение наблюдатель и источник находятся с разных сторон оптического элемента. Глубина микрорельефа в этом случае существенно превышает 0,3 микрона.

Задачей диссертации является разработка таких новых оптических элементов, подделка которых будет очень сложным, дорогостоящим и наукоемким предприятием. Новые защитные элементы разработаны в диссертации на основе электронно-лучевой технологии формирования микрорельефа. Точность формирования микрорельефа в электронно-лучевой технологии составляет 10 нанометров. По этой причине новые защитные элементы в диссертации называются «нанооптическими элементами». Несмотря на жесткие требования к точности формирования микрорельефа нанооптические элементы можно тиражировать, что обеспечивает их низкую цену при массовом производстве.

Технологию синтеза защитных оптических элементов для массового производства условно можно разделить на два этапа. На первом этапе изготавливается оригинал защитного элемента, на втором с помощью специального оборудования осуществляется его тиражирование. Оригиналы первого защитного элемента на карте VISA были записаны с помощью аналоговой оптической записи интерференции опорного и объектного пучка [76]. Аналоговая запись оригиналов используется и до наших дней, хотя большая часть всех защитных оптических элементов безусловно является компьютерно-синтезированной. Все рассматриваемые оптические защитные элементы в диссертации являются компьютерно-синтезированными нанооптическими защитными элементами.

Среди сотен компаний, работающих в области производства защитных элементов, практически все для записи оригиналов используют оптическое излучение. Альтернативой этой технологии является электронно-лучевая технология, которая была создана и развивалась для

изготовления микроэлектроники. Тем не менее именно электронно-лучевая технология позволила сделать принципиальный рывок в области защиты банкнот, паспортов, ID, акцизных марок и брендов. Новые защитные признаки, разработанные в диссертации, ориентированы на электронно-лучевую технологию. Нанооптические элементы надежно защищены от подделок, поскольку их невозможно подделать с использованием оптических методов записи оригинала.

Для изготовления защитных оптических элементов широко используются классические плоские оптические элементы, такие как дифракционные решётки, плоские линзы Френеля и киноформы. В главе 1 для формирования 2D изображений используются плоские оптические элементы – киноформы, введенные в практику оптики более 30 лет назад. Использование электронно-лучевой технологии позволяет синтезировать новые защитные нанооптические элементы на базе киноформов, надежно защищенные от подделок.

### 1.1. Плоский оптический элемент – киноформ

Для изготовления защитных элементов широко используются стандартные оптические элементы, такие как дифракционные решетки, плоские линзы Френеля и киноформы. В диссертации разработаны новые оптические защитные элементы, не имеющие аналогов. В разработке новых защитных элементов используются и классические элементы оптики, к которым относится киноформ. Оптический элемент киноформ впервые был введен Лиземом в 1969 году как плоский оптический элемент, решающий задачу формирования 2D изображения в скалярной волновой модели Френеля [77]. В скалярной волновой модели Френеля выпишем уравнение, которое связывает скалярную волновую функцию в плоскости  $z=0$  и плоскости  $z=f$  в рамках скалярной волновой модели Френеля [78, A25].

$$\gamma \iint_G u(\xi, \eta, 0) \exp(ik\phi(\xi, \eta)) \exp\left\{ik \frac{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}{2f}\right\} d\xi d\eta = u(x, y, f) \quad (1.2)$$

Здесь  $u(x, y, f)$  – скалярная волновая функция в плоскости  $z=f$ ,  $u(\xi, \eta, 0)$  – скалярная волновая функция падающего на плоский оптический элемент излучения,  $\phi(\xi, \eta)$  – фазовая функция плоского оптического элемента,  $k=2\pi/\lambda$ ,  $G$  — область оптического элемента,  $\gamma=2\pi k/f$  – заданная константа. На рисунке 1.1 приведена схема формирования плоским оптическим элементом 2D изображения символа «А». Плоская волна 1 падает на отражающий плоский фазовый оптический элемент 2, микрорельеф которого формирует изображение 3.

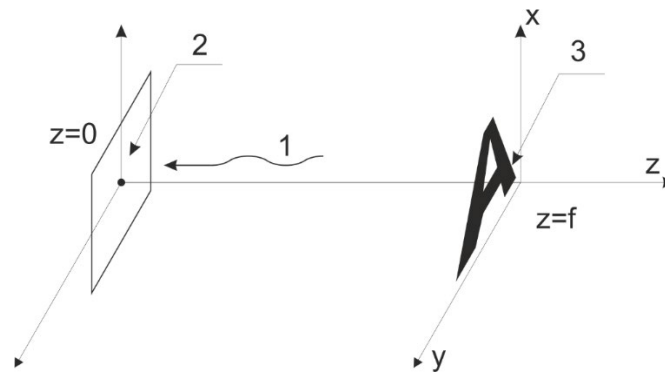


Рисунок 1.1. Оптическая схема формирования изображения.

Особенностью обратной задачи формирования 2D изображения является то, что в правой части уравнения (1.2) известна не волновая функция  $u(x, y, f)$ , а только её модуль  $F(x, y) = |u(x, y, f)|$ . Таким образом, приходим к операторному уравнению:

$$A\varphi(\zeta, \eta) = F(x, y). \quad (1.3)$$

Функции  $\varphi$  и  $F$  принадлежат пространству функций, интегрируемых с квадратом. Здесь  $F(x, y)$  представляет собой заданную функцию. Оператор  $A$  определён следующим соотношением:

$$A\varphi = \left| \gamma \iint_G u(\xi, \eta, 0 - 0) \exp(ik\phi(\xi, \eta)) \exp\left\{ik \frac{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}{2f}\right\} d\xi d\eta \right| \quad (1.4)$$

Уравнение (1.3) представляет собой нелинейное операторное уравнение относительно искомой функции  $\varphi(\zeta, \eta)$ . Задача (1.3) является некорректно поставленной. [5,79]. Для решения линейных и нелинейных некорректных задач разработаны эффективные численные алгоритмы [6,7,8]. Однако, оказалось, что метод, предложенный Лиземом является одним из наиболее эффективных для решения уравнения (1.3). Разработанные в этой статье оптические элементы хорошо известны и получили название «киноформ». Существуют работы [80,81], посвященные исследованию и модификации итерационных методов предложенных Лиземом. В первой главе диссертации используются бинарные киноформы, имеющие симметричный микрорельеф. Новые разработанные в диссертации нанооптические элементы предназначены для формирования визуальных признаков для защиты банкнот, ID, документов.

Пусть оптический элемент занимает область  $G$  плоскости  $Oxy$ . Решая обратную задачу (1.3) относительно  $\varphi(\zeta, \eta)$ , при заданном изображении  $F(x, y)$  и фиксированной длине волны  $\lambda$ , мы получаем фазовую функцию оптического элемента, которая определяет глубину микрорельефа в точке  $(\zeta, \eta)$  элементарной области  $G$ . Приведём итерационный алгоритм расчёта фазовой функции, следуя работе [46]. Введём обозначения:

$$w(x, y) = \Phi\{v\}(x, y) = \gamma \iint_G v(\xi, \eta) \cdot \exp\left(ik \frac{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}{2f}\right) d\xi d\eta. \quad (1.5)$$

Здесь  $\Phi\{v\}(x, y)$  – прямое преобразование Френеля от функции  $v$ . Итерационный процесс построения приближенного решения для фазовой функции, являющейся решением обратной задачи (1.3), строится следующим образом. Для того, чтобы сделать одну итерацию в итерационном алгоритме решения задачи (1.3), нужно сделать 4 шага. Пусть функция  $v^{(k)}(x, y)$  задана на  $k$ -ой итерации. Представим функцию  $v^{(k)}(x, y)$  как  $v^{(k)}(x, y) = A_0 \exp(ik\varphi_0^{(k)}(x, y))$ , а функцию  $w^{(k)}(x, y)$  – в виде  $w^{(k)}(x, y) = A_1 \exp(ik\varphi_1^{(k)}(x, y))$ , где  $A_0$  и  $A_1$  – вещественные функции. Здесь  $A_0(x, y)$  – заданное распределение интенсивности падающего света в плоскости  $z=0$ . Так как мы рассматриваем фазовый оптический элемент, то амплитуда  $A_0(x, y)$  в нашем случае равна единице. Функция  $A_1(x, y) = F(x, y)$  – заданное распределение интенсивности в фокальной плоскости  $z=f$ . Алгоритм решения обратной задачи состоит из следующих последовательно выполняемых четырёх шагов:

- 1)  $\varphi_1^{(k)}(x, y) = \arg\left(\Phi\{v^{(k)}\}(x, y)\right)$
- 2)  $w^{(k)}(x, y) = A_1(x, y) \exp\left(ik\varphi_1^{(k)}(x, y)\right) \quad (1.6)$
- 3)  $\varphi_0^{(k+1)}(x, y) = \arg\left(\Phi^{-1}\{w^{(k)}\}(x, y)\right)$
- 4)  $v^{(k+1)}(x, y) = A_0(x, y) \exp\left(ik\varphi_0^{(k+1)}(x, y)\right)$

Здесь  $\Phi^{-1}$  – обратное преобразование Френеля. Функция  $\varphi_0^{(k+1)}$  представляет собой приближенное решение уравнения (1.3) на  $k+1$  итерации.

В качестве начального приближения можно использовать распределение фазы, равное константе. Известно, что описанный итерационный процесс является релаксационным [7, A28]. Последнее означает, что для функционала невязки  $R_k = R(\varphi^{(k)}) = \left\|A\varphi^{(k)} - F\right\|_{L^2}^2$ , выполнено условие  $R_{k+1} \leq R_k$ . Таким образом, описанный выше итерационный процесс позволяет находить приближенное значение  $\varphi^{(k)}(x, y)$  для фазовой функции  $\varphi(x, y)$ , формирующей в фокальной плоскости заданное изображение  $F(x, y)$ . Характерной особенностью этого итерационного метода является то, что достаточно хорошее приближённое решение получается за небольшое количество итераций порядка одного или двух десятков, после чего скорость убывания функционала невязки  $R_k$  становится намного меньше. Это свойство характерно для всех градиентных методов минимизации функционалов. На рисунке 1.2 представлена типичная зависимость функционала  $R_k$  от числа итераций  $k$ .



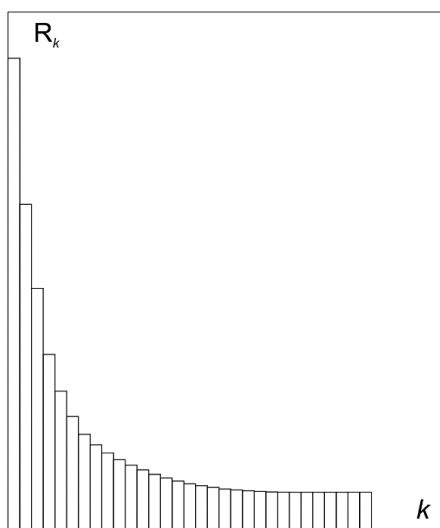


Рисунок 1.2. Зависимость функционала  $R_k$  от числа итераций  $k$ .

Значения функционала  $R_k$  на начальном приближении и двадцатой итерации отличаются в 10 раз. Критерий останова итерационного процесса можно сформулировать следующим образом. За приближенное решение принимается первый элемент  $\varphi^{(k)}$  для которого выполняется неравенств  $R_k \leq \delta$ . Здесь  $\delta$  – априори заданный уровень погрешности.

Рассчитанная с помощью итерационного процесса, описанного в предыдущем параграфе, фазовая функция  $\varphi(\xi, \eta)$  позволяет сформировать микрорельеф плоского дифракционного оптического элемента. Сформулируем ряд важных математических проблем, связанных с решением обратной задачи (1.3). Первый вопрос: всегда ли разрешимо уравнение (1.3) для любой функции  $F(x, y)$ ? Ответ на этот вопрос – отрицательный. Например, любая функция  $F(x, y)$ , принимающая только два значения, является примером функции, для которой уравнение (1.3) неразрешимо. В этом случае  $\inf_{\varphi} \|A\varphi - F\|^2 = \bar{\delta} > 0$ . Если параметр  $\bar{\delta}$  не равняется 0, то  $\bar{\delta}$  является среднеквадратичной погрешностью отклонения изображения, сформированного киноформом, от  $F(x, y)$ . Параметр  $\bar{\delta}$  играет роль оценки качества формирования изображения  $F(x, y)$ . При фиксированной геометрии параметр  $\bar{\delta}$  является функцией от длины волны. Чем меньше длина волны, тем меньше значение  $\bar{\delta}(\lambda)$ .

В диссертации в главах 1,2,3,5,8,9 для синтеза нанооптических элементов используются киноформы как плоские оптические элементы для формирования 2D и 3D изображений. Расчет фазовой функции киноформов осуществляется в математической модели Френеля. Постановку обратной задачи формирования 2D изображений можно осуществить и в модели геометрической оптики.

В работах [A2, A30] показано, что в модели геометрической оптики фазовая функция должна удовлетворять нелинейному уравнению Монжа-Ампера. Последняя задача относится к классическим математическим задачам и исследована в большом количестве публикаций.

Первые фундаментальные результаты в этой области получены еще в 30-х годах прошлого столетия [82,83]. В работах [А2, А30] разработаны методы решения обратных задач синтеза 2D изображений в математической модели геометрической оптики для важного с практической точки зрения направления, получившего в литературе название «beam shaping». Разработанные методы принципиально отличаются от киноформов потому, что позволяют рассчитать, по сути, гладкое зеркало, а не плоский оптический элемент как это имеет место в расчете киноформов. К преимуществам киноформов можно отнести универсальность алгоритмов и простоту расчета фазовой функции.

В диссертации для расчета волнового поля используется приближение Френеля. Возникает вопрос насколько приближение Френеля адекватно действительности в задаче расчета плоских оптических элементов. Ответ на этот вопрос зависит от геометрических параметров схемы наблюдения и параметров оптического элемента. Обычно размер оптического элемента составляет несколько квадратных сантиметров, формируемое изображение также составляет несколько сантиметров, а расстояние, на котором наблюдается визуальный эффект, составляет 20-30 сантиметров. Длина волны в оптическом диапазоне находится в пределах 0.45-0.7 микрона. Типичным плоским оптическим элементом является многоградационная линза Френеля. Вопрос о том, насколько хорошо приближение Френеля описывает процесс формирования изображения линзой Френеля рассмотрен в публикации [84]. В этой статье рассмотрена задача расчета волнового поля формируемого плоской линзой Френеля в приближении уравнения Максвелла. Показано, что на расстояниях порядка десяти длин волн большой вклад в волновое поле вносится ребрами линзы Френеля, на которых микрорельеф (фазовая функция) не является гладкой. Несмотря на это, на расстояниях в несколько сантиметров волновое поле, рассчитанное в приближении Максвелла и в приближении Френеля, совпадают практически абсолютно. Расчеты сделаны для линзы Френеля диаметром несколько сантиметров. Размер минимальной зоны Френеля во много раз превосходил длину волны. Эта ситуация является типичной для всех расчетов в диссертации с использованием приближения Френеля, поскольку геометрические параметры (размеры элемента, расстояние наблюдения, размеры изображения и т.д.) находятся в тех же пределах, а характерные размеры микрорельефа также превосходят длину волны.

## **1.2. Постановка задачи синтеза нанооптических элементов для формирования 2D изображений с кинематическими эффектами движения**

Нанооптический элемент представляет собой плоский фазовый оптический элемент, микрорельеф которого при его освещении светом, формирует видимое наблюдателю

изображение, фрагменты которого меняют свое положение при наклонах оптического элемента. На рисунке 1.3 приведены два варианта наблюдения визуальных изображений. Для определенности будем считать, что источник расположен на оси OZ. На рисунке 1.3(а) фиксирован источник и положение наблюдателя. Дифракционный оптический элемент может менять свое положение относительно наблюдателя. Дифракционный элемент может поворачиваться вокруг оси Oх либо вокруг оси Oy.

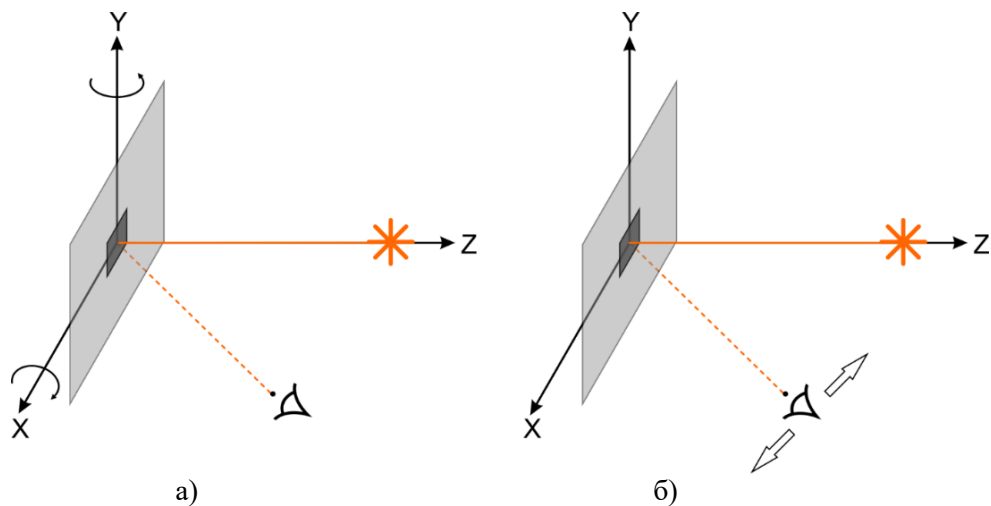


Рисунок 1.3. Схемы наблюдения: (а) при перемещении оптического элемента, (б) при перемещении наблюдателя.

На рисунке 1.3(б) представлена другая схема наблюдения. Фиксирован оптический элемент и источник, а наблюдатель может менять свое положение. При разном положении наблюдатель видит разные изображения, которые будем называть кадрами  $K_n, n = 1, \dots, N$ . Кадры  $K_n$  могут представлять набор цветных или монохроматических 2D-изображений. На рисунке 1.4 приведены несколько кадров  $K_n$ , которые состоят из символов «ОК». Кадры  $K_n$  отличаются положением символов «ОК» в разных кадрах. Кадры  $K_n$  на рисунке 1.4 являются монохроматическими 2D изображениями. Обычно, количество кадров составляет несколько сотен.

Задавая разные кадры  $K_n, n = 1, \dots, N$  можно формировать различные варианты движения фрагментов изображения, как это показано на рисунке 1.4-1.6.

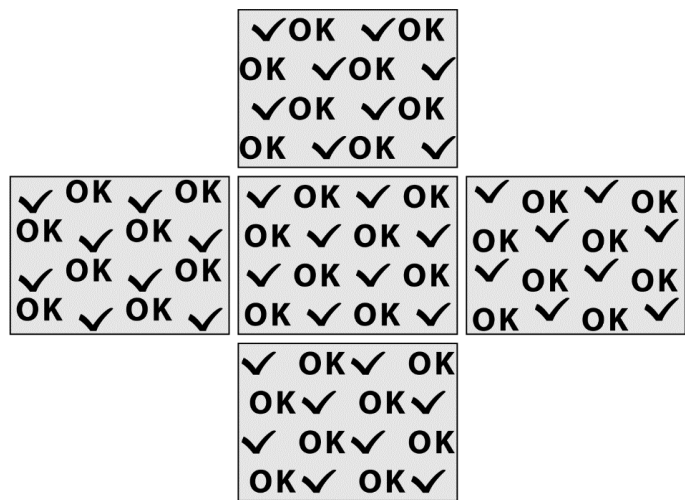


Рисунок 1.4.

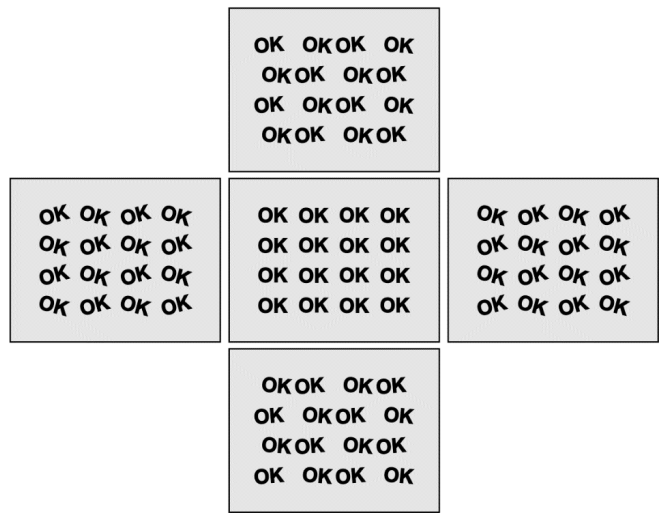


Рисунок 1.5.

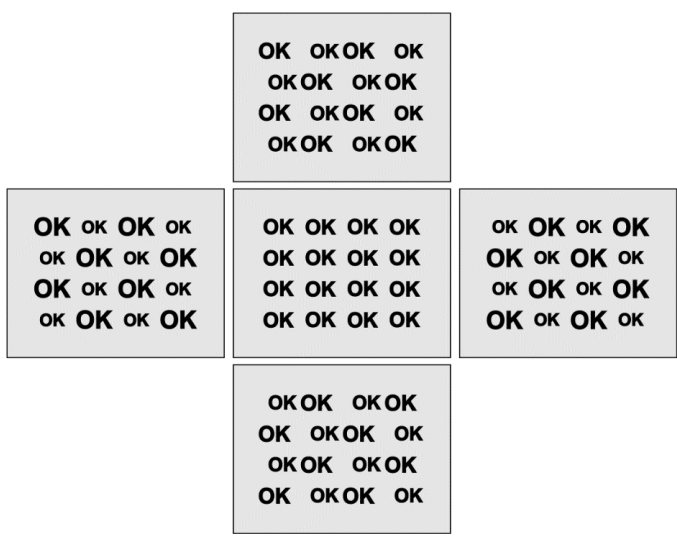


Рисунок 1.6.

На рисунках 1.4-1.6 кадры  $K_n$ , представляют собой набор монохроматических 2D изображений. На рисунке 1.7 приведена схема наблюдения оптического элемента под разными углами в варианте, когда положения источника и оптического элемента фиксированы. В точке  $O_n$  наблюдатель видит кадр  $K_n$ ,  $n = 1, \dots, N$ .

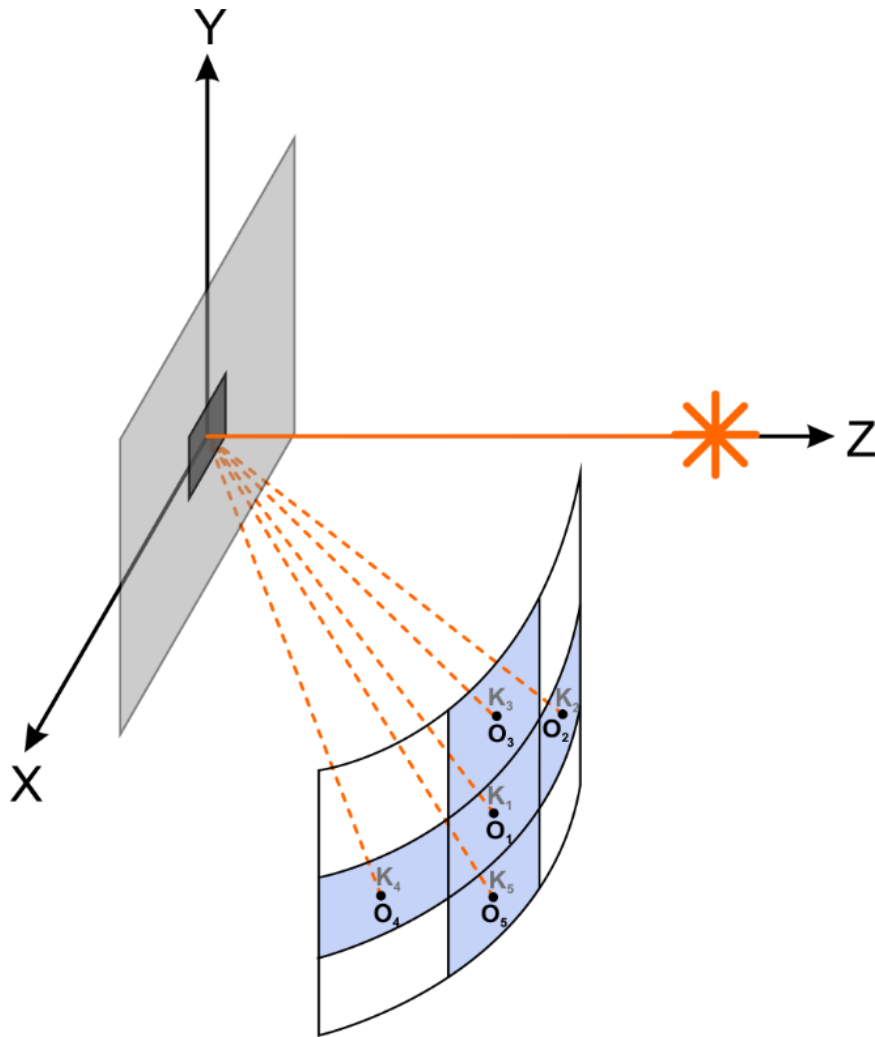


Рисунок 1.7. Схема наблюдения.

В диссертации предложен метод расчёта фазовой функции компьютерно-синтезированного нанооптического защитного элемента, формирующего 2D изображения с кинетическими эффектами движения. Область оптического дифракционного элемента разбивается на элементарные области  $G_{ij}$ ,  $i=1, \dots, I$ ,  $j=1, \dots, J$ . Центр элементарной области  $G_{ij}$  будем обозначать как  $(x_i, y_j)$ . Расчёт фазовой функции компьютерно-синтезированного нанооптического элемента, формирующего 2D изображения с кинетическими эффектами движения состоит из двух этапов: на первом этапе в каждой элементарной области  $G_{ij}$  рассчитываются диаграммы направленности рассеянного излучения. На втором этапе по

заданной диаграмме направленности восстанавливается фазовая функция  $\varphi(\xi, \eta)$  в элементарных областях  $G_{ij}, i=1, \dots, I, j=1, \dots, J$ .

### 1.3. Метод расчёта диаграммы направленности в элементарных областях

В диссертации предлагается двухэтапный метод решения задачи синтеза. Оптический элемент разбивается на элементарные области, размером около 50 микрон. Этот размер находится за пределами разрешения глаза человека.

На рисунке 1.7 из точки наблюдения  $O_n$  наблюдатель видит кадр  $K_n$ . Каждая точка кадра  $K_n$  является для наблюдателя либо светящейся, либо нет в зависимости от того, какую диаграмму направленности имеет элементарная область. Каждая элементарная область  $G_{ij}$  оптического элемента в принципе участвует в формировании всех изображений  $K_n, n=1, \dots, N$ , формируемых оптическим элементом. Предложим алгоритм расчета диаграммы направленности каждой элементарной области по заданным кадрам изображения. На рисунке 1.8 приведена схема разбиения оптического элемента на элементарные области  $G_{ij}, i=1, \dots, I, j=1, \dots, J$ . Центр элементарной области  $G_{ij}$  обозначаем как  $(x_i, y_j)$ .

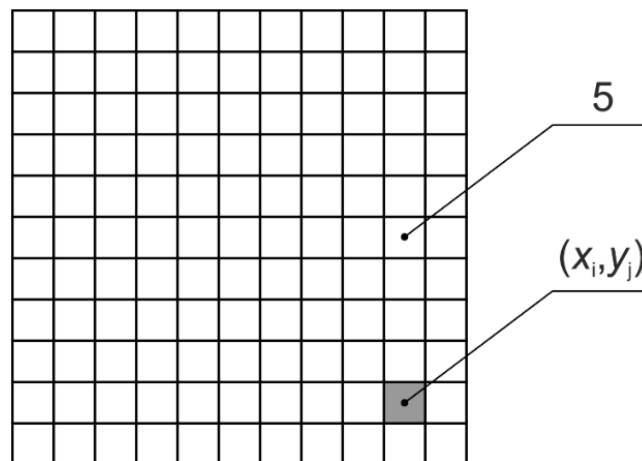


Рисунок 1.8. Схема разбиения области  $G$  на элементарные области.

Рисунок 1.9 иллюстрирует то, как определяется интенсивность луча  $L_n$  в направлении  $(\varphi_n, \theta_n)$  для каждого  $n, n=1, \dots, N$ . Все изображения в кадрах  $K_n, n=1, \dots, N$  являются монохроматическими. Яркость точки  $(x_i, y_j)$  на кадре  $K_n$  измеряется в градациях серого. Интенсивность луча  $L_n$  соответствует яркости точки  $(x_i, y_j)$  на каждом кадре  $K_n$ , то есть если глаз наблюдателя находится под углами  $(\varphi_n, \theta_n)$ , то область  $G_{ij}$  видна как точка, яркость которой

соответствует яркости соответствующей точки  $(x_i, y_j)$  на кадре  $K_n$ . Размер элементарной области составляет не более 50 мкм и глаз видит эту область как точку.

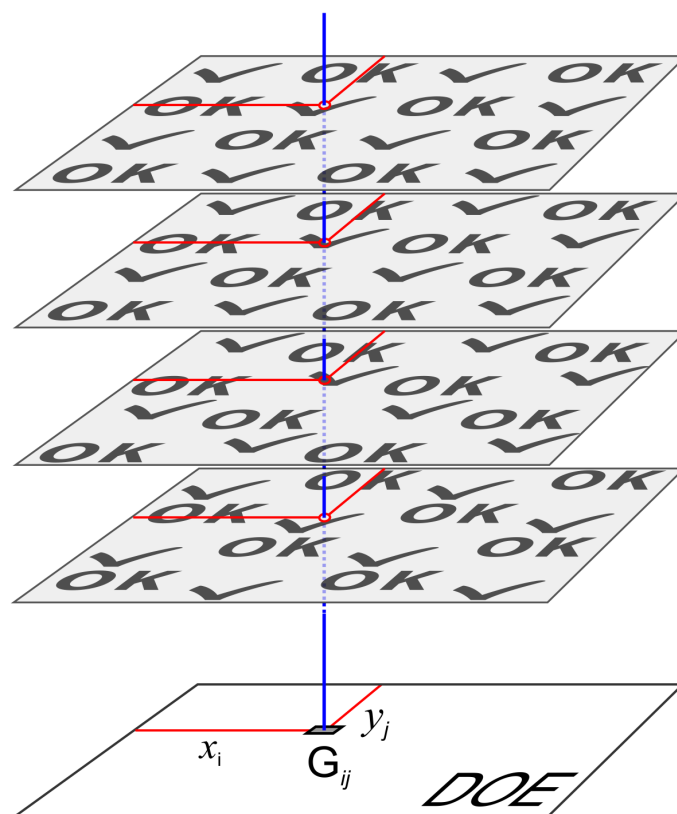


Рисунок 1.9. Схема формирования диаграммы направленности в элементарных областях.

Проделав эту операцию для каждого луча  $L_n$ , выходящего из центра элементарной площадки, во все точки наблюдения  $O_n$  мы сформируем диаграмму направленности рассеянного излучения из каждой элементарной области  $G_{ij}$  под всеми углами  $(\varphi_n, \theta_n)$ ,  $n=1\dots N$ . Диаграмма направленности каждой элементарной области  $G_{ij}$  представляет собой набор из  $N$  лучей, и каждый луч  $L_n$  имеет заданную интенсивность. Определив точки пересечения лучей  $L_n$  с фокальной плоскостью  $z=f$  и задав яркость в точках пересечения равной интенсивности лучей  $L_n$ , мы формируем функцию  $F(x,y)$  в уравнении (1.3). На рисунке 1.10 приведены четыре фрагмента диаграммы направленности в разных элементарных областях. Для каждой элементарной области Функция  $F(x,y)$  представляет собой изображение, состоящее из  $N$  точек разной интенсивности. Число кадров  $N$  обычно составляет несколько сотен.

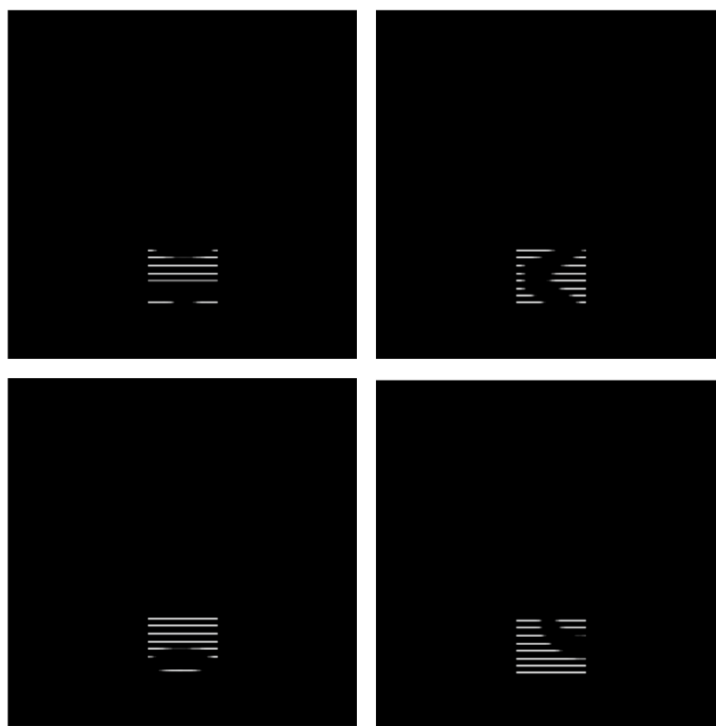


Рисунок 1.10. Примеры диаграмм направленности в элементарных областях.

На рисунке 1.11 приведена оптическая схема, используемая для расчёта фазовой функции  $\varphi(\xi, \eta)$  в элементарных областях  $G_{ij}$ ,  $i=1, \dots, I$ ,  $j=1, \dots, J$ . После того, как в каждой элементарной области реконструированной диаграммы направленности рассеянного света, в элементарных областях  $G_{ij}$ ,  $i=1, \dots, I$ ,  $j=1, \dots, J$ , решается задача расчёта фазовой функции  $\varphi(\xi, \eta)$ . Рассчитав  $\varphi(\xi, \eta)$  во всех элементарных областях  $G_{ij}$ , мы получаем фазовую функцию на всей области оптического элемента.

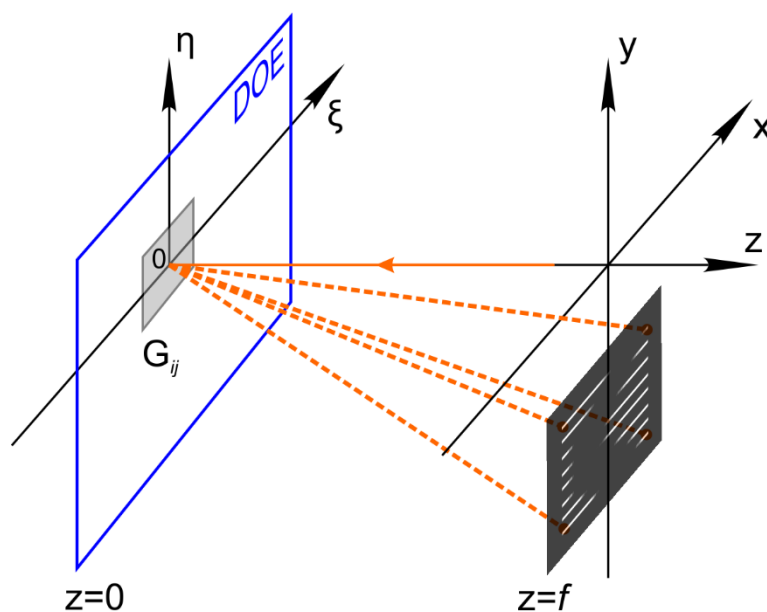


Рисунок 1.11. Оптическая схема расчета фазовых функций в элементарных областях.



Расчёт фазовой функции из уравнений (1.3) и (1.4) осуществляется для длины волны зеленого цвета  $\lambda=525\text{нм}$ . Фазовая функция  $\varphi_{ij}(x,y)$  в элементарной области  $G_{ij}$  находится из решения уравнения:

$$\left| \gamma \iint_{G_{ij}} u(\xi, \eta, 0 - 0) \exp(ik\varphi(\xi, \eta)) \exp\left\{ ik \frac{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}{2f} \right\} d\xi d\eta \right| = F(x, y). \quad (1.7)$$

Фрагмент функции  $F(x,y)$  приведен на рисунке 1.10. Глубина микрорельефа  $h_{ij}(x,y)$  оптического элемента однозначно определяется заданием его фазовой функции  $\varphi_{ij}(x,y)$ . При нормальном падении света на оптический элемент  $h_{ij}(x,y)=0,5 \varphi_{ij}(x,y)$ .

Таким образом, в диссертации предложен способ расчёта фазовой функции нанооптических элементов, формирующих изображения с кинематическими эффектами. Каждая элементарная область  $G_{ij}$  участвует в формировании изображений сразу всех кадров  $K_n, n=1..N$ , что принципиально отличает предложенный способ от классической задачи расчёта киноформа [46,77].

#### **1.4. Пример реализации нанооптического элемента, формирующего 2D изображение с кинематическими эффектами движения**

С целью демонстрации эффективности разработанных методов синтеза был рассчитан и изготовлен нанооптический элемент, формирующий 2D изображение с кинематическими эффектами движения его фрагментов при наклоне оптического элемента [A13, A23].

Для формирования изображения использовался набор кадров, приведенный на рисунке 1.4. Размер оптического элемента: 25 x 25 мм. Схема наблюдения движения фрагментов при наклоне оптического элемента приведена на рисунке 1.3(а). Источник и наблюдатель неподвижны, оптический элемент наклоняется вокруг оси  $Ox$ . Характер движения фрагментов изображения – орто-параллактический (рисунок 1.4). Используя 400 кадров изображений  $K_n$ , видимых наблюдателю из точек  $O_n$ , были рассчитаны диаграммы направленности в каждой элементарной области  $G_{ij}$ . Размер элементарных областей – 50 микрон.

По заданной диаграмме направленности в каждой элементарной области  $G_{ij}$  была рассчитана фазовая функция  $\varphi(x,y)$ . После бинаризации фазовой функции был рассчитан и изготовлен с помощью электронно-лучевой технологии микрорельеф нанооптического элемента. Глубина микрорельефа составляет порядка 0,15 микрона. Киноформы, формирующие

изображение, являются бинарными. Наблюдение осуществляется в окрестности первого или минус первого порядка дифракции. С помощью гальваники были изготовлены мастер-матрицы для тиражирования оптических элементов. Оптические элементы в виде защитных наклеек были изготовлены с помощью стандартного оборудования для производства рельефных голографических элементов.

Фрагмент рассчитанного микрорельефа нанооптического элемента представлен на рисунке 1.12. Размеры фрагмента 20 x 20 микрон.

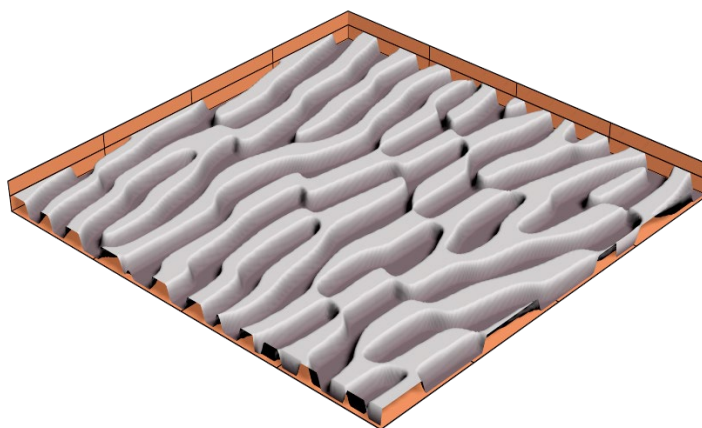


Рисунок 1.12. Фрагмент рассчитанного микрорельефа бинарного киноформа.

На рисунке 1.13 приведены фотографии, полученные с изготовленного нанооптического элемента при разных углах наклона элемента вверх/низ.



Рисунок 1.13. Фотографии нанооптического элемента в окрестности первого порядка дифракции.

Как видно из фотографий, визуальный эффект смещения фрагментов изображений хорошо контролируем. Как видно из рисунка 1.13 при наклонах оптического элемента в

направлении вверх-вниз фрагменты изображения смещаются в направлении влево-вправо. При наклонах оптического элемента в направлении влево-вправо фрагменты изображений смещаются вверх-вниз. Такой характер движения фрагментов изображения называется ортопараллактическим.

### 1.5. Постановка обратной задачи синтеза нанооптических элементов на основе бинарных линз Френеля, формирующих визуальные кинетические эффекты в 2D изображениях

В этом параграфе рассматриваются различные варианты формирования кинетических эффектов движения фрагментов 2D изображений на основе использования плоских линз Френеля с параболоидной и седлообразной фазовой функцией.

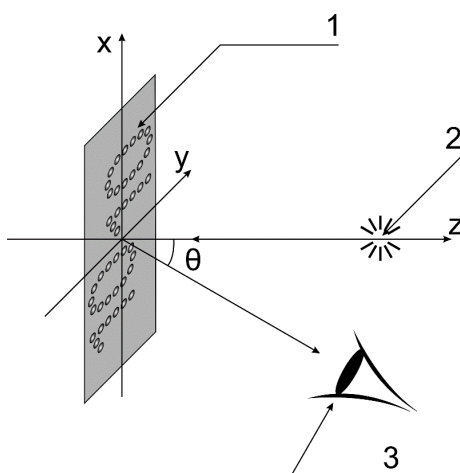


Рисунок 1.14. Схема наблюдения визуальных защитных признаков.

На рисунке 1.14 оптический элемент обозначен цифрой 1, источник света обозначит цифрой 2. Источник расположен на оси  $z$ , которая перпендикулярна плоскости оптического элемента. Глаз наблюдателя находится в плоскости  $Oxz$  по углом  $\theta$  к оси  $z$ . Ось  $Ox$  совпадает с выделенным направлением защитной нити. Поворот вокруг оси  $Oy$  соответствует наклонам нити вверх-вниз. Схема, представленная на рисунке 1.14, использует непересекающиеся линзы Френеля. Изображение, видимое наблюдателю, представляет собой набор ярких точек. При освещении точечным источником в каждой линзе наблюдатель видит яркую точку. В этом случае диапазон смещения изображения при наклонах оптического элемента не может превысить диаметра линзы. В диссертации предложена конструкция плоского оптического элемента, которая обеспечивает максимальный сдвиг фрагментов изображения. Для этого используются пересекающиеся плоские внеосевые линзы Френеля.

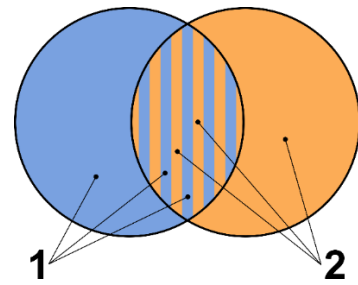
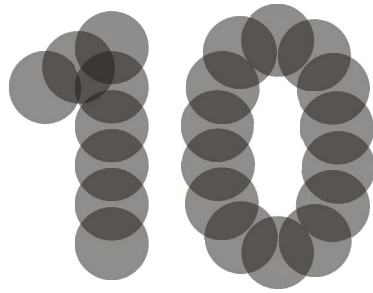


Рисунок 1.15. Схема расположения линз Френеля. Рисунок 1.16. Схема пересечения.

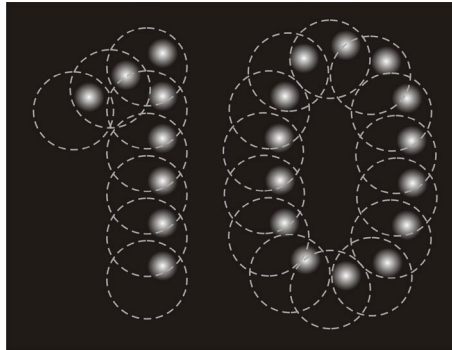
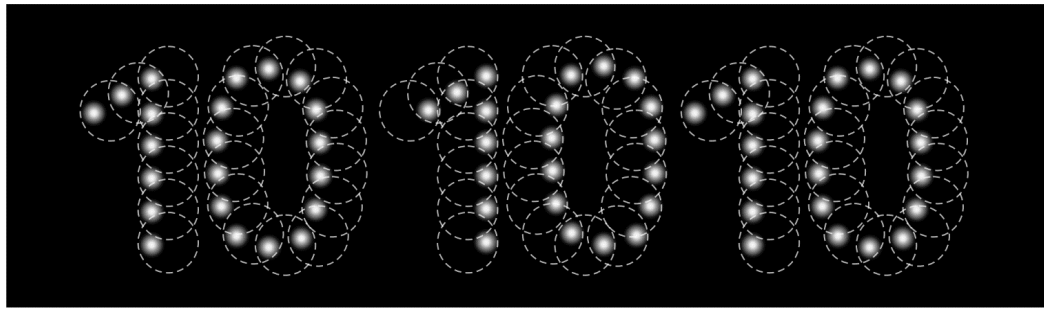


Рисунок 1.17. Фрагмент изображения.

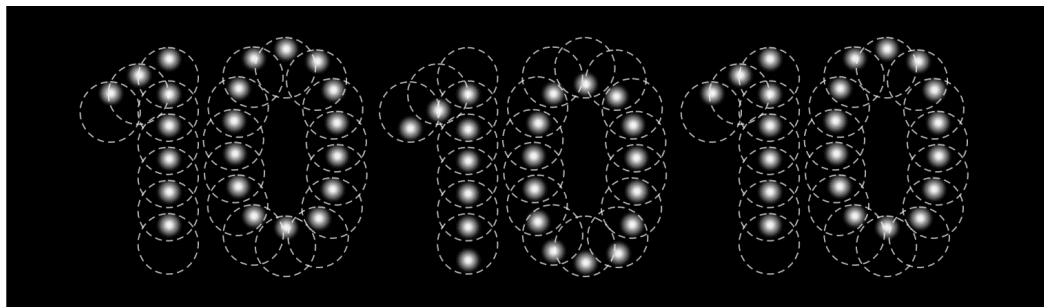
На рисунке 1.15 приведена схема формирования фрагмента изображения, который представляет из себя цифру 10 с помощью пересекающихся линз Френеля. На рисунке 1.16 приведена схема формирования микрорельефа двух пересекающихся плоских оптических элементов. Область пересечения элемента 1 и элемента 2 разбита на подобласти, например, на полосы, как показано на рисунке 1.16. При этом в нечетных полосах (они обозначены голубым цветом) формируется микрорельеф первого элемента, в четных полосах (оранжевые) формируется микрорельеф второго элемента. Ширина полос разбиения выбирается достаточно малой, меньше разрешающей способности глаза человека (менее 50 микрон). Таким образом, разбиение области пересечения оптических элементов не заметно для глаза человека, а диапазон смещения яркой точки для каждого элемента будет равным его диаметру. Использование пересекающихся элементов позволяет сделать диаметр элементов больше, чем непересекающихся элементов. Этот эффект проиллюстрирован на рисунке 1.17. При пересечении плоских оптических элементов на половину эффект движения изображений увеличивается в 2 раза.

Для того чтобы увеличить эффект относительного смещения фрагментов изображений еще в два раза необходимо чтобы фазовые функции соседних фрагментов изображений имели разный знак. В этом случае два соседних фрагмента изображения будут двигаться в разные стороны, что обеспечивает еще двукратное увеличение смещения. Таким образом можно

обеспечить четырехкратное увеличение относительного сдвига фрагментов изображений, что обеспечивает эффективный визуальный эффект движения [A18, A19].



а)



б)

Рисунок 1.18. Сдвиг фрагментов изображений при наклоне оптического элемента:  
(а) параболическая, (б) седлообразная фазовая функция.

Для формирования изображений можно использовать линзы Френеля как с параболической, так и седлообразной фазовой функцией. Параболическая  $\varphi_1(x, y)$  и седлообразная  $\varphi_2(x, y)$  фазовые функции задаются соответственно формулами:

$$\varphi_1(x, y) = C \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2f}, \quad (1.8)$$

$$\varphi_2(x, y) = C(x-x_0)(y-y_0). \quad (1.9)$$

здесь  $C$  — заданная константа. Параметры  $x_0, y_0$  для внеосевых линз не равны нулю. В зависимости от выбора параболической или седлообразной фазовой функции меняется характер смещения точек, формирующих изображения. Если для параболических внеосевых линз при наклоне оптического элемента вверх-вниз фрагменты изображения смещаются так как показано на рисунке 1.18(а), то для седлообразных линз Френеля фрагменты изображения смещаются так как показано на рисунке 1.18(б). Как видно из рисунка 1.18(а) фрагменты изображения двигаются по горизонтали, в то время как на рисунке 1.18(б) фрагменты изображений сдвигаются по вертикали. В литературе принято смещение на рисунке 1.18(а) называть параллактическим, а смещение на рисунке 1.18(б) ортопараллактическим.

Приведенные на рисунке 1.18 смещения фрагментов изображений видны наблюдателю при углах наклона не более 40 градусов. Линзы Френеля занимают лишь небольшую часть области оптического элемента. Можно сформировать структуру нанооптического элемента так, что при больших углах наблюдения более 60 градусов наблюдатель на всей области оптического элемента будет видеть другое цветное изображение.

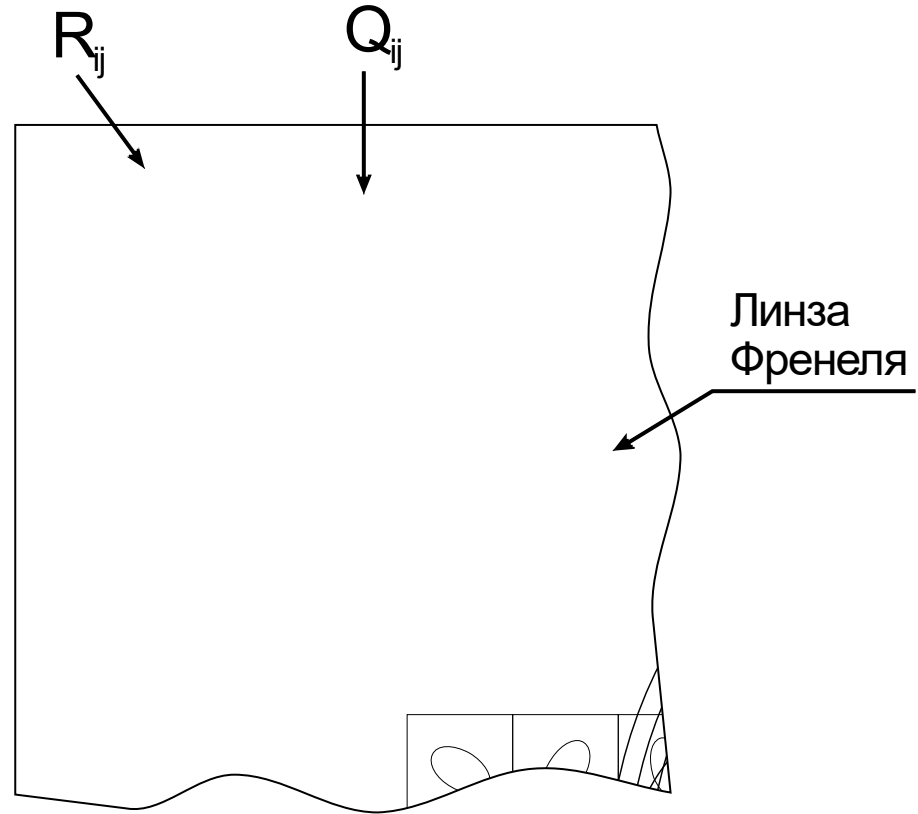


Рисунок 1.19. Схема расположения линз Френеля и дифракционных решеток на области оптического элемента.

Для реализации таких оптических элементов необходимо наличие специальной микроструктуры. На рисунке 1.19 представлена схема расположения линз Френеля и дифракционных решеток в области оптического элемента. Оптический элемент разбит на элементарные области  $R_{ij}$ ,  $i=1\dots I$ ,  $j=1\dots J$ . Области  $R_{ij}$  являются прямоугольниками, размер которых не превосходит 200 микрон. Области  $R_{ij}$  частично заполняются дифракционными решетками, расположенными в областях  $Q_{ij}$ , размер которых не превосходит 40 микрон, как это показано на рисунке 1.19.

Области  $Q_{ij}$  с дифракционными решетками могут располагаться как в линзах Френеля, так и вне их. Дифракционные решетки имеют разное направление и разные периоды от 0,4 до 0,7 микрона. Если каждая из областей  $R_{ij}$ ,  $i=1\dots I$ ,  $j=1\dots J$  содержит дифракционную решетку, то при больших углах дифракции на всей области оптического элемента наблюдатель будет видеть цветное изображение, пример дизайна которого приведен на рисунке 1.20.



Рисунок 1.20. Пример дизайна изображения, видимого наблюдателю при больших углах дифракции  $\theta > 60^\circ$ .

Если дизайн изображения задан, то расчет параметров дифракционных решеток, формирующих заданное изображение при больших углах дифракции, не представляет трудностей [48].

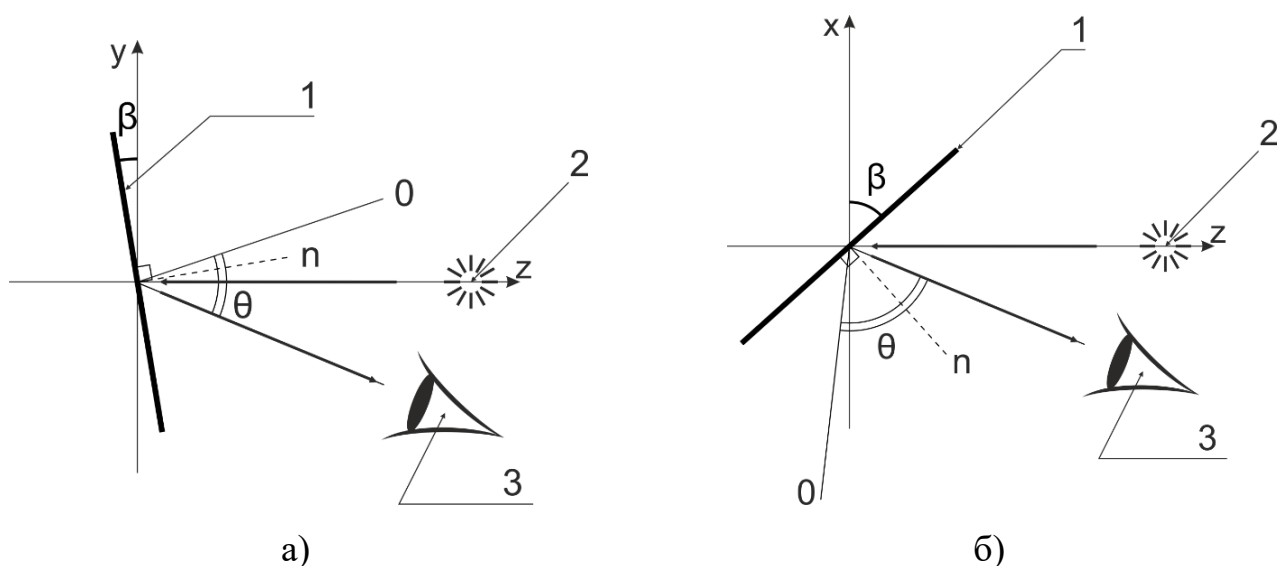
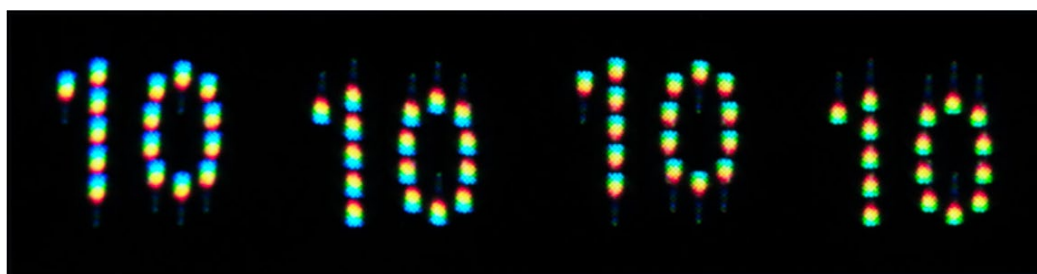


Рисунок 1.21. Схемы наблюдения визуальных изображений: (а) при углах дифракции  $\theta < 40^\circ$ , (б) при углах дифракции  $\theta > 60^\circ$ .

На рисунке 1.21(а) приведена схема наблюдения визуального оптического эффекта при малых углах дифракции  $\theta < 40^\circ$ . Угол дифракции является углом между нулевым порядком дифракции и направлением на наблюдателя. На рисунке 1.21(б) приведена схема наблюдения визуального эффекта при больших углах дифракции  $\theta > 60^\circ$ . Угол дифракции также является углом между нулевым порядком дифракции и направлением на наблюдателя. На рисунке 1.21 угол  $\beta$  является углом поворота оптического элемента вокруг оси  $Oy$ , положение нормали к поверхности оптического элемента обозначено пунктирной линией.

В качестве примера был синтезирован нанооптический элемент, в котором использовались внеосевые бинарные линзы с седлообразной фазовой функцией. Диаметр линз составляет 1 мм, размер оптического элемента составляет 20мм x 5мм. Микрорельеф плоских

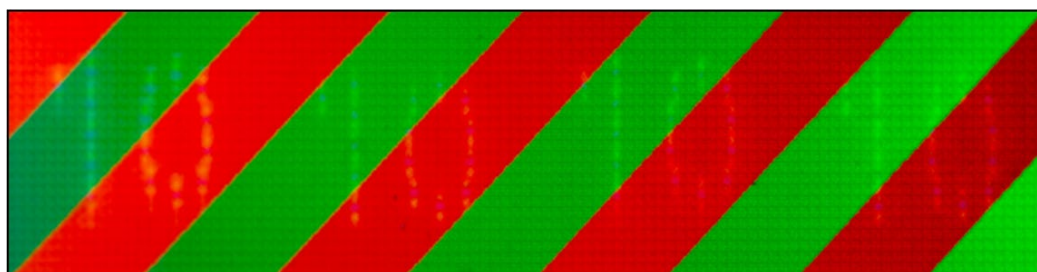
оптических элементов записывался с помощью электронно-лучевой литографии на пластинах с электронным резистом. Глубина микрорельефа, формирующего изображение, составляла 0,15 микрона.



а)



б)



в)

Рисунок 1.22. Фотографии нанооптического элемента при его наклоне вправо\влево.

На рисунке 1.22(а) и 1.22(б) приведены фотографии, полученные при освещении нанооптического элемента белым светом при наклоне оптического элемента вверх/вниз в диапазоне углов дифракции менее 40 градусов. На рисунке 1.22(в) приведена фотография, полученная при угле дифракции более 60 градусов. Максимальный эффект относительного смещения фрагментов изображения при углах дифракции менее 40 градусов достигал 2 миллиметра при размере цифр изображения 3 миллиметра.

Существует другая возможность формирования 2D изображений с кинетическими эффектами движения его фрагментов, в которой для формирования оптического элемента используются микролинзы [85]. В диссертации описан нанооптический элемент на основе



плоских пересекающихся плоских линз Френеля. Плоский оптический элемент является однослойным. В патенте [85] для формирования изображения используется два слоя. Один слой состоит из массива микролинз, второй из микроизображений. Основное предложенного в диссертации варианта формирования микрорельефа на основе линз Френеля заключается в том, что толщина оптического элемента в этом случае намного меньше толщины оптического элемента изготовленного с помощью массива целиковых линз.

## 1.6. Выводы

1. В Главе 1 предложены два варианта формирования изображений с кинетическими эффектами движения. В первом варианте нанооптический элемент формируется на базе киноформа [A13, A23]. Во втором варианте для синтеза нанооптических элементов используются внеосевые линзы Френеля [A18, A19]. С помощью электронно-лучевой технологии были изготовлены образцы нанооптических элементов на основе бинарных киноформов и на основе внеосевых линз Френеля, которые продемонстрировали эффективность разработанных методов синтеза нанооптических элементов для формирования 2D изображений с кинетическими эффектами движения.

2. В первом варианте метод расчета фазовой функции оптического элемента состоит из двух этапов. На первом этапе рассчитывается диаграмма направленности в каждой элементарно области  $G_{ij}$ . Диаграмма направленности однозначно определяется заданием кадров изображения. Расчет диаграммы направленности производится прямым вычислением в рамках геометрической оптики. Задача, решаемая на первом этапе расчета фазовой функции нанооптического элемента, является корректной задачей по Тихонову. По сути дела, эта задача решается прямыми вычислениями и не представляет вычислительной сложности. По заданной диаграмме направленности рассчитывается правая часть уравнения 1.6  $F(x,y)$  для каждой элементарной площадке.

На втором этапе по заданной функции  $F(x,y)$  в каждой элементарной области рассчитывается фазовая функция из нелинейного уравнения 1.6. Последняя задача является обратной некорректно поставленной задачей, для решения которой используются итерационные алгоритмы. Параметром регуляризации является количество итераций, которое зависит от погрешности [7]. Эта задача с вычислительной точки зрения является намного более сложной. Время реализации первого этапа алгоритма в десять раз меньше, чем время приближенного решения уравнения 1.6.

Можно пытаться решать сразу обратную задачу поиска фазовой функции на всей области оптического элемента по заданным кадрам изображения. Такая попытка предпринята, например в работе [86]. Количество неизвестных в этом случае будет порядка  $10^{10}$ . Однако основные

проблемы связаны с тем, что в этом случае искомая функция будет очень быстро осциллирующей, так что количество осцилляций может составлять 10000 и более. Обратную задачу 1.6 можно рассматривать как задачу минимизации функционала, которая решается итерационным методом. Поскольку задача является нелинейной, то функционал имеет очень большое число локальных минимумов. Характерным поведением итерационного процесса в этом случае является то, что он останавливается в одном из ближайших локальных минимумов. Основные результаты работы [86] заключаются в том, что в изложенной выше постановке с попыткой решения обратной задачи на всем оптическом элементе в оптическом диапазоне никаких перспектив на настоящее время не существует. Чтобы не ограничиваться только отрицательным результатом, авторы провели расчеты для длины волны 180 микрон.

В предложенном в диссертации варианте выигрыш в решении обратной задачи в количестве неизвестных составляет  $10^5$  раз, (по сравнению с  $10^{10}$  неизвестных на всем оптическом элементе). Это позволяет решать задачу синтеза в двухэтапном методе даже на персональных компьютерах. Типичное время расчета на первом этапе алгоритма (расчет диаграмм направленности) в десять раз меньше времени расчета фазовой функции в элементарной области. Разработанный в первой главе диссертации нанооптический элемент принципиально отличается от киноформа. Киноформ как оптический элемент формирует один кадр изображения. Разработанный в диссертации нанооптический элемент под разными углами наблюдения формирует разные кадры изображения.

3. Во втором варианте нанооптический элемент формируется с помощью внеосевых пересекающихся линз Френеля. Специальная конструкция оптического элемента в области пересечения линз обеспечивает максимально большой сдвиг фрагментов изображений при наклоне оптического элемента. Рассмотрены два варианта с седлообразной и параболической фазовой функцией линз. В зависимости от типа фазовой функции меняется характер движения фрагментов изображений. Разработанные нанооптические элементы могут быть тиражированы, что обеспечивает их низкую цену при массовом производстве. Разработанные нанооптические элементы могут быть использованы для защиты банкнот, брендов, ID, паспортов, акцизных марок.

## **Глава 2. Многоградационные компьютерно-синтезированные нанооптические защитные элементы с эффектом смены изображения при повороте на 180 градусов**

*В данной главе используются материалы, опубликованные в статьях [A8], [A15], книге [A28], сборниках трудов [A31], A[32].*

### **2.1. Постановка обратной задачи компьютерного синтеза нанооптического защитного элемента с эффектом смены изображений при ввороте на 180 градусов и метод её решения**

Важной задачей в защитных технологиях является разработка новых визуальных защитных признаков, которые легко контролируются. В этой главе предложено два таких признака. В первом признаке наблюдатель видит разные 2D изображения при повороте на 180 градусов. Во втором признаке при повороте на 180 градусов меняется цветность изображения. В настоящее время опубликовано большое количество работ по синтезу оптических структур, размеры которых не превышают длины волны света. Такие структуры позволяют менять спектральный состав света при изменении положения оптического элемента. Эти структуры получили название плазмонных.

Одним из направлений разработок в этой области являются исследования фотонных кристаллов, которые уже позволяют решать различные задачи науки и техники [87,88,89,90]. Характерные размеры элементов фотонных кристаллов не превосходят длину волны фотонов. Поэтому для решения прямых и обратных задач необходимо использовать математические модели на основе уравнений Максвелла [91,92]. Для создания фотонных кристаллов используются как голографическая, так и лазерная литографии [93], так и электронно-лучевая литография [94]. Фотонные кристаллы можно формировать как чисто из диэлектриков, так и с включением металлических фрагментов [95]. Одна из задач которая успешно решается с помощью плазмонных технологий – изменение спектрального состава света [96]. Это направление представляется очень перспективным для защитных технологий.

Несмотря на большое количество публикаций о плазмонных технологиях, количество публикаций в области посвященных синтезу защитных элементов очень ограничено. Основная проблема связана с тем, что одним из основных требований к защитным элементам является тиражируемость. Например, требования к защитным элементам на циркулирующих банкнотах являются очень жесткими. В публикации [97] обсуждаются возможности использования однослойных плазмонных структур для формирования цветных изображений. Используя разные расположения и размеры субволновых элементов можно получать изображения меняющие цвета

при изменении поляризации падающего света. Отметим публикацию [68], в которой на основе электронно-лучевой технологии разработан и изготовлен защитный оптический элемент с кинематическими эффектами движения. Особенностью разработанного элемента является то, что он имеет цвет, формируемый плазмонной структурой. В работе [98] с использованием плазмонных структур разработан нанооптический элемент, обладающий следующим свойством. При освещении оптического элемента на просвет лазерным излучением разной длины волны наблюдатель видит три разных 2D изображения вокруг нулевого порядка дифракции. Такой признак можно использовать для экспертного контроля в защитных технологиях. Основная проблема заключается в возможности тиражирования таких элементов.

В главе 2 диссертации разработаны новые защитные признаки, в том числе признак, позволяющий менять цветность оптического элемента при повороте его на 180 градусов. Для формирования нанооптических элементов, формирующих такой защитный признак, используется электронно-лучевая технология с точностью формирования асимметричного микрорельефа порядка 10 нанометров по его глубине. Разработанные в этой главе нанооптические элементы тиражируются миллионами экземпляров и уже используются для защиты от подделок.

Рассмотрим постановку обратной задачи синтеза нанооптического элемента, формирующего эффект смены двух изображений при повороте на 180 градусов. Оптический защитный элемент представляет собой плоский дифракционный элемент, микрорельеф которого при освещении белым светом формирует изображение, видимое наблюдателю. На рисунке 2.1(а) приведена схема наблюдения визуального эффекта смены двух 2D изображений, в которой дифракционный оптический элемент поворачивается на угол 180 градусов вокруг оси Oz. На дифракционный оптический элемент Q падает излучение от источника белого света S. Наблюдатель видит свет, дифрагированный от элемента Q в направлении L. Основным защитным признаком – смена изображений при повороте оптического элемента на угол  $\theta$  равный 180 градусов. При нормальном положении оптического элемента ( $\theta=0$ ) наблюдатель видит изображение в плюс первом порядке дифракции, при повороте на угол  $\theta$  равный 180 градусам - изображение в минус первом порядке дифракции. Защитный признак легко контролируется визуально - изображения в первом и минус первом порядках должны быть разными. При фиксированном угле  $\theta$  в окрестности 0 или 180 градусов наблюдатель может видеть дополнительный визуальный эффект. При смещении источника света вверх-вниз и влево-вправо наблюдается кинематический эффект движения фрагментов изображения. Схема наблюдения эффекта движения приведена на рис. 2.1(б).

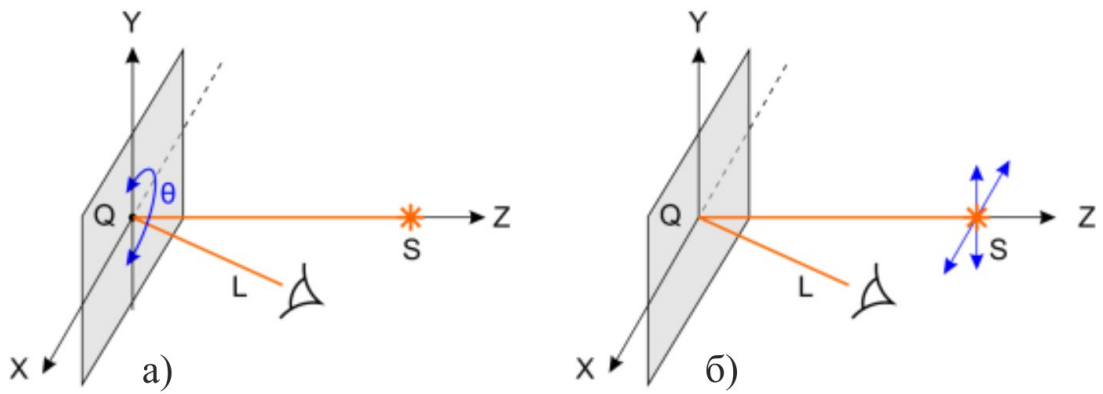


Рис. 2.1. Схема наблюдения визуального эффекта: (а) при повороте DOE на 180 градусов, (б) при смещении источника света.

Заметим, что если микрорельеф дифракционного оптического элемента является симметричным, то изображение в плюс первом и минус первом порядках всегда совпадают. Для того чтобы изображения в плюс первом и минус первом порядке было разным, DOE должен иметь асимметричный микрорельеф. На рисунке 2.1(б) представлена схема наблюдения, в которой оптический элемент поворачивается в плоскости OXY на  $180^\circ$  вокруг оси OZ. На рисунке 2.2(а) и 2.2(б) приведены два изображения, которые наблюдатель видит соответственно при повороте в  $0^\circ$  и  $180^\circ$ . Для простоты в статье используются два бинарных 2D изображения. Основной визуальный контролируемый признак – изображения 2.2(а) и 2.2(б) отличаются друг от друга.

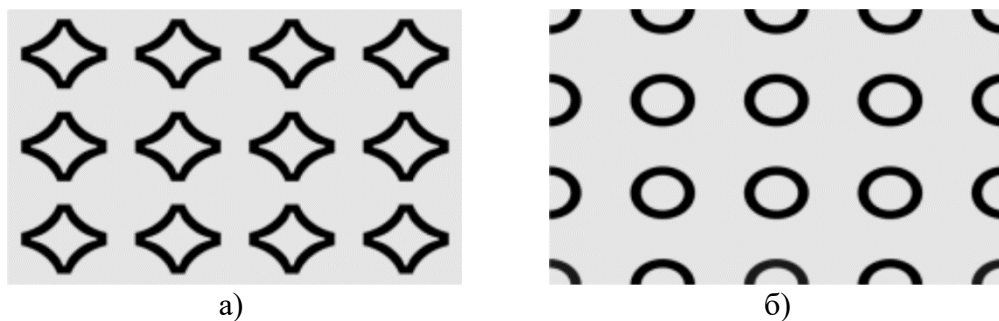


Рис 2.2. Изображение, видимое при  $\theta=0^\circ$  (а) и при  $\theta=180^\circ$  (б).

Важной задачей в компьютерной технологии синтеза дифракционных оптических элементов является расчет фазовой функции  $\varphi(\xi, \eta)$ . Эта задача решается в два этапа. Разобьем область G оптического элемента на элементарные области  $G_{ij}$ ,  $i=1 \dots I, j=1 \dots J$  (рисунок 2.3). Размер элементарных областей не превосходит 100 мкм, что лежит за пределами разрешения человеческого глаза. На первом этапе решается задача формирования диаграммы направленности каждой элементарной области  $G_{ij}$ .

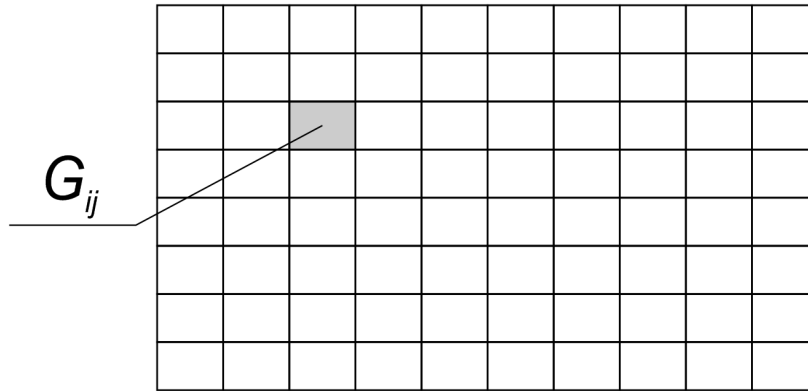


Рис. 2.3. Схема разбиения DOE на элементарные области.

Диаграмма направленности элементарной области однозначно задается кадрами изображений  $K_{n,m}$ ,  $n=1\dots N$ ,  $m=1\dots M$ . Кадры изображений в окрестности плюса первого порядка дифракции обозначим  $K^{(1)}_{n,m}$ , а кадры изображений в окрестности минуса первого порядка обозначим  $K^{(-1)}_{n,m}$ . Приведенные на рисунке 2.2 изображения соответствуют кадрам  $K^{(1)}_{N/2,M/2}$  и  $K^{(-1)}_{N/2,M/2}$ . Обычно количество кадров составляет несколько сотен. Защитный признак включает эффект смены изображений при повороте оптического элемента на 180 градусов. В окрестности углов  $\theta$  равных 0 и 180 градусов при смещении источника света наблюдатель может видеть кинематические эффекты движения фрагментов изображений. Задавая разные кадры, можно получать различные варианты движения изображений.

На рисунке 2.4(a) приведены пять кадров в окрестности  $\theta$  равной 0 при смещениях источника света влево-вправо и вверх-вниз. На рисунке 2.4(b) приведены пять кадров в окрестности  $\theta$  равной 180 градусов при смещениях источника света влево-вправо и вверх-вниз.

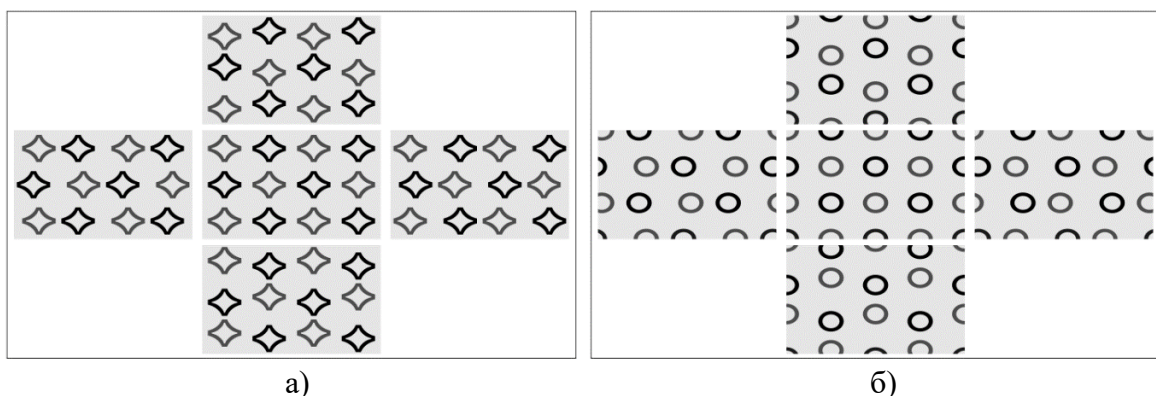


Рис. 2.4. Пример кадров: (а) в окрестности  $\theta=0^\circ$ , (б) в окрестности  $\theta=180^\circ$ .

Приведенный вариант смещения кадров формирует так называемое параллактическое движение, когда при наклоне оптического элемента в направлении вверх/вниз фрагменты

изображения сдвигаются в том же направлении. Возможны и другие варианты сдвигов изображений.

Используя набор кадров в окрестности  $\theta$  равной 0 и 180 градусов, можно рассчитать диаграмму направленности каждой области. На рисунке 2.5 приведена схема формирования диаграммы направленности элементарной области  $G_{ij}$ .

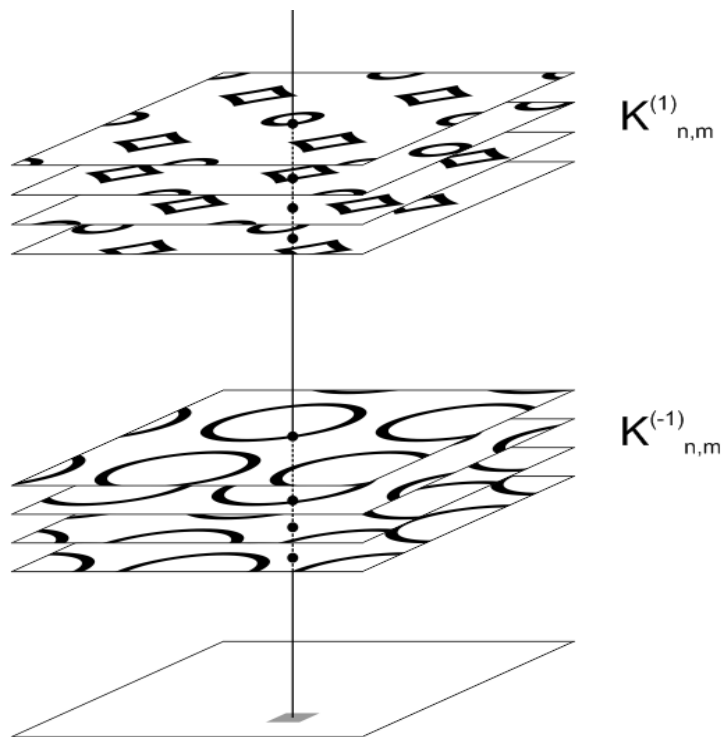


Рис. 2.5. Схема формирования диаграммы направленности произвольной элементарной площадки.

Расположим стопку кадров  $K_{n,m}^{(1)}$  и  $K_{n,m}^{(-1)}$  над областью оптического элемента. Восстановим перпендикуляр из центра элементарной области. Если перпендикуляр пересекает белую область кадра  $K_{n,m}$ , это означает, что луч падающий из источника света  $S$ , находящегося в позиции соответствующей кадру  $K_{n,m}$ , должен отклониться в направлении на наблюдателя  $L$ . Геометрия оптической системы задана так что не представляет труда рассчитать углы наклона луча в сферической системе координат с центром в середине элементарной области. Если точка пересечения черная, то луч света не участвует в формировании этой точки изображения. Продолжая эту процедуру, мы сформируем для выбранной элементарной области все лучи света, которые участвуют в формировании всех кадров изображения. Максимальное количество лучей в диаграмме направленности элементарной области совпадает с количеством кадров. Если все лучи продолжить до пересечения с плоскостью, параллельной плоскости оптического элемента, то получится бинарное черно-белое изображение, которое определяет диаграмму направленности элементарной области  $G_{ij}$ . На рисунке 6 приведен фрагмент такого изображения.



Рис. 2.6. Фрагмент диаграммы направленности элементарной области.

На втором этапе рассчитывается фазовая функция  $\varphi(\xi, \eta)$  для каждой элементарной области  $G_{ij}$ . На рисунке 2.7 приведена оптическая схема для расчета фазовой функции в элементарной области  $G_{ij}$ . Элементарная область расположена в плоскости  $O\xi\eta$  оптического элемента. В плоскости  $Oxy$  задана диаграмма направленности, рассчитанная изложенным выше способом. Обозначим это изображение  $F(x, y)$ .

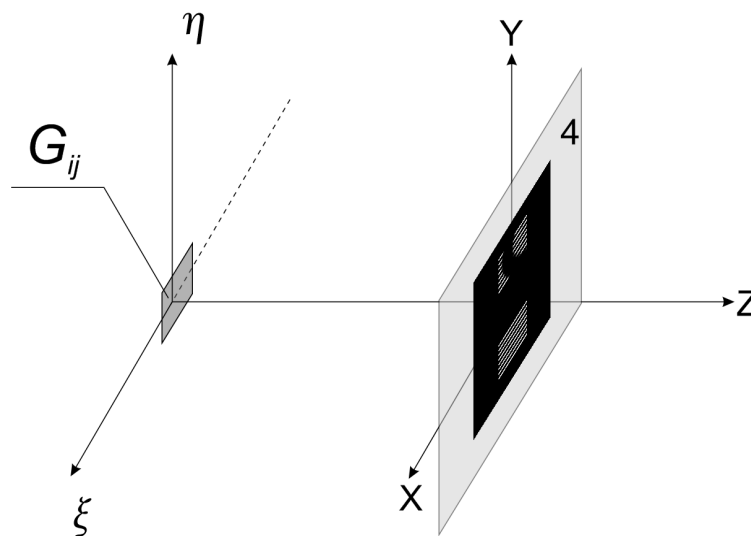


Рис 2.7. Схема расчета фазовой функции  $\varphi(\xi, \eta)$  элементарной области  $G_{ij}$ .

Обратная задача состоит в том чтобы по заданному изображению  $F(x, y)$  в плоскости  $z=f$  рассчитать фазовую функцию  $\varphi(\xi, \eta)$  в плоскости  $O\xi\eta$ . Функции  $F(x, y)$  и  $\varphi(\xi, \eta)$  связаны следующим соотношением:

$$\left| \gamma \iint_{G_{ij}} u(\xi, \eta, 0 - 0) \exp(i\varphi(\xi, \eta)) \exp\left\{ ik \frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{2f} \right\} d\xi d\eta \right| = |u(x, y, f)| = F(x, y). \quad (2.1)$$



Здесь  $u(\xi, \eta, 0 - 0)$  – скалярное волновое поле падающего света,  $u(x, y, f)$  – скалярное волновое поле сформированное DOE в плоскости  $z=f$ ,  $f$  – расстояние до наблюдателя,  $k$  – волновой вектор,  $\gamma$  – известная константа. Итерационные методы приближенного решения задачи (2.1) подробно обсуждаются в главе 1.

Результатом расчетов является фазовая функция  $\varphi(\xi, \eta)$  в области  $G_{ij}$ . Произведя расчеты для каждой элементарной области, получаем фазовую функцию во всей области оптического элемента. На рисунке 2.8 представлен фрагмент фазовой функции с большим увеличением. Видно, что микрорельеф не является симметричным. Фазовая функция однозначно определяет микрорельеф. Например при нормальном падении света глубина микрорельефа  $h(\xi, \eta) = 0,5\varphi(\xi, \eta)$ .

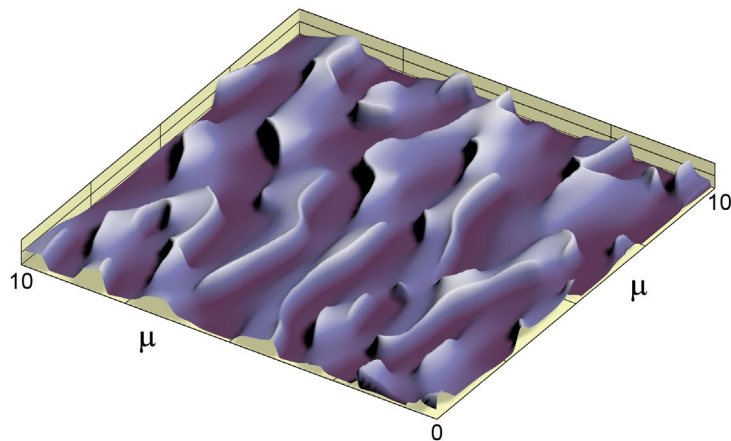


Рис. 2.8. Фрагмент микрорельефа элементарной области.

Размер фрагмента микрорельефа на рисунке 2.8 составляет 10 x 10 микрон. Глубина микрорельефа составляет 0,3 микрона. Видно, что микрорельеф не является симметричным. Как видно из рисунка 2.8, микрорельеф имеет сложную структуру. С помощью математического моделирования в диссертации было установлено, что точность формирования микрорельефа по высоте должна быть в пределах от 10 до 20 нанометров. Существуют различные технологии формирования микрорельефа: оптическая с помощью ультрафиолетовых лазеров [59], рентгеновская [99]. В диссертации показано, что для синтеза нанооптических элементов наиболее подходящей является электронно-лучевая литография. Формированию микрорельефа с помощью электронно-лучевой литографии посвящено множество публикаций [100]. Современные электронно-лучевые литографы обладают высоким разрешением до 10 нанометров. Технология синтеза микрорельефа хорошо разработана и включает исследования эффекты взаимодействия сфокусированного электронного пучка с электронным резистом такие как проксимити эффект [101,102]. Используя методы электронно-лучевой литографии на стандартном оборудовании, можно синтезировать микрорельеф с требуемой для разрабатываемых в диссертации нанооптических элементов точностью.

## 2.2. Пример реализации нанооптического защитного элемента с эффектом смены изображений при повороте на 180 градусов

Для демонстрации эффективности предложенных решений был изготовлен образец дифракционного оптического элемента, формирующего защитный признак "switch на 180°" [A15]. Оптический элемент имел размеры 17мм x 10мм. Размер элементарной области при разбиении оптического элемента на элементарные области составлял 50 микрон, количество кадров, используемых для формирования диаграммы направленности элементарных областей в каждом наборе кадров  $K_{n,m}^{(1)}$  и  $K_{n,m}^{(-1)}$  составляло по 400 кадров. Общее количество используемых кадров составило 800. Расчет фазовой функции DOE осуществлялся для фиксированной длины волны  $\lambda=546\text{нм}$ . Для экспонирования использовался электронно-лучевой генератор shaped-beam Zeiss ZBA-21 с минимальным размером пикселя 25 нм x 25 нм. Глубина микрорельефа составляет 0.27 микрона. Точность изготовления микрорельефа 10 нм.

С помощью гальванопластики были изготовлены мастер-матрицы для изготовления нанооптического элемента. С использованием стандартного оборудования для тиражирования голограмм были изготовлены голографические наклейки, которые были использованы для съёмок визуальных эффектов.

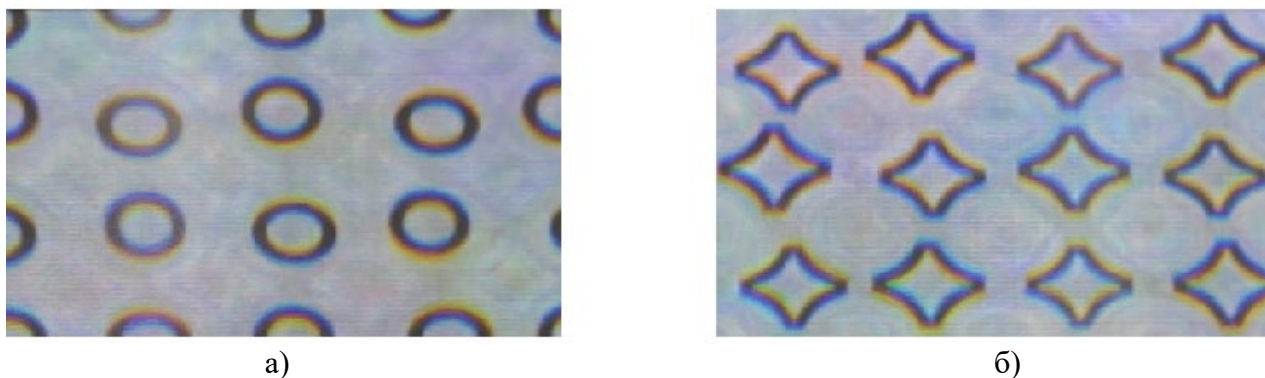
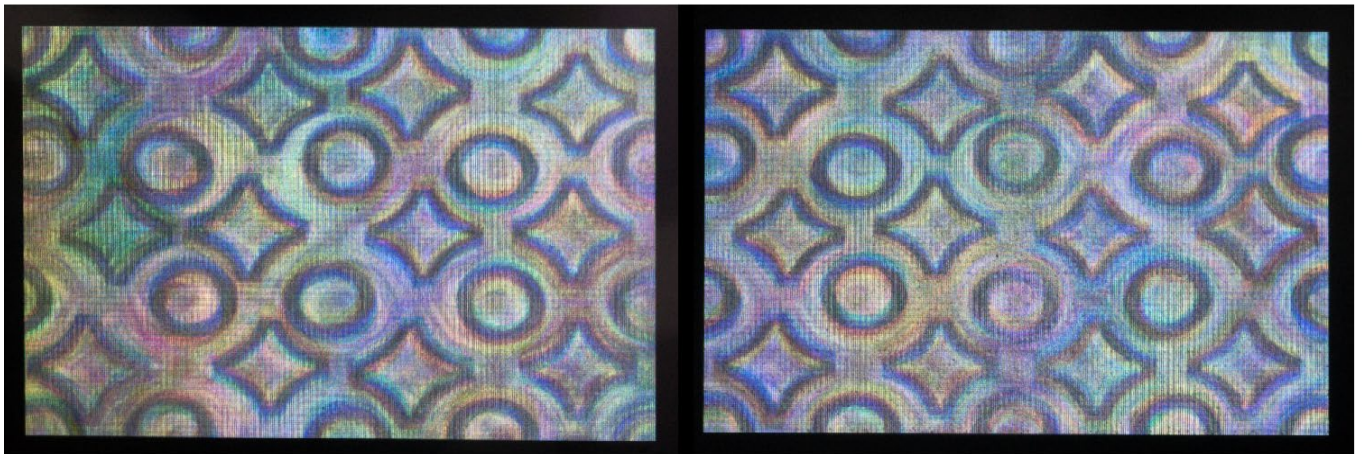


Рис. 2.9. Фотографии изготовленного нанооптического элемента в разных положениях: в окрестности  $\theta=0^\circ$ (а) и в окрестности  $\theta=180^\circ$ (б).

В соответствии со схемами наблюдения 2.1(а) и 2.1(б) были получены реальные фотографии и видео при освещении нанооптического элемента точечным источником белого света, приведенные на рис. 2.9. Как видно из видео при повороте оптического элемента на 180 градусов в схеме наблюдения 2.1(б) происходит четкий эффект смены двух изображений. В окрестности 0 и 180 градусов при смещении позиции источника света, наблюдатель может видеть кинематические эффекты движения изображения.



а)

б)

Рис. 2.10. Фотографии нанооптического элемента с симметричным микрорельефом в разных положениях: в окрестности  $\theta=0^\circ$  (а) и в окрестности  $\theta=180^\circ$  (б).

Абсолютное большинство компаний, работающих в области синтеза оптических защитных элементов, используют оптические методы записи оригиналов. С помощью таких технологий можно изготовить только симметричный микрорельеф, что автоматически приводит к тому, что изображения при  $\theta=0^\circ$  и  $\theta=180^\circ$  градусов будут совпадать, как показано на рис. 2.10.

### **2.3. Постановка обратной задачи компьютерного синтеза нанооптического защитного элемента с эффектом потери цветности при повороте на 180 градусов**

В это параграфе обсуждается задача синтеза нанооптического элемента, формирующего другой вариант смены изображений при повороте на 180 градусов. При угле поворота  $\theta=0^\circ$  наблюдатель видит цветное изображение. При повороте на 180 градусов изображение теряет цветность и становится серым.

На рисунке 2.11 приведена схема наблюдения эффекта смены изображений при повороте оптического элемента. Пусть плоский оптический защитный элемент расположен в плоскости  $z=0$ . Будем полагать, для простоты изложения, что источник дневного света расположен на оси  $Oz$ . Левый и правый глаз наблюдателя расположены в плоскости  $z=f$ . Угол  $\theta$  отсчитывается от оси  $Oz$ . Угол  $\varphi$  — это угол поворота нанооптического элемента в плоскости  $Oxy$  вокруг оси  $Oz$ .

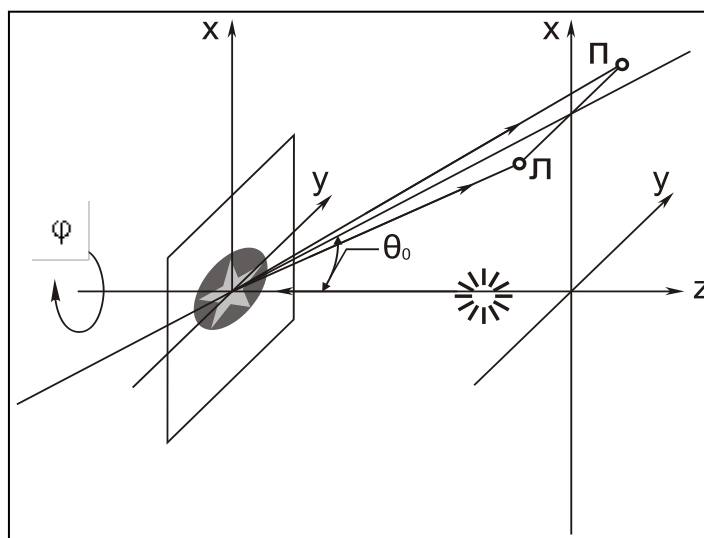


Рисунок 2.11. Схема наблюдения эффекта смены изображений при повороте оптического элемента.

Хорошо известно, как сформировать эффект смены двух цветных изображений при повороте на 90 градусов. Разобьем область оптического элемента на элементарные области, как показано на рисунке 2.12.

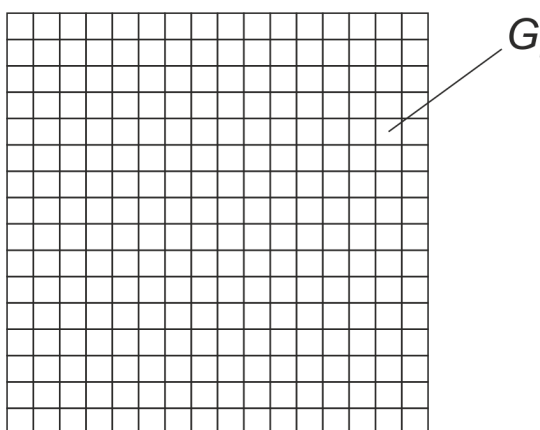


Рисунок 2.12. Разбиение оптического элемента на элементарные области.

Каждую из элементарных областей  $G_i$ ,  $i=1, \dots, N$  разобьем на две части так, что одна из них отвечает за формирование изображения при угле  $\varphi=0^\circ$ , а другая – за формирование изображения при угле  $\varphi=90^\circ$ . Формируя в каждой из частей областей  $G_i$ , дифракционные решетки разной ориентации и разных периодов, можно сформировать разные изображения, видимые наблюдателю при угле  $\varphi=0^\circ$  и угле  $\varphi=90^\circ$ . Если микрорельеф плоского оптического элемента сформирован с помощью фрагментов дифракционных решеток с симметричным микрорельефом, то при повороте голограммы на  $180^\circ$  наблюдатель увидит то же самое (только перевёрнутое) изображение. Если мы хотим, чтобы при  $0^\circ$  и при повороте на  $180^\circ$  изображения

не были идентичны, то микрорельеф нанооптического элемента должен быть асимметричным. Если микрорельеф оригинала записан оптическим образом, то микрорельеф будем симметричным и изображения при  $0^\circ$  и  $180^\circ$  будут идентичными.

Для формирования изображения будем использовать схему разбиения области оптического элемента на элементарные области  $G_i, i=1, \dots, N$ , представленную на рисунке 2.12. Размеры элементарных областей  $G_i$  составляют порядка  $40 \times 40$  мкм. Такое разбиение лежит за пределами разрешающей способности глаза человека. Для формирования микрорельефа дифракционных оптических элементов будем использовать как фрагменты с симметричным микрорельефом, так и фрагменты с асимметричным микрорельефом. Выделим область с асимметричным рельефом на дифракционном оптическом элементе. Это область формирования изображения «колибри», которая соответствует белому цвету на рисунке 2.13. Во всей остальной области дифракционного оптического элемента (чёрный цвет на рисунке 2.13) используются фрагменты с симметричным микрорельефом.



Рисунок 2.13. Области симметричного и асимметричного микрорельефа.

На рисунке 2.14 приведен дизайн нанооптического элемента, который формирует эффект смены изображений при повороте на  $180$  градусов. Видно, что цветное изображение колибри после поворота на  $180$  градусов теряет цветность и превращается в силуэт птицы, залитый серым цветом.

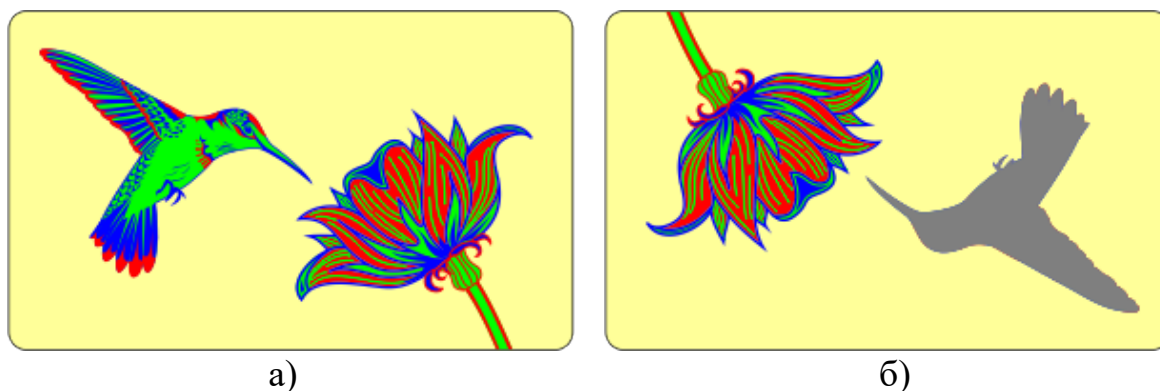


Рисунок 2.14. Дизайн нанооптического элемента. Эффект смены изображений при повороте на  $180^\circ$ : (а)  $\varphi=0$ , (б)  $\varphi=180^\circ$ .

Основной проблемой является расчёт и формирование микрорельефа в области, где рельеф асимметричен. Элементарные области с асимметричным микрорельефом формируют асимметричную диаграмму направленности рассеянного излучения, как показано на рисунке 2.15. Параметры прямоугольников  $Q_1$  и  $Q_2$  определяются следующим образом. Ширина прямоугольника  $Q_1$  при нормальном положении дифракционного оптического элемента при  $\varphi=0^\circ$  выбирается так, чтобы перекрыть оба глаза наблюдателя. При угле  $\theta=0^\circ$  наблюдатель видит цветное изображение «колибри». Цвет пикселей формирующего изображение колибри при угле  $\theta=0^\circ$  определяет угол наклона прямоугольника в области  $z>0$ .

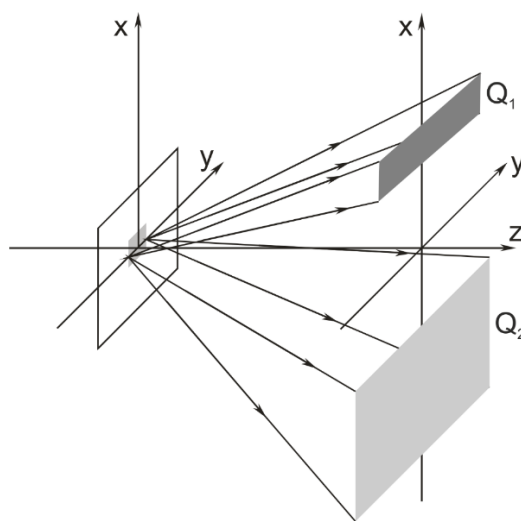


Рисунок 2.15. Диаграмма направленности рассеянного излучения для элементарных областей с асимметричным микрорельефом.

При повороте на  $180^\circ$  глаза наблюдателя перекрываются областью  $Q_2$ , размеры которой во много раз превышают размеры области  $Q_1$ , что обеспечивает существенное уменьшение интенсивности света, регистрируемого наблюдателем.

Для расчёта фазовой функции в каждой элементарной области  $G_i$  использовался алгоритм, подробно описанный в главе 1. Рассчитав фазовую функцию в каждой элементарной области  $G_i$ ,  $i=1, \dots, n$ , получаем фазовую функцию для всей области оптического элемента. Зная фазовую функцию  $\varphi(\xi, \eta)$  можно определить глубину микрорельефа в каждой точке  $(\xi, \eta)$  оптического элемента.

Расчет фазовой функции  $\varphi(\xi, \eta)$  сводится к решению нелинейного операторного уравнения:

$$A\varphi = \left| \gamma \iint_{G_i} u(\xi, \eta, 0 - 0) \exp(ik\varphi(\xi, \eta)) \exp\left\{ ik \frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{2f} \right\} d\xi d\eta \right| = F(x, y) \quad (2.1)$$

На рисунке 2.16 представлена функция  $F(x, y)$ .

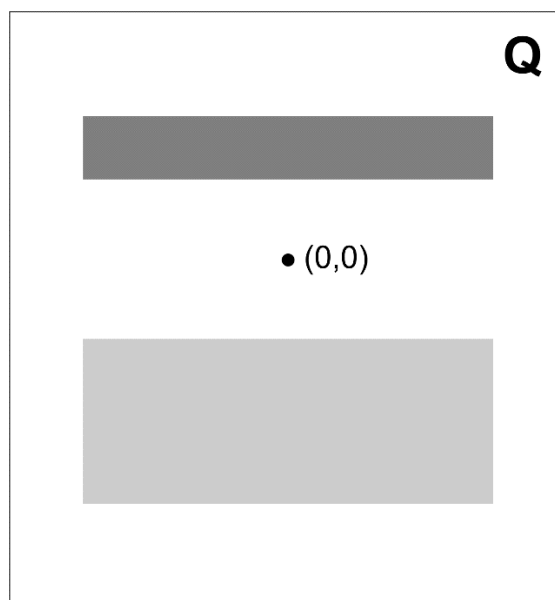


Рисунок 2.16. Функция  $F(x,y)$ .

Значение функции  $F(x,y)$  в прямоугольнике Q прямо пропорционально потемнению в каждой точке рисунка 2.16. Итерационный метод решения нелинейного операторного уравнения подробно описан в пункте 2 главы 1.

На рисунке 2.17(а) представлен пример фрагмента киноформа с асимметричным микрорельефом, рассчитанный для длины волны  $\lambda=0.65$  мкм. С помощью киноформов формируется изображение «колибри». Вся остальная область оптического элемента сформирована с помощью фрагментов с симметричным микрорельефом, пример которого представлен на рисунке 2.17(б). Максимальная глубина микрорельефа составляет порядка 0.3 мкм. Размеры приведённых фрагментов микрорельефа составляют порядка  $8 \times 8$  мкм. Для формирования качественных визуальных изображений, сменяющих друг друга при повороте на  $180^\circ$ , характерные периоды киноформов для цветов R,G,B составляют 1.23, 1.06, 0.9 мкм соответственно.

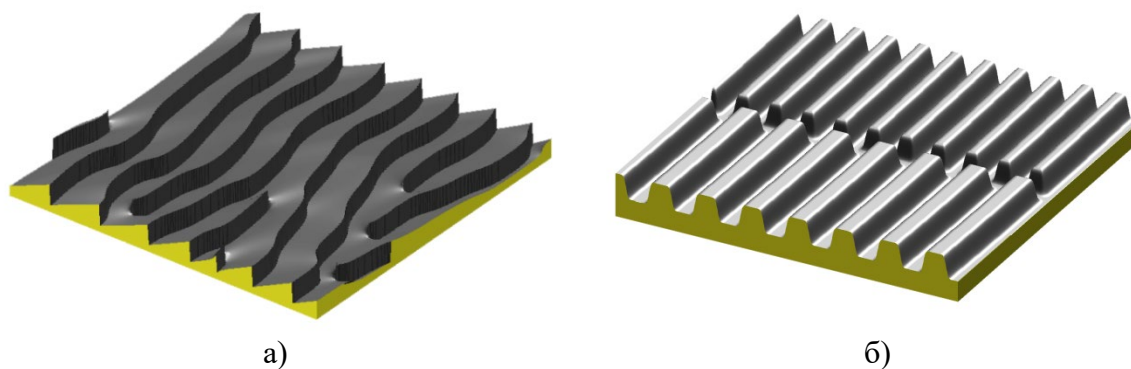


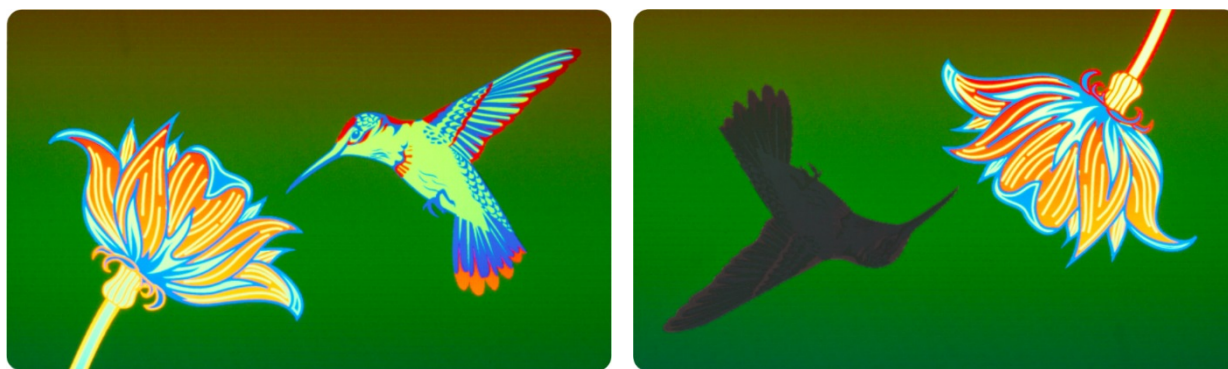
Рисунок 2.17. Фрагменты рассчитанного микрорельефа оптического элемента:  
(а) асимметричного, (б) симметричного.

Как видно из рисунка 2.17, микрорельеф киноформа имеет сложную структуру. Фрагмент киноформа на рисунке 2.17(а) рассчитан для длины волны равной 0,65 микрона.

#### 2.4. Пример реализации нанооптических элементов, формирующих эффект смены цветности изображений при повороте на 180 градусов

Для демонстрации эффективности разработанных технологий был изготовлен пример нанооптического элемента [А8]. Микрорельеф нанооптического элемента был сформирован с помощью электронно-лучевой литографии с разрешением 0,1 микрона. Точность формирования микрорельефа – 10 нм.

Пример 1. Для изготовления первого нанооптического элемента использовался дизайн «Колибри», представленный на рисунке 2.5. Нанооптический элемент включает часть (внутри силуэта колибри), сформированную с помощью многоградационного киноформа с точностью формирования микрорельефа 10 нм. Остальная часть оптического элемента, представляющая собой прямоугольник размерами 20мм x 35мм, имеет бинарный рельеф и заполнена дифракционными решетками. На рисунке 2.9 представлены фотографии изготовленного нанооптического элемента, полученные при его освещении точечным источником белого света.



а) б)  
Рисунок 2.18. Фотографии нанооптического элемента при разных углах поворота:  
(а)  $\varphi=0$ , (б)  $\varphi=180^\circ$ .

Как видно из рисунков 2.14 и 2.18, реальные изображения хорошо совпадают с дизайном нанооптического элемента.

Фотографии получены с никелевой матрицы для тиражирования защитного оптического элемента. Как видно из рисунка 2.18, цветное изображение, видимое наблюдателю при угле  $\varphi=0$  и повороте на 180 градусов, изменяется. Изображение «колибри» при  $\varphi=180^\circ$  теряет свою цветность и становится серым. Защитный признак заключается в смене изображений при



повороте оптического элемента на 180 градусов. Как видно защитный признак легко контролируем.

## **2.5. Электронно-лучевая технология изготовления микрорельефа плоских элементов в оптическом диапазоне**

Для изготовления элементов плоской оптики в оптическом диапазоне можно использовать различные технологии, в том числе фотолитографию, рентгеновскую литографию, электронно-лучевую литографию и другие. Наиболее перспективной технологией формирования микрорельефа оптических защитных элементов является электронно-лучевая литография.

Электронно-лучевая литография представляет собой технологию синтеза различных микроструктур с предельно высоким разрешением. Запись микроструктур осуществляется электронным лучом. Разрешение записи определяется минимальным размером электронного луча. Электронный луч можно сфокусировать в пятно размером до нескольких нанометров, что и определяет высочайшее разрешение электронно-лучевой технологии. Для сравнения, даже теоретически минимальный размер сфокусированного пятна лазерного излучения не может быть меньше длины волны излучения. Таким образом, можно утверждать, что разрешение электронно-лучевой технологии выше оптической на два порядка.

Кратко принцип записи по электронно-лучевой технологии выглядит следующим образом. Экспонирование производится на тонкую пленку специального вещества чувствительного к воздействию электронов – электронный резист, который нанесен на тонкую пластину. Электронный луч управляется компьютером и засвечивает определенные участки в соответствии с заданной программой. После экспонирования пластина с электронным резистом проходит специальную обработку – resist developing процесс. В этом процессе участки резиста засвеченные электронным лучом и незасвеченные участки обрабатываются по-разному. Например, незасвеченные участки остаются на пластине, а участки резиста засвеченные лучом удаляются; в результате в проэкспонированных участках образуются углубления. Таким образом, в результате обработки пластины с резистом на ней образуется микрорельеф с высоким разрешением.

Электронно-лучевая технология была разработана в 60-х годах прошлого века прежде всего для нужд микроэлектроники, где требуется точная запись изображений высокого разрешения. Микроэлектроника является основным приложением электронно-лучевой технологии и в настоящее время.

Синтез оптических элементов является новым приложением электронно-лучевой

технологии. Первые практически значимые результаты в этой области относятся к началу 90-х годов 20 века [73]. Особенно эффективно применение электронно-лучевой технологии для записи оптических элементов предназначенных для работы в видимом диапазоне длин волн. Во многих случаях микроструктуры таких элементов имеют размеры до долей микрона и требуемая точность записи недостижима для какой-либо другой технологии, существующей в настоящее время. Именно по этой причине электронно-лучевая технология была использована в диссертации для формирования защитных элементов в оптическом диапазоне. Диссертация содержит 9 глав. В каждой главе с помощью электронно-лучевой литографии изготовлены образцы нанооптических элементов для формирования 2D или 3D изображений.

Рассмотрим процесс создания плоского оптического элемента с помощью электронно-лучевой литографии. Его можно представить поэтапно:

1. Расчет наноструктур оптического элемента и подготовка данных для экспонирования.
2. Процесс экспонирования на электронном генераторе. На этом этапе, в соответствии с подготовленными данными, электронным лучом экспонируются определенные области (размером до долей микрона). Этот процесс может занимать в зависимости от до десятков часов.
3. Процесс обработки электронного резиста. Проэкспонированные области и непроэкспонированные обрабатываются по-разному – например, проэкспонированные области удаляются. На этом этапе образуется микрорельеф элемента на электронном резисте.

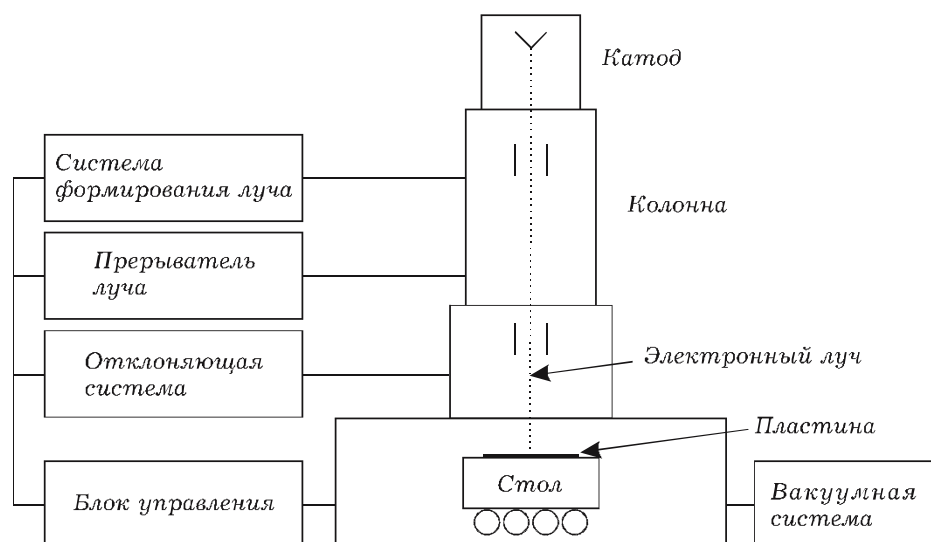


Рисунок 2.19. Блок-схема электронно-лучевого генератора.

Основной технологический процесс – экспонирование производится в специальных приборах - электронно-лучевых генераторах изображений. Эти приборы являются сложнейшим комплексом устройств, вобравших в себя последние достижения науки техники. На рисунке 2.19 показана схема прибора. Генератор состоит из электронной колонны, системы формирования и

отклонения луча, прецизионного стола, системы управления с программным обеспечением, различных вспомогательных систем (вакуумной, загрузки/выгрузки пластин и т.д.). Принцип работы генератора следующий: электроны эмитируются катодом и разгоняются напряжением в несколько десятков киловольт; сложнейшая система из десятков электростатических и магнитных линз формирует электронный луч размером в десятки нанометров и отклоняет его с точностью до нанометров. Некоторые модели электронных генераторов позволяют также изменять форму электронного луча. Сфокусированный электронный луч попадает на пластину, покрытую тонкой пленкой вещества чувствительного к воздействию электронов. Система, отклоняющая электронный луч, как правило имеет предел отклонения до 3 мм. Соответственно после обработки лучом поля 3мм на 3мм стол перемещается в другую позицию и происходит экспонирование другого поля.

Требования к электронно-лучевым генераторам и технологическому процессу записи оптических элементов имеют свои особенности и существенные отличия от процессов, предназначенных для микроэлектроники:

1. Высокая плотность микроструктур и высокое разрешение на всей поверхности оптического элемента.

2. Размеры оптических элементов, как правило, больше размеров микросхем.

3. Огромный объем данных - сотни гигабайт. Нетрудно подсчитать, что изображение структуры бинарного элемента при размере элемента дюйм на дюйм и разрешении 0.1 микрон имеет объем 65 гигабайт. Работа с изображениями такого размера является непростой задачей даже для современных мощных компьютеров. Наиболее сложной задачей является формирование многоградационного микрорельефа. Если сравнивать бинарный и многоградационный элемент одного и того же размера, то объем информации для формирования многоградационного микрорельефа в несколько раз превосходит объем информации бинарного микрорельефа.

4. Наибольшую сложность имеет процесс формирования многоградационного микрорельефа. Для таких оптических элементов требуется получить в результате микрорельеф, представляющий собой сложную трехмерную поверхность с точностью по высоте порядка нескольких нанометров.

Соответственно к процессам и оборудованию для создания оптических элементов предъявляются специальные требования:

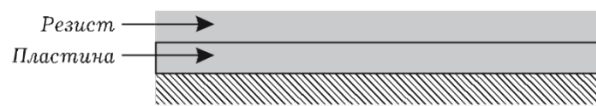
1. Высокая производительность электронно-лучевого генератора.

2. Возможность работы с данными огромного размера.

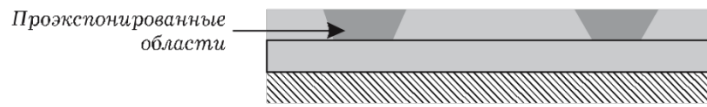
3. Стабильность работы генератора и параметров процесса в течение большого промежутка времени (до нескольких суток).

#### 4. Особая обработка резиста и контроля получаемого микрорельефа.

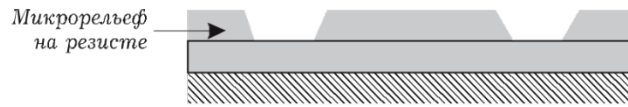
1. Пластина с резистом.



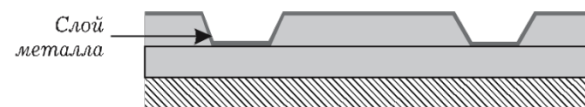
2. Пластина после экспонирования.



3. Пластина после обработки резиста.



4. Металлизированная пластина.



5. Металлическая матрица после процесса гальванопластики.

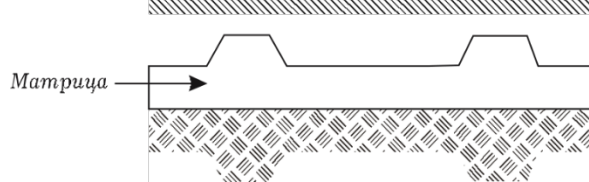


Рисунок 2.20. Схема формирования микрорельефа по электронно-лучевой технологии.

Отдельно остановимся на резистах для записи оптических элементов. На сегодняшний день существует множество различных резистов, чувствительных к электронному лучу, которые обладают разными свойствами [99]. Основными параметрами резистов являются разрешение и чувствительность. Например, резист РММА имеет разрешение в 10 нанометров, а чувствительность порядка 100 кулон на  $\text{см}^2$  [100]. Резист СОР имеет разрешение 1000 нанометров, а чувствительность – 0.3 кулон на  $\text{см}^2$ . Это означает, что на резисте СОР возможно проэкспонировать в 300 раз быстрее, но при этом максимальное разрешение его в 100 раз хуже, чем у резиста РММА. В целом эта зависимость универсальна – чем выше разрешение, тем меньше чувствительность. Таким образом, требуется подбирать оптимальный резист исходя из требуемых параметров конечного оптического элемента.

Резисты делятся на два вида - позитивные и негативные. При обработке позитивного резиста в засвеченных областях образуются углубления. При обработке негативного резиста, наоборот, углубления образуются в незасвеченных областях. Основной характеристикой резиста является зависимость получаемой глубины от засвеченной дозы. На рисунке 2.20 показана последовательность этапов формирования микрорельефа нанооптического элемента с использованием электронно-лучевой литографии [А28, А31, А32].

На первый взгляд задача получения необходимого профиля микрорельефа может показаться простой, так как можно измерить зависимость глубины от заданной дозы. Однако, электроны попадая в резист отклоняются от прямой траектории и часть из них засвечивает соседние области. Этот эффект получил название проксимити эффекта или эффекта близости [102]. Таким образом, глубина микрорельефа в некоторой точке зависит не только от заданной

дозы в этой точке, но и от распределения дозы в окрестностях этой точки. Моделированию этого эффекта посвящено множество работ, и учет влияния этого эффекта в целом поддается успешному математическому моделированию.

Необходимо понимать, что определение оптимальных параметров экспонирования нанооптических элементов в значительной мере зависит от используемого электронно-лучевого оборудования. Их определение в первую очередь происходит в процессе изготовления тестовых и экспериментальных образцов нанооптических элементов.

Отдельно остановимся на методах контроля рельефа, так как для точного воспроизведения трехмерных микроструктур контроль получаемого микрорельефа является необходимым. Фактически идеальным измерителем для этих задач является атомный силовой микроскоп. Глубина микрорельефа бинарных нанооптических элементов составляет порядка 100 нанометров. Глубина микрорельефа составляет порядка 200 нанометров. Характерные размеры микроструктур превышают длину волны. Точность этих устройств до долей нанометра по высоте и единиц нанометров на плоскости, что более чем достаточно для оптических элементов, разработанных в диссертации. Кроме того, для измерений не требуется создания вакуума и каких-либо других сложных операций, что позволяет проводить измерения достаточно оперативно.

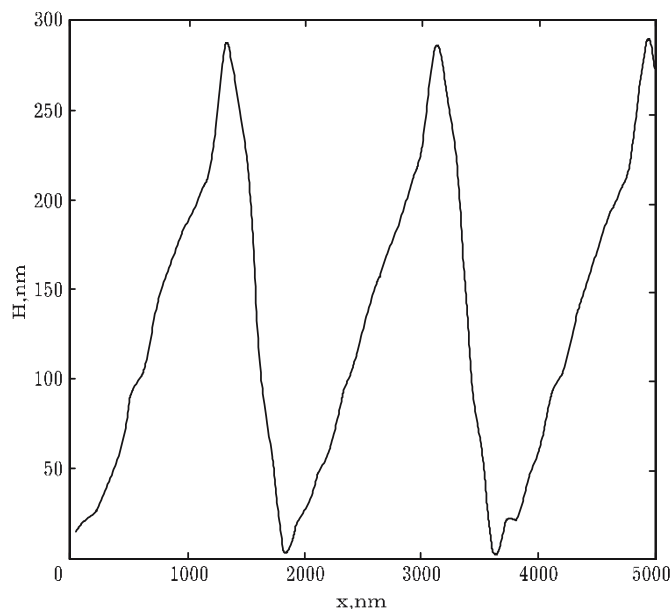


Рисунок 2.21. Профиль микрорельефа многоградационного оптического элемента.

У атомных силовых микроскопов есть определенные ограничения на измерения с микрорельефом, имеющим поверхности, близкие к вертикальным, но, как правило, эти ограничения не являются существенными. На рисунке 2.21 показан фрагмент профиля микрорельефа многоградационного оптического элемента для видимого диапазона записанный

по электронно-лучевой технологии. Видно, что рельеф имеет строго асимметричную структуру, глубина микрорельефа 0.3 мкм, размеры зон 1.8 мкм. Профиль оптического элемента получен с помощью атомного силового микроскопа.

Во всех главах диссертации для формирования бинарного и многоградационных нанооптических элементов использовалась электронно-лучевая литография. Для экспонирования использовался модернизированный электронно-лучевой литограф ZVA-21 с изменяемой формой луча (shaped beam). Формируемый системой электронных линз луч может иметь квадратную или прямоугольную форму. Ускоряющее напряжение литографа равно 20 киловольт. Минимальный размер луча для экспонирования составляет 25 на 25 нанометров. Максимальный размер луча составляет 6.3 микрона. Максимальный размер экспонируемого поля при фиксированном положении стола составляет 3.2 мм x 3.2 мм. Стандартный размер пластин с электронным резистом составляет 5 на 5 дюймов. Максимальный размер пластин для экспонирования составляет 6 на 6 дюймов. Время экспонирования зависит не только от размера нанооптического элемента и разрешения (минимального размера луча), но и от формируемого микрорельефа. При одинаковом размере элемента время экспонирования бинарного микрорельефа обычно в несколько раз меньше, чем время экспонирования многоградационного микрорельефа. Разработанные в диссертации методы позволяют формировать микрорельеф нанооптических элементов с точностью 10 нанометров по глубине.

В конце каждой главы обсуждаются изготовленные образцы нанооптических элементов, формирующие 2D и 3D изображения, в том числе приводятся основные параметры их микрорельефа. Все нанооптические элементы допускают массовое тиражирование с помощью стандартного оборудования для массового производства рельефных (rainbow) голограмм [2].

## 2.6. Выводы

1. В главе 2 предложен новый защитный признак «Эффект смены двух 2D изображений при повороте на 180 градусов». Предложены два варианта эффекта смены изображений.

2. В первом варианте изображения при 0° и 180° состоят из графических символов. При повороте на 180° происходит легко контролируемая визуальная смена изображений [A15]. Расчет фазовой функции нанооптического элемента, формирующего этот визуальный эффект, осуществляется в два этапа аналогично тому, как было описано в главе 1. Оптический элемент разбивается на элементарные области размером менее 100 микрон. Для каждой области рассчитывается диаграмма направленности рассеянного излучения, которая однозначно определяется заданием кадров 2D изображений. Количество кадров изображений может составлять от десятков до нескольких сотен. На втором этапе по заданной диаграмме

направленности реконструируется фазовая функция оптического элемента в каждой элементарной области. Для решения этой обратной задачи используются итерационные алгоритмы, описанные в главе 1.

3. В главе 2 предложен второй вариант эффекта смены двух изображений при повороте на 180 градусов. При  $\theta=0^\circ$  наблюдатель видит цветное изображение. При повороте на  $180^\circ$  изображение теряет цветность и становится серым [A8]. Визуальный эффект легко контролируем. Для решения задачи формирования диаграммы направленности в каждой элементарной области используется параметрическое представление. В этом представлении диаграмма направленности состоит из двух прямоугольников параллельных плоскости  $z=0$ . Прямоугольники расположены в области  $z>0$  и области  $z<0$ . В области  $z>0$  ширина прямоугольника диаграммы направленности является достаточно узкой, чтобы закрыть глаза наблюдателя (рисунок 2.16). Ширина прямоугольника в области  $z>0$  в разы больше, что и определяет эффект потери цветности при повороте на 180 градусов. Для расчета фазовой функции в каждой элементарной области используется итерационный алгоритм, подробно описанный в главе 1.

4. С помощью электронно-лучевой технологии впервые изготовлены образцы многоградационных нанооптических элементов, формирующих эффект смены двух 2D изображений при повороте нанооптического элемента при повороте на 180 градусов и эффект изменения цветности изображения при повороте на 180 градусов.

## Глава 3. Обратные задачи синтеза нанооптических элементов для формирования 2D изображений с полным параллаксом

### 3.1. Идея синтеза нанооптических защитных элементов для формирования 2D изображений с полным параллаксом

*В данной главе используются материалы, опубликованные в статьях [A3], [A4], [A6], патентах [A20-A22], книге A[28], сборнике трудов A[32].*

В главах 1 и 2 был описан дифракционный оптический элемент – киноформ, который был предназначен для решения задачи формирования 2D изображения в фокальной плоскости, параллельной плоскости оптического элемента. В настоящем параграфе предложен новый плоский оптический элемент, сконструированный так, что его фазовая функция представляет собой сумму фазовой функции плоского оптического элемента–киноформа, формирующего в фокальной плоскости заданное изображение, и фазовой функцией внеосевой параболической линзы Френеля и, или линзы Френеля с седлообразной фазовой функцией. Новый оптический элемент в рассеянном свете формирует изображение с визуальным эффектом смещения при наклонах подложки относительно наблюдателя [A6]. Все рассмотренные в этом параграфе нанооптические элементы являются многоградационными и имеют асимметричный микрорельеф. Разработанные в Главе 3 нанооптические элементы не имеют аналогов.

На рисунке 3.1 приведен профиль микрорельефа плоского оптического элемента, фокусирующего падающее на него монохроматическое излучение в точку. Микрорельеф на рисунке 3.1 состоит из фрагментов параболоида и работает для монохроматического излучения как целиковое зеркало, фокусирующее в точку. Фазовая функция  $\varphi(x, y)$  такого оптического элемента хорошо известна:  $\varphi_1(x, y) = C \frac{x^2+y^2}{2f}$ , здесь  $f$  – расстояние до фокальной плоскости,  $C$  – произвольная константа,  $x$  и  $y$  – декартовы координаты в плоскости оптического элемента.



Рисунок 3.1. Плоская линза Френеля с параболической фазовой функцией.

На рисунке 3.2 приведен фрагмент плоского оптического элемента с седлообразной фазовой функцией  $\varphi_2(x, y) = Cxy$ . По аналогии будем называть этот элемент линзой Френеля с седлообразной фазовой функцией. Произвольный фрагмент, вырезанный из линзы Френеля называется внеосевой линзой Френеля. Внеосевые фрагменты линз Френеля можно получить,



вырезая круглую область  $x^2 + y^2 \leq R^2$  из линз Френеля с фазовыми функциями  $\varphi_1(x, y) = C \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2f}$  и  $\varphi_2(x, y) = C(x-x_0)(y-y_0)$ . Здесь  $x_0, y_0$  – фиксированные параметры.

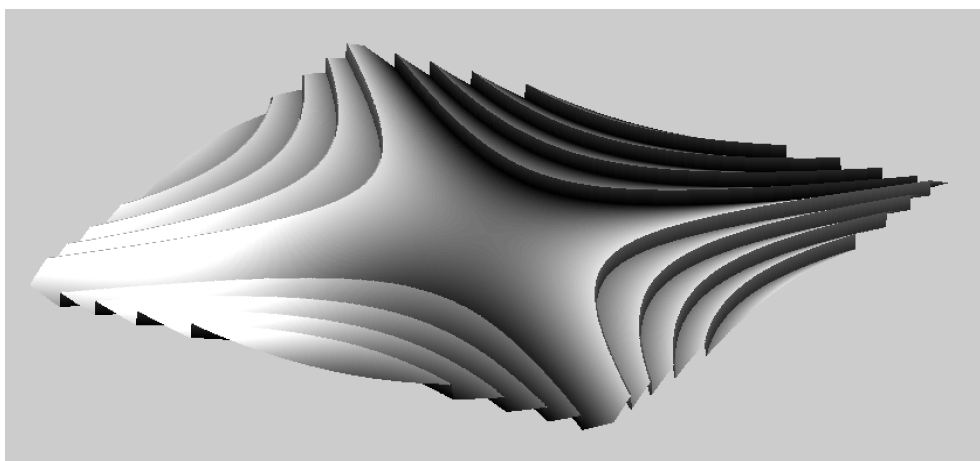


Рисунок 3.2. Плоская линза Френеля с седлообразной фазовой функцией.

Различают 2 вида киноформов по типам микрорельефа: бинарные и многоградационные. Микрорельеф бинарных киноформов имеет 2 уровня. Энергетическая эффективность бинарных киноформов составляет менее 50%. Многоградационные киноформы формируют то же изображение, что и бинарные, но обладают теоретически эффективностью около 100%. Таким образом, многоградационный киноформ имеет максимальную теоретическую эффективность при формировании произвольных изображений.

В главе 1 диссертации приведены алгоритмы, позволяющие рассчитать фазовую функцию киноформов при заданных характеристиках источника света и изображения в фокальной плоскости, которое необходимо сформировать. Эта задача обсуждалась в главах 1 и 2. В главе 3 обсуждаются возможности формирования 2D изображений с кинетическими эффектами движения для плоских оптических элементов, фазовые функции которых  $\varphi_1(x, y)$  и  $\varphi_2(x, y)$  определены следующим образом:

$$\varphi_1(x, y) = \varphi_A(x, y) + C \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2f} \quad (3.1)$$

$$\varphi_2(x, y) = \varphi_A(x, y) + C(x-x_0)(y-y_0) \quad (3.2)$$

Здесь  $\varphi_A$  – фазовая функция киноформа, формирующего 2D изображения,  $f$  – это расстояние от плоского элемента до фокальной плоскости, а  $C, x_0, y_0$  – заданные параметры.

На рисунке 3.3 приведен пример фрагмента микрорельефа плоского фазового оптического элемента – киноформа, формирующего изображение, состоящее из символа «А» (см.

рисунок 3.4). Глубина микрорельефа в каждой точке рисунка 3.3 пропорциональна потемнению в этой точке.

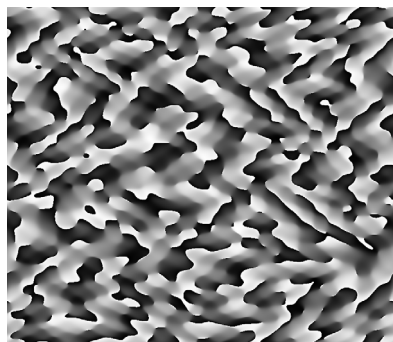


Рисунок 3.3. Фрагмент многоградационного киноформа.

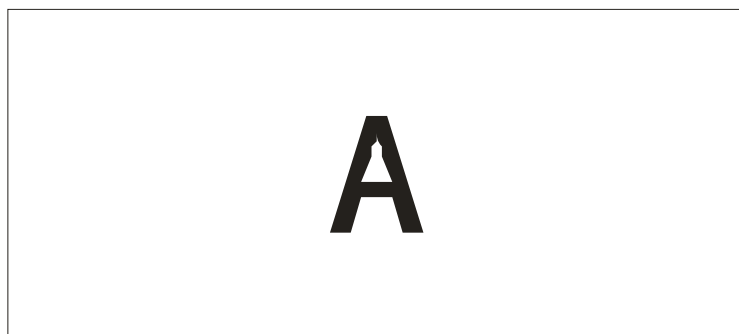


Рисунок 3.4. Формируемое киноформом изображение.

Многоградационный киноформ как оптический элемент давно используется как защитный элемент. Для формирования микрорельефа используется электронно-лучевая литография. В статье [103] синтезирован многоградационный киноформ, который в когерентном свете проецирует 2D изображение на экран. В настоящей главе диссертации разработаны методы синтеза многоградационных нанооптических элементов, которые работают при освещении их белым светом и могут создавать более сложные визуальные защитные признаки. В основе этой разработки лежит следующая идея.

На рисунке 3.5 приведена оптическая схема формирования изображений на отражение с помощью плоских фазовых оптических элементов. Здесь излучение 1 падает на плоский оптический элемент 2, изображение формируется в фокальной плоскости  $z=f$ .

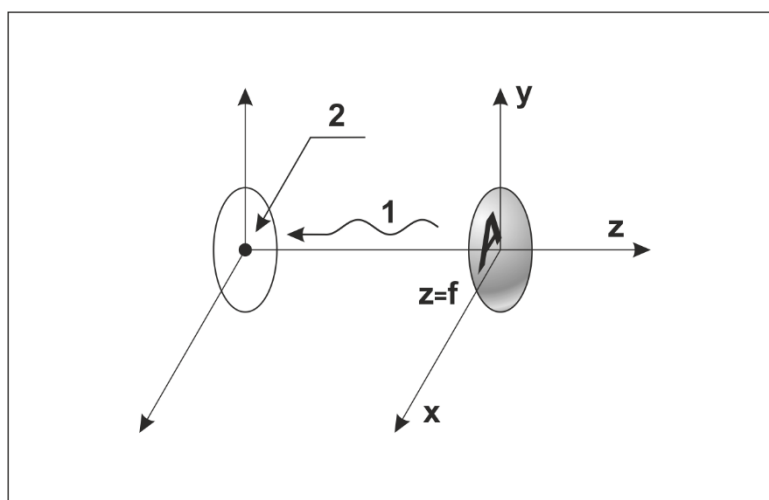


Рисунок 3.5. Схема формирования изображения на отражение.

На рисунке 3.6 приведен фрагмент микрорельефа нанооптического элемента с фазовой функцией  $\varphi_1(x, y)$ , определенной соотношением (3.1). Фазовая функция нанооптического элемента является суммой киноформа, формирующего в фокальной плоскости заданное изображение, и фазовой функции внеосевой линзы Френеля с параболической фазовой функцией. Этот плоский оптический элемент формирует изображение, представленное на рисунке 3.7.

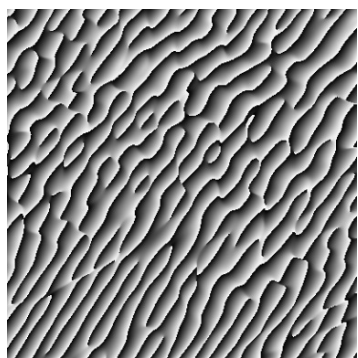


Рисунок 3.6. Микрорельеф плоского оптического элемента.

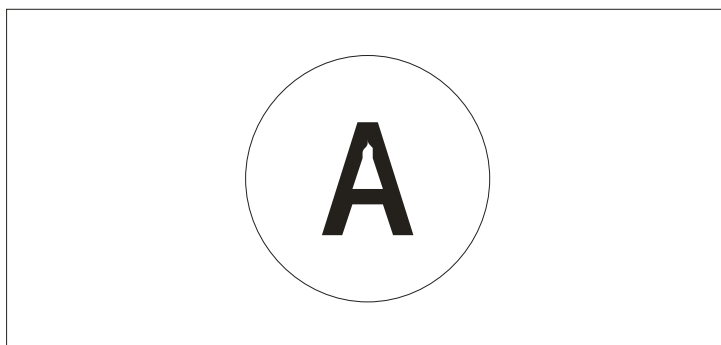


Рисунок 3.7. Изображение, формируемое плоским оптическим элементом.

Для наблюдателя, расположенного на оси  $z$  в области  $z > f$ , изображение будет представлять собой линзу, внутри которой расположена буква «А». Оптическая схема формирования изображения приведена на рисунке 3.8. Здесь 1 – это падающее на оптический элемент излучение, 2 – это плоский фазовый оптический элемент.

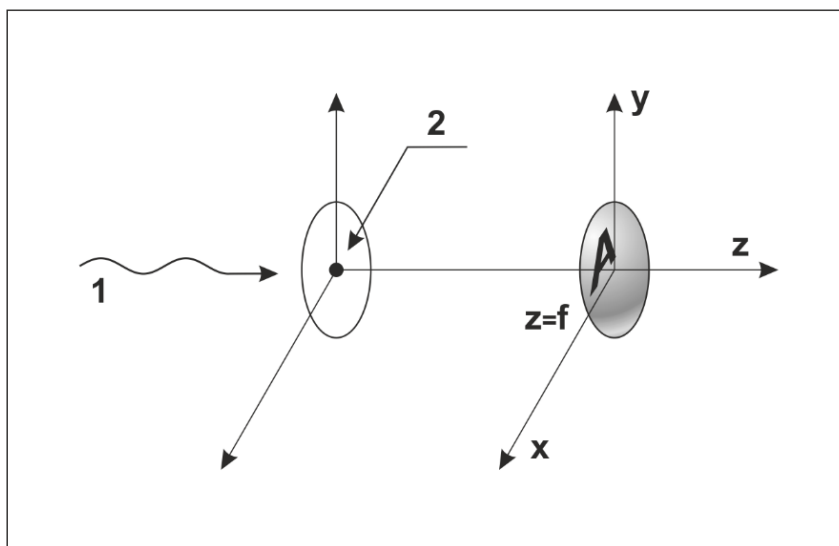


Рисунок 3.8. Схема формирования изображения на прохождении.

Нанооптический элемент на рисунке 3.8 является прозрачным и работает на прохождение. На рисунке 3.9 приведен пример фрагмента микрорельефа нанооптического элемента с фазовой функцией  $\varphi_2(x, y)$ . Фазовая функция нанооптического элемента является суммой киноформа, формирующего в фокальной плоскости заданное изображение, и фазовой функции внеосевой линзы Френеля с седлообразной фазовой функцией.

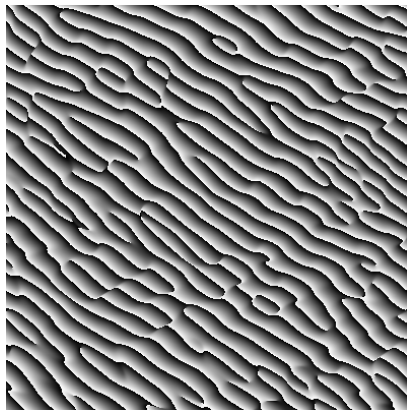


Рисунок 3.9. Фрагмент многоградационного плоского оптического элемента.

Нанооптические элементы, фрагменты которых представлены на рисунках 3.6 и 3.9, формируют одно и то же изображение (смотри рисунок 3.7). Различаются они характером движения изображений при наклонах подложки. При наклонах подложки в направлении от себя/на себя нанооптический элемент, фазовая функция которого представляет собой сумму фазовой функции плоского оптического элемента, формирующего в фокальной плоскости заданное изображение, и фазовой функции внеосевой параболической линзы Френеля, формирует изображение буквы «А», которое сдвигается вверх-вниз (рисунок 3.10). Для нанооптического элемента, фазовая функция которого представляет собой сумму фазовой функции киноформа, формирующего в фокальной плоскости заданное изображение, и фазовой функции внеосевой линзы Френеля с седлообразной фазовой функцией, при наклонах подложки от себя – на себя, изображение буквы «А», сдвигается влево-вправо (рисунок 3.10(б)).

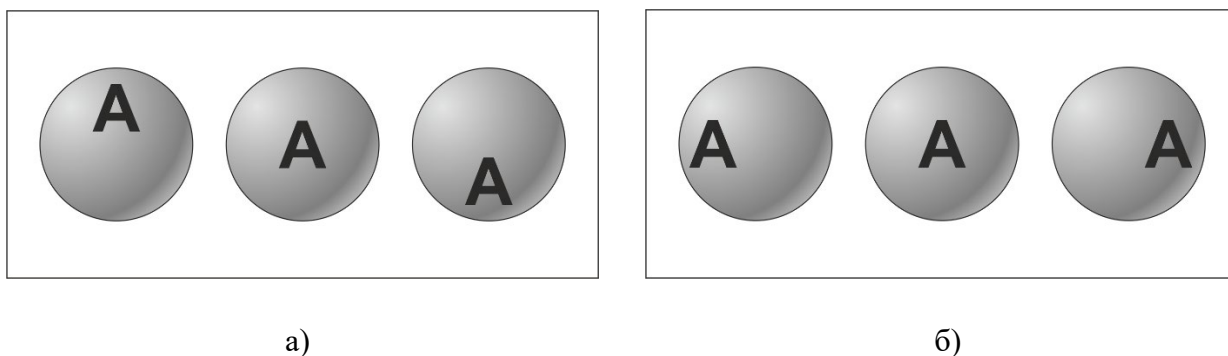


Рисунок 3.10. Дизайн нанооптического элемента при разных углах наклона:  
а) – с параболической фазовой функцией б) – с седлообразной фазовой функцией.

Схема наблюдения кинетических эффектов движения, формируемых описанными нанооптическими элементами в схеме на отражение, приведена на рисунке 3.11.

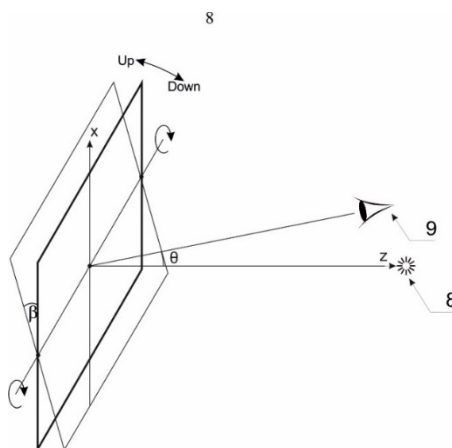


Рисунок 3.11. Схема наблюдения кинетических эффектов движения.

Разработанные нанооптические элементы являются многоградационными и для их синтеза необходима высокая точность формирования микрорельефа.

### 3.2. Примеры реализации нанооптических элементов, формирующих 2D изображения с кинетическими эффектами движения с полным параллаксом в выделенных областях

В качестве примера реализации был синтезирован многоградационный плоский нанооптический элемент, формирующий 2D изображения с кинетическими эффектами движения с полным параллаксом в выделенных областях при наклоне оптического элемента вверх/вниз.

Пример 1. В этом примере изображения, формируемые нанооптическим элементом при его освещении белым светом, формируются в выделенных шести областях  $G_i$ ,  $i=1, \dots, 6$ . На рисунке 3.12(а) представлена область оптического элемента, которая включает в себя три круга. На рисунке 3.12(б) приведен пример разбиения плоского оптического элемента на элементарные области  $Q_i$ .

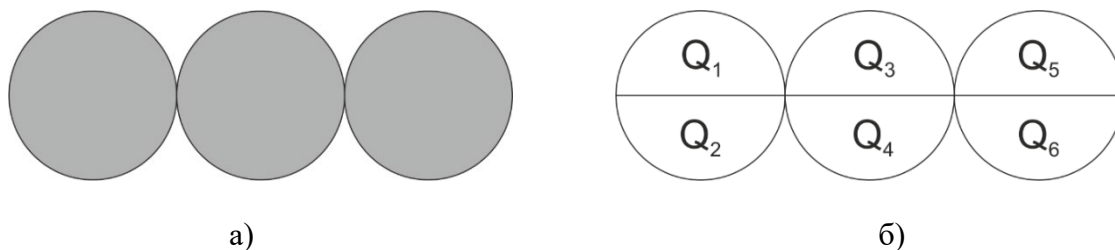


Рисунок 3.12. (а) Область задания оптического элемента, (б) схема разбиения оптического элемента области разбиения  $Q_i$ .

На рисунке 3.13 представлен пример поверхностей  $h_i(x, y)$  в областях  $Q_i, i=1...6$ , видимых наблюдателю при освещении нанооптического элемента рассеянным светом. Форма поверхностей  $h_i(x, y)$  определяется заданием коэффициентов  $a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i$  квадратичной формы  $h_i(x, y)$

$$h_i(x, y) = a_i x^2 + 2b_i xy + c_i y^2 + d_i x + e_i y + f_i. \quad (3.3)$$

Для поверхности, приведенной на рисунке 3.13 в областях  $Q_i, i=1...6$  выполнено следующее соотношение параметров:  $a_i c_i - b_i^2 > 0$ .

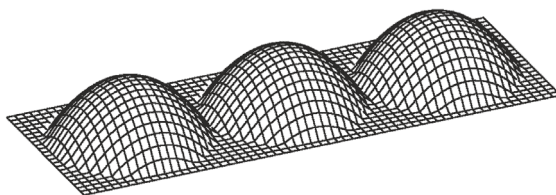


Рисунок 3.13. Пример поверхностей  $h_i(x, y)$  в областях  $Q_i, i=1...6$ .

На рисунке 3.14 представлены схемы наблюдения 2D-изображений, видимых наблюдателю при освещении оптического элемента точечным источником света. В схеме 1 глаз наблюдателя находится выше плоскости  $z=0$ , в схеме 2 глаз наблюдателя находится ниже плоскости  $z=0$ .

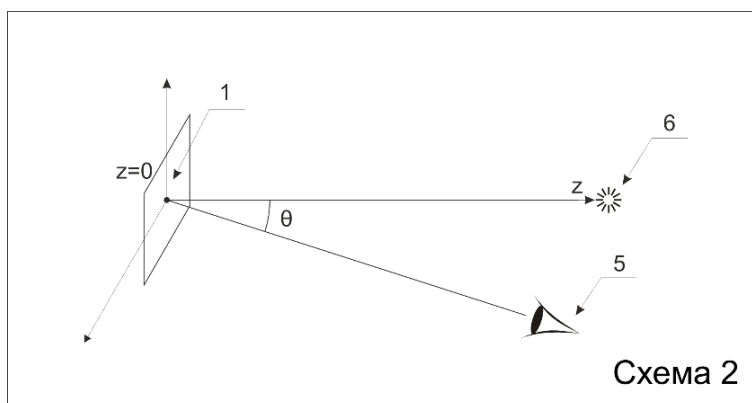
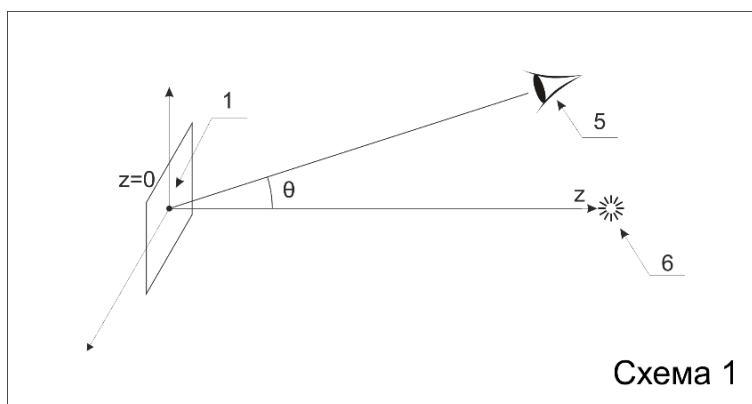


Рисунок 3.14. Схемы наблюдения эффекта смены изображений.

Нанооптический элемент может быть синтезирован так, что при наблюдении оптического элемента в схеме 1 наблюдатель видит изображение, представленное на рисунке 3.15. При наблюдении нанооптического элемента в схеме 2 наблюдатель должен видеть изображение, представленное на рисунке 3.16. Таким образом, при перемещении наблюдателя из области  $z < 0$  в область  $z > 0$ , наблюдатель видит эффект смены изображений. Этот эффект наблюдается при освещении оптического элемента точечным источником. Оптимальным вариантом точечных источников света могут служить фонарики смартфонов, число которых уже превысило население Земли. При освещении оптического элемента рассеянным светом, изображение исчезает и наблюдатель должен видеть поверхность, представленную на рисунке 3.15.

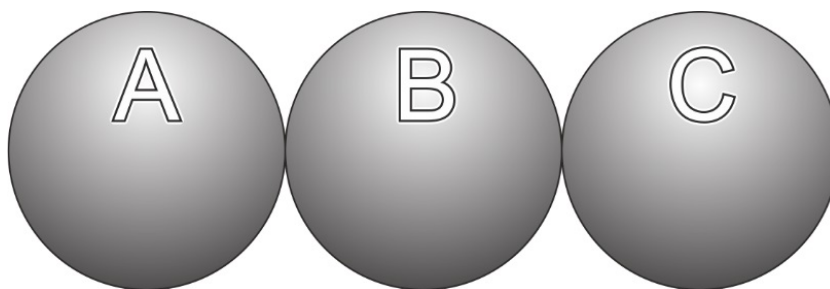


Рисунок 3.15. Дизайн изображения, видимого наблюдателю в схеме наблюдения 1.

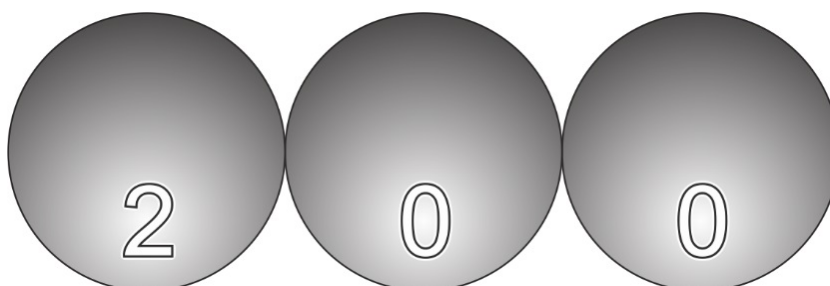


Рисунок 3.16. Изображение, видимого наблюдателю в схеме наблюдения 2.

Изображение на рисунках 3.15 и 3.16 соответствуют случаю, когда фазовые функции линз являются параболическими. Смена изображений в этом случае происходит при наклоне оптического элемента вверх/вниз. Нанооптические элементы, описанные в этом параграфе, являются многоградационными и имеют асимметричный микрорельеф, что надежно защищает их от подделок. Для изготовления нанооптических элементов использовалась электронно-лучевая литография с точностью формирования микрорельефа – 10 нм.

На рисунках 3.17-3.18 приведены фотографии изображений, видимых наблюдателю при разном положении оптического элемента.

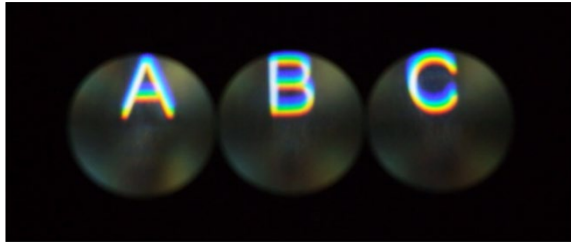


Рисунок 3.17. Фотография изображения, видимого наблюдателю в схеме наблюдения 1.

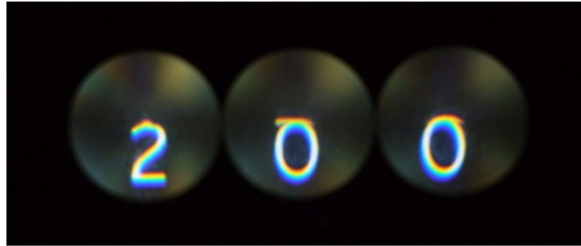


Рисунок 3.18. Фотография изображения, видимого наблюдателю в схеме наблюдения 2.

Приведенные примеры продемонстрировали высокую эффективность разработанных технологий синтеза нанооптических элементов, формирующих 2D изображения с полным параллаксом. Визуальные эффекты движения символов выделенных областей в примерах 1-3 легко контролируются.

### **3.3. Нанооптические элементы, формирующие 2D изображения с кинетическими эффектами движения на всей области оптического элемента**

В этом параграфе разработаны методы компьютерного синтеза голограмм, формирующих 2D изображения с эффектами движения нескольких символов по всей области оптического элемента. Особенностью рассматриваемых в этом параграфе задач является то, что символы, видимые наблюдателю при освещении оптического элемента точечным источником, передвигаются при наклонах оптического элемента вверх-вниз-влево-вправо по всей области оптического элемента. Для решения этой задачи необходима специальная конструкция оптического элемента. В работах [A6, A20] предложены несколько вариантов конструкций оптического элемента, формирующих различные типы кинематического движения символов. В этом параграфе предлагается рассмотреть пять вариантов решения задачи синтеза, которые отличаются как количеством символов, так и характером их движения [A16, A21, A22].

Будем считать, что источник и положение наблюдателя фиксированы. Оптический элемент может наклоняться для определенности в направлении вверх-вниз. В варианте 1 реализации дифракционного оптического элемента при освещении оптического элемента



рассеянным светом наблюдатель видит однородную серую поверхность. Наблюдатель видит эту поверхность как выпуклую лупу линзы. При освещении оптического элемента точечным источником света на этой поверхности появляются два ярких символа «А» и «В», которые при наклонах оптического элемента в направлении вверх-вниз, раздвигаются друг от друга в том же направлении. На рисунке 3.19 приведен компьютерно-синтезированная нанооптический элемент, в котором основные кинематические эффекты движения символов происходят в круглой области G при освещении оптического элемента точечным источником света. Визуальный эффект движения символов «А» и «В» в области G легко контролируется. Для того чтобы синтезировать такой защитный элемент, необходимо использовать специальную структуру, описанную ниже. Специальная структура нанооптического элемента задается его фазовой функцией, которую удастся выписать в явном виде.



Рисунок 3.19. Дизайн изображения с двумя символами.

В варианте 1 нанооптический элемент для формирования визуальных изображений с кинематическими эффектами движения представляет собой размещённый на плоской подложке однослойный фазовый оптический элемент, расположенный в области G плоскости  $z=0$  декартовой системы координат  $Oxyz$ , который разбит на элементарные области  $G_{ij}$ ,  $i=1, 2, \dots, I$ ,  $j=1, 2, \dots, J$ , размером не более 100 микрон. В тех элементарных областях  $G_{ij}$ , где значение  $(i+j)$  чётно, фазовая функция оптического элемента представляет собой сумму заданной функции  $h^{(1)}_{ij}(x,y) = C \cdot \rho^\alpha$  в полярной системе координат  $x = \rho \cdot \cos \varphi$ ,  $y = \rho \cdot \sin \varphi$ , и фазовой функции  $\Phi^{(1)}_{ij}(x,y)$  многоградационного киноформа, формирующего в фокальной плоскости  $z=\text{const}$  изображение символа  $A_1$ . Здесь  $C$  — заданный положительный параметр. Параметр  $\alpha$  принадлежит интервалу  $1 < \alpha < 3$ . В тех областях  $G_{ij}$ , где значение  $(i+j)$  нечётно, фазовая функция оптического элемента представляет собой сумму заданной функции  $h^{(2)}_{ij}(x,y) = -C \cdot \rho^\alpha$  и фазовой функции  $\Phi^{(2)}_{ij}(x,y)$  многоградационного киноформа, формирующего в фокальной плоскости  $z=\text{const}$  изображение символа  $A_2$ . При этом при освещении нанооптического элемента точечным источником света наблюдатель видит одновременно символы  $A_1$  и  $A_2$ . При наклонах оптического элемента символы  $A_1$  и  $A_2$  двигаются во взаимно противоположных направлениях, перемещаясь

по всей области нанооптического элемента. В принятых терминах символ  $A_1$  представляет собой букву «А», а символ  $A_2$  – букву «В».

На рисунке 3.20 приведен вариант движения символов, отличающийся от представленного на предыдущем рисунке. Символы «А» и «В» при наклоне оптического элемента вверх-вниз сдвигаются в противоположных направлениях по горизонтали, а не по вертикали, как это было в предыдущем рисунке. Для того чтобы синтезировать такой элемент, необходимо использовать другие варианты поверхностей  $h^{(1)}_{ij}(x,y)$  и  $h^{(2)}_{ij}(x,y)$ .



Рисунок 3.20. Характер смещения двух символов при наклоне оптического элемента.

В варианте 2 нанооптический элемент для формирования визуальных изображений с кинематическими эффектами движения представляет собой размещённый на плоской подложке однослойный фазовый оптический элемент, расположенный в области  $G$  плоскости  $z=0$  декартовой системы координат  $Oxyz$ , который разбит на элементарные области  $G_{ij}$ ,  $i=1, 2, \dots, I$ ,  $j=1, 2, \dots, J$ , размером не более 100 микрон. В тех элементарных областях  $G_{ij}$ , где значение  $(i+j)$  чётно, фазовая функция оптического элемента представляет собой сумму заданной функции  $h^{(1)}_{ij}(x,y) = C \cdot \rho^\alpha \cos(2\varphi)$  в полярной системе координат  $x=\rho \cdot \cos \varphi$ ,  $y=\rho \cdot \sin \varphi$  и фазовой функции  $\Phi^{(1)}_{ij}(x,y)$  многоградационного киноформа, формирующего в фокальной плоскости  $z=\text{const}$  изображение символа  $A_1$ . Здесь  $C$  — заданный положительный параметр. Параметр  $\alpha$  принадлежит интервалу  $1 < \alpha < 3$ . В тех областях  $G_{ij}$ , где значение  $(i+j)$  нечётно, фазовая функция оптического элемента представляет собой сумму заданной функции  $h^{(2)}_{ij}(x,y) = C \cdot \rho^\alpha \sin(2\varphi)$  и фазовой функции  $\Phi^{(2)}_{ij}(x,y)$  многоградационного киноформа, формирующего в фокальной плоскости  $z=\text{const}$  изображение символа  $A_2$ . При этом при освещении нанооптического элемента точечным источником света наблюдатель видит одновременно символы  $A_1$  и  $A_2$ . При наклонах оптического элемента символы  $A_1$  и  $A_2$  двигаются во взаимно противоположных направлениях, перемещаясь по всей области оптического элемента.

В варианте 3 наблюдатель видит при освещении оптического элемента точечным источником три символа «А», «В», «С», которые разбегаются при наклоне оптического элемента в направлении вверх-вниз из центра к краям области  $G$  и назад (Рисунок 3.21).



Рисунок 3.21. Характер смещения трех символов при наклоне оптического элемента.

В варианте 3 нанооптический элемент для формирования визуальных изображений с кинематическими эффектами движения представляет собой размещённый на плоской подложке однослойный фазовый оптический элемент, расположенный в области  $G$  плоскости  $z=0$  декартовой системы координат  $Oxyz$ , который разбит на элементарные области  $G_{ij}$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$ ,  $j = 1, 2, \dots, J$ , размером не более 100 микрон, из которых сформированы три непересекающиеся области  $G^{(1)}$ ,  $G^{(2)}$  и  $G^{(3)}$  таким образом, что для любой элементарной области  $G_{ij}$  среди соседних элементарных областей всегда присутствуют элементарные области каждой из трёх областей  $G^{(1)}$ ,  $G^{(2)}$  и  $G^{(3)}$ . В элементарных областях  $G_{ij}$  из области  $G^{(1)}$  фазовая функция оптического элемента представляет собой сумму заданной функции  $h^{(1)}_{ij}(x,y) = C \cdot \rho^\alpha \cos(2\varphi)$  в полярной системе координат  $x = \rho \cdot \cos \varphi$ ,  $y = \rho \cdot \sin \varphi$ , и фазовой функции  $\Phi^{(1)}_{ij}(x,y)$  многоградационного киноформа, формирующего в фокальной плоскости  $z=\text{const}$  изображение символа  $A_1$ . Здесь  $C$  — заданный положительный параметр. Параметр  $\alpha$  принадлежит интервалу  $1 < \alpha < 3$ . В элементарных областях  $G_{ij}$  из области  $G^{(2)}$  фазовая функция оптического элемента представляет собой сумму заданной функции  $h^{(2)}_{ij}(x,y) = C \cdot \rho^\alpha \cos(2 \cdot (\varphi + \pi/3))$  и фазовой функции  $\Phi^{(2)}_{ij}(x,y)$  многоградационного киноформа, формирующего в фокальной плоскости  $z=\text{const}$  изображение символа  $A_2$ . В элементарных областях  $G_{ij}$  из области  $G^{(3)}$  фазовая функция оптического элемента представляет собой сумму заданной функции  $h^{(3)}_{ij}(x,y) = C \cdot \rho^\alpha \cos(2 \cdot (\varphi - \pi/3))$  и фазовой функции  $\Phi^{(3)}_{ij}(x,y)$  многоградационного киноформа, формирующего в фокальной плоскости  $z=\text{const}$  изображение символа  $A_3$ . При этом при освещении нанооптического элемента точечным источником света наблюдатель видит одновременно символы  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_3$ . При наклонах оптического элемента символы  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_3$  двигаются по всей области оптического элемента по трём лучам, углы между которыми составляют  $2\pi/3$ .

На рисунке 3.22 представлен вариант 4 оптического элемента, в котором наблюдатель при освещении точечным источником видит четыре символа «A», «B», «C», «D», которые при наклонах оптического элемента в направлении вверх-вниз разбегаются так, как показано на рисунке.



Рисунок 3.22. Характер смещения четырех символов при наклоне оптического элемента.

В варианте 4 нанооптический элемент для формирования визуальных изображений с кинематическими эффектами движения представляет собой размещённый на плоской подложке однослойный фазовый оптический элемент, расположенный в области  $G$  плоскости  $z=0$  декартовой системы координат  $Oxuz$ , который разбит на элементарные области  $G_{ij}$ ,  $i=1, 2, \dots, I$ ,  $j=1, 2, \dots, J$ , размером не более 100 микрон, из которых сформированы четыре непересекающиеся области  $G^{(1)}$ ,  $G^{(2)}$ ,  $G^{(3)}$  и  $G^{(4)}$  таким образом, что для любой элементарной области  $G_{ij}$  среди соседних элементарных областей всегда присутствуют элементарные области каждой из четырёх областей  $G^{(1)}$ ,  $G^{(2)}$ ,  $G^{(3)}$  и  $G^{(4)}$ . В элементарных областях  $G_{ij}$  из области  $G^{(1)}$  фазовая функция оптического элемента представляет собой сумму заданной функции  $h^{(1)}_{ij}(x,y) = C \cdot \rho^\alpha \cos(2\varphi)$  в полярной системе координат  $x = \rho \cdot \cos \varphi$ ,  $y = \rho \cdot \sin \varphi$ , и фазовой функции  $\Phi^{(1)}_{ij}(x,y)$  многоградационного киноформа, формирующего в фокальной плоскости  $z=\text{const}$  изображение символа  $A_1$ . Здесь  $C$  — заданный положительный параметр. Параметр  $\alpha$  принадлежит интервалу  $1 < \alpha < 3$ . В элементарных областях  $G_{ij}$  из области  $G^{(2)}$  фазовая функция оптического элемента представляет собой сумму заданной функции  $h^{(2)}_{ij}(x,y) = C \cdot \rho^\alpha \cos(2 \cdot (\varphi + \pi/4))$  и фазовой функции  $\Phi^{(2)}_{ij}(x,y)$  многоградационного киноформа, формирующего в фокальной плоскости  $z=\text{const}$  изображение символа  $A_2$ . В элементарных областях  $G_{ij}$  из области  $G^{(3)}$  фазовая функция оптического элемента представляет собой сумму заданной функции  $h^{(3)}_{ij}(x,y) = C \cdot \rho^\alpha \cos(2 \cdot (\varphi + \pi/2))$  и фазовой функции  $\Phi^{(3)}_{ij}(x,y)$  многоградационного киноформа, формирующего в фокальной плоскости  $z=\text{const}$  изображение символа  $A_3$ . В элементарных областях  $G_{ij}$  из области  $G^{(4)}$  фазовая функция оптического элемента представляет собой сумму заданной функции  $h^{(4)}_{ij}(x,y) = C \cdot \rho^\alpha \cos(2 \cdot (\varphi + 3\pi/4))$  и фазовой функции  $\Phi^{(4)}_{ij}(x,y)$  многоградационного киноформа, формирующего в фокальной плоскости  $z=\text{const}$  изображение символа  $A_4$ . При этом при освещении нанооптического элемента точечным источником света наблюдатель видит одновременно символы  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  и  $A_4$ . При наклонах оптического элемента символы  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  и  $A_4$  двигаются по всей области оптического элемента по четырём лучам, углы между которыми составляют  $\pi/2$ .

Каждый из вариантов 1-4 можно модернизировать, так чтобы наблюдатель при больших углах дифракции более  $60^\circ$  в области G видел другое цветное изображение. Согласно варианту 5 нанооптический элемент имеет в каждой элементарной области  $G_{ij}$  область  $G'_{ij}$  размером не более 40 микрон, в которую записаны дифракционные решётки разной ориентации с периодами менее 0.8 микрон. При этом при больших углах дифракции (более  $60^\circ$ ) наблюдатель на всей области оптического элемента видит другое цветное изображение (Рисунок 3.23).

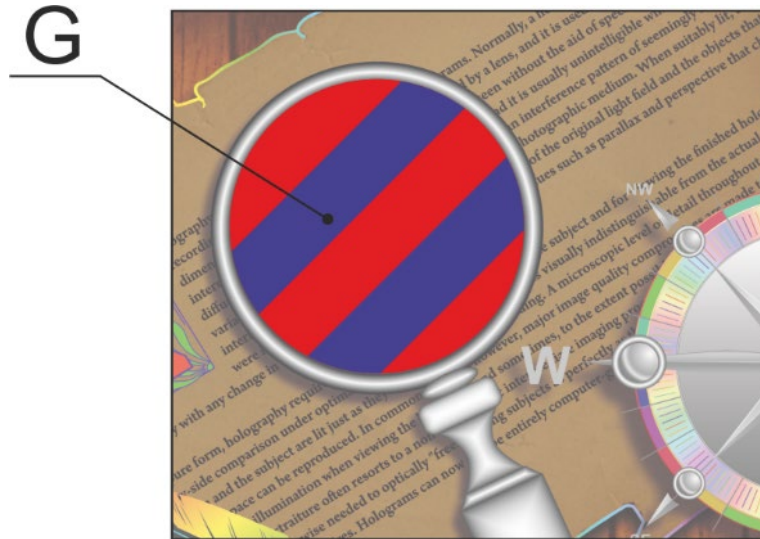


Рисунок 3.23. Дизайн нанооптического элемента при углах дифракции более 60 градусов.

Расчёт фазовой функции  $\Phi(x,y)$  оптического элемента, формирующего заданное изображение  $F(x,y)$ , является классической задачей плоской оптики. Известно, что скалярные волновые функции в плоскости  $z = 0$  и  $z = f$  связаны соотношением.

Обратная задача сводится к определению функции  $\Phi(x,y)$  из уравнения:

$$\left| \gamma \iint_{G_{ij}} u(\xi, \eta, 0 - 0) \exp(ik\Phi(\xi, \eta)) \exp\left\{ik \frac{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}{2f}\right\} d\xi d\eta \right| = F(x, y) \quad (3.4)$$

В качестве функций  $F(x,y)$  в уравнении (3.4) фигурируют изображения символов “А”, “В”, “С”, “D”. Для решения обратной задачи (3.4) используются алгоритмы, подробно описанные в главе 1.

На рисунке 3.24 приведена схема разбиения области G оптического элемента на элементарные области  $G_{ij}$ ,  $i=1, 2, \dots, I$ ,  $j=1, 2, \dots, J$ . Область оптического элемента G расположена в плоскости  $z=0$  декартовой системы координат  $Oxuz$ . Одна из областей  $G_{ij}$  на рисунке 3.24 заштрихована. Размер элементарной области  $G_{ij}$  не превышает 100 микрон.

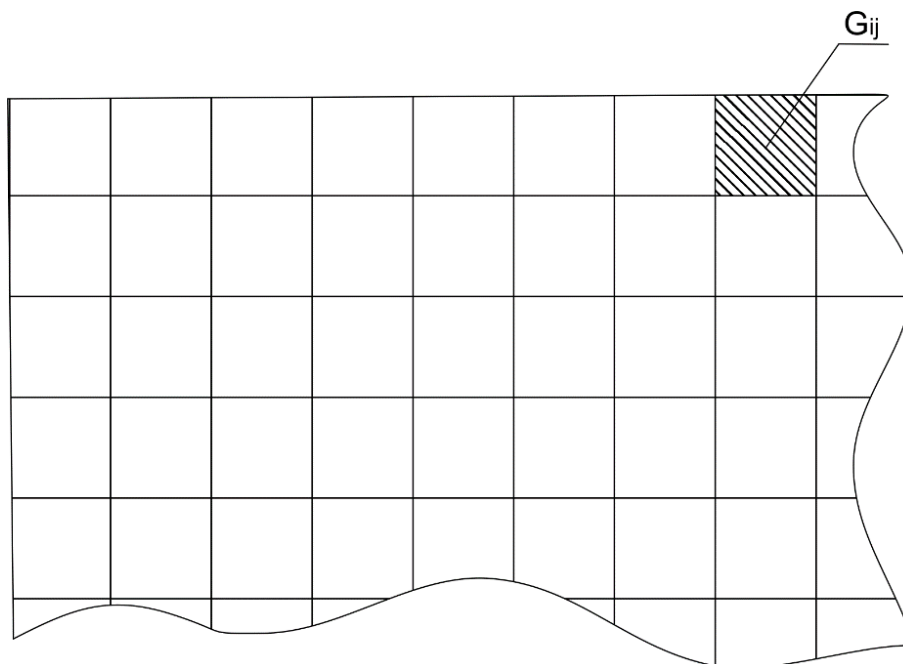


Рисунок 3.24. Разбиение области  $G$  на элементарные области.

На рисунке 3.25 приведена схема расположения двух областей  $G^{(1)}$  и  $G^{(2)}$  в области оптического элемента  $G$ , что описано в вариантах 1 и 2. Область  $G^{(1)}$  состоит из белых прямоугольников и является объединением тех элементарных областей  $G_{ij}$ , где значение  $(i+j)$  чётно, а область  $G^{(2)}$  состоит из чёрных прямоугольников и является объединением тех элементарных областей  $G_{ij}$ , где значение  $(i+j)$  нечётно. Совокупность элементарных областей, обозначенных на рисунке 3.25 цифрой 1, образует область  $G^{(1)}$ . Совокупность элементарных областей, обозначенных на рисунке 3.25 цифрой 2, образует область  $G^{(2)}$ . Область  $G^{(1)}$  отвечает за формирование символа  $A_1$ . Область  $G^{(2)}$  отвечает за формирование символа  $A_2$ .

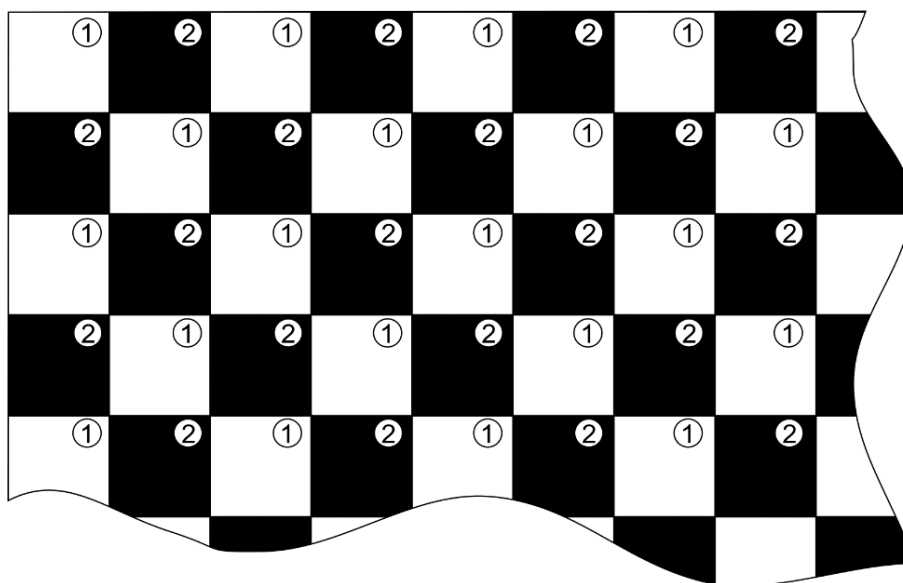


Рисунок 3.25. Области  $G^{(1)}$  и  $G^{(2)}$  варианте с двумя символами.

В варианте 3 в области  $G$  наблюдатель видит три символа. На рисунке 3.26 приведена схема расположения трёх непересекающихся областей  $G^{(1)}$ ,  $G^{(2)}$  и  $G^{(3)}$  в области оптического элемента  $G$ , что описано в варианте 3. Область  $G^{(1)}$  состоит из белых прямоугольников, обозначенных цифрой 1, область  $G^{(2)}$  состоит из прямоугольников с вертикальной штриховкой, обозначенных цифрой 2, и область  $G^{(3)}$  состоит из чёрных прямоугольников, обозначенных цифрой 3. Для любой элементарной области  $G_{ij}$  среди соседних областей всегда присутствуют элементарные области каждой из областей  $G^{(1)}$ ,  $G^{(2)}$ ,  $G^{(3)}$ . Область  $G^{(1)}$  отвечает за формирование символа  $A_1$ . Область  $G^{(2)}$  отвечает за формирование символа  $A_2$ . Область  $G^{(3)}$  отвечает за формирование символа  $A_3$ .

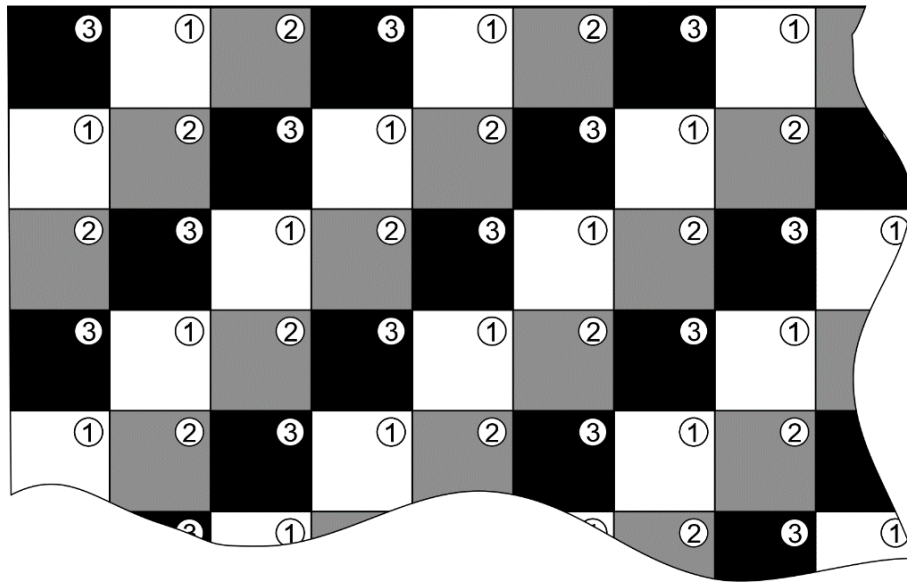


Рисунок 3.26. Области  $G^{(1)}$ ,  $G^{(2)}$  и  $G^{(3)}$  в варианте с тремя символами.

В варианте 4 наблюдатель видит перемещение четырех символов в области  $G$ . На рисунке 3.27 приведена схема расположения четырёх непересекающихся областей  $G^{(1)}$ ,  $G^{(2)}$ ,  $G^{(3)}$  и  $G^{(4)}$  в области оптического элемента  $G$ , описанная в варианте 4. Область  $G^{(1)}$  состоит из белых прямоугольников, обозначенных цифрой 1, область  $G^{(2)}$  состоит из прямоугольников с вертикальной штриховкой, обозначенных цифрой 2, область  $G^{(3)}$  состоит из прямоугольников с горизонтальной штриховкой, обозначенных цифрой 3, и область  $G^{(4)}$  состоит из чёрных прямоугольников, обозначенных цифрой 4. Для любой элементарной области  $G_{ij}$  среди соседних областей всегда присутствуют элементарные области каждой из областей  $G^{(1)}$ ,  $G^{(2)}$ ,  $G^{(3)}$ ,  $G^{(4)}$ . Область  $G^{(1)}$  отвечает за формирование символа  $A_1$ . Область  $G^{(2)}$  отвечает за формирование символа  $A_2$ . Область  $G^{(3)}$  отвечает за формирование символа  $A_3$ . Область  $G^{(4)}$  отвечает за формирование символа  $A_4$ .

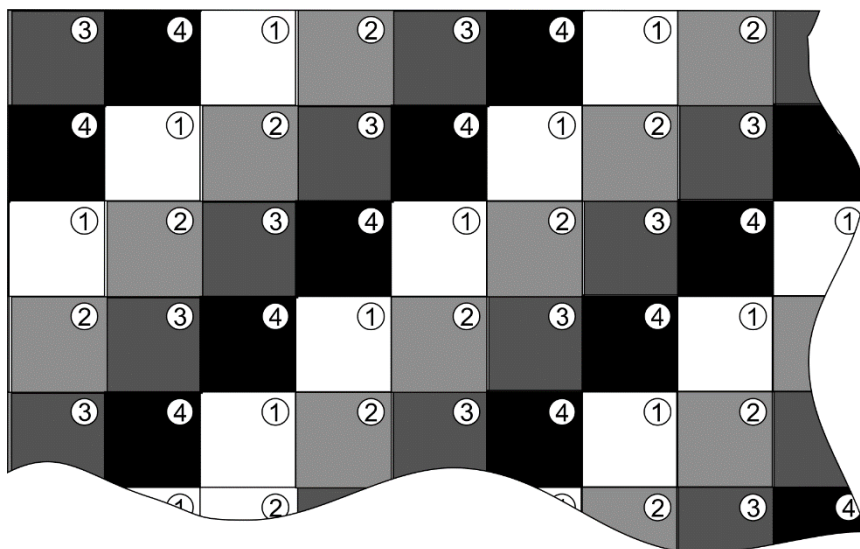


Рисунок 3.27. Области  $G^{(1)}$ ,  $G^{(2)}$ ,  $G^{(3)}$  и  $G^{(4)}$  в варианте с четырьмя символами.

На рисунке 3.28 приведён график функции  $h^{(1)}(x,y) = C \cdot \rho^\alpha$  в полярной системе координат  $x = \rho \cdot \cos \varphi$ ,  $y = \rho \cdot \sin \varphi$ , где  $C$  — заданный положительный параметр,  $\alpha$  принадлежит интервалу  $1 < \alpha < 3$ . При значении параметра  $\alpha = 2$  данная функция представляет собой вогнутый параболоид вращения. Функции  $h^{(1)}_{ij}(x,y)$  представляют собой фрагменты функции  $h^{(1)}(x,y)$  и являются одним из слагаемых фазовой функции плоского оптического элемента в элементарных областях  $G_{ij}$  из области  $G^{(1)}$ .

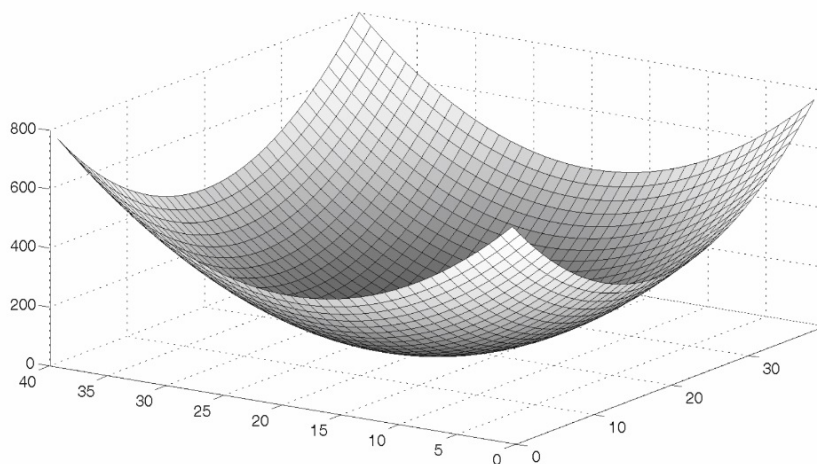


Рисунок 3.28. График функции  $h^{(1)}(x,y)$  в варианте 1.

На рисунке 3.29 приведён график функции  $h^{(2)}(x,y) = -C \cdot \rho^\alpha$  в полярной системе координат  $x = \rho \cdot \cos \varphi$ ,  $y = \rho \cdot \sin \varphi$ , где  $C$  — заданный положительный параметр,  $\alpha$  принадлежит интервалу  $1 < \alpha < 3$ . При значении параметра  $\alpha = 2$  данная функция представляет собой выпуклый параболоид вращения. Функции  $h^{(2)}_{ij}(x,y)$  представляют собой фрагменты функции  $h^{(2)}(x,y)$  и являются одним из слагаемых фазовой функции плоского оптического элемента в элементарных



областях  $G_{ij}$  из области  $G^{(2)}$ . Функции  $h^{(1)}_{ij}(x,y)$  и  $h^{(2)}_{ij}(x,y)$  используются для синтеза нанооптических элементов варианте 1.

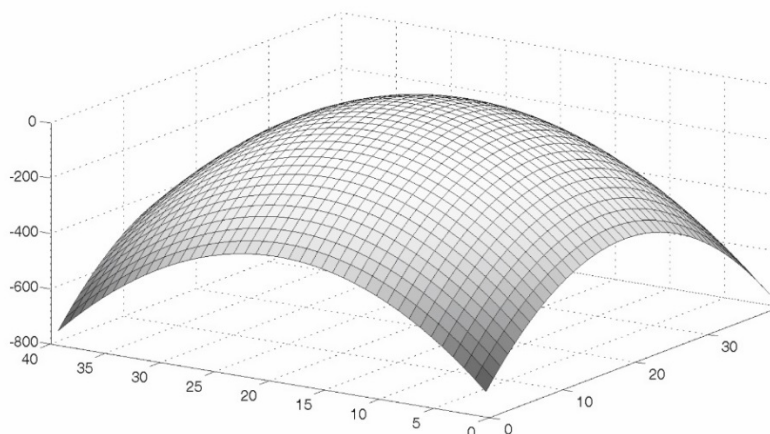


Рисунок 3.29. График функции  $h^{(2)}(x,y)$  в варианте 1.

На рисунке 3.30 приведён график функции  $h^{(1)}(x,y) = C \cdot \rho^\alpha \cos(2\varphi)$  в полярной системе координат  $x = \rho \cdot \cos \varphi$ ,  $y = \rho \cdot \sin \varphi$ , где  $C$  — заданный положительный параметр,  $\alpha$  принадлежит интервалу  $1 < \alpha < 3$ . При значении параметра  $\alpha = 2$  данная функция является седлообразным параболоидом. Функции  $h^{(1)}_{ij}(x,y)$  представляют собой фрагменты функции  $h^{(1)}(x,y)$  и являются одним из слагаемых фазовой функции плоского оптического элемента в элементарных областях  $G_{ij}$  из области  $G^{(1)}$ .

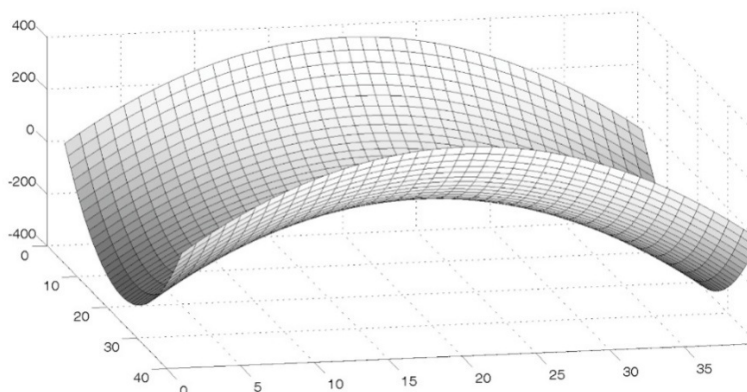


Рисунок 3.30. График функции  $h^{(1)}(x,y)$  в варианте 2.

На рисунке 3.31 приведён график функции  $h^{(2)}(x,y) = C \cdot \rho^\alpha \sin(2\varphi)$  в полярной системе координат  $x = \rho \cdot \cos \varphi$ ,  $y = \rho \cdot \sin \varphi$ ,  $C$  — заданный положительный параметр,  $\alpha$  принадлежит интервалу  $1 < \alpha < 3$ . При значении параметра  $\alpha = 2$  данная функция представляет собой седлообразный параболоид. График функции  $h^{(2)}(x,y)$  совпадает с графиком функции  $h^{(1)}(x,y)$  при повороте на  $\pi/2$  относительно оси  $Oz$ . Функции  $h^{(2)}_{ij}(x,y)$  представляют собой фрагменты функции  $h^{(2)}(x,y)$  и являются одним из слагаемых фазовой функции плоского оптического

элемента в элементарных областях  $G_{ij}$  из области  $G^{(2)}$ . Функции  $h^{(1)}_{ij}(x,y)$  и  $h^{(2)}_{ij}(x,y)$  используются для синтеза нанооптических элементов в варианте 2.

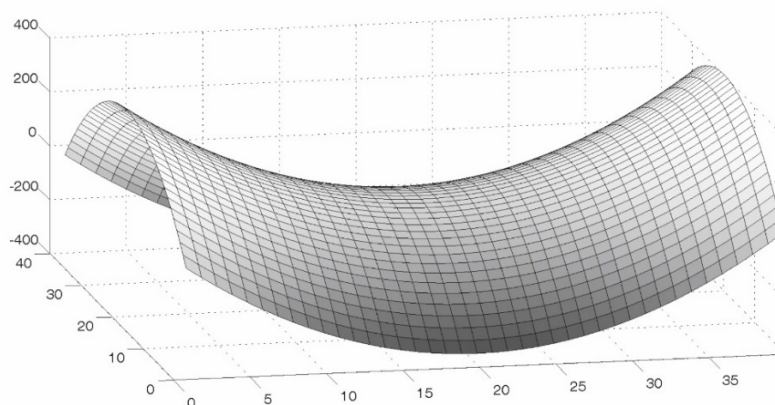


Рисунок 3.31. График функции  $h^{(2)}(x,y)$  в варианте 2.

На рисунке 3.32, 3.33 и 3.34 приведены графики функций  $h^{(1)}(x,y) = C \cdot \rho^\alpha \cos(2\varphi)$ ,  $h^{(2)}(x,y) = C \cdot \rho^\alpha \cos(2 \cdot (\varphi + \pi/3))$  и  $h^{(3)}(x,y) = C \cdot \rho^\alpha \cos(2 \cdot (\varphi - \pi/3))$  в полярной системе координат  $x = \rho \cdot \cos \varphi$ ,  $y = \rho \cdot \sin \varphi$ , где  $C$  — заданный положительный параметр,  $\alpha$  принадлежит интервалу  $1 < \alpha < 3$ . При значении параметра  $\alpha = 2$  данные функции представляют собой седлообразные параболоиды. Графики функций  $h^{(2)}(x,y)$  и  $h^{(3)}(x,y)$  отличаются от графика функции  $h^{(1)}(x,y)$  поворотом относительно оси  $Oz$  на  $+\pi/3$  и  $-\pi/3$  соответственно. Функции  $h^{(1)}_{ij}(x,y)$  представляют собой фрагменты функции  $h^{(1)}(x,y)$  и являются одним из слагаемых фазовой функции плоского оптического элемента в элементарных областях  $G_{ij}$  из области  $G^{(1)}$ . Функции  $h^{(2)}_{ij}(x,y)$  представляют собой фрагменты функции  $h^{(2)}(x,y)$  и являются одним из слагаемых фазовой функции плоского оптического элемента в элементарных областях  $G_{ij}$  из области  $G^{(2)}$ . Функции  $h^{(3)}_{ij}(x,y)$  представляют собой фрагменты функции  $h^{(3)}(x,y)$  и являются одним из слагаемых фазовой функции плоского оптического элемента в элементарных областях  $G_{ij}$  из области  $G^{(3)}$ . Функции  $h^{(1)}_{ij}(x,y)$ ,  $h^{(2)}_{ij}(x,y)$ ,  $h^{(3)}_{ij}(x,y)$  используются для синтеза нанооптических элементов в варианте 3.

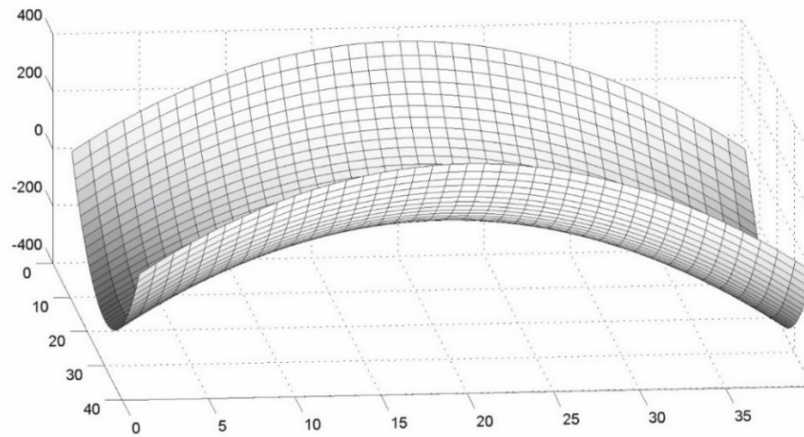


Рисунок 3.32. График функции  $h^{(1)}(x,y)$  в варианте 3.

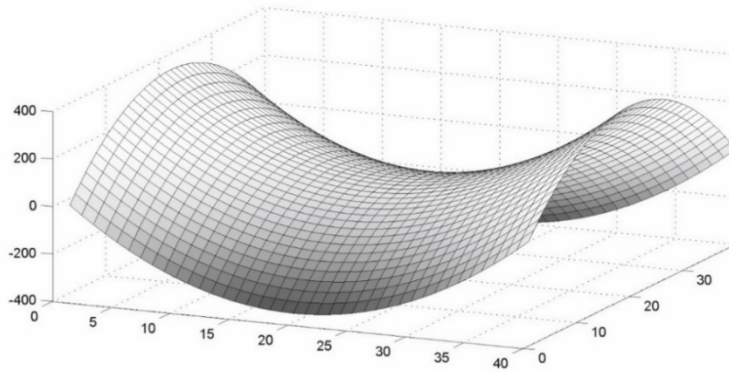


Рисунок 3.33. График функции  $h^{(2)}(x,y)$  в варианте 3.

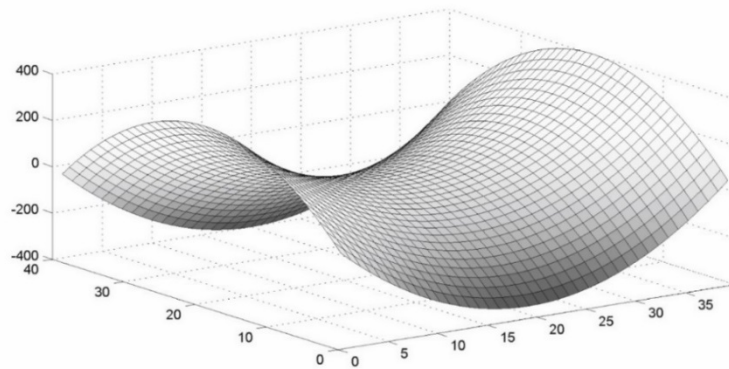


Рисунок 3.34. График функции  $h^{(3)}(x,y)$  в варианте 3.

Аналогично, на рисунке 3.35, 3.36, 3.37 и 3.38 приведены графики функций  $h^{(1)}(x,y) = C \cdot \rho^\alpha \cos(2\varphi)$ ,  $h^{(2)}(x,y) = C \cdot \rho^\alpha \cos(2 \cdot (\varphi + \pi/4))$ ,  $h^{(3)}(x,y) = C \cdot \rho^\alpha \cos(2 \cdot (\varphi + \pi/2))$  и  $h^{(4)}(x,y) = C \cdot \rho^\alpha \cos(2 \cdot (\varphi + 3\pi/4))$  в полярной системе координат  $x = \rho \cdot \cos \varphi$ ,  $y = \rho \cdot \sin \varphi$ , где  $C$  — заданный положительный параметр,  $\alpha$  принадлежит интервалу  $1 < \alpha < 3$ . При значении параметра  $\alpha = 2$  данные функции представляют собой седлообразные параболоиды. Графики функций

$h^{(2)}(x,y)$ ,  $h^{(3)}(x,y)$  и  $h^{(4)}(x,y)$  отличаются от графика функции  $h^{(1)}(x,y)$  последовательным поворотом относительно оси  $Oz$  на углы  $\pi/4$ ,  $\pi/2$ ,  $3\pi/4$ . Функции  $h^{(1)}_{ij}(x,y)$  представляют собой фрагменты функции  $h^{(1)}(x,y)$  и являются одним из слагаемых фазовой функции плоского оптического элемента в элементарных областях  $G_{ij}$  из области  $G^{(1)}$ . Функции  $h^{(2)}_{ij}(x,y)$  представляют собой фрагменты функции  $h^{(2)}(x,y)$  и являются одним из слагаемых фазовой функции плоского оптического элемента в элементарных областях  $G_{ij}$  из области  $G^{(2)}$ . Функции  $h^{(3)}_{ij}(x,y)$  представляют собой фрагменты функции  $h^{(3)}(x,y)$  и являются одним из слагаемых фазовой функции плоского оптического элемента в элементарных областях  $G_{ij}$  из области  $G^{(3)}$ . Функции  $h^{(4)}_{ij}(x,y)$  представляют собой фрагменты функции  $h^{(4)}(x,y)$  и являются одним из слагаемых фазовой функции плоского оптического элемента в элементарных областях  $G_{ij}$  из области  $G^{(4)}$ . Функции  $h^{(1)}(x,y)$ ,  $h^{(2)}(x,y)$ ,  $h^{(3)}(x,y)$  и  $h^{(4)}(x,y)$  используются для формирования изображений в варианте 4.

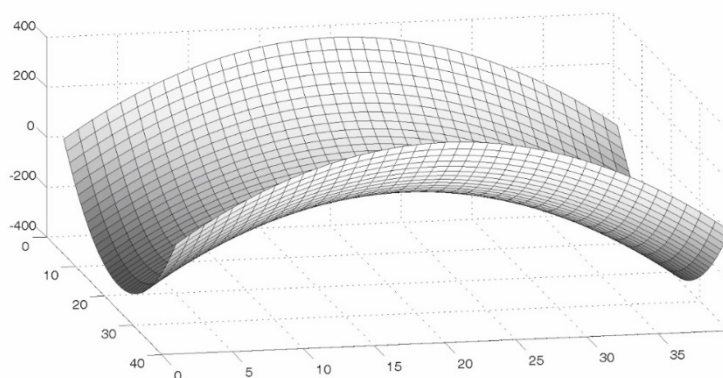


Рисунок 3.35. График функции  $h^{(1)}(x,y)$  в варианте 4.

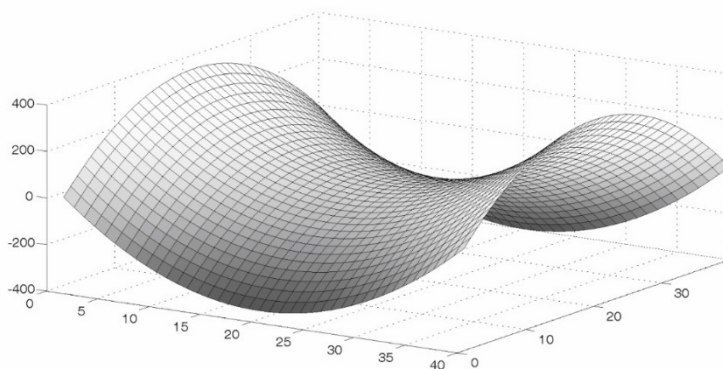


Рисунок 3.36. График функции  $h^{(2)}(x,y)$  в варианте 4.

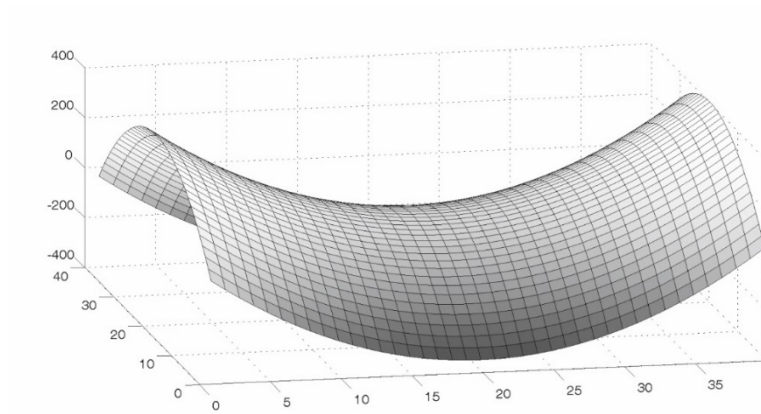


Рисунок 3.37. График функции  $h^{(3)}(x,y)$  в варианте 4.

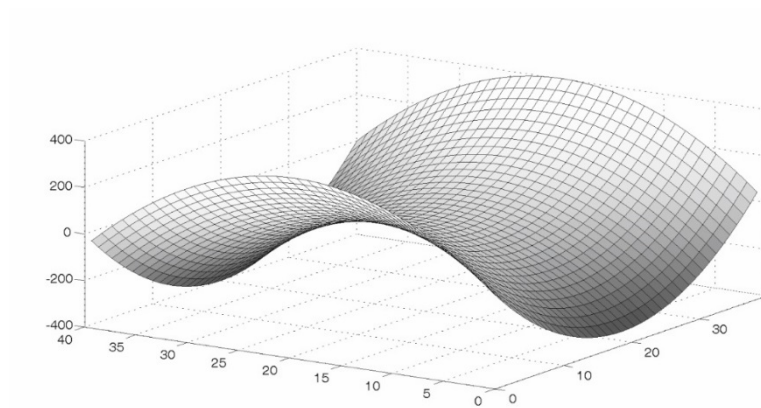


Рисунок 3.38. График функции  $h^{(4)}(x,y)$  в варианте 4.

На рисунке 3.39 представлена схема формирования изображения с помощью многоградационного киноформа. На плоский оптический элемент 5, расположенный в плоскости  $z = 0$ , падает оптическое излучение 6. Рассеянный оптическим элементом свет формирует в фокальной плоскости  $z = f$ , параллельной плоскости оптического элемента, изображение 7 символа  $A_m$ ,  $m = 1, 2, 3, 4$ . Обозначим фазовую функцию киноформа, расположенного в области  $G_{ij}$  и формирующего символ  $A_m$ , как  $\Phi_{ij}^{(m)}(x,y)$ . Для расчёта фазовой функции  $\Phi_{ij}^{(m)}(x,y)$  в элементарных областях  $G_{ij}$  используются стандартные алгоритмы расчёта микроструктуры многоградационного киноформа [А32], то есть решается уравнение (3.4) в области  $G_{ij}$  при правой части, представляющей собой изображение символа  $A_m$ . Пример фрагмента микрорельефа киноформа приведён на рисунке 3.40. Размер фрагмента микрорельефа —  $80 \times 80$  микрон. Яркость изображения в каждой точке  $(x,y)$  рисунка 3.40 пропорциональна глубине микрорельефа в этой точке.

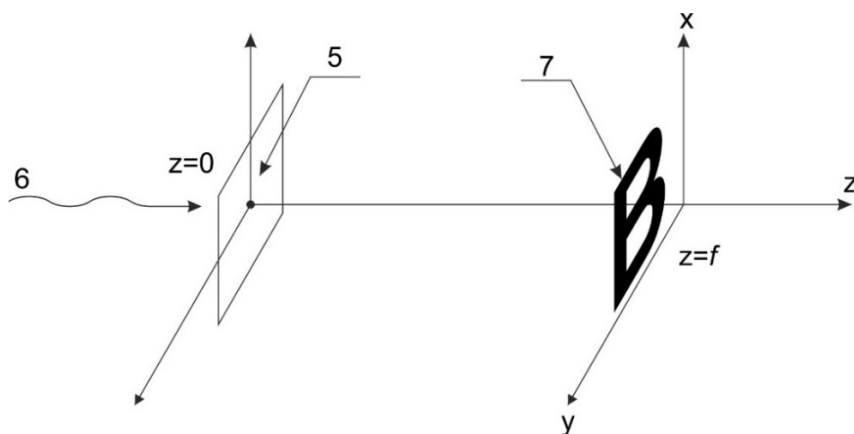


Рисунок 3.39. Схема формирования изображения.

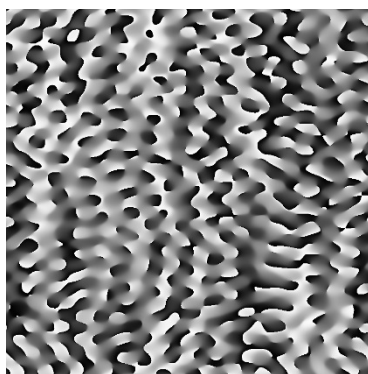


Рисунок 3.40. Фрагмент многоградационного киноформа.

Фазовая функция нанооптического элемента  $\Psi_{ij}^{(m)}(x,y)$  в точках  $(x,y)$ , принадлежащих области  $G_{ij}$ , равняется сумме фазовой функции киноформа  $\Phi_{ij}^{(m)}(x,y)$  и функции  $h_{ij}^{(m)}(x,y)$ . Фазовые функции  $\Phi_{ij}^{(m)}(x,y)$  определены в областях  $G^{(m)}$ . Для вариантов 1 и 2 индекс  $m$  принимает значения 1 и 2. Для варианта 3 индекс  $m$  принимает значения 1, 2 и 3. Для варианта 4 индекс  $m$  принимает значения 1, 2, 3 и 4.

На рисунках 3.41 и 3.42 представлены схемы наблюдения нанооптических элементов, описанных в вариантах 1-4. На рисунке 3.41 приведена схема наблюдения при наклоне оптического элемента в направлении вверх-вниз. Источник 8 и наблюдатель 9 фиксированы и расположены в плоскости  $Ozx$ . Источник света располагается на оси  $Oz$ . В качестве точечного источника света подходит фонарик любого мобильного телефона. При наклоне оптического элемента в направлении вверх-вниз поворот оптического элемента осуществляется вокруг оси  $Oy$  на угол  $\beta$ .

На рисунке 3.42 приведена схема наблюдения нанооптических элементов при наклоне оптического элемента в направлении влево-вправо. Источник 8 и наблюдатель 9 фиксированы и расположены в плоскости  $Ozx$ . Источник света располагается на оси  $Oz$ . При наклоне

оптического элемента в направлении влево-вправо поворот оптического элемента осуществляется вокруг оси  $Ox$  на угол  $\gamma$ .

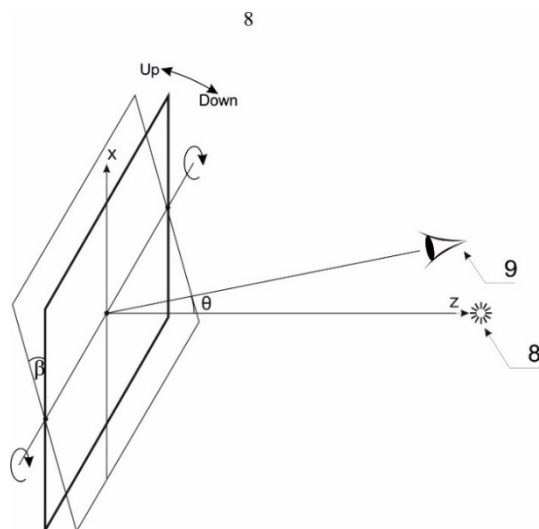


Рисунок 3.41. Схема наблюдения.

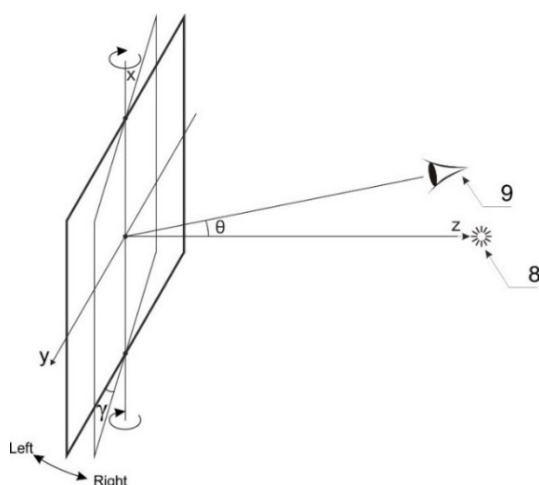


Рисунок 3.42. Схема наблюдения.

На рисунке 3.43 показаны кинематические эффекты движения фрагментов изображения для нанооптического элемента, описанного в вариантах 1 и 2, при  $\alpha = 2$ , при его наклонах в направлении вверх-вниз. Угол  $\gamma = 0$ . Нанооптический элемент, представленный в вариантах 1 и 2, формирует два символа  $A_1$  и  $A_2$ . В качестве символа  $A_1$  выбрана буква «А», а в качестве символа  $A_2$  выбрана буква «В». Центральные кадры на рисунке 3.43(а) и 3.43(б) соответствуют углу наклона  $\beta = 0$ . На рисунке 3.43(а) показаны кинематические эффекты движения фрагментов изображения для нанооптического элемента, описанного в варианте 1. При наклоне оптического элемента вверх-вниз буквы «А» и «В» перемещаются в противоположных направлениях от центра оптического элемента вдоль вертикальной оси. На рисунке 3.43(б) показаны кинематические эффекты движения фрагментов изображения для нанооптического элемента,

описанного в варианте 2. При наклоне оптического элемента up/down буквы «А» и «В» перемещаются в противоположных направлениях от центра оптического элемента вдоль горизонтальной оси.

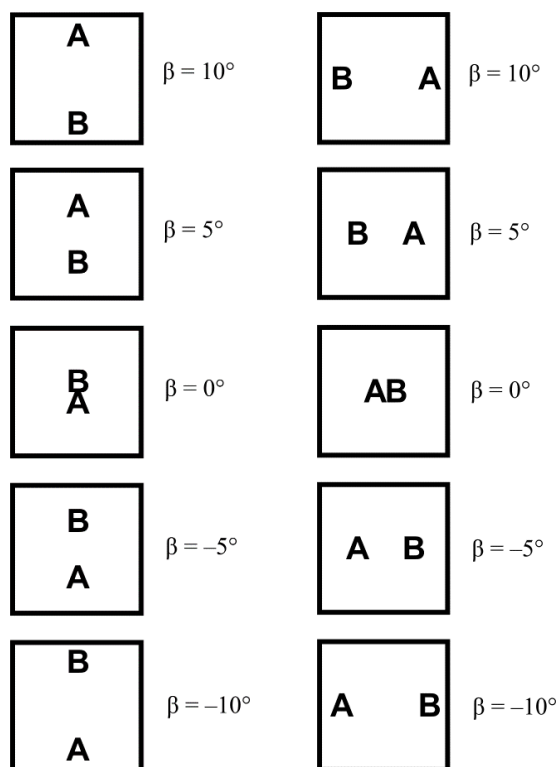


Рисунок 3.43. Характер движения символов при наклоне оптического элемента вверх/вниз в варианте 1 и в варианте 2.

На рисунке 3.44 представлены изображения, формируемые нанооптическим элементом, представленным в вариантах 1 и 2, при наклонах оптической системы в направлении влево-вправо. Изображения получены для разных углов  $\gamma$  при фиксированном угле  $\beta$ . Центральные кадры на рисунках 3.44(а), 3.44(б) соответствуют углу наклона  $\gamma=0$ . На рисунке 3.44(а) представлены изображения, формируемые нанооптическим элементом согласно варианту 1 при значении параметра  $\alpha = 2$  при наклонах оптической системы в направлении влево-вправо. На рисунке 3.44(б) представлены изображения, формируемые нанооптическим элементом, описанным в варианте 2, при значении параметра  $\alpha = 2$  при наклонах оптической системы в направлении влево-вправо. Как видно из рисунка 3.44(а), при наклоне оптического элемента влево-вправо, буквы «А» и «В» перемещаются в противоположных направлениях от центра оптического элемента вдоль горизонтальной оси. Как видно из рисунка 3.44(б), при наклоне оптического элемента влево-вправо, буквы «А» и «В» перемещаются в противоположных направлениях от центра оптического элемента вдоль вертикальной оси.



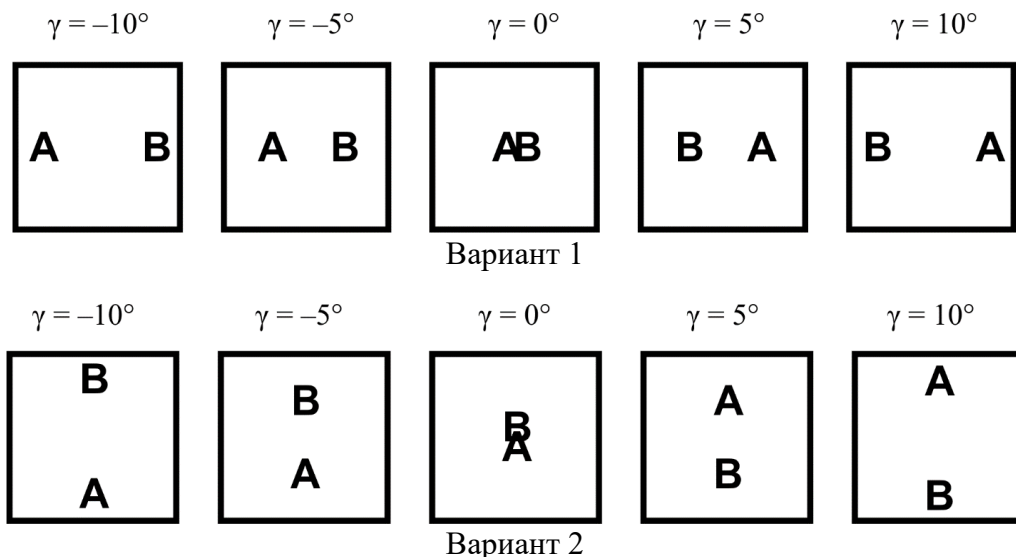


Рисунок 3.44. Характер движения символов при наклоне оптического элемента влево/вправо в варианте 1 и в варианте 2.

На рисунке 3.45 приведены изображения, формируемые нанооптическим элементом, описанным в вариантах 3 и 4, при наклонах оптической системы вверх-вниз. Угол  $\gamma$  фиксирован и равен 0. Нанооптический элемент, представленный в варианте 3, формирует изображение из трёх символов  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_3$ . В качестве символа  $A_1$  выбрана буква «А», в качестве символа  $A_2$  выбрана буква «В», а в качестве символа  $A_3$  выбрана буква «С». Нанооптический элемент в варианте 4, формирует изображение из четырёх символов  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  и  $A_4$ . В качестве символа  $A_1$  выбрана буква «А», в качестве символа  $A_2$  выбрана буква «В», в качестве символа  $A_3$  выбрана буква «С», а в качестве символа  $A_4$  выбрана буква «D». На рисунке 3.45(а) приведены изображения, формируемые нанооптическим элементом, описанным в варианте 3, при наклонах нанооптического элемента вверх-вниз. Как видно из рисунка 3.45(а), при наклоне нанооптического элемента в направлении вверх/вниз буквы «А», «В» и «С» разбегаются от центра по лучам, углы между которыми составляют  $120^\circ$ . На рисунке 3.45(б) приведены изображения, формируемые нанооптическим элементом, описанным в варианте 4, при наклонах оптической системы вверх/вниз. Как видно из рисунка 3.45(б), при наклоне нанооптического элемента в направлении вверх/вниз буквы «А», «В», «С» и «D» разбегаются от центра по лучам, углы между которыми составляют  $90^\circ$ . Центральные кадры на рисунках 3.45(а) и 3.45(б) соответствует углу наклона  $\beta=0$ .

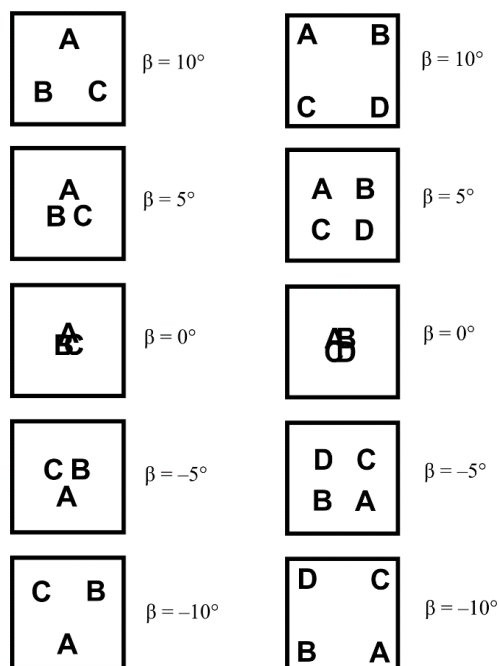


Рисунок 3.45. Характер движения символов при наклоне оптического элемента вверх/вниз в варианте 3 и в варианте 4.

На рисунке 3.46 приведены изображения, формируемые нанооптическим элементом в вариантах 3 и 4 при наклонах оптической системы в направлении влево-вправо. Угол  $\gamma$  меняется, а угол  $\beta$  фиксирован. На рисунке 3.46(а) приведены изображения, формируемые нанооптическим элементом в варианте 3 при наклонах оптической системы влево-вправо. Как видно из рисунка 3.46(а), при наклоне нанооптического элемента влево-вправо буквы «А», «В» и «С» поворачиваются по/против часовой стрелки относительно центра. На рисунке 3.46(б) приведены изображения, формируемые нанооптическим элементом, описанным в варианте 4, при наклонах оптической системы влево-вправо. Как видно из рисунка 3.46(б), при наклоне нанооптического элемента влево-вправо буквы «А», «В», «С» и «D» поворачиваются по/против часовой стрелки относительно центра. Центральные кадры соответствуют углу  $\gamma=0$ .

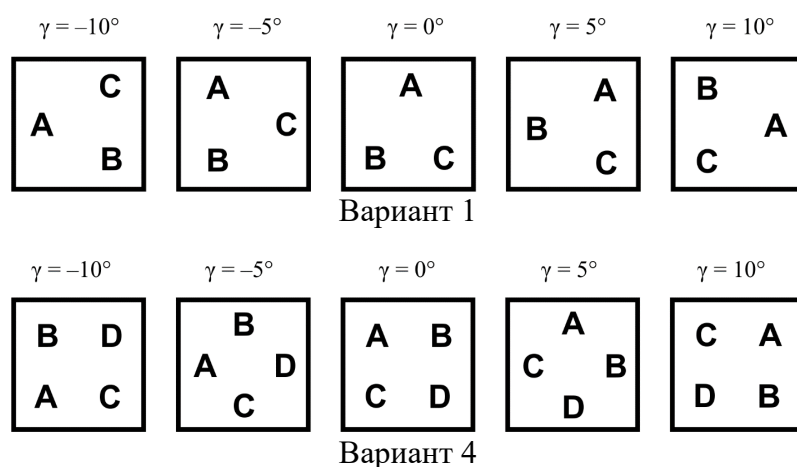


Рисунок 3.46. Характер движения символов при наклоне оптического элемента влево/вправо в варианте 3 и в варианте 4.

Все иллюстрации на рисунках 3.43–3.46 соответствуют значению параметра  $\alpha = 2$ . В этом случае для нанооптического элемента в варианте 1 функция  $h^{(1)}(x,y)=C \cdot (x^2+y^2)$ ,  $C>0$ , а функция  $h^{(2)}(x,y)=-C \cdot (x^2+y^2)$ . Для нанооптического элемента в варианте 2 функция  $h^{(1)}(x,y)=C \cdot (x^2-y^2)$ ,  $C>0$ , а функция  $h^{(2)}(x,y)=-C \cdot (x^2-y^2)$ . Формы поверхностей  $h^{(m)}(x,y)$  для нанооптического элемента в вариантах 3 и 4 приведены на рисунках 3.30–3.38.

Параметр  $\alpha$  отвечает за масштабируемость (размер) изображений, видимых наблюдателю при освещении нанооптического элемента точечным источником. При  $\alpha = 2$  размеры символов не меняются при их движении друг относительно друга.

Таким образом, нанооптические элементы в вариантах 3 и 4 формируют изображения, состоящие из трёх или четырёх букв соответственно. При наклонах оптической системы вверх/вниз буквы изображения разбегаются от центра оптического элемента по лучам, углы между которыми составляют  $120^\circ$  для п. 3 и  $90^\circ$  – для варианта 4. При наклонах оптической системы left/right происходит поворот изображения по/против часовой стрелки. Разница между наблюдаемыми кинематическими эффектами движения, сформированными нанооптическими элементами, описанными в вариантах 3 и 4, заключается как в количестве формируемых символов, так и в углах между лучами, по которым разбегаются символы при наклоне оптического элемента.

На рисунке 3.47 приведена схема формирования элементарных областей  $G_{ij}$  в варианте 5. Каждая элементарная область  $G_{ij}$  содержит область  $G'_{ij}$ , размером не более 40 микрон. Область  $G'_{ij}$  на рисунке 3.47 обозначена цифрой 7. Размер областей  $G_{ij}$  и  $G'_{ij}$  специально выбирается так, что разрешения человеческого глаза недостаточно для того, чтобы увидеть элементарные области. Размещая в областях  $G'_{ij}$  дифракционные решётки разной ориентации с периодами менее 0.8 микрон, можно сформировать другое цветное изображение, видимое наблюдателю на всей области оптического элемента при больших углах дифракции — более  $60^\circ$ .

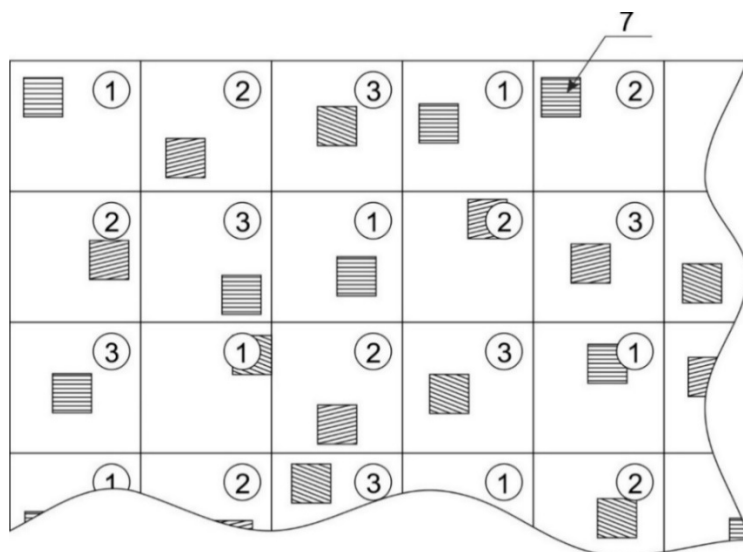


Рисунок 3.47. Схема формирования микрорельефа в варианте 5.

На рисунке 3.48 приведена схема наблюдения нанооптического элемента, представленной в варианте 5, при больших углах дифракции. На рисунке 3.49 приведён пример цветного изображения, которое должен видеть наблюдатель при больших углах дифракции. При углах дифракции, меньших  $60^\circ$ , наблюдатель видит изображение символов, формируемое киноформами.

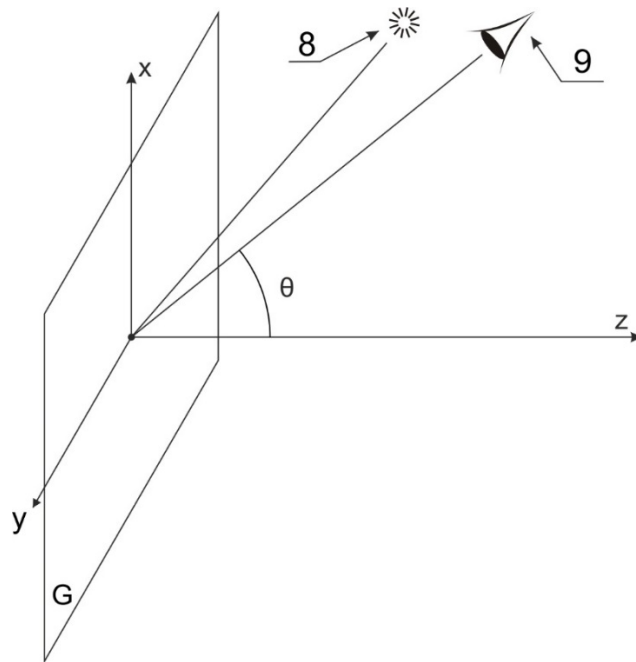


Рисунок 3.48. Схема наблюдения при больших углах дифракции более  $60^\circ$  градусов в варианте 5.



Рисунок 3.49. Дизайн нанооптического элемента при больших углах дифракции.

Варианты 1-4 определяют фазовую функцию нанооптического элемента. В каждой элементарной области  $G_{ij}$  из области  $G^{(m)}$  фазовая функция  $\Psi_{ij}^{(m)}(x,y)$  нанооптического элемента является суммой заданной функции  $h_{ij}^{(m)}(x,y)$  и фазовой функции  $\Phi_{ij}^{(m)}(x,y)$  многоградационного

киноформа, формирующего в фокальной плоскости  $z=\text{const}$  изображение определённого символа. Фазовая функция  $\Psi_{ij}^{(m)}(x,y)$ ,  $i=1\dots I$ ,  $j=1\dots J$ ,  $m=1\dots M$ , однозначно определяет микрорельеф плоского фазового оптического элемента. В нанооптическом элементе, описанном в вариантах 1 и 2,  $M=2$ . В нанооптическом элементе, описанном в варианте 3,  $M=3$ . В нанооптическом элементе, описанном в варианте 4,  $M=4$ .

Различают многоградационные и бинарные плоские фазовые оптические элементы. Для многоградационных плоских оптических элементов, работающих на отражение, при нормальном падении света на оптический элемент глубина микрорельефа  $h(x,y)$  составляет  $0.5 \cdot \Psi(x,y)$ . [A32]. Многоградационный плоский оптический элемент имеет теоретическую энергетическую эффективность, близкую к 100%.

В отличие от многоградационных элементов, микрорельеф бинарных фазовых плоских оптических элементов принимает только два значения – 0 и  $h$ . Причём глубина микрорельефа равняется  $h$  для тех точек  $(x,y)$ , для которых выполнены условия  $0 < k\Psi(x,y) < \pi$ . Здесь  $k$  – волновое число,  $h$  – заданный параметр, значение которого меньше 0.6 микрона. Энергетическая эффективность бинарных элементов не превосходит 50%. Другой важной особенностью бинарных элементов является то, что бинарный плоский оптический элемент всегда формирует симметричное изображение [A32]. Это означает, что ни одно из изображений, приведённых на рисунках 3.43–3.46, в принципе нельзя получить с помощью бинарных оптических элементов. На рисунке 3.50 приведен пример симметричного изображения с кинематическими эффектами движения, которые можно синтезировать с помощью бинарных оптических элементов. В заключении отметим, что технология синтеза бинарных плоских оптических элементов намного проще технологии синтеза многоградационных элементов. В защитных оптических технологиях последнее является значимым фактором, именно поэтому все нанооптические элементы в вариантах 1-4 формируются с использованием многоградационных плоских оптических элементов.

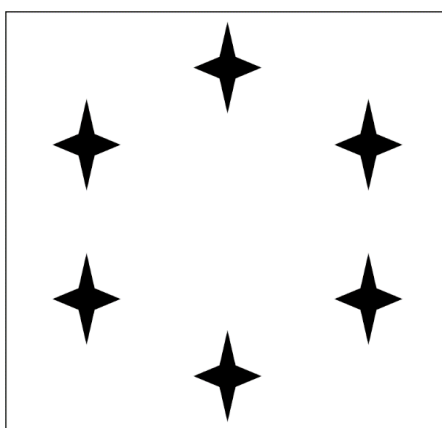


Рисунок 3.50. Вариант симметричного 2D изображения.

Технология синтеза многоградационных плоских оптических элементов является наиболее защищённой от подделки. Точность изготовления микрорельефа таких оптических элементов должна составлять порядка 20 нм [A3, A4]. Для изготовления заявленных нанооптических элементов может быть использована технология электронно-лучевой литографии, которая позволяет сформировать микрорельеф с такой точностью. Электронно-лучевая технология не является распространённой, в мире существует всего несколько компаний, которым доступна эта технология. Всё это позволяет сузить круг технологий, с помощью которых можно изготовить заявленные нанооптические элементы, что обеспечивает их надёжную защиту от подделки [A28].

Технология массового тиражирования заявленных нанооптических элементов доступна и обеспечивает их низкую себестоимость при массовом тиражировании [2].

### **3.4. Примеры реализации многоградационных нанооптических элементов с кинематическими эффектами движения на всей области оптического элемента**

С целью демонстрации эффективности разработанных технологий были изготовлены два нанооптических элемента, формирующих 2D изображения с кинематическими эффектами движения на всей области оптического элемента.

Микрорельеф плоских оптических элементов в примерах 1-2 записывался с помощью электронно-лучевой литографии на пластинах с электронным резистом. С изготовленных пластин, после их металлизации с помощью гальванопластики, были изготовлены мастер-матрицы нанооптических элементов. Используя стандартное оборудование для тиражирования голограмм, были изготовлены металлизированные нанооптические элементы, формирующие описанные выше изображения. Глубина микрорельефа нанооптических элементов составляет 0,3 микрона, точность изготовления микрорельефа порядка 10 нм.

#### **Пример 1**

В области G, представляющей собой круг диаметром 12.8 мм, расположен дифракционный оптический элемент — нанооптический элемент, формирующий изображение из двух символов. При освещении нанооптического элемента точечным источником света наблюдатель видит две буквы «А» и «В». Дифракционный оптический элемент в области G соответствует вариантам 1 и 5. Параметр  $\alpha = 2$ . Для синтеза нанооптического элемента область G разбивалась на элементарные области  $G_{ij}$ , размер которых не превосходил 100 микрон. Общее

количество элементарных областей в области  $G_{ij}$  составило более 35 000. Из областей  $G_{ij}$  были сформированы две области  $G^{(1)}$  и  $G^{(2)}$  в соответствии с рисунком 3.25. В областях  $G^{(1)}$  и  $G^{(2)}$  были рассчитаны многоградационные киноформы с фазовыми функциями  $\Phi^{(m)}_{ij}$ ,  $m = 1, 2$ , формирующие изображения символов «А» и «В». Фазовая функция многоградационного нанооптического элемента в элементарных областях  $G_{ij}$  из областей  $G^{(m)}$ ,  $m = 1, 2$ , равняется сумме функций  $\Phi^{(m)}_{ij}$  и  $h^{(m)}_{ij}(x,y)$ , что представлено в варианте 1.

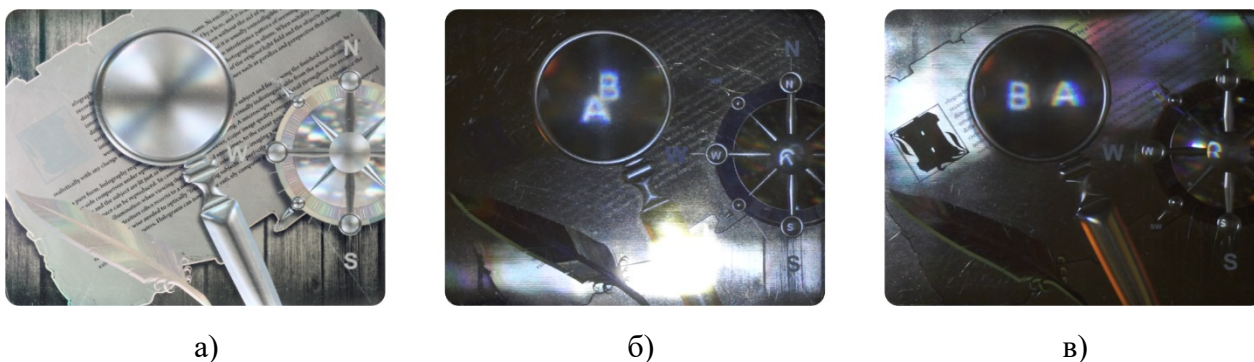


Рисунок 3.51. Фотография реального нанооптического элемента в варианте 1: (а) в рассеянном свете, (б) и (в) при освещении точечным источником света.

На рисунке 3.51 приведена фотография реального нанооптического элемента. При освещении нанооптического элемента рассеянным источником света, наблюдатель видит изображение, представленное на рисунке 3.51(а). При освещении нанооптического элемента точечным источником света, наблюдатель видит изображение, представленное на рисунке 3.51(б).

При наклонах оптического элемента вверх-вниз при углах дифракции менее  $60^\circ$  наблюдатель видит изображение букв «А» и «В», которые двигаются по двум лучам, угол между которыми составляет  $180^\circ$ . Характер движения символов представлен на рисунке 3.43(а). Характер движения символов при наклонах влево-вправо представлен на рисунке 3.44(б).

#### Пример 2

В области  $G$ , представляющей собой круг диаметром 12.8 мм на рисунке 3.52 (фотография), расположен дифракционный оптический элемент — нанооптический элемент, формирующий изображение из трёх символов. При освещении нанооптического элемента точечным источником света наблюдатель видит три буквы «А», «В» и «С». Параметр  $\alpha = 2$ . Для синтеза нанооптического элемента область  $G$  разбивалась на элементарные области  $G_{ij}$ , размер которых не превосходил 100 микрон. Общее количество элементарных областей в области  $G_{ij}$  составило более 35 000. Из областей  $G_{ij}$  были сформированы три области  $G^{(1)}$ ,  $G^{(2)}$  и  $G^{(3)}$ . В областях  $G^{(1)}$ ,  $G^{(2)}$  и  $G^{(3)}$  были рассчитаны многоградационные киноформы с фазовыми

функциями  $\Phi^{(m)}_{ij}$ ,  $m = 1, 2, 3$ , формирующие изображения символов «А», «В» и «С». Фазовая функция нанооптического элемента в элементарных областях  $G_{ij}$  из областей  $G^{(m)}$ ,  $m = 1, 2, 3$ , равняется сумме функций  $\Phi^{(m)}_{ij}$  и  $h^{(m)}_{ij}(x,y)$ , что представлено в варианте 3.

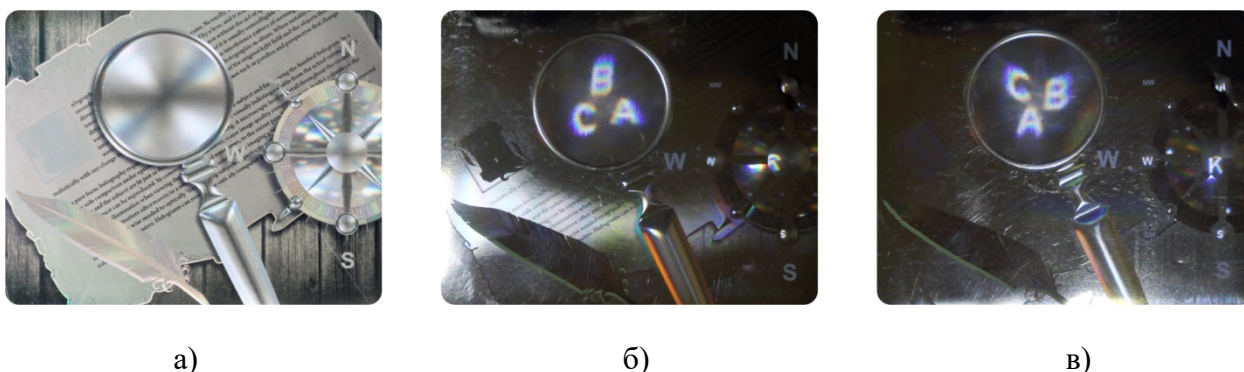


Рисунок 3.52. Фотография реального нанооптического элемента в варианте 3: а) в рассеянном свете, б) и в) при освещении точечным источником света.

На рисунке 3.52 приведена фотография реального нанооптического элемента. При освещении нанооптического элемента рассеянным источником света, наблюдатель видит изображение, представленное на рисунке 3.52(а). При освещении нанооптического элемента точечным источником света, наблюдатель видит изображение, представленное на рисунке 3.52(б) и 3.52(в) при разных углах наклона.

При углах дифракции менее  $60^\circ$  при наклонах оптического элемента в направлении вверх-вниз наблюдатель видит изображение букв «А» и «В» и «С», которые перемещаются по трём лучам, углы между которыми составляют  $120^\circ$ . Характер движения символов представлен на рисунке 3.52. При наклонах в направлении влево-вправо происходит поворот символов, как показано на рисунке 3.52.

Изготовленные образцы показали высокую эффективность предложенных технических решений.

Пример 3. Разработанные в Главе 3 методы синтеза нанооптических элементов, формирующих 2D изображения с кинетическими эффектами движения с полным параллаксом позволяют формировать различные варианты защитных визуальных признаков, которые легко визуально контролируются. В то же время защитный нанооптический элемент надежно защищен от подделки. В примере 1 и 2 визуальный эффект позволял наблюдателю видеть движение с полным параллаксом двух и трех символов при наклоне оптического элемента. Размер символов не менялся. Разработанные в диссертации методы позволяют синтезировать защитный признак, в котором происходит превращение одного символа при наклоне оптического элемента в другой. Этот эффект демонстрируется в примере 3. В рассеянном свете наблюдатель видит песочные



часы. При включении точечного источника света в верхней части песочных часов загорается буква «О», которая при наклоне оптического элемента вверх/вниз уменьшается в размере, становится узкой, проходит через сужение песочных часов и превращается в букву «К». Контроль такого защитного признака не требует никакой квалификации. Подделать разработанный защитный признак с помощью широко распространенного оборудования невозможно. На рисунке 3.53 представлена фотография реального оптического элемента. На рисунке 3.53(а) представлен вид оптического элемента в рассеянном свете. На рисунке 3.53(б) представлено изображение, видимое наблюдателю при нормальном положении оптического элемента и при его освещении точечным источником света. На рисунке 3.53(в) представлено изображение нанооптического элемента при его освещении точечным источником и наклоне оптического элемента вверх/вниз.

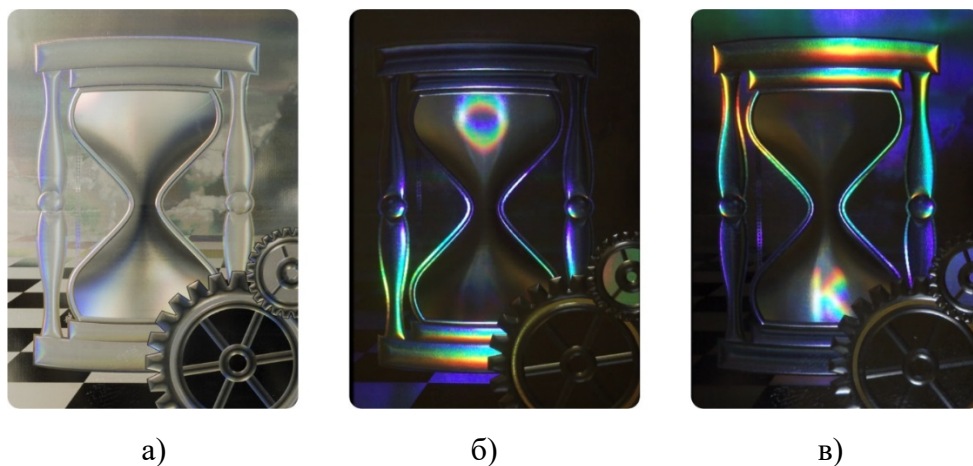


Рисунок 3.53 Фотографии нанооптического элемента: а) в рассеянном свете, б) и в) при освещении точечным источником белого света.

Размер оптического элемента составляет 35мм на 50мм, область песочных часов формируется с помощью многоградационного микрорельефа, глубина микрорельефа составляет 0.2 микрона. Остальная область оптического элемента заполнена бинарными структурами глубиной порядка 0.15 микрона.

### 3.5. Выводы

1. В главе 3 предложен новый защитный признак. Для формирования нанооптического элемента используются фрагменты многоградационных киноформ. Многоградационный киноформ как оптический элемент предназначен для формирования изображений на экране. Существуют работы, в которых многоградационный киноформ синтезируется с помощью электронно-лучевой литографии [103]. В этой работе изображение формируется на экране при освещении оптического элемента когерентным светом. В Главе 3 диссертации разработаны

методы синтеза нанооптических элементов, которые позволяют формировать более сложные визуальные защитные признаки. При освещении нанооптического элемента точечным источником белого света наблюдатель видит изображение символа (цифры, буквы и т.п.) или нескольких символов, которые перемещаются при наклонах оптического элемента [A6, A20]. В пункте 3.1 и 3.2 область перемещения символов ограничена заданием областей  $G_i$   $i=1, \dots, N$ . В каждой из перечисленных областей могут перемещаться разные символы. В пункте 3.3 символы перемещаются на всей области оптического элемента. Одновременно может перемещаться несколько символов. Визуальный эффект легко контролируем.

2. Впервые изготовлены нанооптические элементы, формирующие изображения двух и трех символов при освещении элемента белым светом. При наклоне оптического элемента относительно наблюдателя, символы перемещаются друг относительно друга как показано на рисунках 3.43 и 3.45. При изменении ориентации оптического элемента каждый из символов может занимать любую точку области оптического элемента. При наклонах оптического элемента изображения символов двигаются с полным параллаксом, т.е. наблюдатель видит движение символов как при наклоне влево/вправо так и при наклоне вверх/вниз [A16, A21, A22].

3. Разработанные нанооптические элементы могут быть тиражированы, что определяет их низкую цену при массовом изготовлении. Новые нанооптические элементы предназначены для защиты банкнот, паспортов, ценных бумаг, ID, пластиковых карт, акцизных марок и брендов.

## **Глава 4. Задачи компьютерного синтеза нанооптических защитных элементов для формирования 2D-изображений с кинетическими эффектами движения фрагментов по одной из координат**

*В данной главе используются материалы, опубликованные в сборнике трудов [A32].*

### **4.1. Постановка и методы решения обратной задачи компьютерного синтеза нанооптических элементов для формирования 2D-изображений с кинетическими эффектами движения фрагментов по одной из координат**

Плоские оптические осесимметричные линзы широко используются в различных приложениях оптики. Плоские линзы Френеля высокой эффективности могут быть изготовлены на тонких полимерных носителях [104, 105]. Такие элементы используются для записи и считывания информации в оптических системах хранения информации [106], в дисплеях виртуальной реальности [107], в гибридных линзах [108, 109]. Во всех перечисленных приложениях осесимметричные линзы Френеля используются для того, чтобы сфокусировать плоскую волну в точку с максимальной эффективностью. В Главе 4 плоские осесимметричные линзы Френеля используются для формирования визуальных эффектов движения при наклонах оптического элемента.

В Главе 4 рассматриваются задачи компьютерного синтеза нанооптических элементов с кинематическими эффектами движения по одной из координат. Одно из наиболее востребованных применений оптических элементов в защите банкнот – это тонкие нити (ныряющие или с оконным выходом) шириной от 2 до 5 мм. При такой маленькой ширине нити в диссертации предложены различные варианты синтеза оптических защитных элементов с легко контролируемым визуальным эффектом движения фрагментов изображений по одной из осей при наклонах оптического элемента. Предложено несколько вариантов решения этой задачи. Разработанные оптические элементы являются многоградационными и надежно защищены от подделок. Визуальный эффект, контролируемый наблюдателем, состоит в движении черных и белых полос при наклонах оптического элемента при углах дифракции менее  $60^\circ$ . При углах дифракции более  $60^\circ$  на всей области оптического элемента наблюдатель видит другое цветное изображение.

Обозначим за  $Q$  область оптического элемента, которая представляет собой прямоугольник  $|x| \leq L_x/2$   $|y| \leq L_y/2$ . В варианте 1 область  $Q$  разбита на элементарные области  $Q_{ij}$  размером не более 250 микрон с центрами в точках  $(x_i, y_j)$ ,  $i = 1 \dots N$ ,  $j = 1 \dots M$ . В каждой области  $Q_{ij}$  рассчитывается и изготавливается плоский оптический элемент с фазовой функцией  $\Phi(x, y)$ , которая в точке  $(x, y)$  каждой элементарной области  $Q_{ij}$  вычисляется по формуле  $\Phi(x, y) = \varphi_{ij}(x, y) \cdot \psi(y)$ ,  $i = 1 \dots N$ ,  $j = 1 \dots M$ . Функция  $\varphi_{ij}(x, y)$  представляет собой фазовую

функцию осевой линзы Френеля с центром в точке  $(x_i, y_j)$ , вычисляемую по формуле  $\varphi_{ij}(x, y) = C[(x-x_i)^2 + (y-y_j)^2]$ ,  $C$  – заданный параметр. Функция  $\psi(y)$  является периодическим продолжением функции  $\bar{\psi}(y)$ , заданной на отрезке  $|y| \leq T_\psi/2$  так, что  $\bar{\psi}(y)$  равно 1, если  $|y| \leq \Delta/2$ , и равно 0, если  $|y| > \Delta/2$ . Величины  $T_\psi$  и  $\Delta$  – заданные параметры, такие, что величина  $\Delta/T_\psi \leq 1/2$ , причём период  $T_\phi$  линз Френеля по оси  $Oy$ , равный  $T_\phi = L_y/M$ , отличается от периода  $T_\psi$  не более чем на 5%. При освещении нанооптического элемента точечным источником света при углах дифракции менее  $60^\circ$  наблюдатель видит на всей области  $Q$  оптического элемента изображение, состоящее из черных и белых полос, которое не меняется при повороте оптического элемента влево-вправо в диапазоне углов наклона  $-15^\circ < \beta < 15^\circ$ . Кинематический эффект заключается в движении чёрных и белых полос при наклонах оптического элемента вверх-вниз в диапазоне углов  $-30^\circ < \alpha < 30^\circ$ . Угол  $\alpha$  является углом поворота оптического элемента вокруг оси  $Ox$ , угол  $\beta$  является углом поворота оптического элемента вокруг оси  $Oy$ .

На рисунке 4.1 приведена область  $Q$  задания оптического элемента, представленная в вариантах 1-6. Область  $Q$  представляет собой прямоугольник размером  $L_x \times L_y$  с центром в начале декартовой системы координат  $Oxy$ . Ось  $Oy$  располагается по середине области оптического элемента.

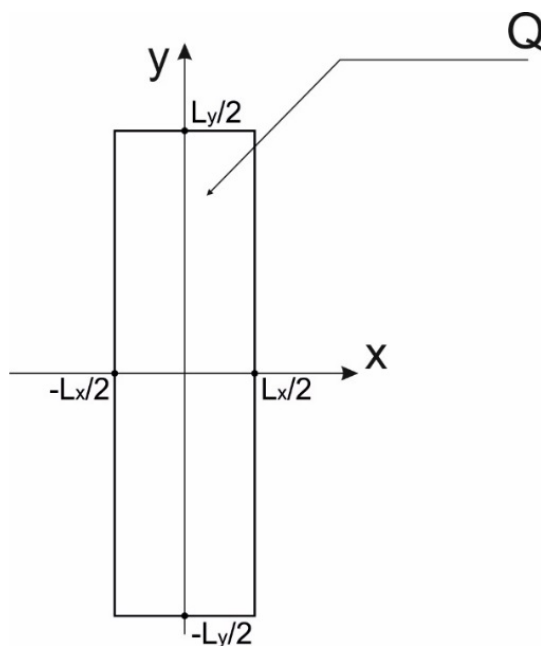


Рисунок 4.1. Область  $Q$  задания оптического элемента согласно вариантам 1-6.

На рисунке 4.2 приведена схема разбиения области оптического элемента на элементарные области  $Q_{ij}$ . Центр каждой элементарной области  $Q_{ij}$  находится в точке с координатами  $(x_i, y_j)$ . Размеры элементарных областей не превышают 250 микрон. В предпочтительном варианте схемы прямоугольник вытянут по оси  $Oy$ , то есть  $L_y > L_x$ . В

предпочтительном варианте нанооптический элемент формируется с помощью осевых линз Френеля.

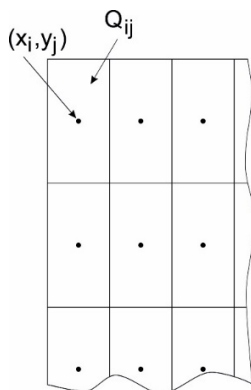


Рисунок 4.2. Схема разбиения области оптического элемента на элементарные области  $Q_{ij}$ .

На рисунке 4.3 приведена схема расположения линз Френеля в элементарных областях  $Q_{ij}$ . Сплошными линиями обозначены линии уровня фазовой функции. В качестве фазовых функций линз Френеля используются  $\varphi^+(x,y)$  для вогнутых линз и  $\varphi^-(x,y)$  для выпуклых линз, заданные соотношением  $\varphi(x,y) = C \cdot (x^2 + y^2)$ , где  $C$  – заданный параметр. Функция  $\varphi^+(x,y)$  соответствует параметру  $C > 0$ , функция  $\varphi^-(x,y)$  соответствует параметру  $C < 0$ .

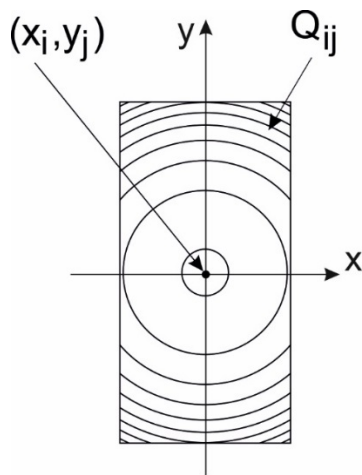


Рисунок 4.3. Схема расположения линз Френеля в элементарных областях  $Q_{ij}$ .

Нанооптический элемент, представленный в варианте 2, отличается от нанооптического элемента в варианте 1 тем, что область  $Q$  оптического элемента, в которой фазовая функция  $\Phi(x,y)$  равна нулю, заполняется дифракционными решётками разной ориентации с разными периодами, не превосходящими 0,6 микрона. При освещении нанооптического элемента точечным источником света при углах дифракции менее  $60^\circ$ , наблюдатель видит на всей области  $Q$  оптического элемента изображение, состоящее из чёрных и белых полос, которое не меняется

при повороте оптического элемента вправо-влево в диапазоне углов наклона  $-15^\circ < \beta < 15^\circ$ . Кинематический эффект заключается в движении чёрных и белых полос при наклонах оптического элемента вверх-вниз в диапазоне углов  $-30^\circ < \alpha < 30^\circ$ . При углах дифракции более  $60^\circ$  наблюдатель видит другое цветное изображение.

Многоградационный нанооптический элемент в варианте 3 является плоским отражающим фазовым дифракционным оптическим элементом с областью Q, представляющей собой прямоугольник  $|x| \leq L_x/2, |y| \leq L_y/2$ . В области Q выделены две непересекающиеся области: область  $Q^1$ , состоящая из точек  $(x,y)$  области Q с положительными координатами x, и область  $Q^2$ , состоящая из точек  $(x,y)$  области Q с отрицательными координатами x. Каждая из областей  $Q^1$  и  $Q^2$ , разбивается на элементарные области  $Q^1_{ij}$  и  $Q^2_{ij}$ , размером не более 250 микрон с центрами в точках  $(x_i, y_j)$ ,  $i = 1 \dots N/2, j = 1 \dots M$ . В каждой области  $Q^1_{ij}$  рассчитывается и изготавливается плоский оптический элемент с фазовой функцией  $\Phi(x,y)$ , которая в точке  $(x,y)$  элементарной области  $Q^1_{ij}$  вычисляется по формуле  $\Phi(x,y) = \varphi^+_{ij}(x,y) \cdot \psi(y)$ ,  $i = 1 \dots N/2, j = 1 \dots M$ , где  $\varphi^+_{ij}(x,y)$  представляет собой фазовую функцию вогнутой осевой линзы Френеля с центром в точке  $(x_i, y_j)$ , вычисляемую по формуле  $\varphi^+_{ij}(x,y) = C[(x-x_i)^2 + (y-y_j)^2]$ , C – положительный заданный параметр. В каждой области  $Q^2_{ij}$  рассчитывается и изготавливается плоский оптический элемент с фазовой функцией  $\Phi(x,y)$ , которая в точке  $(x,y)$  элементарной области  $Q^2_{ij}$  вычисляется по формуле  $\Phi(x,y) = \varphi^-_{ij}(x,y) \cdot \psi(y)$ ,  $i = 1 \dots N/2, j = 1 \dots M$ , где  $\varphi^-_{ij}(x,y)$  представляет собой фазовую функцию выпуклой осевой линзы Френеля с центром в точке  $(x_i, y_j)$ , вычисляемую по формуле  $\varphi^-_{ij}(x,y) = C[(x-x_i)^2 + (y-y_j)^2]$ , C – отрицательный заданный параметр. Функция  $\psi(y)$ , определённая во всей области Q, является периодическим продолжением функции  $\bar{\psi}(y)$ , заданной на отрезке  $|y| \leq T_\psi/2$  так, что  $\bar{\psi}(y)$  равно 1, если  $|y| \leq \Delta/2$ , и равно 0, если  $|y| > \Delta/2$ . Здесь  $T_\psi$  и  $\Delta$  – заданные параметры, такие, что величина  $\Delta/T_\psi \leq 1/2$ . Период  $T_\phi$  линз Френеля по оси Oy, равный  $T_\phi = L_y/M$ , отличается от периода  $T_\psi$  не более чем на 5%. При освещении нанооптического элемента точечным источником света при углах дифракции менее  $60^\circ$  наблюдатель видит в областях  $Q^1$  и  $Q^2$  изображения, состоящие из чёрных и белых полос, которые не меняются при повороте оптического элемента влево-вправо в диапазоне углов наклона  $-15^\circ < \beta < 15^\circ$ . Кинематический эффект заключается в движении чёрных и белых полос при наклонах оптического элемента вверх-вниз в диапазоне углов  $30^\circ < \alpha < 30^\circ$ , причём направления движения чёрных и белых полос в областях  $Q^1$  и  $Q^2$  взаимно противоположны.

Многоградационный нанооптический элемент, представленный в варианте 4, отличается от нанооптического элемента в варианте 3 тем, что область Q оптического элемента, в которой фазовая функция  $\Phi(x,y)$  равна нулю, заполняется дифракционными решётками разной ориентации с разными периодами, не превосходящими 0,6 микрона. При освещении нанооптического элемента точечным источником света при углах дифракции менее  $60^\circ$

наблюдатель видит в областях  $Q^1$  и  $Q^2$  изображения, состоящие из чёрных и белых полос, которые не меняются при повороте оптического элемента влево вправо в диапазоне углов наклона  $-15^\circ < \beta < 15^\circ$ . Кинематический эффект заключается в движении чёрных и белых полос при наклонах оптического элемента вверх-вниз в диапазоне углов  $-30^\circ < \alpha < 30^\circ$ , причём направления движения полос в областях  $Q^1$  и  $Q^2$  взаимно противоположны. При углах дифракции более  $60^\circ$  наблюдатель видит другое цветное изображение.

В вариантах 3 и 4 движение полос в областях  $Q^1$  и  $Q^2$  разнонаправленно за счет того, что фазовые функции линз Френеля  $\phi^+(x,y)$  и  $\phi^-(x,y)$  в левой и правой полосе имеют разные знаки. Оказывается, что тот же визуальный признак можно получить, используя в областях  $Q^1$  и  $Q^2$  одинаковые фазовые функции. В этом случае в областях  $Q^1$  и  $Q^2$  используются разные функции  $\psi_1(y)$  и  $\psi_2(y)$ . Этот случай представлен в вариантах 5 и 6.

Многоградационный нанооптический элемент в варианте 5 является плоским отражающим фазовым дифракционным оптическим элементом с областью  $Q$ , представляющей собой прямоугольник  $|x| \leq L_x/2$ ,  $|y| \leq L_y/2$ . В области  $Q$  выделены две непересекающиеся области: область  $Q^1$ , состоящая из точек  $(x,y)$  области  $Q$  с положительными координатами  $x$ , и область  $Q^2$ , состоящая из точек  $(x,y)$  области  $Q$  с отрицательными координатами  $x$ . Каждая из областей  $Q^1$  и  $Q^2$ , разбивается на элементарные области  $Q^{1_{ij}}$  и  $Q^{2_{ij}}$ , размером не более 250 микрон с центрами в точках  $(x_i, y_j)$ ,  $i = 1 \dots N/2$ ,  $j = 1 \dots M$ . В каждой из областей  $Q^{1_{ij}}$  рассчитывается и изготавливается плоский оптический элемент с фазовой функцией  $\Phi(x,y)$ , которая в точке  $(x,y)$  элементарной области  $Q^{1_{ij}}$  вычисляется по формуле  $\Phi(x,y) = \phi_{ij}(x,y) \cdot \psi_1(y)$ ,  $i = 1 \dots N/2$ ,  $j = 1 \dots M$ . В каждой из областей  $Q^{2_{ij}}$  рассчитывается и изготавливается плоский оптический элемент с фазовой функцией  $\Phi(x,y)$ , которая в точке  $(x,y)$  элементарной области  $Q^{2_{ij}}$  вычисляется по формуле  $\Phi(x,y) = \phi_{ij}(x,y) \cdot \psi_2(y)$ ,  $i = 1 \dots N/2$ ,  $j = 1 \dots M$ . Здесь  $\phi_{ij}(x,y)$  представляет собой фазовую функцию осевой линзы Френеля с центром в точке  $(x_i, y_j)$ , вычисляемую по формуле  $\phi_{ij}(x,y) = C[(x-x_i)^2 + (y-y_j)^2]$ ,  $C$  – заданный параметр. Функция  $\psi_1(y)$ , определённая в области  $Q^1$ , является периодическим продолжением функции  $\bar{\psi}_1(y)$ , заданной на отрезке  $|y| \leq T_{\psi_1}/2$  так, что  $\bar{\psi}_1(y)$  равно 1, если  $|y| \leq \Delta_1/2$ , и равно 0, если  $|y| > \Delta_1/2$ . Функция  $\psi_2(y)$ , определённая в области  $Q^2$ , является периодическим продолжением функции  $\bar{\psi}_2(y)$ , заданной на отрезке  $|y| \leq T_{\psi_2}/2$  так, что  $\bar{\psi}_2(y)$  равно 1, если  $|y| \leq \Delta_2/2$ , и равно 0, если  $|y| > \Delta_2/2$ . Здесь  $T_{\psi_1}$ ,  $T_{\psi_2}$ ,  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  – заданные параметры, такие, что величины  $\Delta_1/T_{\psi_1} \leq 1/2$ ,  $\Delta_2/T_{\psi_2} \leq 1/2$ , причём период  $T_\phi$  линз Френеля по оси  $Oy$ , равный  $T_\phi = L_y/M$ , отличается от периодов  $T_{\psi_1}$  и  $T_{\psi_2}$  не более, чем на 5%, а величины  $(T_\phi - T_{\psi_1})$  и  $(T_\phi - T_{\psi_2})$  имеют разные знаки. При освещении нанооптического элемента точечным источником света при углах дифракции менее  $60^\circ$ , наблюдатель видит в областях  $Q^1$  и  $Q^2$  изображения, состоящие из чёрных и белых полос, которые не меняются при повороте

оптического элемента в диапазоне углов наклона влево-вправо  $15^\circ < \beta < 15^\circ$ . Кинематический эффект заключается в движении чёрных и белых полос при наклонах оптического элемента вверх-вниз в диапазоне углов  $30^\circ < \alpha < 30^\circ$ , причём направления движения полос в областях  $Q^1$  и  $Q^2$  взаимно противоположны.

Многоградационный нанооптический элемент в варианте 6 отличается от нанооптического элемента в варианте 5 тем, что область  $Q$  оптического элемента, в которой фазовая функция  $\Phi(x,y)$  равна нулю, заполняется дифракционными решётками разной ориентации с разными периодами, не превосходящими 0,6 микрона. При освещении нанооптического элемента точечным источником света при углах дифракции менее  $60^\circ$  наблюдатель видит в областях  $Q^1$  и  $Q^2$  изображения, состоящие из чёрных и белых полос, которые не меняются при повороте оптического элемента влево-вправо в диапазоне углов наклона  $15^\circ < \beta < 15^\circ$ . Кинематический эффект заключается в движении чёрных и белых полос при наклонах оптического элемента вверх-вниз в диапазоне углов  $30^\circ < \alpha < 30^\circ$ , причём направления движения полос в областях  $Q^1$  и  $Q^2$  взаимно противоположны. При углах дифракции более  $60^\circ$  наблюдатель видит другое цветное изображение.

Нанооптические элементы в вариантах 1-5, представляют собой плоские фазовые оптические элементы, состоящие из многоградационных дифракционных элементов – осевых линз Френеля и дифракционных решеток.

На рисунке 4.4 приведено сечение функций  $\varphi^+(x,y)$  и  $\varphi^-(x,y)$  при  $x = 0$ . Приведенные на рисунке 4.4 фазовые функции соответствуют многоградационным фазовым элементам [А32]. Этот вариант является предпочтительным для формирования нанооптических элементов.

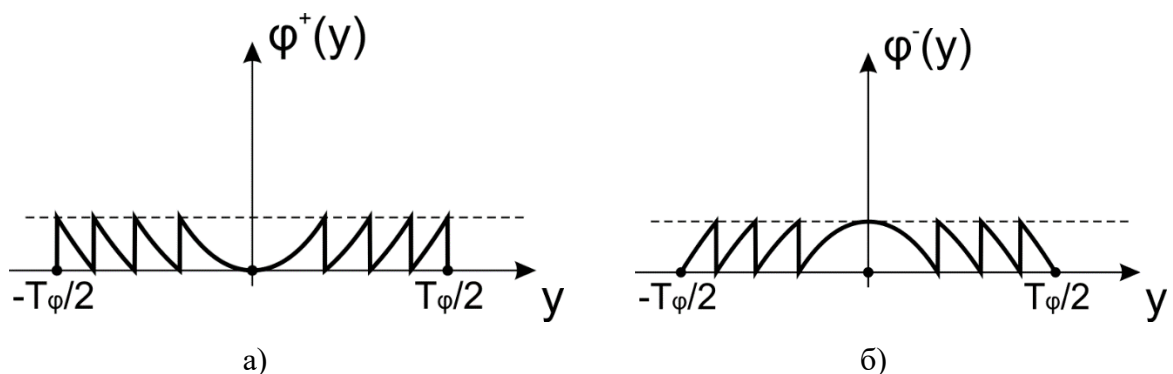


Рисунок 4.4. Сечение функций  $\varphi^+(x,y)$  и  $\varphi^-(x,y)$  при  $x = 0$ .

На рисунке 4.5 представлен вариант бинарного фазового элемента. В отличие от многоградационного плоского оптического элемента, фазовая функция бинарного оптического элемента принимает всего два значения.



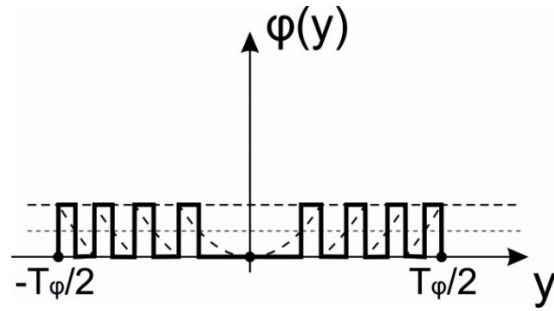


Рисунок 4.5. Бинарный фазовый элемент.

Для формирования визуального изображения при углах дифракции менее  $60^\circ$  вводится бинарная функция  $\psi(y)$ , которая является периодическим продолжением функции  $\bar{\psi}(y)$ , изображенной на рисунке 4.6. Функция  $\bar{\psi}(y)$  задана на сегменте  $[-T_\psi/2, T_\psi/2]$ . Функция  $\bar{\psi}(y) = 1$  на сегменте  $[-\Delta/2, \Delta/2]$ . Вне этого сегмента функция  $\bar{\psi}(y)$  равняется 0. Параметры  $\Delta$  и  $T_\psi$  являются заданными. Другим важным параметром является период  $T_\varphi$  расположения осевых линз Френеля по оси  $Oy$ . Параметр  $T_\varphi$  вычисляется как  $T_\varphi = L_y/M$ .

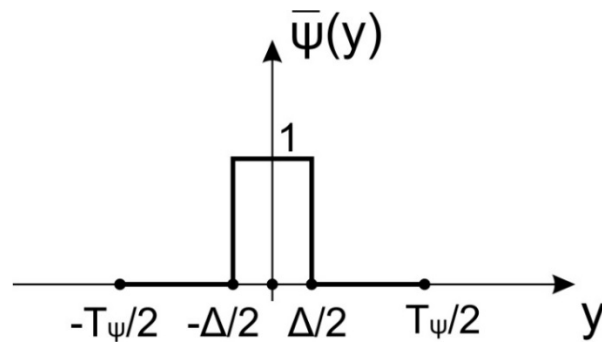


Рисунок 4.6. Функция  $\bar{\psi}(y)$ .

На рисунке 4.7 приведен график функции  $\psi(y)$ . Функция  $\psi(y)$  является периодической с периодом  $T_\psi$ . Периоды  $T_\varphi$  и  $T_\psi$ , для нанооптических элементов в вариантах 1,2,3,4 должны удовлетворять следующим соотношениям:

1. Периоды  $T_\varphi$  и  $T_\psi$  должны отличаться друг от друга.
2. Различие между значениями  $T_\varphi$  и  $T_\psi$  не должно превышать 5%.

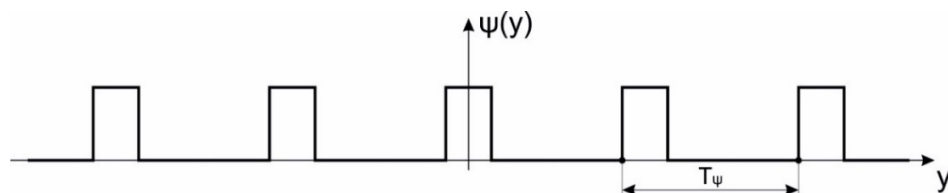


Рисунок 4.7. График функции  $\psi(y)$ .

Эти условия являются принципиальными для реализации заявленных нанооптических элементов, представленных в вариантах 1-6. Например, если период  $T_\phi$  совпадает с  $T_\psi$ , то при углах дифракции  $\theta < 60^\circ$  сформировать изображение, состоящее из чёрных и белых полос, не представляется возможным. При большом различии параметров  $T_\phi$  и  $T_\psi$  кинематический эффект движения полос будет незначительным.

Многоградационные нанооптические элементы в вариантах 1 и 2 имеют фазовую функцию  $\Phi(x,y)$ , которая в точке  $(x,y)$  каждой элементарной области  $Q_{ij}$  вычисляется по формуле  $\Phi(x,y) = \varphi_{ij}(x,y) \cdot \psi(y)$ ,  $i = 1 \dots N$ ,  $j = 1 \dots M$ . Фазовая функция  $\Phi(x,y)$  однозначно определяет микрорельеф плоского оптического элемента в области  $Q$ . Зная фазовую функцию, можно рассчитать глубину микрорельефа в каждой точке  $(x, y)$  области  $Q$ . Для отражающего плоского дифракционного оптического элемента при нормальном падении света на оптический элемент глубина микрорельефа вычисляется как  $h(x,y) = 0,5 \varphi(x,y)$ . [110].

На рисунке 4.8 представлена схема расположения нанооптического элемента 1 относительно плоскости  $Oxy$ . Нанооптический элемент освещается точечным источником 2, расположенным в плоскости  $Oyz$ . Оптический элемент может поворачиваться вокруг оси  $Ox$  на угол  $\alpha$ . Угол поворота оптического элемента вокруг оси  $Oy$  обозначим как  $\beta$ . Глаз наблюдателя находится в плоскости  $Oyz$ . Наклоны оптического элемента вверх-вниз осуществляются вокруг оси  $Ox$ , наклоны оптического элемента влево-вправо осуществляются вокруг оси  $Oy$ .

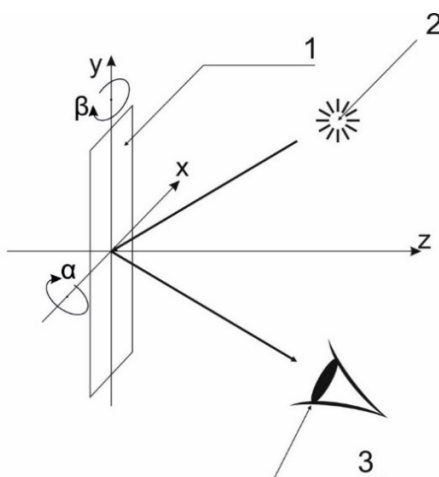


Рисунок 4.8. Схема расположения нанооптического элемента относительно плоскости  $Oxy$ .

На рисунке 4.9 приведена схема наблюдения нанооптического элемента 1 в диапазоне углов дифракции менее  $60^\circ$ . Угол дифракции  $\theta$  измеряется как угол между нулевым порядком дифракции, обозначенным на рисунке 4.9 как луч  $R2$ , и направлением на глаз наблюдателя 3. Направление луча  $R2$  совпадает с направлением отраженного от оптического элемента луча от источника света 2 (луч  $R1$ ), если фазовая функция оптического элемента равна константе, то есть

если оптический элемент представляет собой зеркало. Изменяя наклон оптического элемента относительно оси  $Oy$  (угол  $\alpha$ ), мы тем самым изменяем угол дифракции  $\theta(\alpha) = 2\alpha$ . При наклонах оптического элемента на угол  $\alpha < 30^\circ$  угол дифракции не превышает  $60^\circ$ . При углах дифракции менее  $60^\circ$  наблюдатель на всей области оптического элемента  $Q$  видит изображение, сформированное нанооптическим элементом из вариантов 1 и 2, состоящее из горизонтальных чёрных и белых полос с кинематическим эффектом движения полос при наклоне оптического элемента вверх-вниз. На рисунке 4.10 приведены два изображения, видимые наблюдателю при разных углах  $\theta$  менее  $60^\circ$ . Изображение на рисунке 4.10(а) соответствует углу  $\theta_1 = 20^\circ$ , а на рисунке 4.10(б) – углу  $\theta_2 = 30^\circ$ .

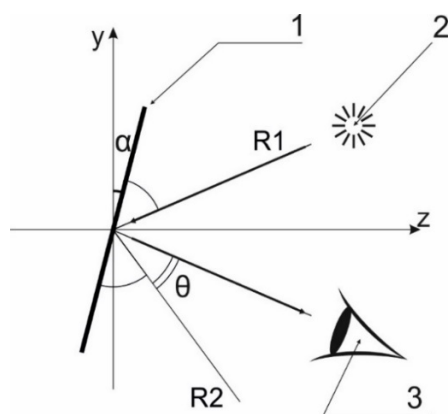


Рисунок 4.9. Схема наблюдения нанооптического элемента в диапазоне углов дифракции менее  $60^\circ$ .

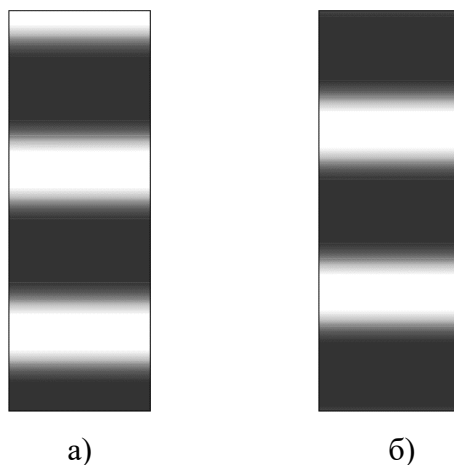


Рисунок 4.10. Изображения, видимые наблюдателю при разных углах  $\theta$  менее  $60^\circ$  (дизайн).

Изображение при углах дифракции менее  $60^\circ$  формируется с помощью фрагментов осевых линз Френеля с параболической фазовой функцией. Важным параметром, характеризующим плоские осевые линзы Френеля, является размер крайних зон Френеля. Предпочтителен размер крайних зон Френеля, не превышающий 1,2 микрона. Благодаря тому, что размер прямоугольных линз Френеля не превышает 250 микрон, а размер крайних зон

Френеля не превосходит 1,2 микрона, обеспечивается широкая диаграмма направленности отражённого от нанооптического элемента света по горизонтали. Линзы Френеля формируют изображение, состоящее из горизонтальных чёрных и белых полос, которое не меняется при наклоне оптического элемента вокруг оси  $Oy$  влево-вправо на углы  $\beta$  в пределах  $\pm 15^\circ$ . Кинематический эффект заключается в движении чёрно-белых полос при наклонах нанооптического элемента вверх-вниз в диапазоне углов  $\pm 30^\circ$ .

Фрагменты линз Френеля не видны человеческому глазу, поскольку их размер не превосходит 250 микрон. Принципиальным моментом является то, что для синтеза нанооптических элементов используются многоградационные линзы Френеля. Именно использование многоградационных оптических элементов обеспечивает то, что характер движения полос не меняется при переходе через нулевой порядок дифракции, что соответствует переходу от положительных углов наклона оптического элемента  $\alpha > 0$  к отрицательным  $\alpha < 0$ .

Многоградационный нанооптический элемент, представленный в варианте 2, отличается от нанооптического элемента в варианте 1 тем, что область  $Q$  оптического элемента, в которой фазовая функция  $\Phi(x,y)$  равна нулю, заполняется дифракционными решётками разной ориентации с разными периодами, не превосходящими 0,6 микрона. При освещении нанооптического элемента точечным источником света при углах дифракции менее  $60^\circ$  наблюдатель видит на всей области  $Q$  оптического элемента изображение, состоящее из черных и белых полос с таким же кинематическим эффектом движения, как в варианте 1. При углах дифракции более  $60^\circ$  наблюдатель видит другое цветное изображение.

Схема наблюдения нанооптического элемента при больших углах дифракции  $\theta > 60^\circ$  представлена на рисунке 4.11. Также, как на рисунке 9, угол дифракции  $\theta$  измеряется как угол между направлением на наблюдателя 3 и нулевым порядком дифракции  $R_2$ . Рисунок 4.9 и рисунок 4.11 отличаются только величиной угла  $\alpha$ . Большие наклоны оптического элемента соответствуют большим углам  $\alpha$  и, соответственно, большим углам дифракции  $\theta$ . Параметры микрорельефа нанооптического элемента выбраны так, что при углах дифракции более  $60^\circ$  изображение формируется дифракционными решетками. Размеры дифракционных решёток не превосходят 200 микрон, поэтому фрагменты решёток не видны наблюдателю. Вариант такого цветного изображения в условных цветах представлен на рисунке 4.12.

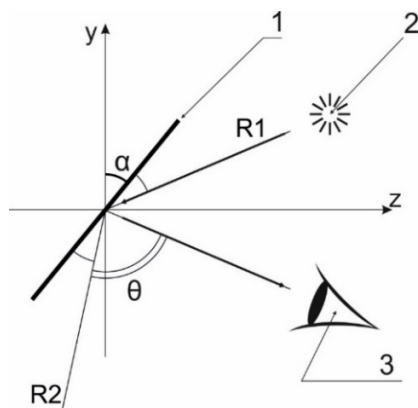


Рисунок 4.11. Схема наблюдения нанооптического элемента при больших углах дифракции  $\theta > 60^\circ$ .



Рисунок 4.12. Вариант дизайна цветного изображения, которое видит наблюдатель при углах дифракции  $\theta > 60^\circ$  (дизайн).

В вариантах 3–6 область Q разбивается на две области  $Q^1$  и  $Q^2$ , как это показано на рисунке 4.13. Границей областей  $Q^1$  и  $Q^2$  может быть, как прямая линия, как это показано на рисунке 4.13(а), так и волнистая линия, как это показано на рисунке 4.13(б).

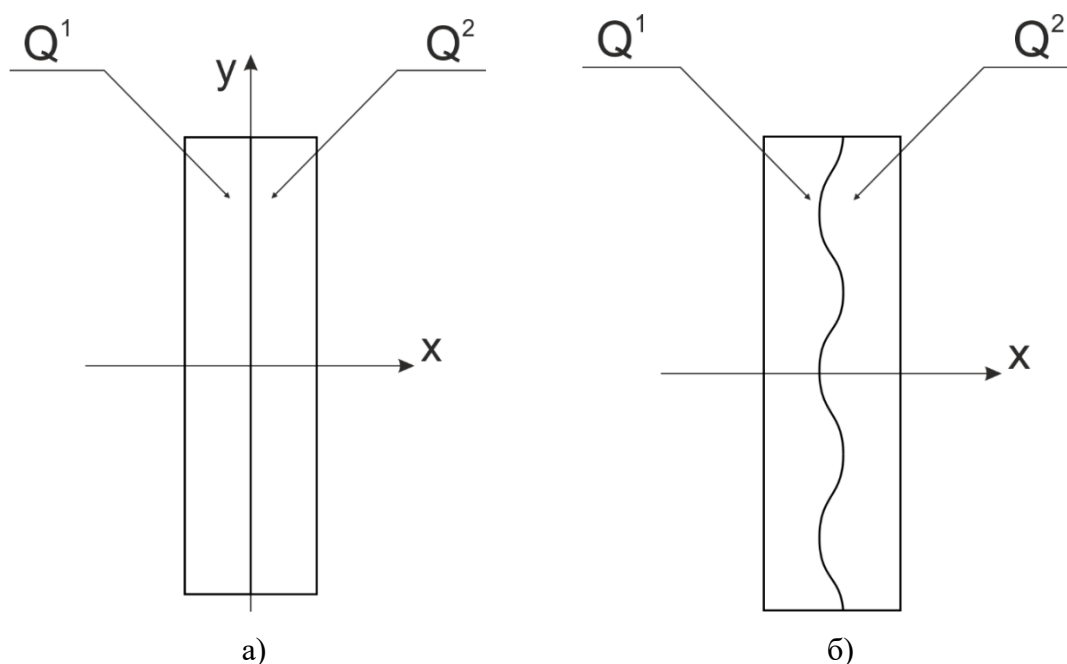


Рисунок 4.13. Схема разбиения области Q согласно вариантам 3-6.

Нанооптический элемент в варианте 3 имеет область оптического элемента, состоящую из областей  $Q^1$  и  $Q^2$ . Каждая из областей  $Q^1$  и  $Q^2$ , разбивается на элементарные области  $Q^{1_{ij}}$  и  $Q^{2_{ij}}$  размером не более 250 микрон с центрами в точках  $(x_i, y_j)$ ,  $i = 1 \dots N/2$ ,  $j = 1 \dots M$ .

В каждой области  $Q^{1_{ij}}$  рассчитывается и изготавливается плоский оптический элемент с фазовой функцией  $\Phi(x, y)$ , которая в точке  $(x, y)$  элементарной области  $Q^{1_{ij}}$  вычисляется по формуле  $\Phi(x, y) = \varphi^{+}_{ij}(x, y) \cdot \psi(y)$ ,  $i = 1 \dots N/2$ ,  $j = 1 \dots M$ , где  $\varphi^{+}_{ij}(x, y)$  представляет собой фазовую функцию вогнутой осевой линзы Френеля с центром в точке  $(x_i, y_j)$ , вычисляемую по формуле  $\varphi^{+}_{ij}(x, y) = C[(x-x_i)^2 + (y-y_j)^2]$ ,  $C$  – заданный положительный параметр. В каждой области  $Q^{2_{ij}}$  рассчитывается и изготавливается плоский оптический элемент, с фазовой функцией  $\Phi(x, y)$ , которая в точке  $(x, y)$  элементарной области  $Q^{2_{ij}}$  вычисляется по формуле  $\Phi(x, y) = \varphi^{-}_{ij}(x, y) \cdot \psi(y)$ ,  $i = 1 \dots N/2$ ,  $j = 1 \dots M$ , где  $\varphi^{-}_{ij}(x, y)$  представляет собой фазовую функцию выпуклой осевой линзы Френеля с центром в точке  $(x_i, y_j)$ , вычисляемую по формуле  $\varphi^{-}_{ij}(x, y) = C[(x-x_i)^2 + (y-y_j)^2]$ ,  $C$  – заданный отрицательный параметр. Таким образом, фазовые функции  $\varphi^{+}_{ij}(x, y)$  в области  $Q^1$  и  $\varphi^{-}_{ij}(x, y)$  в области  $Q^2$  отличаются знаком. Функции  $\psi(y)$  в областях  $Q^1$  и  $Q^2$  совпадают. Функция  $\psi(y)$ , определённая во всей области  $Q$ , является периодическим продолжением функции  $\bar{\psi}(y)$ , заданной на отрезке  $|y| \leq T_\psi/2$ . Функция  $\bar{\psi}(y)$  равна 1, если  $|y| \leq \Delta/2$ , и равна 0, если  $|y| > \Delta/2$ . Величины  $T_\psi$  и  $\Delta$  – заданные параметры, такие, что величина  $\Delta/T_\psi \leq 1/2$ , причём период  $T_\psi$  линз Френеля по оси  $Oy$ , равный  $T_\psi = L_y/M$ , отличается от периода  $T_\psi$  не более, чем на 5%.

При освещении нанооптического элемента точечным источником света при углах дифракции менее  $60^\circ$  наблюдатель видит в областях  $Q^1$  и  $Q^2$  изображения, состоящие из черных и белых полос, которые не меняются при повороте оптического элемента влево-вправо в диапазоне углов наклона  $15^\circ < \beta < 15^\circ$ . Кинематический эффект заключается в движении чёрных и белых полос при наклонах оптического элемента вверх-вниз в диапазоне углов  $30^\circ < \alpha < 30^\circ$ , причём направления движения полос в областях  $Q^1$  и  $Q^2$  взаимно противоположны. На рисунке 4.14 приведены изображения, видимые наблюдателю при разных углах наклона для нитей дизайн которых задан рисунком 4.13 при углах наклона меньше 60 градусов. При углах наклона больше 60 градусов наблюдатель видит другое изображение.

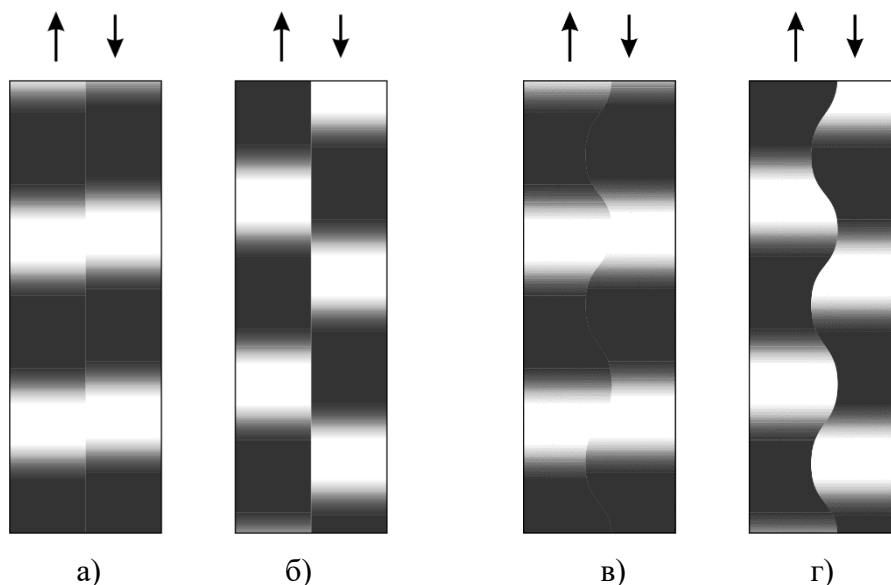


Рисунок 4.14. Изображение нитей для разных углов наклона оптического элемента: а) и б) соответствуют разбиению на рисунке 4.13 (а); в) и г) соответствуют разбиению на рисунке 4.13 (б).

Многоградационный нанооптический элемент в варианте 4 отличается тем, что область Q оптического элемента, в которой фазовая функция  $\Phi(x,y)$  равна нулю, заполняется дифракционными решётками разной ориентации с разными периодами, не превосходящими 0,6 микрона. На рисунке 4.15 представлен фрагмент микроструктуры нанооптического элемента согласно варианту 4. Представленный фрагмент состоит из фрагментов областей  $Q^1$  и  $Q^2$ , которые расположены слева и справа относительно оси  $x = 0$ . Размер представленного фрагмента равен 400 микрон по Oх и 608,4 микрона по Oу. Глубина микрорельефа в точке (x,y) пропорциональна потемнению в этой точке. Изображение на рисунке 4.15 не претендует на реальное изображение микрорельефа, а представляет собой только схему его формирования. В реальности период дифракционных решеток составляет менее 0,6 микрона. Линзы Френеля имеют не по несколько зон, как это показано на рисунке 4.15. Количество зон Френеля в реальном нанооптическом элементе составляет порядка 50, причем размер крайних зон составляет порядка 1,2 микрона. Для формирования такого микрорельефа используется электронно-лучевая технология.

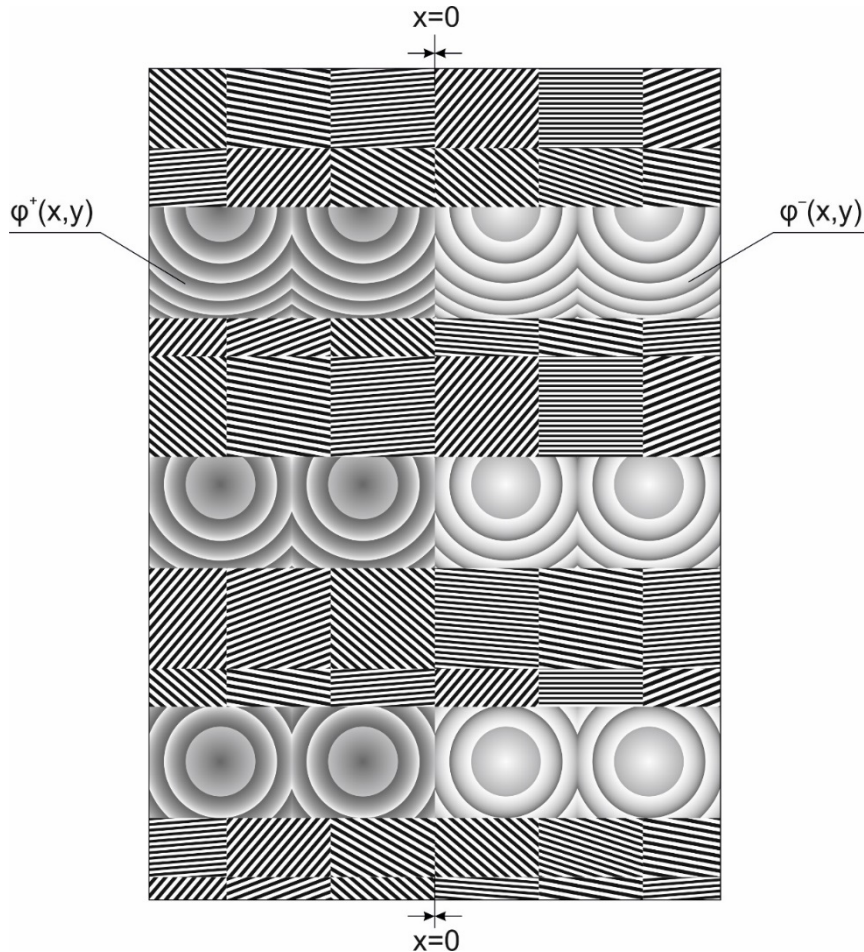


Рисунок 4.15. Микроструктура нанооптического элемента согласно варианту 4.

При освещении нанооптического элемента точечным источником света при углах дифракции менее  $60^\circ$ , наблюдатель видит в областях  $Q^1$  и  $Q^2$  изображения, представленные на рисунке 4.14, состоящие из чёрных и белых полос, которые не меняются при повороте оптического элемента в диапазоне углов наклона влево-вправо  $15^\circ < \beta < 15^\circ$ . Кинематический эффект заключается в движении чёрных и белых полос при наклонах оптического элемента вверх-вниз в диапазоне углов  $30^\circ < \alpha < 30^\circ$ , причём направления движения полос в областях  $Q^1$  и  $Q^2$  взаимно противоположны. При углах дифракции более  $60^\circ$  наблюдатель видит другое цветное изображение (рисунок 4.12).

Многоградационный нанооптический элемент, представленный в варианте 5, имеет область  $Q$  оптического элемента, разбитую на области  $Q^1$  и  $Q^2$ . Каждая из областей  $Q^1$  и  $Q^2$  разбивается на элементарные области  $Q^1_{ij}$  и  $Q^2_{ij}$ . В каждой из областей  $Q^1_{ij}$  рассчитывается и изготавливается плоский оптический элемент с фазовой функцией  $\Phi(x,y)$ , которая в точке  $(x,y)$  элементарной области  $Q^1_{ij}$  вычисляется по формуле  $\Phi(x,y) = \varphi_{ij}(x,y) \cdot \psi_1(y)$ ,  $i = 1 \dots N/2$ ,  $j = 1 \dots M$ . В каждой из областей  $Q^2_{ij}$  рассчитывается и изготавливается плоский оптический элемент с фазовой функцией  $\Phi(x,y)$ , которая в точке  $(x,y)$  элементарной области  $Q^2_{ij}$  вычисляется по формуле  $\Phi(x,y) = \varphi_{ij}(x,y) \cdot \psi_2(y)$ ,  $i = 1 \dots N/2$ ,  $j = 1 \dots M$ .



Фазовые функции  $\varphi_{ij}(x,y)$  в областях  $Q^1$  и  $Q^2$  совпадают. Для определенности будем считать, что фазовые функции  $\varphi_{ij}(x,y)$  во всей области оптического элемента равны  $\varphi^+_{ij}(x,y) = C[(x-x_i)^2 + (y-y_j)^2]$ , где  $C$  – заданный положительный параметр. Функции  $\psi_1(y)$  и  $\psi_2(y)$  в областях  $Q^1$  и  $Q^2$  – различны. Функции  $\psi_1(y)$  и  $\psi_2(y)$  выбираются следующим образом. Функция  $\psi_1(y)$ , определённая в области  $Q^1$ , является периодическим продолжением функции  $\bar{\psi}_1(y)$ , заданной на отрезке  $|y| \leq T_{\psi_1}/2$  так, что  $\bar{\psi}_1(y)$  равно 1, если  $|y| \leq \Delta_1/2$ , и равно 0, если  $|y| > \Delta_1/2$ . Функция  $\psi_2(y)$ , определённая в области  $Q^2$ , является периодическим продолжением функции  $\bar{\psi}_2(y)$ , заданной на отрезке  $|y| \leq T_{\psi_2}/2$  так, что  $\bar{\psi}_2(y)$  равно 1, если  $|y| \leq \Delta_2/2$ , и равно 0, если  $|y| > \Delta_2/2$ . Параметры  $T_{\psi_1}$ ,  $T_{\psi_2}$ ,  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  – заданные параметры, такие, что величина  $\Delta_1/T_{\psi_1} \leq 1/2$ ,  $\Delta_2/T_{\psi_2} \leq 1/2$ . Период  $T_\varphi$  линз Френеля по оси  $Oy$ , равный  $T_\varphi = L_y/M$ , отличается от периодов  $T_{\psi_1}$  и  $T_{\psi_2}$  не более, чем на 5%, при этом величины  $(T_\varphi - T_{\psi_1})$  и  $(T_\varphi - T_{\psi_2})$  имеют разные знаки. Графики функций  $\psi_1(y)$  и  $\psi_2(y)$  представлены на рисунке 4.16.

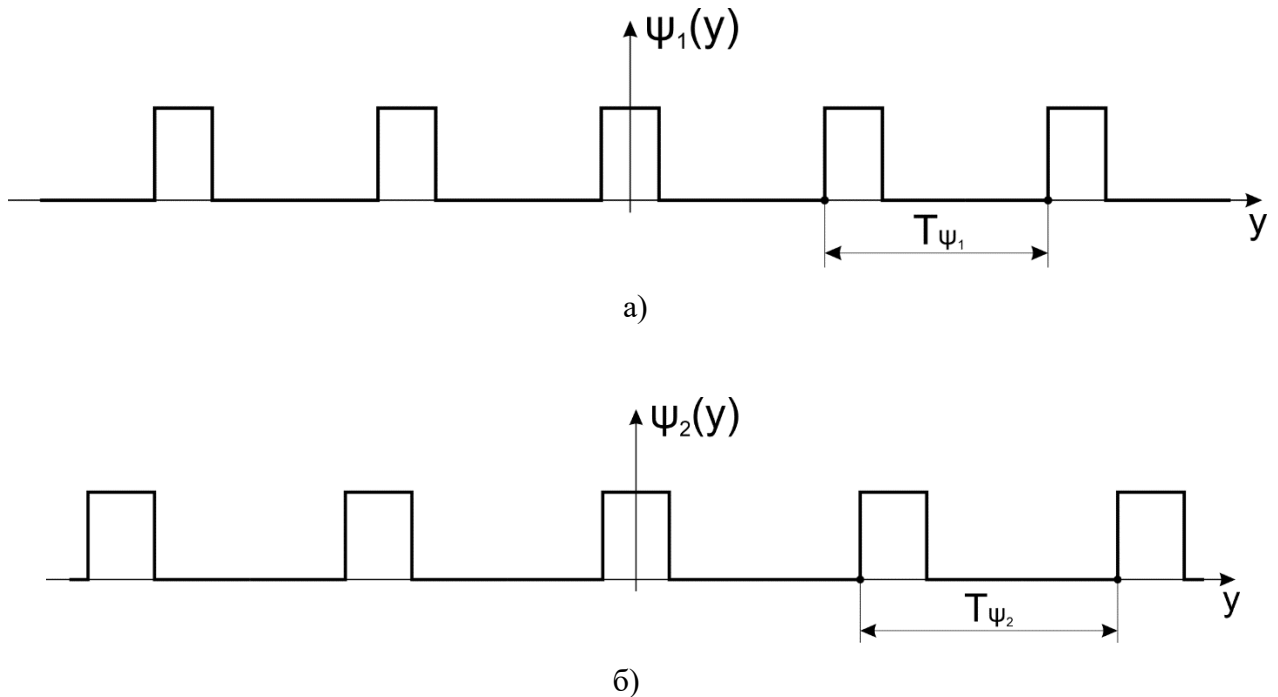


Рисунок 4.16. Графики функций  $\psi_1(y)$  и  $\psi_2(y)$ .

На рисунке 4.17 представлен фрагмент микроструктуры нанооптического элемента, описанного в варианте б. Представленный фрагмент состоит из фрагментов областей  $Q^1$  и  $Q^2$ , которые расположены слева и справа относительно оси  $x = 0$ . Как видно из рисунка 4.17 фазовые функции  $\varphi_{ij}(x,y)$  в областях  $Q^1$  и  $Q^2$  совпадают, а функции  $\psi_1(y)$  и  $\psi_2(y)$  являются различными. Глубина микрорельефа в точке  $(x,y)$  пропорциональна потемнению в этой точке.

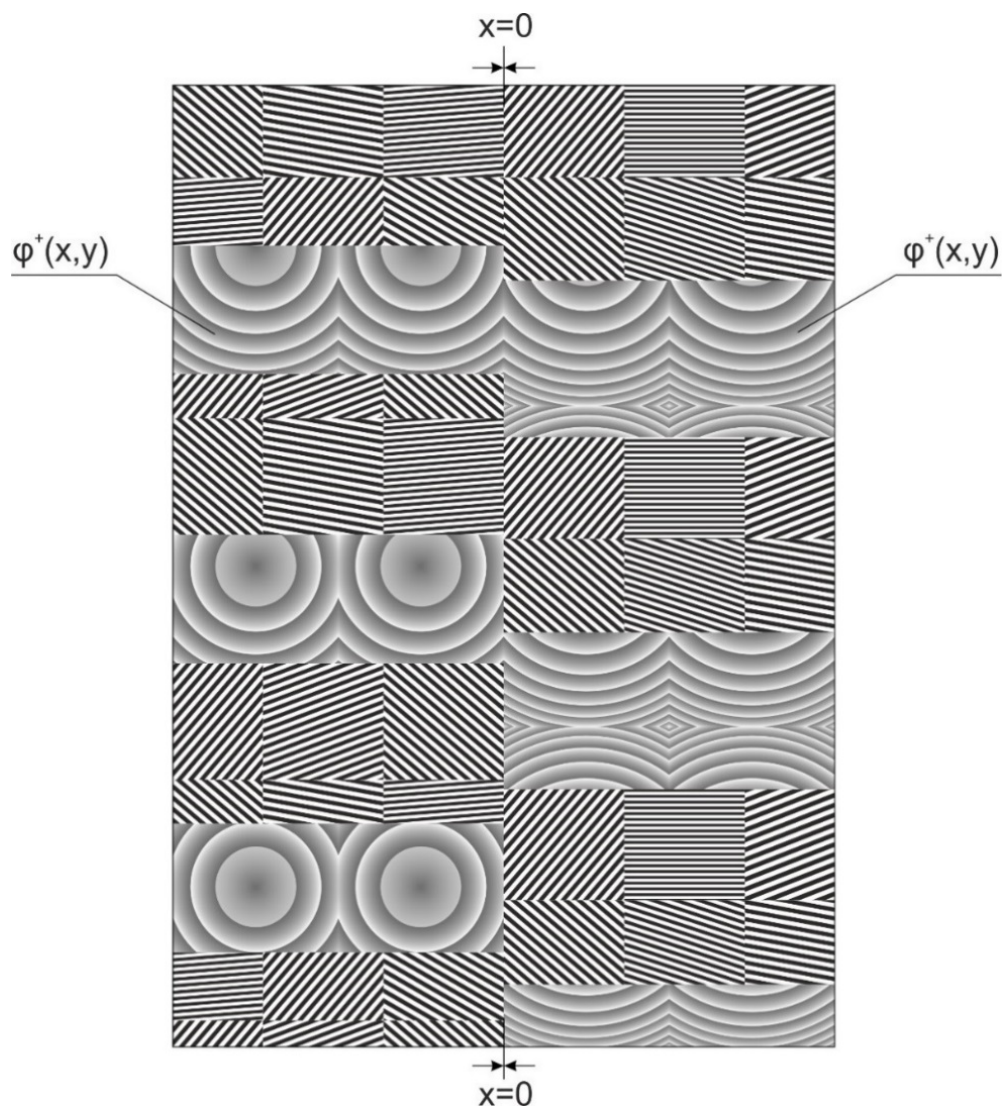


Рисунок 4.17. Микроструктура нанооптического элемента, описанного в варианте 6.

При освещении нанооптического элемента точечным источником света при углах дифракции менее  $60^\circ$  наблюдатель видит в областях  $Q^1$  и  $Q^2$  изображения, представленные на рисунке 4.14, состоящие из чёрных и белых полос, которые не меняются при повороте оптического элемента влево-вправо в диапазоне углов наклона  $15^\circ < \beta < 15^\circ$ . Кинематический эффект заключается в движении чёрных и белых полос при наклонах оптического элемента вверх-вниз в диапазоне углов  $30^\circ < \alpha < 30^\circ$ , причём направления движения полос в областях  $Q^1$  и  $Q^2$  взаимно противоположны. При углах дифракции более  $60^\circ$  наблюдатель видит другое цветное изображение (рисунок 4.12).

В предпочтительном варианте реализации нанооптических элементов формирования визуальных изображений с кинематическими эффектами движения можно использовать варианты 3-4, либо варианты 5-6.

Центральным моментом технологии является запись оригинала нанооптического элемента. Многоградационный нанооптические элементы, предложенные в диссертации,

изготавливаются с помощью электронно-лучевой технологии. Электронно-лучевая литография имеет очень высокое разрешение (не хуже 0,1 микрона) и обеспечивает необходимую точность изготовления микрорельефа порядка 20 нанометров. В настоящее время в области изготовления защитных голограмм работают сотни фирм. Практически все они используют для записи оригиналов защитных элементов оптические технологии [2]. Изготовить оригинал заявленного нанооптического элемента с помощью описанных технологий невозможно. Электронно-лучевая технология не является распространенной и очень наукоемка, что надежно защищает заявленные в полезной модели нанооптические элементы от подделок.

#### **4.2. Пример реализации нанооптического элемента для формирования 2D-изображений с кинетическими эффектами движения фрагментов по одной из координат**

Для демонстрации эффективности предложенных технологий был изготовлен нанооптический элемент в соответствии с дизайном 4.13(б), формирующий 2D изображение с кинетическими эффектами движения фрагментов по одной из координат. Изготовленный нанооптический элемент представляет собой отражающую голографическую нить для защиты банкнот и ценных бумаг шириной 5 мм. Для формирования микрорельефа использовались выпуклые и вогнутые прямоугольные линзы Френеля с параболической фазовой функцией. Размер прямоугольников  $Q_{ij}$  – 100×200 микрон. Минимальный размер крайней зоны линз Френеля составляет порядка 1.2 микрона. Количество зон Френеля составляет порядка 50. Размер центральной зоны порядка 10 микрон. Схема наблюдения нанооптического элемента при углах дифракции  $\theta < 60^\circ$  приведена на рисунке 4.9, схема наблюдения при углах дифракции  $\theta > 60^\circ$  приведена на рисунке 4.11. Для формирования изображения при больших углах дифракции использовались дифракционные решетки с периодами менее 0.6 микрона. Размер фрагментов дифракционных решеток равен 20 микрон. С помощью электронно-лучевой литографии были синтезированы оригиналы нанооптического элемента.

Монохроматическое изображение, видимое при углах дифракции менее  $60^\circ$ , представлено на фото 4.18 (а,б). Монохроматическое изображение состоит из черных и белых полос,двигающихся при наклоне голографической нити вверх-вниз. Цветное изображение, видимое при больших углах дифракции, более  $60^\circ$ , приведено на фото 4.18 (в).

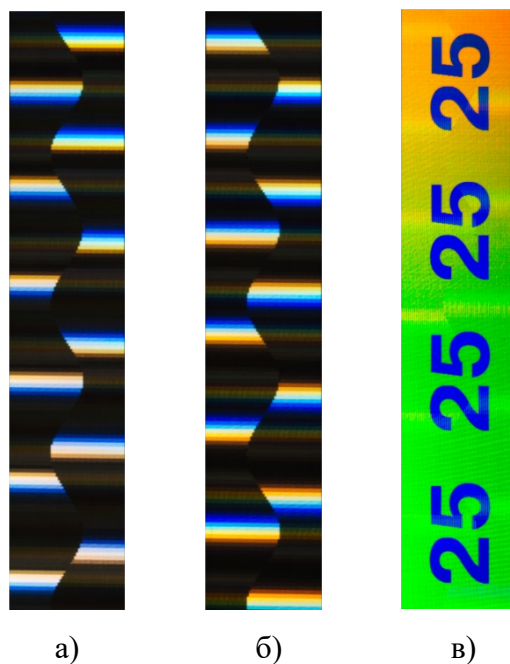


Рисунок 4.18. Фотография нанооптического элемента: а) и б) при разных углах дифракции менее 60 градусов, в) при углах дифракции более 60 градусов.

Изготовленный нанооптический элемент продемонстрировал, что защитный признак, заключающийся в разнонаправленном движении черных и белых полос при углах дифракции менее 60 градусов, легко контролируется визуально. При углах дифракции больше 60 градусов наблюдатель видит на всей области нити другое изображение.

### 4.3. Выводы

1. В главе 4 разработан новый нанооптический защитный элемент, формирующий 2D изображения с кинетическими эффектами движения фрагментов по одной из координат. Если разделить элемент на две области  $Q^1$  и  $Q^2$ , то движение ярких полос в этих областях можно сделать разнонаправленным. Такой признак очень легко контролируется. При углах дифракции более 60 градусов, наблюдатель видит другое цветное изображение.

2. Впервые с помощью электронно-лучевой технологии изготовлен многоградационный нанооптический элемент, формирующий этот признак. Микрорельеф изготовленного нанооптического элемента является асимметричным. Точность формирования микрорельефа – 10 нм. Новые нанооптические элементы надежно защищены от подделок.

3. Создать визуальный эффект кинетического движения фрагментов изображений по одной координате можно и другим образом, например так как это делает фирма Sicra – один из основных поставщиков защитных красок в мире [111]. OVI (Optically variable ink) краски фирмы Sicra состоят из многослойных микрочешуек некоторых материалов, которые ориентируются

магнитным полем в процессе печати. С помощью OVI красок Sicra можно создать визуальный кинетический эффект движения по одной из координат [112,113,114,115]. По сути дела, микрочешуйки представляют собой систему микрзеркал ориентированным специальным образом с помощью магнитного поля. Этот визуальный признак получил название SicraSpark. Отличие визуального признака SicraSpark от визуального признака разработанного в Главе 4 диссертации состоит в том, что нанооптические элементы, синтезированные с помощью электронно-лучевой литографии, позволяют формировать как кинетический движения по одной из координат при наклоне оптического элемента в углах менее 60 градусов, так и эффект смены изображений на цветное 2D изображение в углах дифракции более 60 градусов.

4. Разработанный в диссертации метод синтеза нанооптических элементов, формирующих кинетический эффект движения по одной из координат, защищенный патентом [A25], открывает широкие возможности в проектировании новых защитных признаков для визуального контроля.

5. Разработанные в диссертации нанооптические элементы могут быть тиражированы, что определяет их низкую цену при массовом изготовлении. Новые нанооптические элементы предназначены для защиты банкнот, паспортов, ценных бумаг, ID, пластиковых карт, акцизных марок и брендов.

## **Глава 5. Разработка методов синтеза нанооптических элементов для формирования 3D-изображений с полным параллаксом**

*В данной главе используются материалы, опубликованные в статье [A11], патенте [A26].*

### **5.1. Обратные задачи синтеза нанооптических элементов для формирования 3D-изображений**

В Главах 5-7 диссертации разрабатываются методы синтеза нанооптических элементов для формирования 3D изображений. Для изготовления нанооптических элементов используется электронно-лучевая технология позволяющая синтезировать микрорельеф с высокой точностью вплоть до 10 нанометров по высоте микрорельефа. Важнейшей задачей является разработка методов расчета фазовых функций нанооптических элементов для формирования 3D изображений. Эта задача успешно решается как для бинарных нанооптических элементов, формирующих изображение в первом порядке дифракции, так и для многоградационных оптических элементов, формирующих изображение в нулевом порядке дифракции. Основным применением разработанных методов синтеза является защита от подделки банкнот ID, пластиковых карт, брендов. Алгоритмы расчета фазовых функций нанооптических элементов для формирования различных 3D изображений в нулевом и первом порядках дифракции могут быть использованы в проектируемых в настоящее время дисплеях и проекторах.

Существуют три основные технологии 3D проекторов. В проекторах первого типа используется механическое мультиплексирование, в проекторах второго типа используются дифракционные голографические элементы, в проекторах третьего типа используется пространственное мультиплексирование 2D изображений [116].

Механические системы [117] содержат быстро вращающийся экран или зеркало, на которые за один оборот последовательно проецируются изображения предмета в разных ракурсах. Частота кадров проектора должна быть очень высокой, порядка 2000 кадров в секунду. Такая система позволяет наблюдать 3D изображение с любой точки в одной горизонтальной плоскости. Размер изображения в механических системах ограничен размером экрана или зеркала. В цилиндрическом 3D проекторе использована вертикальная вращающаяся светоизлучающая линейка, наблюдаемая сквозь цилиндр с барьерами. Под каждым из углов зрения видна вертикальная полоса, формируемая линейкой в каждый момент времени. В системе DepthCube [118] используется 20 неподвижных прозрачных LCD экранов, расположенных параллельно и формирующих 3D изображение, состоящее из 20 плоских слоёв.

Системы с дифракционными голографическими элементами воспроизводят дифракционную картину трёхмерного объекта с помощью модуляторов света. Формируемое такими системами изображение является полностью трёхмерным, однако как правило имеет небольшой размер и угол обзора. Реализация дифракционных систем с большим размером изображения и большим углом обзора очень сложна, поскольку для каждого кадра требуется огромное количество информации и огромное количество модулирующих элементов. В работе [119] описана система с фазовым модулятором и специальным дифракционным экраном, расширяющим угол обзора. Современные фазовые модуляторы имеют несколько миллионов элементов. Эти технологии [120] позволяют удешевить фазовые модуляторы света и увеличить количество и плотность элементов в них для формирования 3D голографических изображений в реальном времени. В работе [56] в качестве модулятора используется специальный перезаписываемый фоторефракционный полимер, на который в реальном времени лазером записывается 3D голограмма. На запись голограммы требуется около 2 секунд. Система может быть использована для голографической видеосвязи, где на передающей стороне располагается набор видеокамер для съёмки 3D изображений.

Для формирования 3D изображений могут быть использованы системы с пространственным мультиплексированием, которые могут быть созданы на базе обычного проекционного оборудования. Такие системы имеют несколько излучателей света, каждый из которых формирует 2D изображение, видимое наблюдателю с определённого направления. Недостатком таких систем является фиксированное и обычно небольшое количество ракурсов. Простейшие 3D мониторы формируют два изображения для правого и левого глаза под разными углами. В них стереоизображение можно наблюдать только с одной точки [121]. В многоракурсных 3D мониторах изображение можно наблюдать с любой точки. Такие мониторы называют автостереоскопическими [122]. Для распределения изображений каждого ракурса по направлениям используются микролинзы [123], или дифракционные решётки [124]. Количество ракурсов обычно составляет несколько десятков. Для больших сцен используется набор проекторов и светорассеивающий экран с микролинзами, на котором изображение наблюдается на просвет [125]. С каждого направления на экране видно изображение с проектора, расположенного напротив наблюдателя. Размер такого экрана может составлять несколько метров, а количество проекторов — до 200. Система такого типа может использоваться для трёхмерной видеосвязи, для этого на передающей стороне располагается набор камер таким же образом, как проекторы на приёмной стороне. Разработанные в диссертации методы расчета

фазовых функций могут быть использованы, например, в системах с фазовым модулятором и специальным дифракционным экраном.

В Главе 5 диссертации разрабатываются методы синтеза бинарных и нанооптических элементов для формирования 3D изображений с полным параллаксом. Этот эффект так же возможно формировать с помощью аналоговой записи фотополимерных голограмм [126]. Фотополимерные голограммы не являются рельефными. За счет того, что запись информации происходит в трехмерной среде полимера, формируемое 3D изображение является качественным и обладает полным параллаксом. [53,127]. К недостаткам этой технологии можно отнести большую толщину фотополимера (десятки микрон), что ограничивает возможность использование фотополимерных голограмм как защитных элементов на банкнотах, паспортах, ID и пластиковых картах. Второй недостаток связан с тем, что каждую фотополимерную голограмму нужно записывать аналоговым образом индивидуально, что существенно повышает цену тиражирования таких голограмм.

Существуют попытки синтеза рельефных плоских оптических элементов для формирования 3D изображений с полным параллаксом. Возможности записи микрорельефа нанооптических элементов с помощью оптических технологий, таких например, как «Dot-matrix» [59], весьма ограничены из-за невысокого разрешения. Существуют разработки, в которых оптические технологии используются для синтеза нанооптических элементов, формирующих 3D-изображения с полным параллаксом. В работах [128,129] для синтеза плоских оптических элементов, формирующих 3D изображения с полным параллаксом, использована лазерная литография с разрешением 0.6 мкм. По мнению авторов этой статьи использование оптических методов записи микрорельефа с помощью лазерной литографии, которая обладает низким разрешением, существенно ограничивает возможности формирования 3D изображений с полным параллаксом.

Одной из основных проблем в синтезе нанооптических элементов для формирования 3D изображений с полным параллаксом является разработка методов расчета фазовых функций плоского оптического элемента. В работе [A11] предложены методы расчета фазовой функции как для бинарных нанооптических элементов, формирующих изображение в первом порядке дифракции, так и для многоградационных элементов, формирующих изображение в первом порядке дифракции.



## 5.2. Постановка обратной задачи и методы расчёта микрорельефа бинарных нанооптических элементов для формирования 3D изображений с полным параллаксом

Для формирования компьютерно-синтезированных 3D изображений с полным параллаксом будем использовать набор 2D-кадров 3D-объекта, снятых с разных ракурсов. Каждый кадр представляет собой изображение в градациях серого. Рассматриваемый пример оптического элемента использует 55 ракурсов по горизонтали и 15 по вертикали, всего  $N=825$  кадров. Обозначим кадры через  $K_n$ , где  $n=1..N$ . Схема формирования изображения приведена на рисунке 5.1.

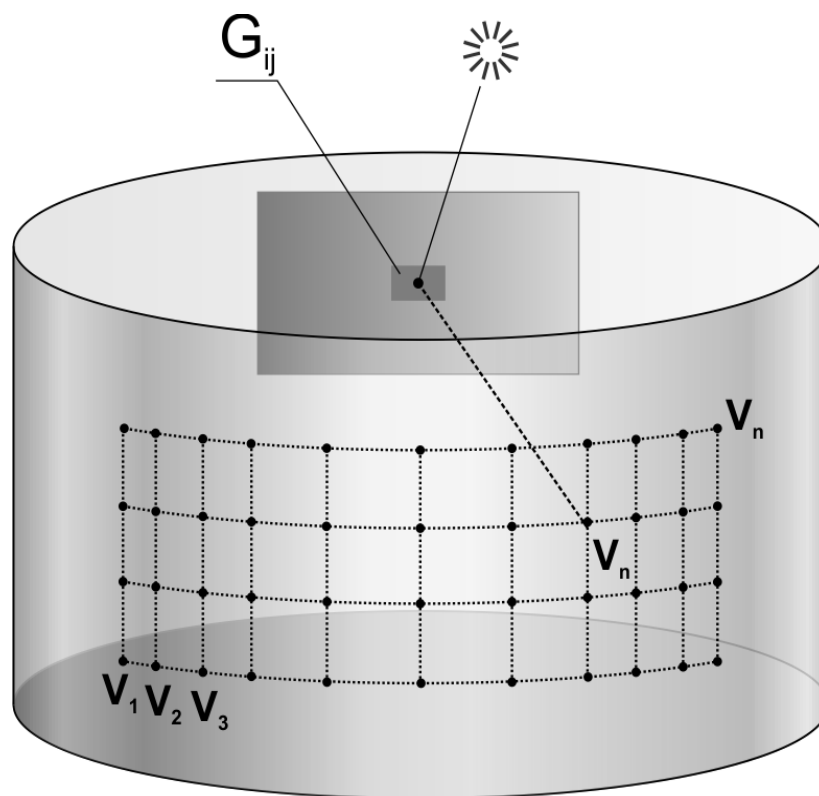


Рисунок 5.1. Схема формирования 3D изображений с полным параллаксом.

Введем декартову систему координат  $Oxuz$  с центром в точке  $O$ . Угол между плоскостью оптического элемента и оси  $Oz$  равен  $\alpha$ . Оптический элемент  $Q$  освещается источником белого света  $S$ , расположенным на оси  $Oz$ .

В результате дифракции на микрорельефе нанооптического элемента свет рассеивается так, что с разных ракурсов наблюдатель видит разные кадры  $K_n$ . На рисунке 1 точками  $V_n, n=1..N$  обозначены точки наблюдения, из которых наблюдатель видит на поверхности нанооптического элемента соответствующий кадр  $K_n$ . Обозначим углы наблюдения  $n$ -го кадра как  $(\theta_n, \varphi_n)$ . По сути

$(\theta_n, \varphi_n)$  являются полярным и азимутальным углами вектора  $OV_n$  в сферической системе координат. Угол  $\theta_n$  представляет собой угол между осью  $Oz$  и лучом  $OV_n$ . Угол  $\varphi_n$  представляет собой азимутальный угол между осью  $Ox$  и проекцией вектора  $OV_n$  на плоскость  $Oxy$ .

На рисунке 5.2 приведена оптическая схема наблюдения наноптического элемента. Свет от источника падает на оптический элемент под углом  $\alpha$ . Формируемое дифракционным оптическим элементом изображение наблюдается в первом порядке дифракции в направлении  $V_n, n=1 \dots N$ . Нулевой порядок обозначен как  $L_0$ .

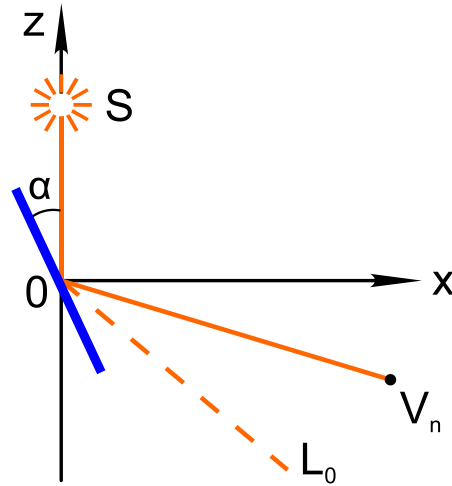


Рисунок 5.2. Схема наблюдения 3D-изображений с полным параллаксом.

Компьютерно-синтезированный наноптический элемент представляет собой фазовый оптический элемент, работающий на отражение. Разобьём область оптического элемента на элементарные области  $G_{ij}, i=1 \dots I, j=1 \dots J$  размером  $50 \times 50$  мкм, как показано на рисунке 5.3. Такое разбиение находится вне разрешения человеческого глаза и невидимо для наблюдателя. Каждая элементарная область видна наблюдателю как точка, имеющая определённую яркость в градациях серого в диапазоне от 0 до 1, в соответствии с потемнением кадра в этой точке.

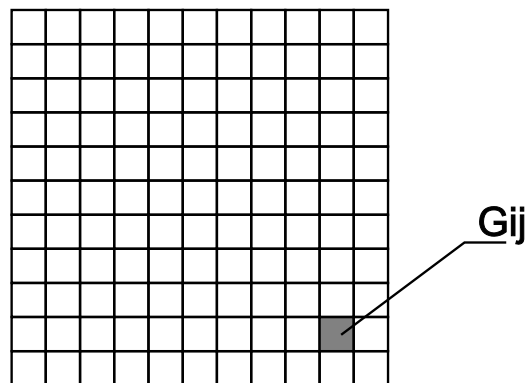


Рисунок 5.3. Разбиение площади наноптического элемента на элементарные области.

Для того, чтобы рассчитать микрорельеф в каждой элементарной области  $G_{ij}$  сначала определим диаграмму направленности дифрагированного света, которую она должна создавать. В итоге мы должны получить набор из большого количества диаграмм направленностей по количеству элементарных областей  $G_{ij}$ . Условием для формирования 3D изображения в градациях серого эффекта является то, что в результате под заданным углом наблюдения ( $\theta_n, \varphi_n$ ) наблюдатель должен видеть в градациях серого на поверхности оптического элемента кадр  $K_n$ . 3D изображения полного обзора означает, что при фиксированном положении наблюдателя объект может менять положения вверх-вниз и влево-вправо.

Каждая элементарная область нанооптического элемента формирует точку с заданной яркостью сразу во всех 2D-кадрах 3D изображения. Мысленно зафиксируем одну элементарную область  $G_{ij}$  на дифракционном оптическом элементе, как это сделано на рисунке 5.4.

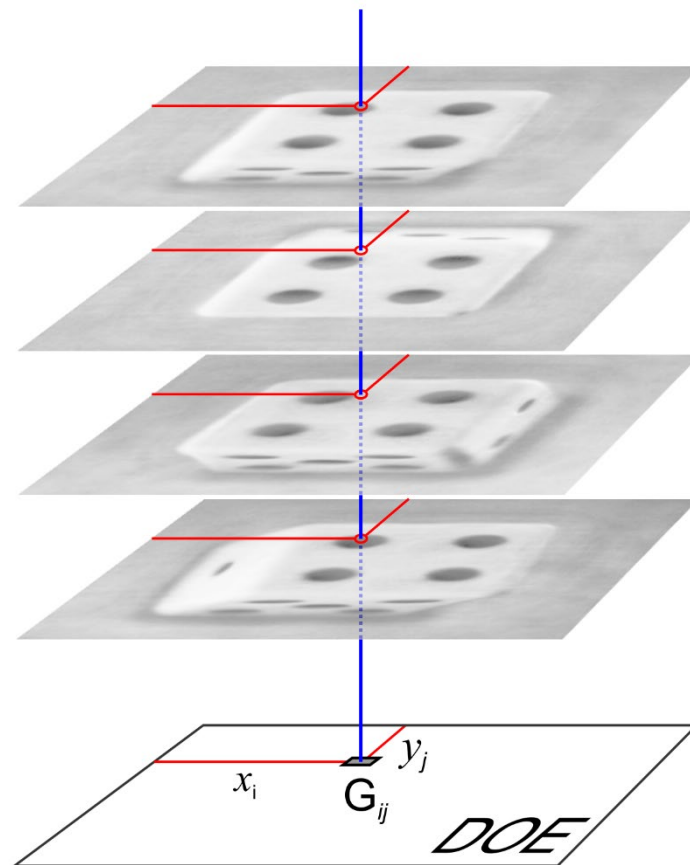


Рисунок 5.4. Схема формирования диаграммы направленности для элементарной области  $G_{ij}$ .

Для того, чтобы получить диаграмму направленности этой элементарной области, требуется определить яркость, с которой эта область будет видна под каждым из  $N$  заданных направлений наблюдения, заданных парами углов ( $\theta_n, \varphi_n$ ),  $n=1..N$ . Проведём вертикальную линию из центра области  $G_{ij}, i=1..I, j=1..J$ , которая пересекает все кадры  $K_n, n=1..N$ . Кадр  $K_n$  пересекается с вертикальной линией в точке  $(x_i, y_j)$ . Таким образом яркость элементарной области

$G_{ij}$  в направлении  $(\theta_n, \varphi_n)$  равна яркости точки  $(x_i, y_j)$  на кадре  $K_n$ . Таким же образом, получаем диаграмму направленности рассеянного излучения для каждой элементарной области  $G_{ij}$ .

На рисунке 5.5 приведено несколько кадров  $K_n$ . На каждом из кадров выбранная точка  $(x_i, y_j)$  помечена крестом. Как видно из рисунка 5, при разных углах наблюдения яркость точки  $(x_i, y_j)$  может меняться в градациях серого от 0 до 1.

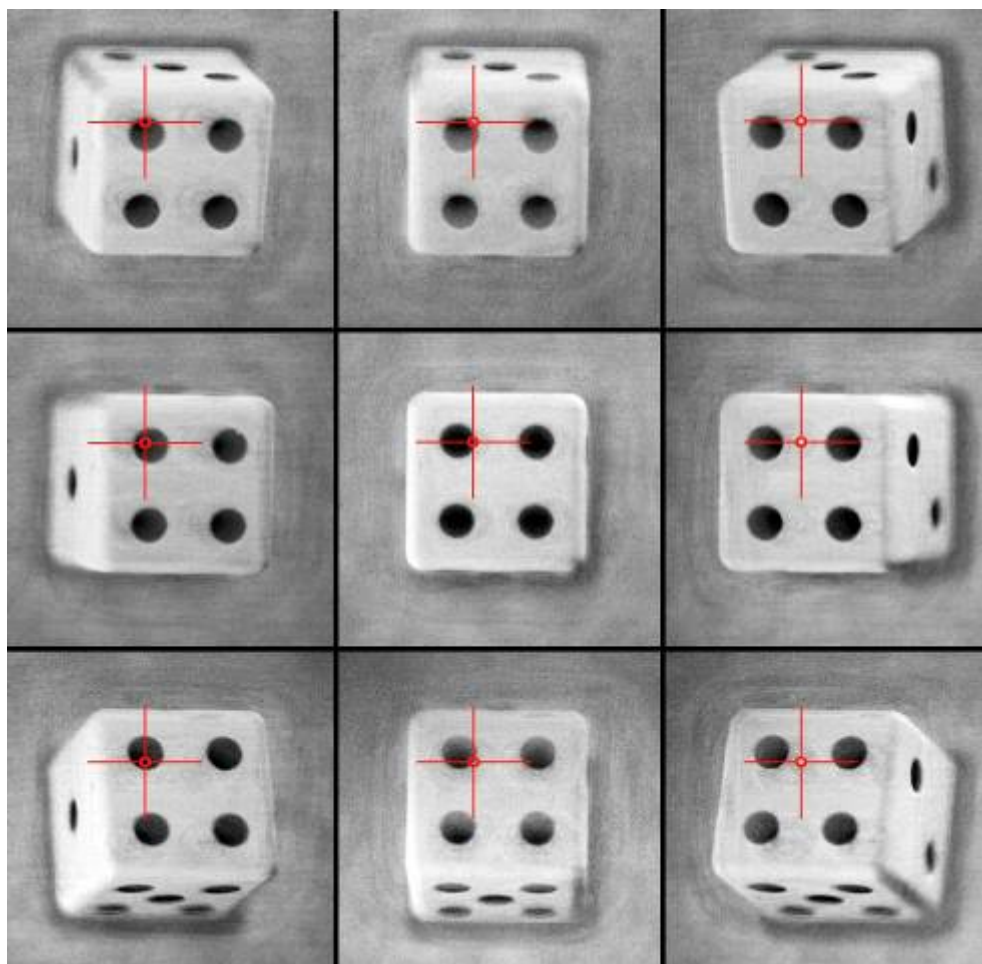


Рисунок 5.5. Пример входных 2D изображений в градациях серого. На каждом из кадров крестом помечена выбранная точка  $(x_i, y_j)$ .

Следующая задача состоит в том, чтобы рассчитать, какой должен быть микрорельеф в каждой элементарной области для формирования заданной диаграммы направленности. Искусственно зададим некоторую фокальную плоскость на расстоянии  $f$  от нанооптического элемента. Зная диаграмму направленности области  $G_{ij}$ , легко посчитать распределение интенсивности  $F(x, y)$  в заданной фокальной плоскости  $z=f$ . Определив точки пересечения лучей, проведенных из центра области  $G_{ij}$  в направлениях  $(\theta_n, \varphi_n)$  с плоскостью  $z=f$ , и положив яркость этих точек равной яркости точки  $(x_i, y_j)$  кадра  $K_n$ , мы задаём требуемое распределение интенсивности отражённого света  $F(x, y)$  в фокальной плоскости. Функция  $F(x, y)$  представляет собой изображение, состоящее из  $N$  точек разной яркости. На рисунке 5.6 приведены четыре

примера диаграмм направленности, которые определяют функции  $F(x,y)$  для разных элементарной области.

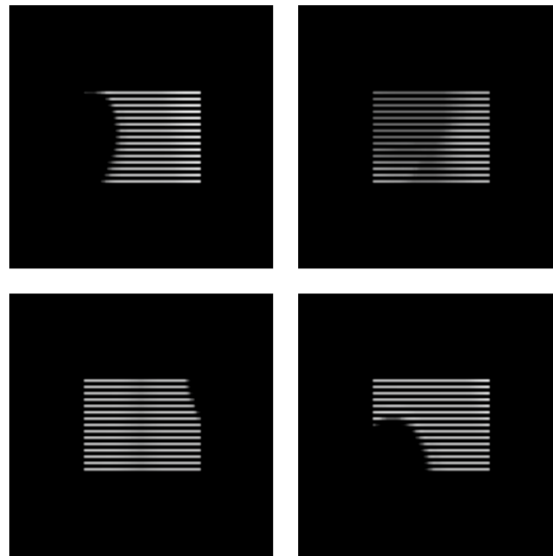


Рисунок 5.6. Диаграммы направленности для четырех элементарных областей.

На рисунке 5.7 приведена оптическая схема для расчета фазовой функции элементарной области по заданной функции  $F(x,y)$ .

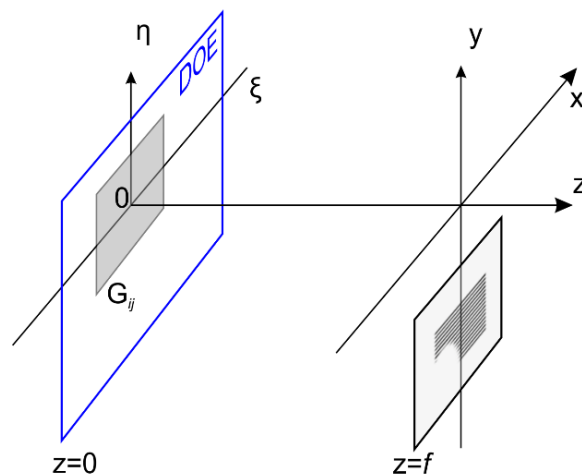


Рисунок 5.7. оптическая схема для расчета фазовой функции элементарных областей.

В скалярном волновом приближении Френеля обратную задачу расчёта фазовой функции нанооптического элемента в каждой элементарной области  $G_{ij}$ ,  $i=1\dots I$ ,  $j=1\dots J$  можно свести к интегральному уравнению. Известно, что скалярные волновые функции в плоскости  $z=0$  и  $z=f$  связаны соотношением:

$$u(x, y, f) = \gamma \iint_{G_{ij}} u(\xi, \eta, 0) \exp(ik\Phi(\xi, \eta)) \exp\left\{ik \frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{2f}\right\} d\xi d\eta. \quad (5.1)$$

Здесь  $(\xi, \eta)$  – декартовы координаты в плоскости оптического элемента,  $(x, y)$  – декартовы координаты в фокальной плоскости  $z=f$ ,  $|\gamma| = \frac{k}{2\pi f}$ ,  $k=2\pi/\lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны падающего излучения,  $G$  – область оптического элемента,  $f$  – расстояние от оптического элемента до фокальной плоскости. Особенностью рассматриваемых обратных задач является то, что в уравнении (5.1) известна не сама функция  $u(x,y,f)$ , а только её модуль  $|u(x,y,f)|=F(x,y)$ . Таким образом, обратная задача сводится к определению фазовой функции  $\Phi(\xi,\eta)$  из уравнения

$$\mathbf{A}\Phi=F(x,y), \quad (5.2)$$

где  $F(x,y)$  – заданная функция распределения интенсивности излучения в фокальной плоскости  $z=f$ . Оператор  $\mathbf{A}$  определяется соотношением

$$\mathbf{A}\Phi = \left| \gamma \iint_{G_{ij}} u(\xi, \eta, 0 - 0) \exp(ik\Phi(\xi, \eta)) \exp\left\{ik \frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{2f}\right\} d\xi d\eta \right|. \quad (5.3)$$

Итерационные методы решения этого уравнения подробно обсуждаются в главе 1 диссертации. Глубина микрорельефа оптического элемента  $h(\xi,\eta)$  однозначно определяется заданной фазовой функцией  $\Phi(\xi,\eta)$ : для отражающего элемента  $h(\xi,\eta)=\frac{1}{2}\Phi(\xi,\eta)/\cos(\alpha)$ , где  $\alpha$  – угол падения света от источника на нанооптический элемент (рисунок 5.2). В рассматриваемых нанооптических элементах можно использовать как бинарный, так и многоградационный киноформ. В отличие от многоградационного киноформа, бинарный киноформ имеет только два уровня глубины. Бинарный и многоградационный киноформы формируют одно и то же изображение, однако бинарный киноформ имеет энергетическую эффективность не более 50%. Многоградационный киноформ обладает большей дифракционной эффективностью, но требует более сложной технологии изготовления. На рисунке 5.8 приведён фрагмент многоградационного (а) и бинарного (б) микрорельефа одной из элементарных областей дифракционного оптического элемента.

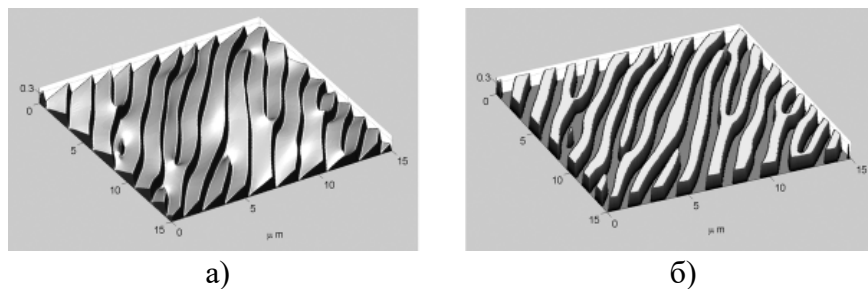


Рисунок 5.8. Фрагменты микрорельефа нанооптического элемента:  
(а) многоградационный, (б) бинарный.

Таким образом, для расчёта микрорельефа нанооптического элемента нужно для каждой элементарной области решить нелинейное интегральное уравнение (5.3), предварительно сформировав его правую часть. В главе 5 рассматривается вариант синтеза 3D изображений с помощью бинарных нанооптических элементов (Рисунок 5.8(б)). Бинарные киноформы представляют собой хорошо изученные структуры [130,131]. В этой публикации рассматриваются бинарные киноформы, для формирования 2D изображений. В диссертации бинарные структуры используются для формирования 3D изображений с полным параллаксом формируемая в окрестности первого порядка дифракции.

### **5.3. Пример реализации бинарного нанооптического элемента для формирования 3D изображений с полным параллаксом**

Для демонстрации эффективности предложенных технологий был изготовлен нанооптический элемент, формирующий 3D изображение с полным параллаксом в градациях серого.

Для изготовления нанооптического элемента, формирующего 3D изображение с полным параллаксом в градациях серого, была использована компьютерная 3D-модель игровой кости. С помощью стандартной программы 3D-моделирования были получены 825 2D-кадров 3D-объекта, снятых с разных ракурсов  $V_n$  (рисунок 5.5). Количество ракурсов по горизонтали: 55, по вертикали: 15. Используя эти кадры для каждой элементарной площадки размером  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$  были рассчитаны правые части  $F(x, y)$  для уравнения (5.2). Пример функции  $F(x, y)$  для одной из элементарных площадок приведен на рисунке 5.8. Как видно из рисунка 6.8, изображение состоит из ярких точек на темном фоне.

После решения 160 000 нелинейных обратных задач были рассчитаны фазовые функции киноформов в каждой элементарной площадке. Размер изготовленного оптического элемента  $20 \times 20$  мм. Несмотря на огромное количество нелинейных обратных задач, для расчета фазовой функции нанооптического элемента вполне хватает персонального компьютера.

На рисунке 5.9 приведён фрагмент микрорельефа реального бинарного нанооптического элемента, изготовленного с помощью электронно-лучевой технологии. Размер фрагмента  $15 \times 15$  мкм. Характерные размеры структуры киноформа варьируются в пределах  $0.55 - 1.15$  мкм, что соответствует углам дифракции зеленого света от  $27$  до  $73$  градусов. Глубина микрорельефа составила порядка  $0.15$  мкм. Для сканирования микрорельефа использовался атомный силовой микроскоп.

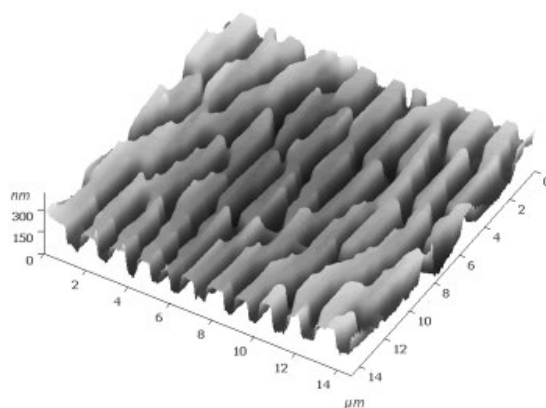


Рисунок 5.9. Микрорельеф фрагмента нанооптического элемента.

Для синтеза дифракционного оптического элемента использовалась электроннолучевая технология, а именно shaped-beam электронный генератор с минимальным размером штампа  $0.1 \times 0.1$  мкм. Микрорельеф формировался на пластинах позитивным резистом. Эффективность разработанной технологии иллюстрируется фотографиями, представленными на рисунках 5.9 и 5.10.

Поскольку расчёт микрорельефа, представляющий собой решение уравнения (5.2), производился для фиксированной длины волны  $\lambda=525$  нм, наилучшее качество изображения получается при освещении оптического элемента зелёным светом. На рис 5.10 представлены кадры изображения, снятые с реального оптического элемента в зелёном свете. Для освещения использовалось некогерентное излучение зеленого светодиода с максимумом интенсивности излучения на длине волны  $\lambda=525$  нм.

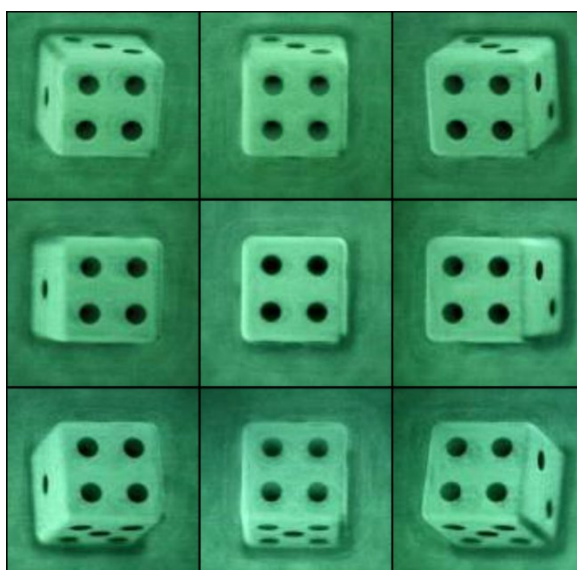


Рисунок 5.10. Фотографии реального нанооптического элемента в монохроматическом свете.



На рисунке 5.11 представлены кадры, полученные при освещении нанооптического элемента белым светом. Хотя диапазон длин волн не соответствует расчётному, качество изображения и в этом случае является достаточно хорошим.

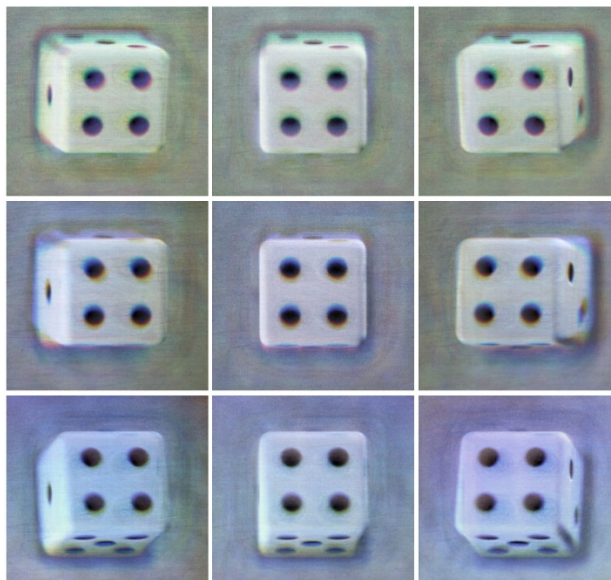


Рисунок 5.11. Фотографии реального нанооптического элемента в белом свете.

Изготовленный нанооптический элемент состоит из 160 000 киноформов, расположенных в областях размером 50 на 50 микрон. Фазовая функция каждого киноформа определяет его диаграмму направленности. Какое именно изображение из набора 2D-кадров будет видеть глаз наблюдателя практически не зависит от расстояния наблюдения, а зависит только от угла наблюдения, если считать, что положение нанооптического элемента и положение источника света фиксированы. Таким образом, 3D-эффект можно наблюдать с любого расстояния от нанооптического элемента. При этом, конечно, оба глаза наблюдателя должны находиться в пределах диапазона углов наблюдения ( $\theta_n$ ,  $\varphi_n$ ). Для изготовленного образца наиболее удобное расстояние от наблюдателя до оптического элемента составляет от 20 до 60 см.

Дифракционный оптический элемент для формирования 3D изображения с полным параллаксом представляет собой компьютерно-синтезированный нанооптический элемент. Для расчёта микрорельефа нанооптического элемента использовались 825 кадров 3D изображения, полученные с помощью компьютерной модели игральной кости. Из рисунков 5.10 и 5.11 следует, что электроннолучевая технология позволяет синтезировать нанооптический элемент, формирующий 3D-изображение с полным параллаксом в градациях серого.

#### 5.4. Постановка задачи синтеза многоградационных нанооптических элементов для формирования 3D-изображений нулевого порядка и методы ее решения

В этом пункте рассматривается задача формирования 3D изображения в окрестности нулевого порядка с помощью многоградационных элементов. В диссертации впервые разработаны методы синтеза 3D изображений в нулевом порядке дифракции [A26]. Задача синтеза нанооптического элемента для формирования 3D-изображений нулевого порядка является достаточно сложной. Трехмерное изображение наблюдается при небольших углах дифракции менее  $60^\circ$ . Но поскольку одно из основных применений разрабатываемых нанооптических систем – защитные технологии, усложним задачу. Поставим дополнительную задачу, чтобы при больших углах дифракции более  $60^\circ$  наблюдатель мог видеть на всей области оптического элемента дополнительно другое цветное 2D изображение.

На рисунке 5.12 представлена схема формирования 3D изображений плоским фазовым отражающим оптическим элементом в углах дифракции менее  $60^\circ$ .

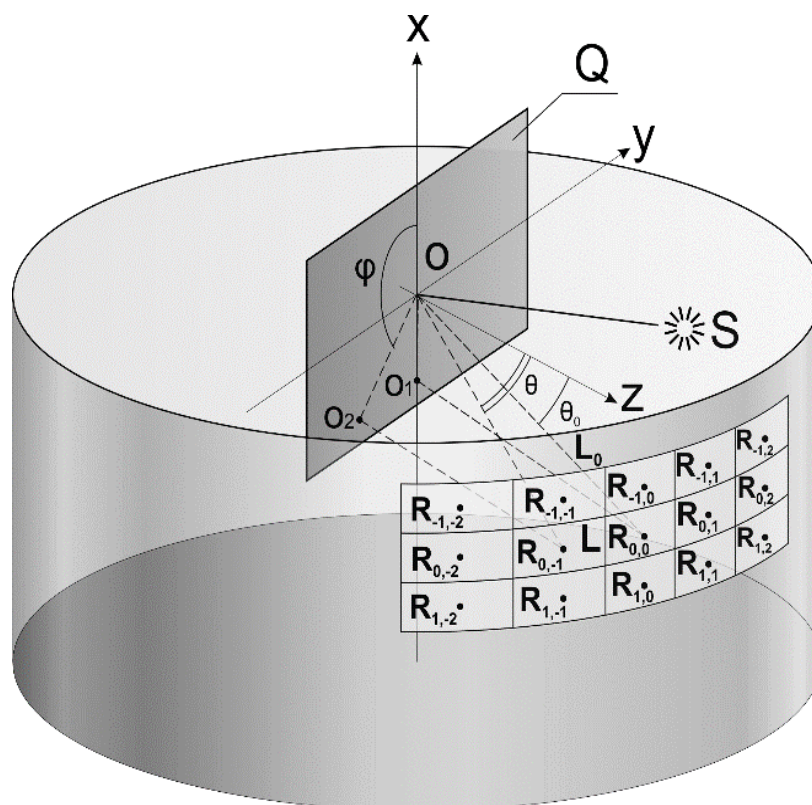


Рисунок 5.12. Схема формирования 3D изображений плоским фазовым оптическим элементом в углах дифракции менее  $60^\circ$ .

Оптический элемент расположен в плоскости  $Z=0$ . На рисунке 5.12 представлен фрагмент точек наблюдения (5 точек по горизонтали и 3 точки по вертикали). Центры точек наблюдения

обозначены буквами R. Для реальных оптических элементов, формирующих 3D-изображение в нулевом порядке, количество кадров составляет несколько сотен. Источник излучения S расположен в плоскости Oхz декартовой системы координат. Источник находится под углом  $\theta_0$  к оси Oz. Направление на нулевой порядок обозначено как  $L_0$ . Наблюдатель под разными углами  $\varphi, \theta$  видит разные 2D-кадры  $K_n, n=1\dots N$  3D-изображения. Здесь  $\varphi, \theta$  – углы в сферической системе координат. Угол  $\theta$  отсчитывается от оси Oz, а  $\varphi$  – азимутальный угол. Луч L на рисунке 5.12 направлен в одну из точек наблюдения и имеет угловые координаты  $\varphi, \theta$ . Будем считать, что углы  $(\varphi_n, \theta_n)$  задают направления на точку наблюдения кадра  $K_n, n=1\dots N$ .

На рисунке 5.13 в плоскости Oхz, приведена схема наблюдения при малых углах дифракции. Угол дифракции определяется как угол между нулевым порядком дифракции и направлением на точку наблюдения. Обозначим угол дифракции как  $\beta$ . При малых углах дифракции угол определяется формулой  $\beta = \theta - \theta_0$ . Трёхмерное изображение наблюдается при углах дифракции менее  $60^\circ$  вокруг нулевого порядка дифракции. Угол  $\theta_0$  между источником излучения S и нормалью к плоскости оптического элемента, совпадающей с осью Oz на схеме, определяет нулевой порядок дифракции лучом  $L_0$ .

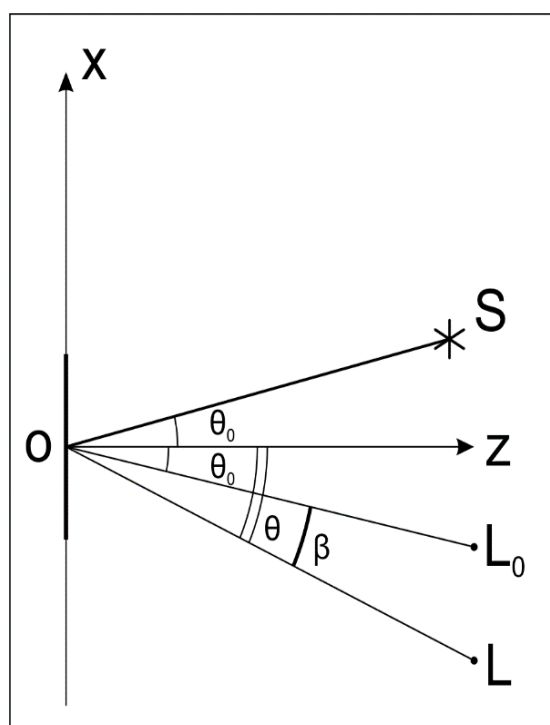


Рисунок 5.13. Схема наблюдения при малых углах дифракции.

На рисунке 5.14 приведена схема наблюдения 2D изображения при больших углах дифракции более  $60^\circ$ . При наклоне оптического элемента на угол  $\alpha$  вокруг оси Oy при больших

углах дифракции  $\beta = \theta - \theta_0$  наблюдатель видит другое цветное 2D изображение. Нормаль к оптическому элементу в этом случае не совпадает с осью Oz и обозначена пунктиром.

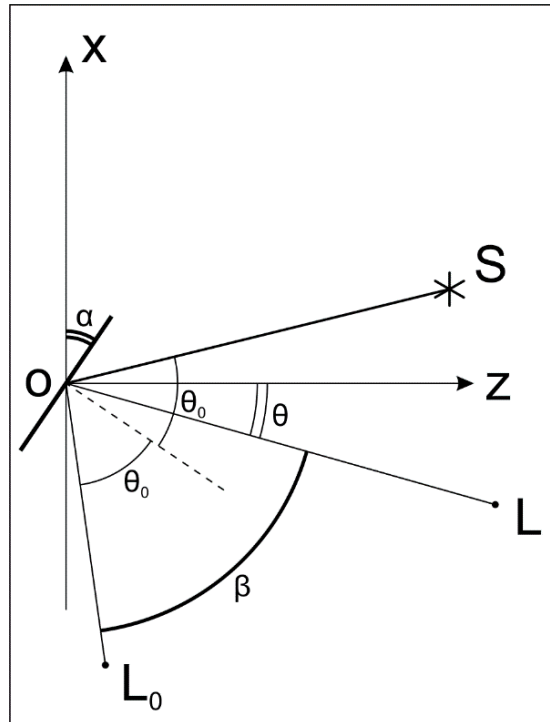


Рисунок 5.14. Схема наблюдения 2D изображения при больших углах дифракции более  $60^\circ$ .

Предложенный в диссертации способ формирования 3D изображений позволяет использовать различные 3D-модели. Для простоты демонстрации способа расчёта фазовой функции дифракционного оптического элемента 3D-объект выбран максимально простым. На рисунке 5.15 представлена компьютерная 3D-модель объекта, которая состоит из рёбер правильной четырёхугольного куба. Рёбра окрашены в чёрный цвет.

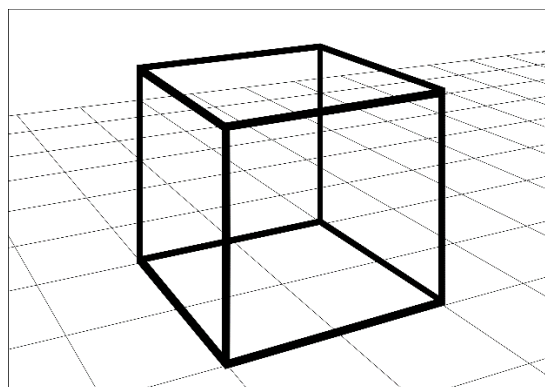


Рисунок 5.15. 3D-модель объекта.

На рисунке 5.16 представлен фрагмент 2D-кадров 3D-объекта. На рисунке 5.17 представлена схема разбиения оптического элемента на элементарные области  $G_{ij}$ . Размер

элементарной области не превышает 100 микрон, что находится за пределами разрешающей способности человеческого глаза.

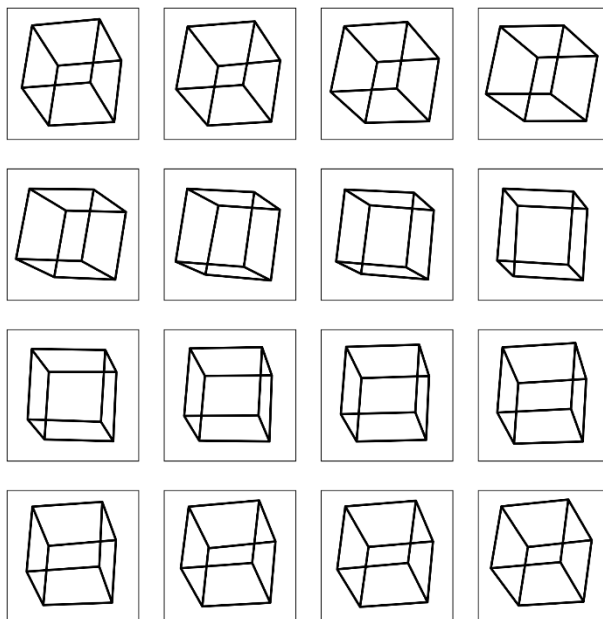


Рисунок 5.16. Фрагмент 2D-кадров 3D-объекта.

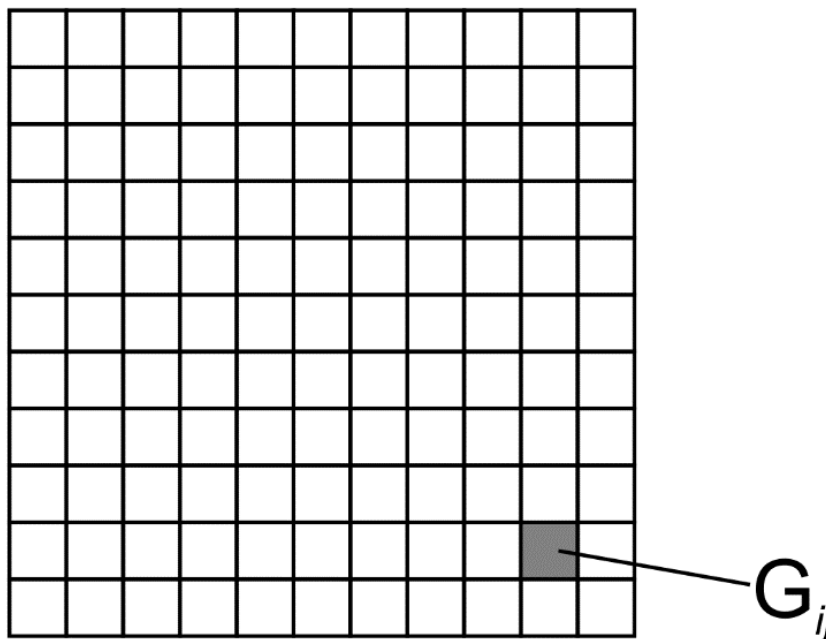


Рисунок 5.17. Схема разбиения оптического элемента на элементарные области.

Для того, чтобы наблюдатель при больших углах дифракции мог видеть цветное 2D изображение, разобьем каждую элементарную область  $G_{ij}$  на две подобласти  $G^{(1)}_{ij}$  и  $G^{(2)}_{ij}$ ,  $i=1, \dots, I$ ,  $j=1, \dots, J$ . Область  $G^{(1)}_{ij}$  предназначена для размещения многоградационных киноформов, область  $G^{(2)}_{ij}$  частично или полностью заполнена дифракционными решетками с периодами от 0,4 до 0,7

микрон. На рисунке 5.18 представлен вариант схемы разбиения элементарной области на подобласти  $G_{ij}^{(1)}$  и  $G_{ij}^{(2)}$ .

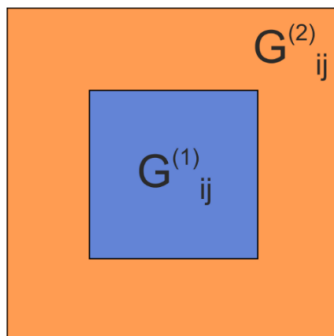


Рисунок 5.18. Вариант схемы разбиения элементарной области на подобласти.

Таким образом, область  $G_{ij}$  является объединением двух подобластей  $G_{ij}^{(1)}$  и  $G_{ij}^{(2)}$ .

На рисунке 5.19 представлена схема формирования диаграммы направленности подобласти  $G_{ij}^{(1)}$  элементарной области, расположенной в области  $G_{ij}$ . В формировании диаграммы направленности участвуют все лучи из центра элементарной области во все точки наблюдения  $R$ . Луч  $L_n$  в центр точки наблюдения кадра  $K_n$  задается углами  $\varphi_n, \theta_n$ . Количество лучей совпадает с количеством 2D-кадров 3D-изображения и составляет несколько сотен. Интенсивность луча  $L_n$  в направлении  $(\varphi_n, \theta_n)$  для каждого  $n, n=1...N$ , определяется следующим образом. Яркость точки  $(x_i, y_j)$  на кадре  $K_n$  определяет интенсивность луча  $L_n$ . Как видно из рисунка 5.19, точка пересечения 1-ой, 2-ой и 3-ей плоскости попадает на изображение в кадрах, а в 4-ой плоскости – попадает на фон. Размер элементарной области составляет не более 100 мкм и глаз видит эту область как точку.

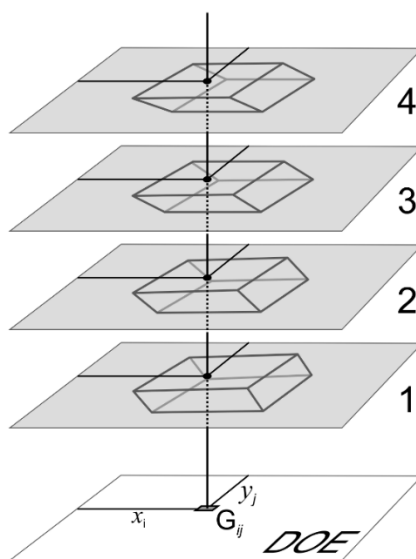


Рисунок 5.19. Схема формирования диаграммы направленности области  $G_{ij}^{(1)}$  элементарной площадки, расположенной в области  $G_{ij}$ .

Диаграмма направленности рассеянного излучения из области  $G^{(1)}_{ij}$  каждой элементарной области  $G_{ij}$  формируется под всеми углами  $(\varphi_n, \theta_n)$  наблюдения 3D-изображения. Здесь  $n=1\dots N$ . Диаграмма направленности области  $G^{(1)}_{ij}$  представляет собой набор из  $N$  лучей, и каждый луч  $L_n$  имеет заданную интенсивность. Определив точки пересечения лучей  $L_n$  с фокальной плоскостью  $z=f$  и задав в этих точках яркость, равную интенсивности лучей  $L_n$ , мы формируем функцию  $F(x,y)$  в уравнении, которое связывает  $F(x,y)$  и фазовую функцию  $\Phi(x,y)$ , в каждой элементарной области  $G_{ij}$ ,  $i=1,\dots,I$ ,  $j=1,\dots,J$ . Это соотношение можно представить как уравнение (5.4):

$$A\Phi = \left| \gamma \iint_G u(\xi, \eta, 0 - 0) \exp(ik\Phi(\xi, \eta)) \exp\left\{ ik \frac{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}{2f} \right\} d\xi d\eta \right| = F(x, y) \quad (5.4)$$

За параметр  $f$  можно принять расстояние от глаза наблюдателя до оптического элемента. Функция  $F(x,y)$  в уравнении 5.4 представляет собой изображение, состоящее из  $N$  точек разной интенсивности.

На рисунке 5.20. приведены три функции  $F(x,y)$ , рассчитанные для областей  $G^{(1)}_{ij}$  трёх разных элементарных площадок.



Рисунок 5.20. Три функции  $F(x,y)$ , рассчитанные для разных подобластей  $G^{(1)}_{ij}$ .

Общее количество элементарных областей может составлять сотни тысяч. Функция  $F(x,y)$  рассчитывается для области  $G^{(1)}_{ij}$  каждой элементарной области  $G_{ij}$ . Затем решается обратная задача (8.1) и определяется фазовая функция  $\Phi_{ij}(x,y)$  для подобласти  $G^{(1)}_{ij}$  каждой элементарной области  $G_{ij}$ .

Схема расчёта фазовой функции в элементарной области  $G^{(1)}_{ij}$  приведена на рисунке 5.21. Элементарная область  $G_{ij}$  расположена в плоскости  $Z=0$ . В плоскости  $Z=f$  расположено полутонное изображение  $F(x,y)$ . Расчет фазовой функции из уравнения (8.1) осуществляется для длины волны зеленого цвета  $\lambda=547$  нм. Итерационные алгоритмы решения обратной задачи (8.1)

подробно рассмотрены в главе 1. Глубина микрорельефа  $h_{ij}(x,y)$  оптического элемента однозначно определяется заданием его фазовой функции  $\Phi_{ij}(x,y)$ . Для оптических элементов, работающих на отражение при углах падения света, близких к нормали, глубина микрорельефа определяется формулой  $h_{ij}(x,y) = \frac{1}{2}\Phi_{ij}(x,y)$ .

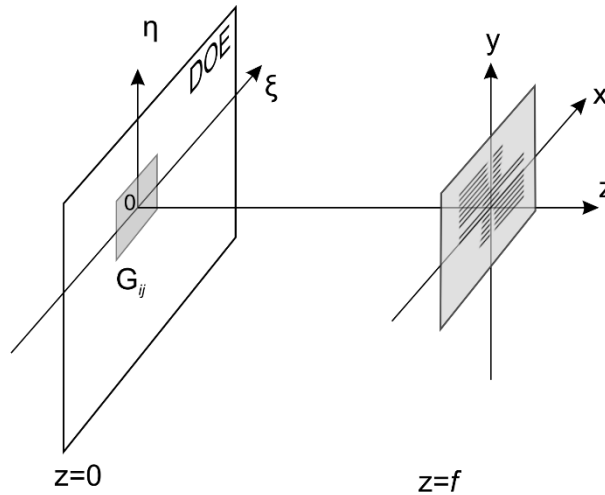


Рисунок 5.21. Схема расчёта фазовой функции в каждой элементарной области  $G^{(1)}_{ij}$ .

Решая обратную задачу 5.4 по заданной функции  $F(x,y)$  можно найти фазовую функцию для каждой элементарной области. На рисунке 5.22 представлен фрагмент микрорельефа многоградационного киноформа в одной из элементарных областей  $G_{ij}$ . Размер изображения составляет менее 100 мкм. Глубина микрорельефа не превышает  $0.5 \lambda$ .

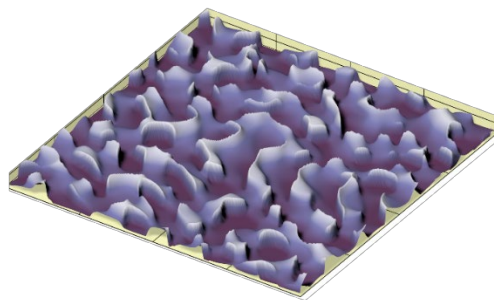


Рисунок 5.22. Фрагмент микрорельефа многоградационного киноформа в одной из элементарных областей.

На рисунке 5.23 представлен вариант структуры элементарной области. Здесь многоградационный киноформ занимает область  $G^{(1)}_{ij}$  элементарной площадки. На рисунке 5.23 глубина микрорельефа киноформа пропорциональна степени потемнения в области  $G^{(1)}_{ij}$ . Оставшаяся площадь элементарной области  $G^{(2)}_{ij}$  частично или полностью заполнена



фрагментами дифракционных решёток различных периодов и ориентации, формирующими при освещении белым светом другое цветное 2D-изображение, видимое наблюдателю под большими углами дифракции более  $60^\circ$ .

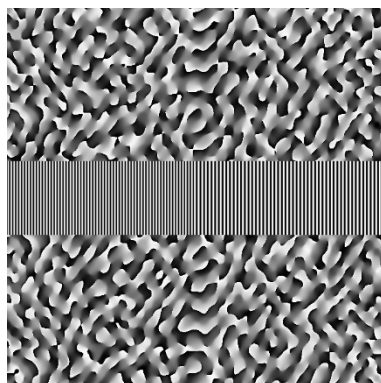


Рисунок 5.23. Вариант структуры элементарной области.

Вариант такого цветного изображения в условных цветах представлен на рисунке 5.24.

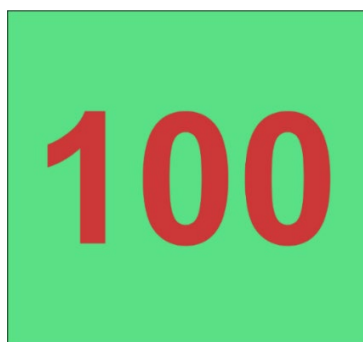


Рисунок 5.24. Цветное изображение, видимое наблюдателю при больших углах дифракции.

Схема наблюдения при больших углах дифракции приведена на рисунке 8.3.

### **5.5. Пример реализации многоградационного нанооптического элемента для формирования 3D изображения нулевого порядка**

Для демонстрации эффективности предложенных технологий были изготовлены два нанооптических элемента, формирующих 3D изображение нулевого порядка. 3D изображение состоит из ребер правильной четырехугольной пирамиды. Нанооптические элементы представляют собой плоские отражающие фазовые оптические элементы размером  $20 \times 20$  мкм. Один из них является металлизированным, второй выполнен прозрачным на материале с высоким показателем отражения. Для синтеза оригинала плоского отражающего оптического элемента была использована электронно-лучевая технология.

Для формирования 3D изображения использовались многоградационные киноформы. Плоский оптический элемент размером  $20 \times 20$  мм разбивался на элементарные области  $G_{ij}, i=1 \dots L, j=1 \dots M$  размером  $50 \times 50$  мкм, как показано на рисунке 5.17. Общее число элементарных областей составило 160000. Количество кадров  $N$  составляло 825 (55 кадров по горизонтали, 15 кадров по вертикали). Расчёт микрорельефа плоского оптического элемента производился при заданной длине волны  $\lambda=547$  нм для каждой элементарной области  $G^{(1)}_{ij}$  размером менее  $50 \times 50$  микрон. Для расчёта фазовой функции в области  $G^{(1)}_{ij}$  каждой элементарной области использовалась сетка  $500 \times 500$ , на которой решалась обратная задача (8.1). Для расчёта фазовой функции  $\Phi_{ij}(x,y)$  для каждой области  $G^{(1)}_{ij}, i=1 \dots L, j=1 \dots M$ , достаточно использовать обычный персональный компьютер. Время расчета фазовой функции оптического элемента не превышает 10 минут на ПЭВМ.

Для изготовления микрорельефа нанооптического элемента использовался электронный генератор с разрешением 0.1 микрона. Для формирования изображения использовался позитивный электронный резист. Оригинал дифракционного оптического элемента был изготовлен с помощью стандартной процедуры гальванопластики. Изготовленный оригинал был мультиплицирован. С помощью мультиплицированных матриц были изготовлены два нанооптических элемента в виде металлизированной и прозрачной наклеек. Для изготовления прозрачной наклейки использовался материал с высоким коэффициентом отражения. При углах дифракции менее  $60^\circ$  наблюдатель может видеть 3D изображения пирамиды под разными углами. Фотографии нанооптического элемента, сделанные с разных ракурсов при углах дифракции менее  $60^\circ$  представлены на рисунке 5.25.

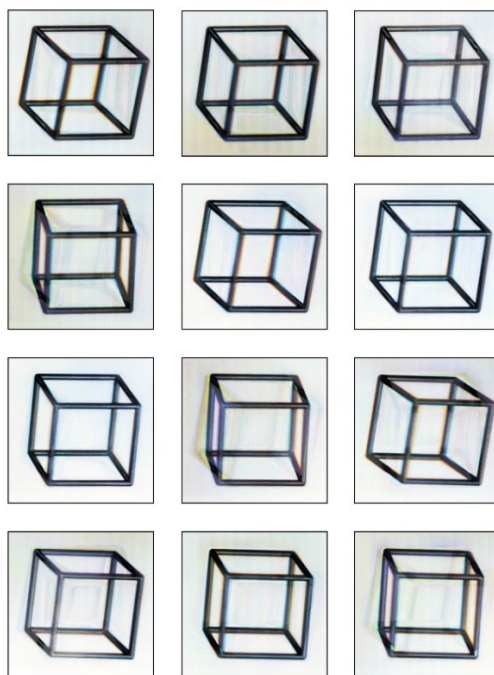


Рисунок 5.25. 3D изображения куба под разными углами.

При углах дифракции менее  $60^\circ$  наблюдатель видит 3D-изображения в нулевом порядке дифракции. При углах дифракции более  $60^\circ$  наблюдатель видит другое цветное 2D изображение, приведенное на рисунке 5.24. Расчёт микрорельефа проводился при длине волны  $\lambda=547$  нм, что соответствует зелёному свету, однако и при освещении белым светом качество формируемых изображений остаётся хорошим. В качестве точечного источника белого света при тестировании использовался фонарик мобильного телефона. При углах дифракции более  $60^\circ$  наблюдатель видит другое цветное изображение, дизайн которого представлен на рисунке 5.24. Проведённое тестирование изготовленных образцов показало высокую эффективность предложенных технических решений.

## 5.6. Выводы

1. В Главе 5 разработаны методы синтеза нанооптических элементов для формирования 3D изображений с полным параллаксом. Для синтеза 3D изображений в первом порядке дифракции используются бинарные киноформы, для синтеза изображений в нулевом порядке используются многоградационные киноформы [A26]. Для формирования микрорельефа нанооптических элементов используется электронно-лучевая литография.

2. Важной задачей в синтезе нанооптических элементов является расчет фазовой функции. Сложность заключается в том, что фазовая функция оптического элемента очень быстро осциллируется, что приводит к необходимости использования при вычислениях очень мелкой сетки. В диссертации впервые разработан эффективный метод фазовой функции оптического элемента. Расчет производится в два этапа. Оптический элемент разбивается на элементарные области размером не более 50 микрон. На первом этапе по заданным кадрам изображений рассчитывается диаграмма направленности каждой элементарной области. С математической точки зрения эта задача является тоже обратной. Задача расчета диаграммы направленности является корректной по Тихонову и численно решается прямыми вычислениями согласно предложенному в диссертации алгоритму. После вычисления диаграмм направленности рассчитывается фазовая функция в каждой элементарной области. Поскольку размер элементарной области не превышает 50 микрон то эту задачу уже можно эффективно решить для каждой элементарной области с помощью известных итерационных методов. Параметром регуляризации является количество итераций [7].

3. Впервые были изготовлены нанооптические элементы для формирования 3D изображений с полным параллаксом. Изготовленные нанооптические элементы были рассчитаны под определенную длину волны, соответственно и наилучшее качество изображения было получено при освещении монохроматическим источником соответствующего цвета. Изготовленные образцы показывают, что и при использовании белого света качество 3D изображений не ухудшается.

4. Разработанные методы расчета фазовых функций нанооптических элементов для формирования 3D изображений могут быть использованы и в разрабатываемых в настоящее время 3D-дисплеях и 3D-проекторах.

## **Глава 6. Разработка методов синтеза нанооптических элементов для формирования эффекта смены двух 3D-изображений**

*В данной главе используются материалы, опубликованные в статье [A10].*

### **6.1. Постановка задачи синтеза нанооптических элементов для формирования эффекта смены двух 3D-изображений**

В главе 5 для синтеза 3D изображений были использованы бинарные и многоградационные нанооптические элементы. В Главе 6 формируется визуальный эффект смены двух 3D-изображений при наклоне нанооптического элемента. Этот эффект является более сложным и для синтеза нанооптического элемента используются как бинарные, так и многоградационные структуры.

Существуют попытки аналоговой оптической записи рельефных плоских оптических элементов, формирующих цветное 3D изображение [132]. Возможности аналоговой записи 3D-структур с помощью рельефных элементов весьма ограничена, поэтому в диссертации рассматриваются только компьютерно-синтезированные голограммы. В публикации [133] сделана попытка компьютерного синтеза плоского оптического элемента, формирующего цветное 3D-изображение. Запись рельефа плоского оптического элемента осуществляется с помощью dot-matrix [59] технологии с размером пикселей порядка 30-60 микрон. Минимальный период дифракционных решеток в такой оптической технологии составляет порядка 1 микрона. С таким низким разрешением невозможно сформировать даже одно 3D изображение высокого разрешения.

В настоящей диссертации предложен принципиально новый визуальный защитный признак – эффект смены двух 3D изображений при наклоне нанооптического элемента вверх-вниз [A10]. Такой эффект в принципе невозможно синтезировать с помощью оптических методов записи оригиналов. Разработанный в этой главе нанооптические элементы имеют как бинарный, так и многоградационный рельеф. Именно использование многоградационного рельефа обеспечивает чистый эффект смены двух изображений.

В диссертации разработаны методы расчета и синтеза этого защитного признака. Признак базируется на электронно-лучевой технологии. Точность формирования микрорельефа для нового защитного признака должна составлять 20 нанометров по глубине. Признак легко контролируется визуально и надёжно защищён от подделок. Для синтеза нанооптического элемента в главе 6 используются дифракционные решетки различной ориентации и периода.

Для формирования компьютерно-синтезированных 3D изображений используют хорошо изученные подходы, основанные на использовании наборов 2D-кадров 3D-объекта, снятых с разных ракурсов. Когда каждый глаз наблюдателя видит изображение из набора 2D-кадров,

соответствующее ракурсу наблюдения, наблюдатель воспринимает изображение объекта в объемном виде. В нашем случае, для формирования вертикального эффекта смены двух 3D-изображений необходимо использовать два набора 2D-кадров. Кадры для первого 3D-изображения будем обозначать буквами  $K_0 \dots K_{\pm N}$ , а для второго 3D-изображения – буквами  $R_0 \dots R_{\pm N}$ . Общее количество кадров для формирования каждого 3D-изображения равняется  $2(N+1)$ . Схема формирования вертикального свитч эффекта приведена на рисунке 6.1.

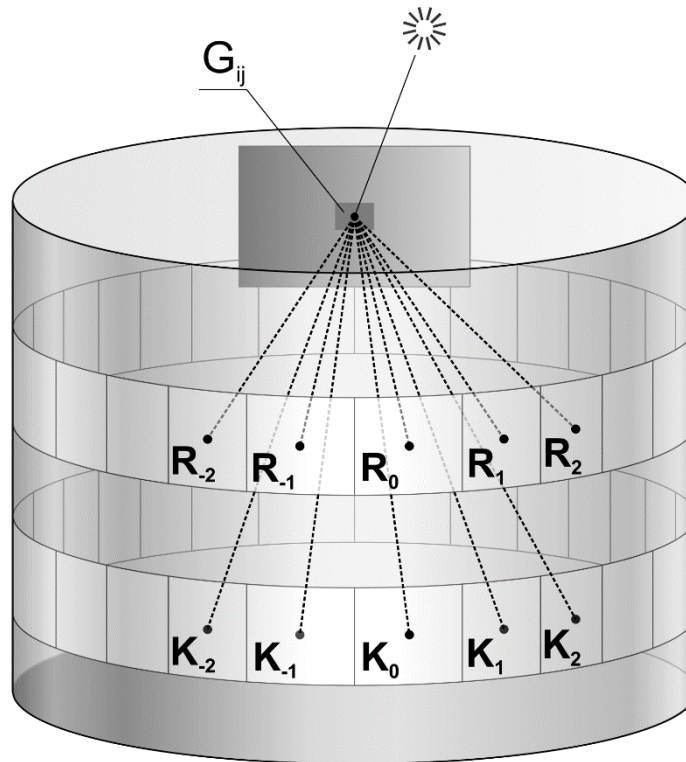


Рисунок 6.1. Схема формирования визуального защитного признака – эффекта смены двух 3D изображений.

Источник дневного света  $S$  освещает белым светом плоский нанооптический элемент  $Q$  расположенный в плоскости  $x=0$ . В результате дифракции на микрорельефе нанооптического элемента свет рассеивается так, что с определенных ракурсов наблюдения на поверхности нанооптического элемента формируется заданное 2D изображение. А именно: точки  $K_0 \dots K_{\pm N}$  и  $R_0 \dots R_{\pm N}$  на рисунке 6.1 черными точками обозначена позиция глаза наблюдателя, из которой виден соответствующий кадр из набора 2D-кадров. Будем считать, что глаза наблюдателя находятся на одной высоте, то есть голова не наклонена ни вправо, ни влево. Будем использовать для обозначения кадров, формирующих первое изображение, обозначение  $K_i$ , а для кадров, формирующий второе изображение обозначение  $R_i$ . Индекс  $i$  принимает значение  $-N \dots 0 \dots N$ . Первое 3D изображение будет видно при наблюдении с позиций  $K_0 \dots K_{\pm N}$ . Второе 3D-изображение можно наблюдать с позиций  $R_0 \dots R_{\pm N}$ . Угол между направлениями наблюдения

крайних кадров  $R_{-N}$  и  $R_N$  определяет сектор обзора защитного признака. Для устойчивого стереоскопического восприятия 3D-изображения важно, чтобы величина этого угла была заметно больше углового расстояния между глазами наблюдателя. На рисунке 6.2 приведено сечение, проходящее через оси  $Oz$ ,  $Ox$  и источник света  $S$ . Это сечение пересекает плоский оптический элемент  $Q$  по оси  $Oz$ . Лучи  $L_1$  и  $L_2$ , направленные на центры нулевых кадров имеют разные углы наклона к оси  $Oz$ .

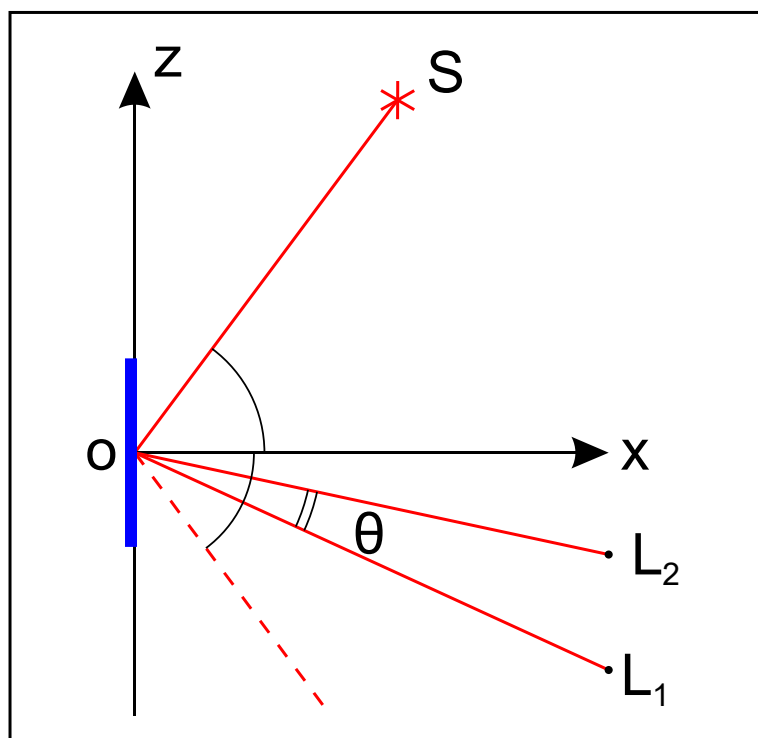


Рисунок 6.2. Схема расположения оптического защитного элемента, источника и наблюдателя.

Угол  $\theta$  между лучами  $L_1$  и  $L_2$  определяет то, насколько «чистым» будет эффект переключения между изображениями. При небольших углах  $\theta$  изображения будут смешиваться из-за спектрального разложения белого света на дифракционных структурах нанооптических элементов. При выборе угла  $\theta$ , учитывается, также, то, что в реальных условиях наблюдения эффекта источник света может быть не точечным, а иметь значимый пространственный размер. Таким образом, для большей устойчивости наблюдения эффекта, угол  $\theta$  должен быть выбран достаточно большим, чтобы учитывать углы разложения белого света в спектр и протяженность источника света. С другой стороны, если угол  $\theta$  выбрать слишком большим, то для формирования первого 3D изображения придется использовать дифракционные решетки с крупными периодами (первое 3D изображение будет вынуждено находиться вблизи нулевого порядка дифракции). Это приведёт к тому, что это изображение будет неудобно наблюдать, а его

контраст и насыщенность заметно упадут. Из этих соображений угол  $\theta$  должен лежать в промежутке от 20 до 30 градусов.

Наборы кадров 3D-сцены с заданных направлений были получены с помощью компьютерной программы 3D-моделирования. При выбранной ширине сектора обзора 3D-эффекта в 30 градусов, для получения хорошего по качеству 3D-изображения, обычно достаточно чтобы число кадров  $N$  лежало в промежутке от 15 до 20 2D-кадров. Первое 3D изображение формируется набором кадров  $K_0 \dots K_{\pm N}$ , а второе видимое 3D изображение формируется своим набором кадров  $R_0 \dots R_{\pm N}$ . Направления наблюдения кадров 3D-сцен соответствуют схеме, представленной на рисунке 6.1.

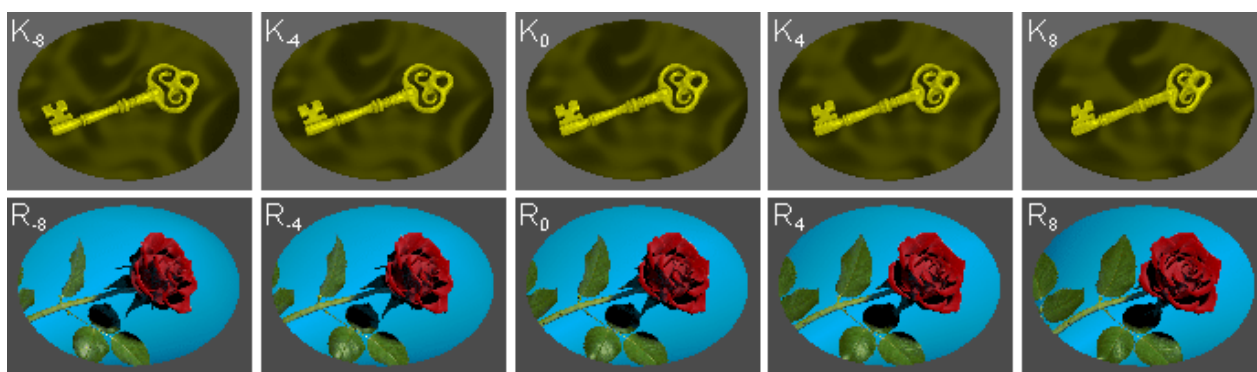


Рисунок 6.3. Дизайн визуальных 3D-изображений, видимых наблюдателю при наклоне оптического элемента.

На рисунке 6.3 выборочно показаны по пять кадров из каждого набора  $K_i$  (верхний ряд) и  $R_i$  (нижний ряд),  $i$  принимает значения  $-2, -1, 0, 1, 2$ . Каждое 2D изображение на рисунке 6.3 состоит из пикселей, общее число пикселей изображения в каждом кадре составляет порядка  $6 \times 10^5$ .

## 6.2. Методы расчета и технология синтеза нанооптических элементов, формирующих эффект смены двух 3D изображений

Для формирования микроструктуры нанооптического элемента разобьем оптический элемент на элементарные области, представляющие собой равные прямоугольники. Пусть количество элементарных областей равно  $M \times N$ . Идея разбиения нанооптического элемента на элементарные области, в которых формируется различный микрорельеф, известна и широко используется в защитных технологиях [73,133]. Максимальный размер области определяется разрешением человеческого глаза. Наблюдатель не должен видеть разбиения нанооптического элемента на элементарные области. Исходя из этого, размер элементарной области не должен превосходить 80 микрон. С другой стороны, нельзя делать размеры элементарных областей



слишком маленькими. Диаграмма направленности, формируемая элементарной областью, является достаточно сложной и при размерах элементарных областей менее 30 микрон, качество синтезируемых 3D изображений существенно падает. Оптимальный размер элементарной области лежит в пределах от 40 до 80 микрон.

Будем считать, что каждый 2D-кадр состоит из  $M \times N$  пикселей изображения, таким образом общее количество пикселей в кадре совпадает с количеством элементарных областей нанооптического элемента. Рассмотрим пиксель 2D-кадра с координатами  $(i, j)$ , где  $i$  – строка, а  $j$  – столбец пикселя. Геометрическое положение центра каждой элементарной области в позиции  $(i, j)$  внутри нанооптического элемента соответствует геометрическому положению центра пикселя изображения с теми же координатами  $(i, j)$  для любого 2D-кадра. Оптический элемент сформирован так, что при наблюдении с любого из заданных направлений, цвет элементарной области с координатами  $(i, j)$  будет соответствовать цвету пикселя кадра координатами  $(i, j)$ , соответствующего этому направлению. Например, цвет пикселя с координатами  $(i, j)$  2D-кадра  $R_0$  формируется только одной элементарной областью с координатами  $(i, j)$  при наблюдении из точки  $R_0$ .

Нанооптический элемент устроен так, что каждая элементарная область участвует в формировании всех 2D-кадров. Любая элементарная область нанооптического элемента формирует как пиксели одного 3D изображения, так и другого 3D изображения. Поскольку кадры являются цветными, то необходимо формировать 2D изображения в трех цветах (RGB). Таким образом, задача расчета микрорельефа в каждой элементарной области является очень сложной, поскольку дифрагированное от микрорельефа излучение участвует в формировании большого числа цветовых пикселей. Если каждая элементарная область заполнена одной дифракционной решеткой, то такую задачу решить невозможно.

Поэтому каждая элементарная область разбивается на дифракционные пиксели, в каждый из которых записывается дифракционная решетка с заданным периодом и ориентацией. Схематично фрагмент элементарной области показан на рисунке 6.4. Буквой К обозначены дифракционные пиксели, формирующие первое 3D-изображение (показаны жёлтым), а буквой R обозначены дифракционные пиксели, формирующие второе 3D изображение.

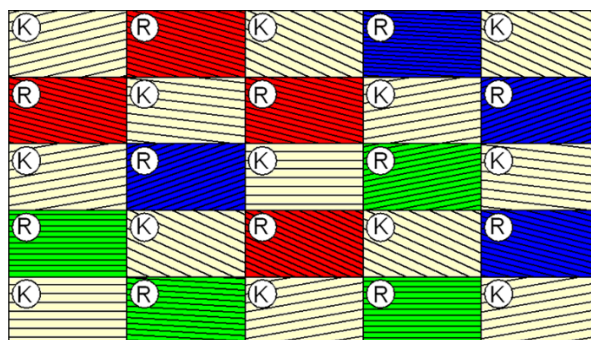


Рисунок 6.4. Фрагмент заполнения элементарных областей дифракционными решетками.

Количество дифракционных пикселей в элементарной области составляет несколько десятков. Общее число дифракционных пикселей на оптическом элементе составляет порядка 1 миллиона. Элементарные области состоят не только из дифракционных пикселей, но содержат и пустые места. Общее количество параметров, используемое для обратной задачи, составляет порядка 2 миллионов. Такого количества параметров вполне достаточно для формирования не только одного 3D изображения, но и для формирования эффекта смены двух 3D изображений. Таким образом, можно предложить конструктивные методы расчета периодов и ориентаций дифракционных решеток в каждом дифракционном пикселе.

Будем считать, что каждый дифракционный пиксель отвечает за формирование для наблюдателя одного цветового канала одного кадра. Таким образом, параметры дифракционной решетки каждого дифракционного пикселя рассчитываются при заданной длине волны и с заданным направлением на наблюдателя. Дифракция на решетках при наклонном падении света хорошо изучена даже в моделях, учитывающих поляризацию света [48]. В скалярной волновой модели, которая используется в настоящей статье, ситуация сильно упрощается. Хорошо известно соотношение, связывающее компоненты волновых векторов падающей и дифрагированной волны [49]:

$$\vec{k}_{Q,m} = \vec{k}_{Q,i} + m\vec{D} \quad (7.1)$$

Здесь  $\vec{k}_{Q,i}$  – проекция волнового вектора  $\vec{k}_i$  падающего излучения на поверхность оптического элемента Q, а  $\vec{k}_{Q,m}$  – проекция на ту же плоскость волнового вектора  $\vec{k}_m$  излучения, дифрагированного в направлении  $m$ -го порядка дифракции. Вектор  $\vec{D} = \frac{2\pi}{d}\vec{e}_d$ , где  $d$  – период решетки,  $\vec{e}_d$  – единичный вектор в плоскости оптического элемента перпендикулярный штрихам дифракционной решетки.

В нашем случае вектор  $\vec{k}_i$  коллинеарен вектору  $\vec{SO}$ , а вектор  $\vec{k}_m$  коллинеарен направлению наблюдения соответствующего кадра  $\vec{OK}_j$  для первого изображения или  $\vec{OR}_j$  для второго изображения (см. рисунок 6.1). Вектора  $\vec{k}_i$  и  $\vec{k}_m$  имеют модуль, равный  $2\pi / \lambda$ . Поскольку координаты векторов  $\vec{k}_i$  и  $\vec{k}_m$  известны, не трудно вычислить координаты их проекций  $\vec{k}_{Q,i}$  и  $\vec{k}_{Q,m}$  на плоскость оптического элемента  $x=0$ . В нашем случае мы формируем изображения в первом порядке дифракции, таким образом  $m=1$ . Из соотношения (6.1) следует, что вектор  $\vec{D} = \vec{k}_{Q,m} - \vec{k}_{Q,i}$ , что определяет как направление штрихов решеток в каждом пикселе, так и период дифракционной решетки для каждой длины волны  $\lambda$  соответствующей красному, зеленому и синему цвету.

Элементарная область может заполняться дифракционными пикселями не целиком, а только частично. Для синтеза визуального эффекта смены двух 3D изображений в настоящей статье используются дифракционные решетки с периодами от 0.6 микрона до 1.4 микрона.

### 6.3. Пример реализации нанооптического элемента для формирования эффекта смены двух 3D изображений

Для демонстрации эффективности предложенных технологий был изготовлен нанооптический элемент, формирующий эффект смены двух 3D изображений при наклоне оптического элемента. Дизайн 3D изображений, формируемых нанооптическим элементом, приведен на рисунке 6.3.

Общий размер нанооптического элемента составляет 40 на 30 мм. Размер области, занимаемой 3D-эффектом, составляет 25 на 18 мм. Число кадров  $N$ , используемых для формирования 3D изображений 17. Угол  $\theta$  между лучами  $L_1$  и  $L_2$ , определяющий угловое расстояние между двумя 3D изображениями, равнялся 24 градусам. Используя методы, изложенные в параграфе 6.2, были рассчитаны углы наклона и периоды дифракционных решеток в каждой элементарной области.

На рисунке 6.5 показан фрагмент микрорельефа двух дифракционных пикселей размером 10 x 15 мкм, формирующих изображение розы. Изображения получены помощью атомного силового микроскопа.

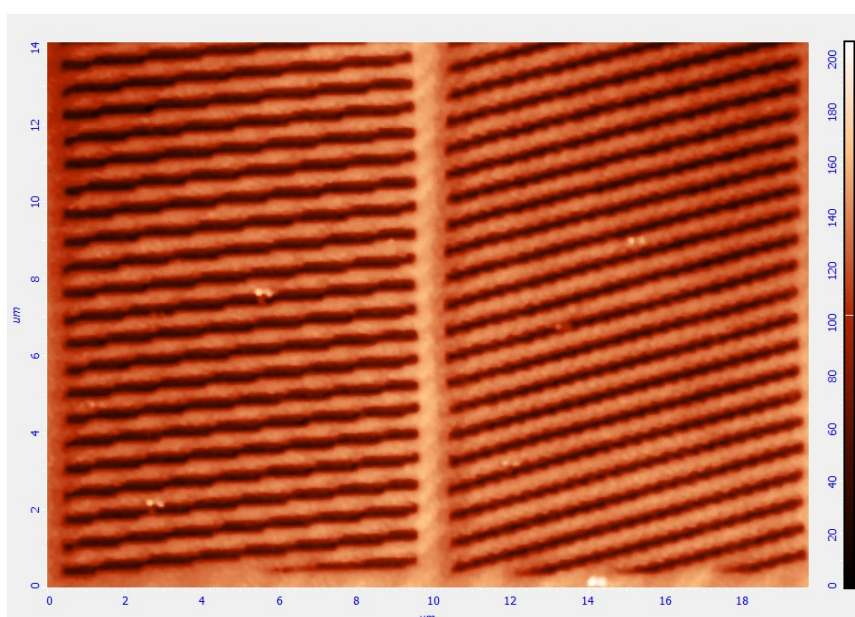


Рисунок 6.5. Фрагменты микрорельефа, формирующего изображение розы, полученный на атомном силовом микроскопе.

Период дифракционных решеток составляет порядка 0,6 микрон. Изображение на рисунке 6.5 с мастер-матрицы нанооптического элемента. Глубина микрорельефа составляет порядка 100 нм.

Для синтеза мастер-матрицы использовалась электронно-лучевая технология с разрешением 0,1 микрона и точностью формирования микрорельефа равной 0,2 микрона. Используя позитивный резист, на электронно-лучевой установке ZBA-21 был сформирован микрорельеф. Используя стандартные процедуры гальванопластики, мультиплицирования были изготовлены мультиплицированные мастер-матрицы. Образцы нанооптических элементов были изготовлены с помощью стандартного оборудования для изготовления рельефных голограмм. Нанооптические элементы на подложке толщиной 23 микрон, глубина микрорельефа, формирующего 3D изображение, составляет порядка 0,15 микрона.

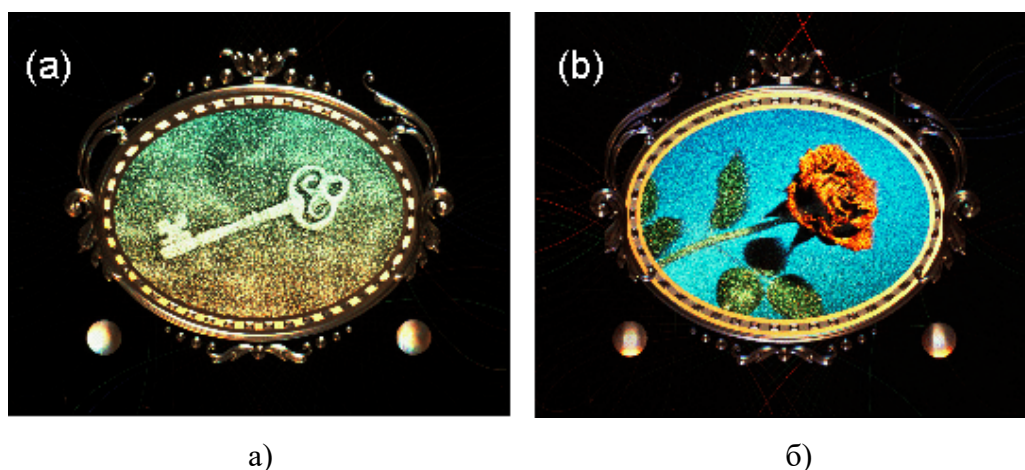


Рисунок 6.6. Фотографии двух 3D изображений, видимых наблюдателю при наклоне оптического элемента.

На рисунке 6.6 приведены фотографии реального образца нанооптического элемента. Нанооптический элемент освещался источником белого света. Изображение (a) на рисунке 6.6, получено из точки наблюдения, соответствующей центральному кадру  $K_0$  первого 3D изображения. Правое изображение на рисунке 6.6 получено из точки наблюдения, соответствующей центральному кадру  $R_0$  второго 3D изображения. Из представленных фотографий видно, что разработанная технология синтеза нанооптического элемента, формирующего эффект смены двух 3D изображений, изготовленного на основе электронно-лучевой технологии, допускает массовое тиражирование с помощью стандартного оборудования для тиражирования рельефных голограмм.

Изготовленный нанооптический элемент позволяет уверенно контролировать эффект смены двух 3D-изображений в диапазоне горизонтальных углов  $\pm 10$  градусов на точечном источнике. Разница вертикальных углов наблюдения двух 3D-изображений составляет 15 градусов при освещении точечным источником света.

При формировании эффекта смены двух 3D изображений отдельной проблемой является наличие у дифракционных решеток не только плюс первого порядка дифракции, в котором формируется эффект, но и наличие нулевого, минус первого, второго и минус второго порядков. Отметим сразу, что нулевой и все минусовые порядки влияния на качество формируемых 3D-изображений не оказывают, если не принимать во внимание потерю части энергии света в эти порядки. Серьезной проблемой является возможное возникновение артефактов на втором 3D изображении (розе) от второго порядка первого 3D-изображения (ключа). Для того, чтобы решить эту проблему для формирования изображения розы использовались бинарные дифракционные решетки, а для формирования ключа были использованы многоградационные дифракционные решетки что и позволило получить визуально чистый эффект смены двух 3D изображений. Проблема формирования многоградационных дифракционных решеток (blazed gratings) с высокой точностью может быть решена с помощью электронно-лучевой технологии [134]. Для этой цели используется и рентгеновская литография [135].

#### 6.4. Выводы

1. В диссертации впервые предложен новый защитный признак для визуального контроля – эффект смены двух 3D изображений при наклоне оптического элемента. Для обеспечения чистого визуального эффекта используются как бинарные, так и многоградационные микроструктуры.

2. В диссертации предложен новый эффективный метод расчета микроструктуры нанооптического элемента, формирующего эффект смены двух 3D-изображений [A10]. Расчет микрорельефа производится в два этапа. Область нанооптического элемента разбивается на элементарные области. На первом этапе алгоритма, используя кадры 3D-изображений, рассчитываются диаграммы направленности в каждой элементарной области. На втором этапе, используя полученные диаграммы направленности, рассчитываются параметры дифракционных решеток, расположенных в элементарных областях. Таким образом, обратная задача синтеза решается в модели геометрической оптики в параметрическом представлении. Количество параметров модели составляет порядка  $10^7$ . Несмотря на огромное количество параметров,

разработанные алгоритмы настолько эффективны, что позволяют произвести расчет микрорельефа нанооптического элемента на обычной ПЭВМ за время порядка 10-15 минут.

3. Впервые с использованием электронно-лучевой литографии с разрешением 0,1 микрона был изготовлен нанооптический элемент, формирующий эффект смены двух 3D изображений. Точность формирования микрорельефа по глубине составляет порядка 10-20 нанометров. Электронно-лучевая технология является наукоёмкой и не имеет широкого распространения. Разработанный новый защитный элемент надёжно защищён от подделок и допускает массовое тиражирование.

4. Нанооптический элемент был изготовлен с использованием стандартного оборудования для тиражирования рельефных голограмм. Высокое качество полученных изображений демонстрирует, что разработанные нанооптические элементы могут быть тиражированы, что обеспечивает их низкую цену при массовом изготовлении.

5. Разработанные методы расчета фазовых функций нанооптических элементов для формирования 3D изображений могут быть использованы и в разрабатываемых в настоящее время 3D дисплеях и 3D проекторах.

## **Глава 7. Разработка методов синтеза нанооптических элементов для формирования 3D изображений на цилиндрической поверхности**

*В данной главе используются материалы, опубликованные в статьях [A4], [A12].*

### **7.1. Постановка обратной задачи и методы расчёта микрорельефа нанооптического элемента на цилиндрической поверхности для формирования 3D изображения**

Задаче синтеза нанооптических элементов на неплоских поверхностях (цилиндрической, сферической, конической) посвящено небольшое количество публикаций, в большей части из которых обсуждаются вопросы аналоговой записи голограмм на цилиндрической поверхности [136,137,138].

Что касается возможности изготовления компьютерно-синтезированных голограмм на неплоских поверхностях, то количество таких публикаций крайне невелико. Трудности, которые возникают при расчете микрорельефа нанооптического элемента связаны с тем, что шаг сетки на поверхности оптического элемента должен быть меньше длины волны, что даже для небольших оптических элементов приводит к огромному количеству неизвестных в обратной задаче, которое может составлять порядка  $10^{10}$  даже для сравнительно небольшого оптического элемента. Обратная задача усугубляется тем, что как правило, известна лишь амплитуда формируемых 2D или 3D изображений. Как результат, в большинстве публикаций предложенные методы ограничиваются модельными расчетами, которые авторы вынуждены проводить для длин волн, которые далеки от оптического диапазона [139, 140]. В обеих публикациях расчеты фазовой функции оптического элемента проведены для длины волны  $L=180$  микрон.

В отличие от перечисленных работ, в настоящей диссертации разработаны методы расчета нанооптических элементов на цилиндрической поверхности для оптического диапазона. Обратная задача расчета микрорельефа, формирующего 3D-изображение, решается в конечно-параметрическом представлении. Нанооптический элемент разбит на элементарные области, размер которых не превышает 50 микрон. Каждая элементарная область состоит из дифракционных решеток, размером не более 10 микрон. Таким образом, каждая область задается конечным числом параметров, определяющих период и ориентацию дифракционных решеток. Параметрическое представление позволяет снизить число неизвестных в обратной задаче в тысячи раз. Тем не менее, количество параметров в нелинейной обратной задаче составляет порядка  $10^7$ , при этом обратная задача является нелинейной.

В диссертации предложен эффективный метод расчета фазовой функции отражающего нанооптического элемента в указанной выше параметрической модели [A4]. Обратная задача

решается в два этапа. На первом этапе, используя 2D-кадры, полученные из 3D-модели объекта, рассчитывается интенсивность дифракционных лучей от элементарной области в первом порядке дифракции в направлении на точки наблюдения. На втором этапе, используя стандартное представление из теории дифракционных решеток, рассчитываются периоды и ориентации фрагментов дифракционных решеток каждой из элементарных областей.

Для формирования 3D изображения высокого качества необходима технология синтеза микрорельефа нанооптических элементов высокого разрешения. Особенностью электронно-лучевой технологии является то, что она позволяет формировать микрорельеф только на плоском носителе. В настоящей главе предлагаются методы расчета и изготовления плоского рельефного оптического элемента, который будучи помещен на цилиндрическую поверхность заданного радиуса, формирует видимое наблюдателю 3D изображение при освещении нанооптического элемента белым светом.

Обратная задача синтеза нанооптического элемента на цилиндрической поверхности состоит в расчете фазовой функции. При освещении нанооптического элемента белым светом наблюдатель должен видеть 3D изображение. 3D изображение формируется с помощью набора 2D-кадров, полученных с разных точек наблюдения. Схема наблюдения представлена на рисунке 7.1.

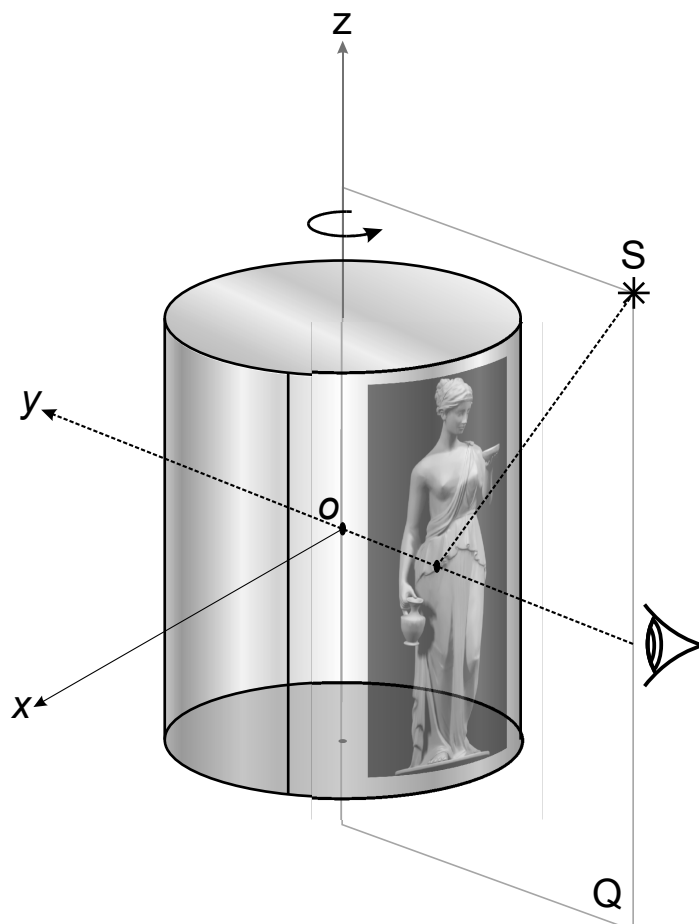


Рисунок 7.1. Схема расположения источника и наблюдателя.



Ось  $Oz$  декартовой системы координат  $Oxyz$  которой совпадает с осью цилиндра. Источник  $S$  и наблюдатель находятся в одной плоскости  $Q$ . Плоскость  $Q$  проходит через ось цилиндра. Наиболее просто схему наблюдения можно реализовать при неподвижном наблюдателе и источнике света, поворачивая нанооптический элемент на цилиндре вокруг оси  $Oz$ . Свет от источника  $S$  падает на нанооптический элемент на цилиндре. Формируемое нанооптическим элементом изображение наблюдатель видит в первом порядке дифракции. Трехмерное изображение получается за счет формирования разных изображений для левого и правого глаза наблюдателя. Наблюдатель видит 3D изображение с круговым обзором на 360 градусов.

Задачу синтеза нанооптических элементов на цилиндрической поверхности будем рассматривать, как задачу расчета и изготовления плоского нанооптического элемента, который, будучи помещенным на цилиндрическую поверхность, будет формировать заданное 3D изображение. Для формирования 3D изображений будем использовать набор 2D-кадров 3D-объекта, снятых с разных ракурсов. Каждый кадр представляет собой проекцию 3D-объекта на цилиндрическую поверхность в направлении точки наблюдения. Обозначим кадры через  $K_n$ , где  $n=1\dots N$ . На рисунке 7.2 приведена схема расположения точек наблюдения кадров 3D-изображения.

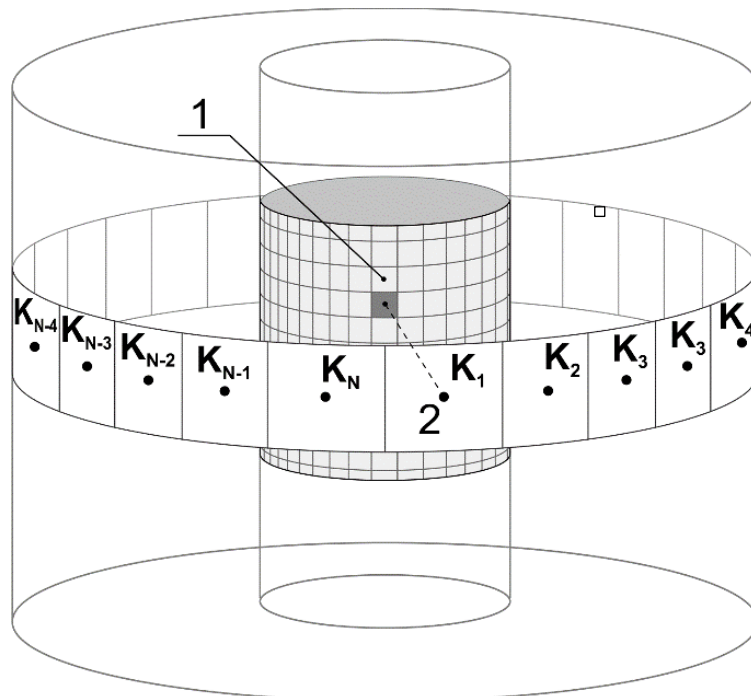


Рисунок 7.2. Схема расположения точек наблюдения кадров 3D изображения.

На рисунке 7.2 цилиндрическая поверхность нанооптического элемента разбита на элементарные области (1). Точки наблюдения кадров  $K_n$  находятся на цилиндрической поверхности, обозначенной цифрой 2. Углы наблюдения  $K_n$  и  $K_{n+1}$  кадров отличаются на  $2\pi/N$ . Размер элементарной области не превышает 50 микрон. Каждая элементарная область видна наблюдателю как яркая или темная точка.

На рисунке 7.3(а) приведена развертка на плоскость цилиндрической поверхности нанооптического элемента, разбитой на элементарные области  $G_{ij}$ ,  $i=1, \dots, I$ ,  $j=1, \dots, J$ . Каждая элементарная область разбита на подобласти, как это показано на рисунке 7.3(б), обозначенные цифрой 3. Подобласти заполняются дифракционными решетками. Дифракционные решетки отличаются периодами и ориентацией. Пустое место, не заполненное решетками, представляет собой участки с плоским микрорельефом и позволяет регулировать интенсивность видимого изображения.

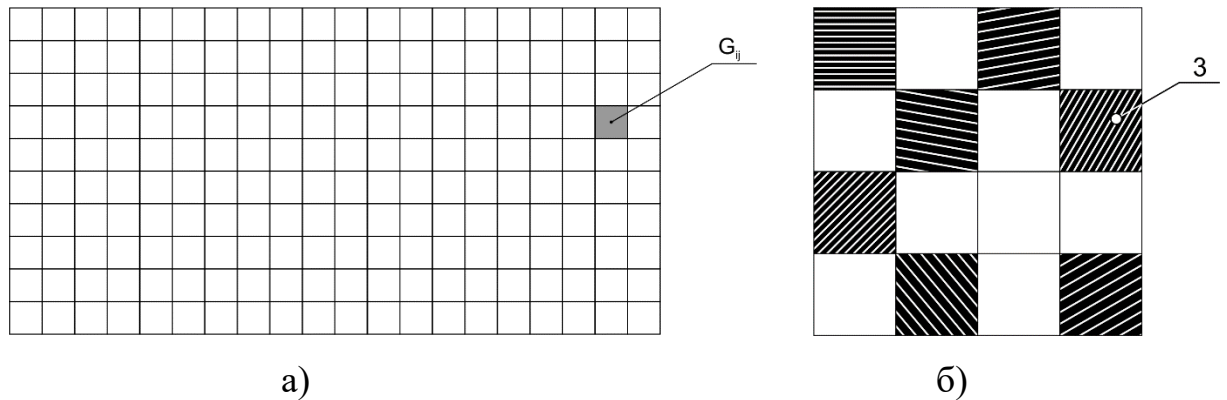


Рисунок 7.3. Структура нанооптического элемента: (а) разбиение нанооптического элемента на элементарные области, (б) схема заполнения элементарных областей дифракционными решетками.

На рисунке 7.4 приведена схема формирования дифрагированных лучей от элементарной области в направлении наблюдателя. Цифрой 4 обозначена развертка на плоскость 2D-кадров 3D-изображения. Восстановим перпендикуляр из центра выделенной элементарной области. Обозначим центр элементарной площадки  $G_{ij}$  как  $(x_j, y_j)$ . Перпендикуляр пересекает изображение, относящееся к кадру  $K_n$ , в точке  $(x_j, y_j)$ . На рисунке 7.4  $n$  принимает значение от 1 до  $N$ . Яркость изображения в этой точке  $I_n(x_j, y_j)$  определяет яркость элементарной области, видимая наблюдателю из точки наблюдения  $n$ -го кадра. В дифракционной структуре элементарной области достаточно одной подобласти для того, чтобы сформировать в первом порядке дифракции луч с заданной интенсивностью  $I_n(x_j, y_j)$ . Проведем эту процедуру для каждой элементарной области. Каждая область в принципе может принимать участие в формировании всех  $N/2$  кадров изображения.

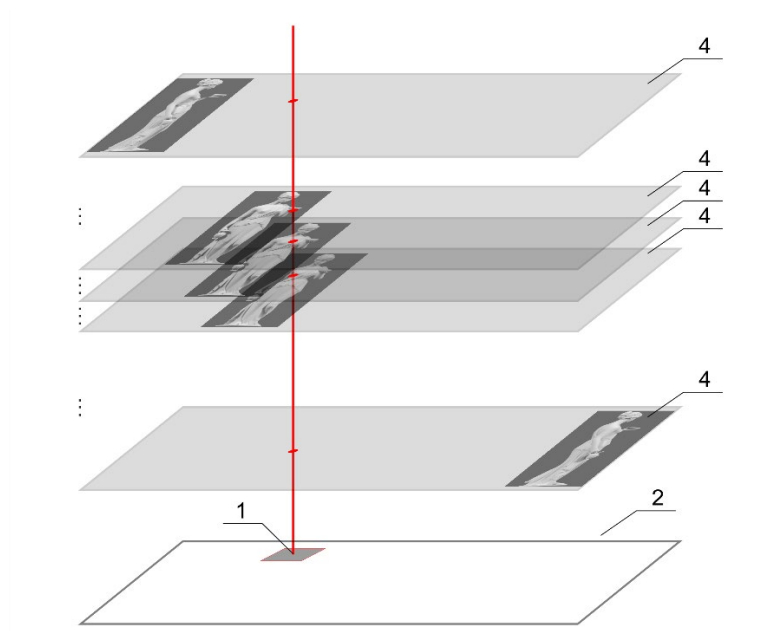


Рисунок 7.4. К расчету интенсивности дифрагированных лучей элементарных областей.

Рассмотрим произвольную элементарную область  $G$  оптического элемента. Поскольку размер области не превышает 50 микрон, будем считать ее плоской.

На рисунке 7.5 представлена схема расположения падающего на элементарную область излучения (волновой вектор  $\vec{k}_1$ ) и дифрагированного от элементарной области луча в направлении на наблюдателя (волновой вектор  $\vec{k}_2$ ). Вектора  $\vec{k}_1$  и  $\vec{k}_2$  имеют модуль, равный  $2\pi/\lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны. Расчеты параметров решеток осуществляются для фиксированной длины волны. При освещении оптического элемента белым светом в качестве  $\lambda$  выбиралась длина волны зеленого света ( $\lambda = 0,545$  микрон).

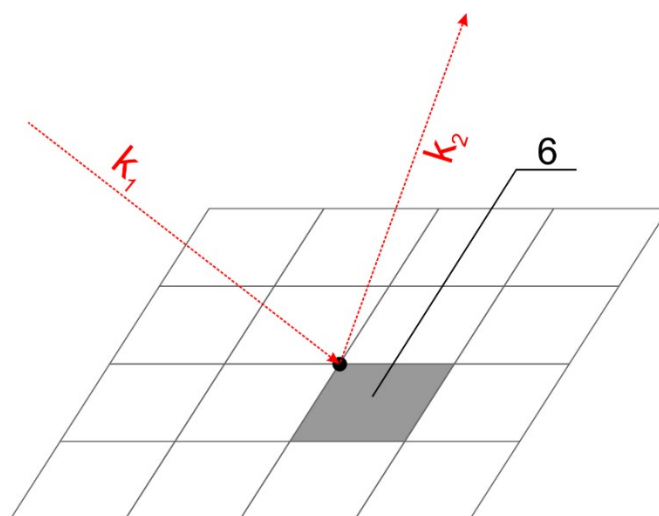


Рисунок 7.5. Расположение векторов  $\vec{k}_1$  и  $\vec{k}_2$ .

Координаты каждой элементарной области на цилиндрической поверхности известны. Координаты источника и координаты точки наблюдения известны, поэтому вычисление векторов  $\vec{k}_1$  и  $\vec{k}_2$  не представляет трудности. Введем вектор  $\vec{D} = \frac{2\pi}{d}\vec{e}_d$ , где  $d$  – период решетки, а  $\vec{e}_d$  – единичный вектор в плоскости оптического элемента перпендикулярный штрихам дифракционной решетки. Известно [27], что

$$\vec{D} = \vec{k}_{G,1} - \vec{k}_{G,2}. \quad (7.1)$$

Здесь  $\vec{k}_{G,1}$  – проекция вектора  $\vec{k}_1$  на плоскость элементарной области  $G$ , а  $\vec{k}_{G,2}$  – проекция на ту же плоскость вектора  $\vec{k}_2$ . Соотношение (7.1) определяет как направление штрихов решетки в подобласти, так и период решетки для заданной длины волны. Таким образом мы можем сформировать дифракционную структуру каждой подобласти. Параметры дифракционных решеток в остальных подобластях рассчитывается аналогично. Пустое место в элементарной области используется для регулировки интенсивности дифрагированных лучей от подобластей. Теоретически каждая элементарная область нанооптического элемента может участвовать в формировании  $N/2$  кадров  $K_n$ . В изготовленном образце нанооптического элемента число кадров, формируемых каждой элементарной областью, не превышало 20.

Особенностью предложенной оптической схемы наблюдения является то, что положение источника света не меняется относительно наблюдателя при переходе от одного угла наблюдения к другому. Поэтому, достаточно рассчитать параметры дифракционных решеток, формирующих изображение только для одного ракурса. При переходе к следующему углу наблюдения параметры формирующего новое изображение решеток остаются прежними, меняется только их положение на поверхности нанооптического элемента, а именно они сдвигаются по горизонтали на расстояние  $2\pi R/N$ .

## **7.2. Пример реализации нанооптического элемента для формирования 3D изображения на цилиндрической поверхности**

Для демонстрации эффективности предложенных технологий был изготовлен нанооптический элемент на цилиндрической поверхности, формирующий 3D изображение при освещении элемента белым светом с обзором на 360 градусов.

В диссертации нанооптический элемент является отражающим, источник и наблюдатель находятся с внешней стороны цилиндра. Описанный в параграфе 2 главы 7 метод расчета микрорельефа нанооптического элемента на цилиндрической поверхности для формирования 3D изображения, позволил получить параметры дифракционных решеток в каждой из

элементарных областей. С помощью стандартной программы 3D-моделирования был получен набор двумерных кадров  $K_n$  с различных точек наблюдения. Количество кадров для формирования 3D изображения – 240. Размеры цилиндра:  $r=15\text{ mm}$ , высота  $h=31\text{ mm}$ . Угловое расстояние между соседними точками наблюдения -1.5 градуса. Микрорельеф нанооптического элемента рассчитан для освещения дневным светом, поэтому при расчетах использовалась длина волны 0,545 микрон.

Для изготовления микрорельефа плоского нанооптического элемента использована электронно-лучевая технология с разрешением 0.1 микрона. Особенностью электронно-лучевой технологии является то, что микрорельеф можно формировать только на плоской поверхности. Глубина микрорельефа нанооптического элемента составляет порядка 0.2 микрона. На рисунке 7.6 приведен фрагмент рассчитанного микрорельефа.

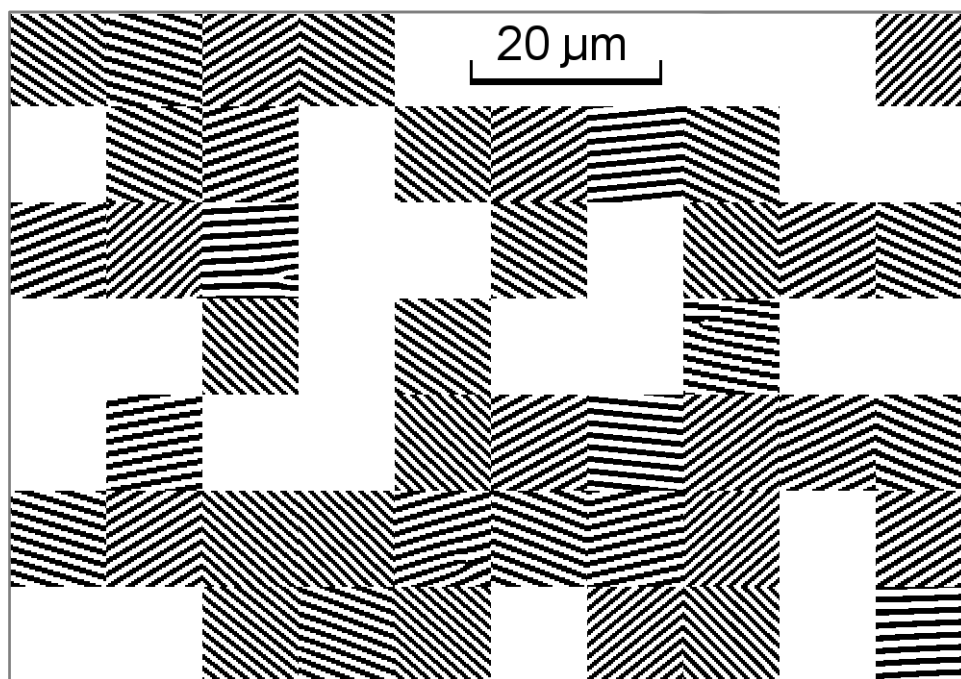


Рисунок 7.6. Фрагмент рассчитанного микрорельефа нанооптического элемента.

С помощью гальванопластики была изготовлена гальваническая копия микрорельефа – плоская мастер матрица толщиной порядка 200 микрон. Такая матрица может быть использована для массового тиражирования [2]. Изготовленный с помощью мастер-матрицы на полимерном носителе нанооптические элементы, будучи помещенными на цилиндрическую поверхность, при освещении точечным источником формируют 3D изображение с обзором на 360 градусов. Для демонстрации эффективности предложенной технологии с мастер-матрицы была изготовлена тонкая копия толщиной порядка 40 микрон. Тонкую копию нанооптического элемента можно поместить как на плоскую поверхность, так и на цилиндрическую. При

освещении нанооптического элемента белым светом, на плоской поверхности формируется изображение, мало напоминающее 3D-объект (рисунок 7.7).

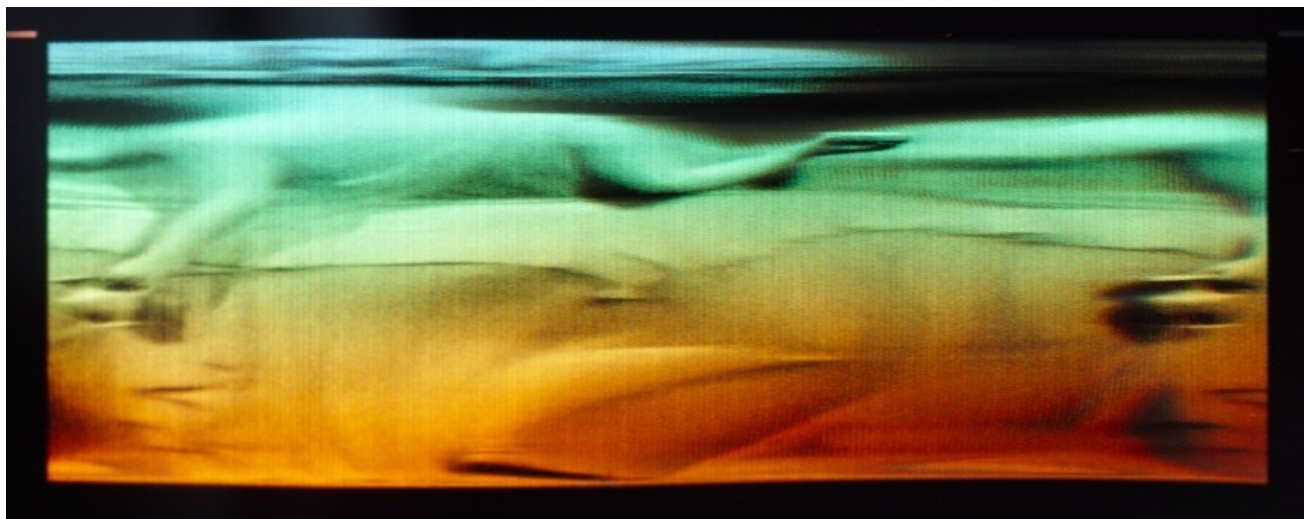


Рисунок 7.7. Изображение, формируемое нанооптическим элементом, расположенном на плоском носителе.

При освещении нанооптического элемента на цилиндрической поверхности белым светом, формируется нужное 3D-изображение. На рисунке 7.8 представлены фотографии изображения, снятые с реального оптического элемента на цилиндрической поверхности.

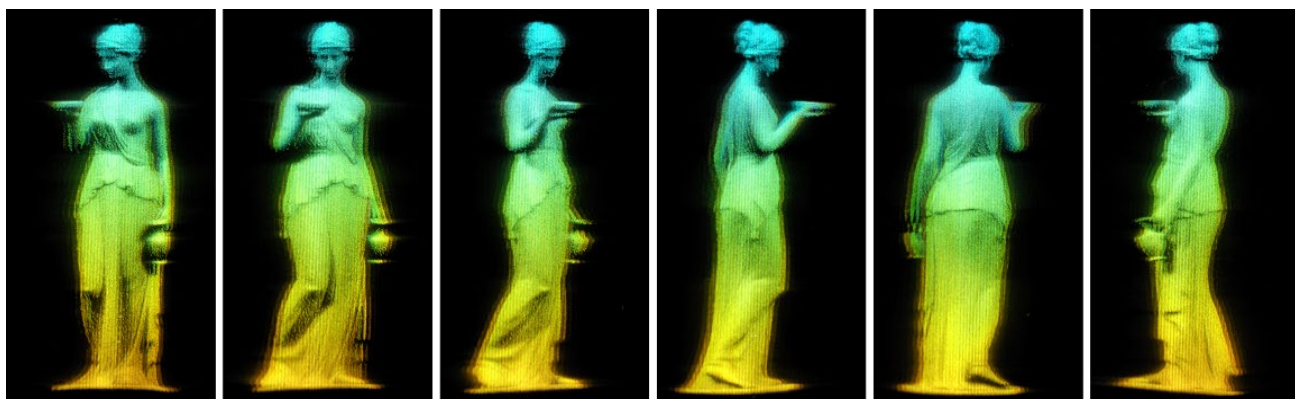


Рисунок 7.8. Фотографии реального нанооптического элемента на цилиндрической поверхности.

Сформированное 3D изображение на цилиндре наблюдается в углах 360 градусов.

### 7.3. Выводы

1. В настоящей диссертации предложен эффективный метод расчета плоского нанооптического элемента, который будучи помещен на цилиндрическую поверхность, формирует 3D-изображения с обзором на 360° [A12]. Оптический элемент разбит на

элементарные области, размером менее 50 микрон. Элементарные области заполнены дифракционными решетками, размером не более 10 микрон. Минимальный период дифракционной решетки составил порядка 0.58 микрона. Расчет микрорельефа осуществляется в конечно-параметрической модели в два этапа. На первом этапе в модели геометрической оптики рассчитываются диаграммы направленности в каждой элементарной площадке. Диаграмма направленности состоит из  $L_n$ ,  $n=1, \dots, N$  лучей. Интенсивность каждого луча  $L_n$  определяется с использованием кадров 3D-изображения  $K_n$ . Разработанные алгоритмы являются эффективными. Несмотря на огромное количество параметров, число которых составляет порядка  $10^7$ , расчет микрорельефа оптического элемента вполне осуществим на ПЭВМ за время порядка 10 минут.

2. Впервые был изготовлен компьютерно-синтезированный нанооптический элемент, формирующий 3D-изображение на цилиндрической поверхности. Для изготовления элемента использовалась электронно-лучевая технология с разрешением порядка 0,1 микрона. Точность формирования микрорельефа - порядка 20 нм.

3. Разработанные нанооптические элементы являются плоскими. Трехмерное изображение получается только после помещения элемента на цилиндрическую поверхность. Для изготовления разработанных нанооптических элементов можно использовать обычную линейку устройств для массового производства рельефных голограмм. Таким образом, разработанные элементы тиражируются, что определяет их невысокую стоимость.

4. Разработанные нанооптические элементы могут быть использованы для защиты брендов (например, алкогольной продукции). Чем меньше радиус цилиндра, тем меньше минимальный период дифракционных решеток. Используемая для синтеза элементов электронно-лучевая технология является дорогостоящей, мало распространенной и наукоемкой, что надежно защищает нанооптические элементы от подделки.

5. Аналогичная технология может быть использована для синтеза нанооптических элементов на конических поверхностях.

6. Разработанные методы расчета фазовых функций нанооптических элементов для формирования 3D изображений могут быть использованы и в разрабатываемых в настоящее время 3D дисплеях и 3D проекторах.

## Глава 8. Разработка нанооптических элементов для визуального и автоматизированного контроля с помощью смартфона

В данной главе используются материалы, опубликованные в статьях [A5], [A7], [A9], [A14].

### 8.1. Постановка обратной задачи синтеза и методы её решения

В настоящее время получили широкое распространение различные информационные технологии, основанные на использовании мобильных устройств. С их помощью считываются и контролируются линейные штрих-коды, двумерные бар-коды. Технологии распознавания меток являются частью технологии дополненной реальности [141], позволяющей извлекать информацию об объектах по их фотографии, сделанной с мобильного устройства, и отображать её на экране устройства вместе с объектом. Уже запущена AR-система “Amazon Flow”, использующая информацию с бар-кодов на различных товарах для отображения информации о них. В диссертации рассматриваются технологии синтеза и распознавания бинарных нанооптических элементов, которые могут применяться в AR-системах [A7,A9,A14]. С помощью таких меток можно защищать банкноты, паспорта, пластиковые карты, документы и т.п.

Нанооптический защитный элемент представляет собой плоский фазовый элемент, микрорельеф которого при его освещении белым светом формирует визуальное изображение. На рисунке 8.1 приведена схема регистрации изображения защитного элемента с помощью смартфона.

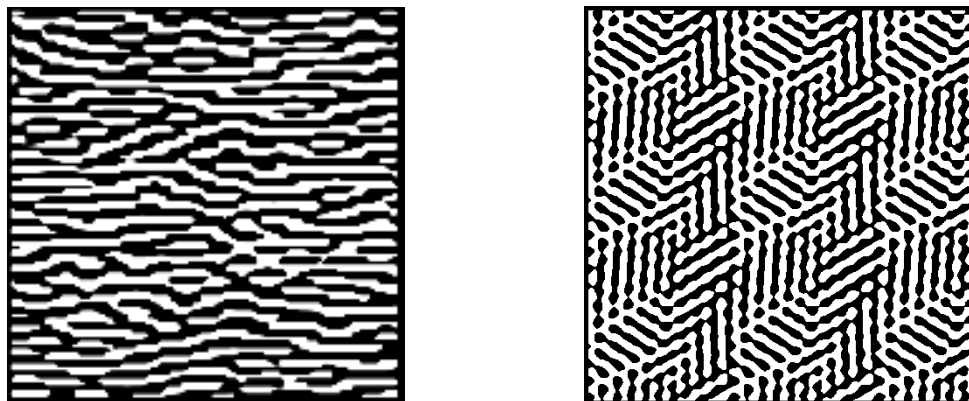


Рисунок 8.1. Регистрация изображений с помощью смартфона (с руки).

Защитная метка фотографируется с помощью смартфона. Полученное изображение интерпретируется как дифракционный оптический элемент, который формирует изображение, используемое для идентификации защитной метки.



На рисунке 8.2 приведены фрагменты примеры изображений защитных меток, которые можно использовать для идентификации с помощью смартфона. Бинарные изображения на рисунках 8.2(а) и 8.2(б) представляют собой некоторую текстуру, содержащую информацию, используемую для идентификации подлинности защитной метки.



(а)

(б)

Рисунок 8.2. Фрагменты бинарных киноформ.

Центральным моментом является использование для процедуры идентификации изображений защитных меток, изготовленных на основе бинарных киноформ [А5]. Киноформ как оптический элемент широко используется в современной оптике [142,143,144,145,146].

На рисунке 8.3 приведена схема формирования 2D изображения плоским оптическим элементом — киноформом. Оптический элемент расположен в плоскости  $z=0$ . Декартовы координаты в плоскости оптического элемента обозначим как  $(\xi, \eta)$ , декартовы координаты в фокальной плоскости,  $z=f$  параллельной плоскости элемента —  $(x, y)$ . Область  $G$  — область оптического элемента,  $f$  — расстояние до фокальной плоскости. Схема приведена для плоских оптических элементов, работающих на отражение. Схема на прохождение отличается только тем, что лазерное излучение падает на оптический элемент с другой стороны.

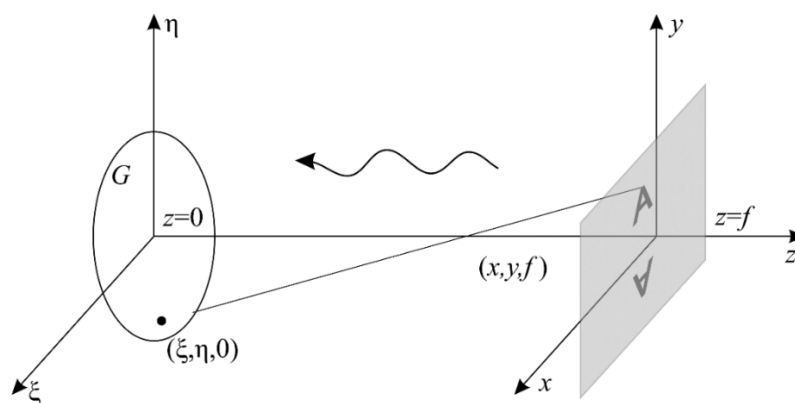


Рисунок 8.3. Схема формирования изображений на отражение.

Киноформ как дифракционный оптический элемент, формирующий заданное изображение в фокальной плоскости  $z=f$ , был впервые предложен в работе Лизема [46]. Различают многоградационные киноформы и бинарные киноформы. На рисунке 8.4(а) проиллюстрирована микроструктура многоградационного киноформа. Глубина микрорельефа в точке  $(x,y)$  на рисунке 8.4 пропорциональна потемнению в этой точке. Глубина микрорельефа многоградационного киноформа для видимого диапазона длин волн не превышает 0,3 мкм. Рисунок 8.4(б) иллюстрирует структуру бинарного киноформа, формирующего то же самое изображение.

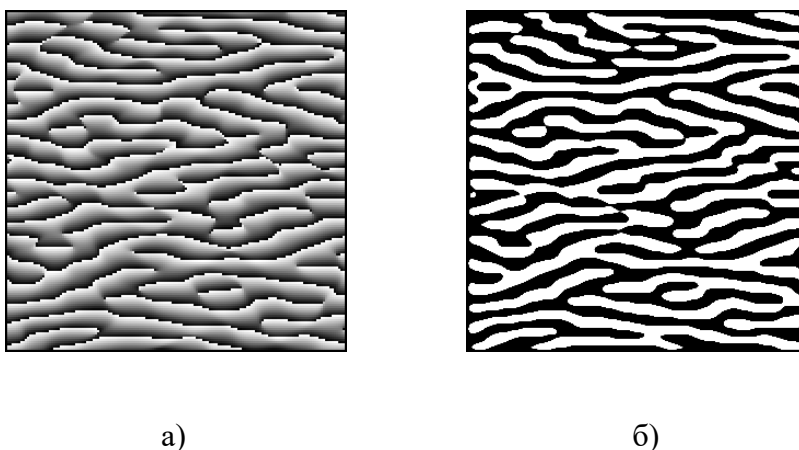


Рисунок 8.4. Фрагменты микрорельефа киноформа: а) многоградационного, б) бинарного.

На рисунке 8.5(а) приведено изображение, формируемое многоградационным киноформом. На рисунке 8.5(б) приведено изображение, формируемое бинарным киноформом. Точка в середине изображения на рисунке 8.5(б) соответствует нулевому порядку дифракции. Изображение, формируемое бинарным киноформом, всегда симметрично относительно нулевого порядка. Как видно, изображение, формируемое многоградационным киноформом, таким не является. В главе 8 диссертации обсуждаются возможности идентификации защитных меток, изготовленных на базе бинарных киноформов.



Рисунок 8.5. Изображения, формируемые киноформом: (а) многоградационным, (б) бинарным.

Каждый киноформ (многоградационный или бинарный) задаётся своей фазовой функцией  $\varphi(\xi, \eta)$ . Плоский фазовый оптический элемент осуществляет преобразование волновой функции падающего излучения так, что волновая функция после оптического элемента  $u(\xi, \eta, 0+0)$  и волновая функция до оптического элемента  $u(\xi, \eta, 0-0)$  связаны соотношением:

$$u(\xi, \eta, 0+0) = u(\xi, \eta, 0-0) \cdot e^{ik\varphi(\xi, \eta)}. \quad (8.1)$$

Здесь  $k=2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  — длина волны света. Формируемое оптическим элементом изображение  $F(x, y)$  и фазовая функция  $\varphi(\xi, \eta)$  связаны соотношением:

$$\left| \gamma \cdot \iint_G u(\xi, \eta, 0-0) \cdot \exp\left(ik \frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{2f}\right) e^{ik\varphi(\xi, \eta)} d\xi d\eta \right| = F(x, y). \quad (8.2)$$

Соотношение (8.2) позволяет при заданной фазовой функции  $\varphi(\xi, \eta)$  рассчитать формируемое в фокальной плоскости изображение  $F(x, y)$ . Зная фазовую функцию, можно рассчитать изображение, формируемое оптическим элементом.

Задача расчёта изображения  $F(x, y)$  является прямой задачей. Если задано  $F(x, y)$  и требуется найти фазовую функцию  $\varphi(\xi, \eta)$ , такая задача называется обратной. Методы решения прямой и обратной задачи подробно описаны в главе 1.

В предложенном методе контроля подлинности защитных меток используется смартфон. Необходимо решить две задачи. Первая из них решается на этапе синтеза нанооптического элемента. Задавая изображение  $F(x, y)$  в фокальной плоскости, необходимо рассчитать фазовую функцию плоского оптического элемента. Для этого решается обратная задача определения фазовой функции  $\varphi(\xi, \eta)$  по заданному изображению  $F(x, y)$ . Итерационные методы решения этой задачи описаны в главе 1 диссертации. Функция  $\varphi(\xi, \eta)$  однозначно определяет микрорельеф нанооптического элемента. Для многоградационного киноформа при нормальном падении излучения на плоский оптический элемент глубина микрорельефа  $h(\xi, \eta)$  в точке  $(\xi, \eta)$  равна  $0.5 \cdot \varphi(\xi, \eta)$ . Для бинарного киноформа фазовая функция также определяет глубину микрорельефа, которая принимает всего два значения — 0 и  $H$ . Для видимого света  $H < 0.4$  мкм. Глубина микрорельефа бинарного киноформа  $h(\xi, \eta)$  принимает значение, равное  $H$ , только для тех точек  $(\xi, \eta)$ , для которых выполнено соотношение  $0 < k\varphi(\xi, \eta) < \pi$ .

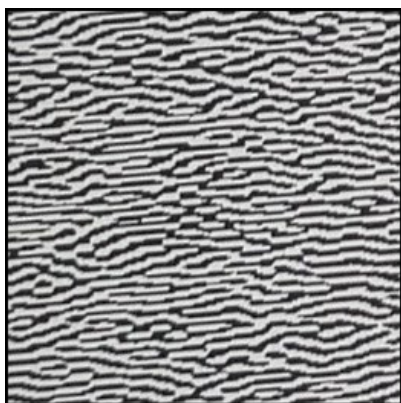
Вторая задача состоит в идентификации подлинности защитной метки. Изготовленный нанооптический элемент фотографируется смартфоном. Полученное изображение интерпретируется как дифракционный оптический элемент — киноформ. Рассчитывается изображение  $F(x, y)$ , формируемое киноформом в фокальной плоскости, то есть решается прямая задача. Именно это изображение участвует в процессе идентификации подлинности. Таким образом, на этапе идентификации решается только прямая задача, решение которой на

процессорах современных смартфонов занимает сотые доли секунды и может осуществляться в реальном времени в системе дополненной реальности.

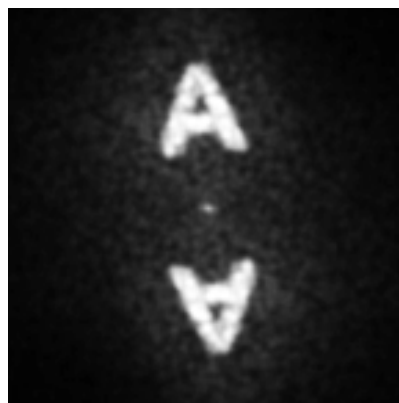
Нетрудно видеть, что для обычного пользователя изображение микроструктуры киноформа (рисунок 8.4) совсем не напоминает формируемое киноформом изображение  $F(x,y)$  на рисунке 8.5, используемое смартфоном для идентификации. Можно считать, что осуществляется процесс идентификации изображения, которое зашифровано указанным выше способом.

На рисунке 8.6(а) представлено реальное сфотографированное смартфоном изображение киноформа. С помощью установки электронно-лучевого экспонирования ZBA-21 был изготовлен нанооптический элемент размером  $32 \times 40$  мм. Площадь киноформа для автоматизированного контроля на оптическом элементе составляет порядка  $4 \text{ см}^2$ . Оптический элемент изготовлен с разрешением  $0.1$  мкм. Глубина микрорельефа бинарного киноформа составляет  $0.3$  мкм.

На рисунке 8.6(б) представлено восстановленное изображение  $F(x,y)$ , формируемое фазовым оптическим элементом, представленным на рисунке 8.6(а).



а)



б)

Рисунок 8.6. (а) Фотография фрагмента нанооптического элемента и (б) восстановленное изображение  $F(x,y)$ .

Расчитанное смартфоном изображение можно отображать на его экране в системе дополненной реальности. Такие изображения могут представлять собой, например, логотип и легко идентифицируются пользователем визуально.

Изображение, формируемое киноформом, уменьшается обратно пропорционально расстоянию до объекта, как и изображение самого объекта. Чем меньше расстояние до объекта и выше детализация изображения, тем более подробная информация может быть извлечена. Кроме этого, как будет показано далее, восстановленное изображение устойчиво к повреждению или перекрытию части поверхности киноформа другими предметами. Это свойство киноформа делает его перспективным для использования в системах дополненной реальности.

Представляет интерес автоматическая идентификация защитных меток, осуществляемая с помощью смартфона. Если рассчитанное смартфоном изображение состоит из небольшого количества цифр или букв, а в памяти смартфона зашит эталон, то процедура идентификации изображения  $F(x,y)$  сводится к оптическому распознаванию символов. В настоящее время эта технология широко распространена и используется для сканирования документов, в том числе с помощью смартфонов [147,148]. Одной из проблем, с которой приходится сталкиваться в задачах идентификации символов, является то, что процедура идентификации должна быть инвариантна относительно поворота и смещения символов. Существует большой набор алгоритмов и программное обеспечение как для персональных компьютеров, так и для смартфонов, которое успешно решают эту задачу. В основе большинства таких алгоритмов лежит сжатие изображения, заключающееся в выделении на изображении символа небольшого числа ключевых точек, которые затем используются в процедуре идентификации [149]. Такие алгоритмы получили название структурно-логические.

Наиболее просто задача идентификации решается в случае, если идентифицируемое изображение  $F(x,y)$  представляет собой набор точек. Хорошо известно, что для этого случая существуют инвариантные относительно поворота и смещения признаки, к которым относятся линейные или угловые расстояния между точками. На рисунке 8.7(а) приведено увеличенное изображение киноформа, формирующего в фокальной плоскости изображение  $F(x,y)$ , состоящее из 6 точек, расположенных на окружности. Распределение интенсивности изображения  $F(x,y)$  приведено на рисунке 8.7(б). В этом случае процедура идентификации является предельно простой: в качестве признака для инвариантной относительно поворота идентификации используются угловые расстояния между яркими точками изображения  $F(x,y)$ .

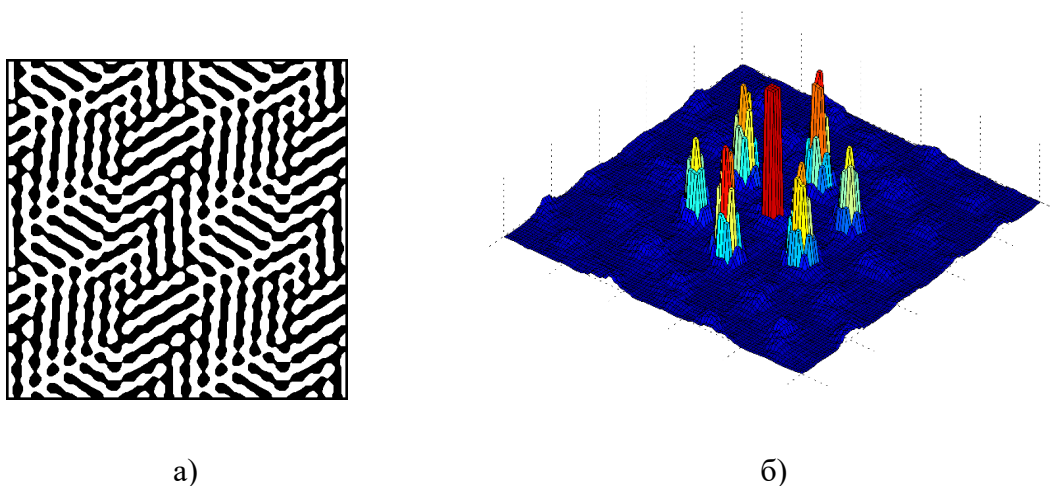


Рисунок 8.7. Фрагмент киноформа (а) и формируемое им изображение (б) для автоматизированного контроля.

На рисунке 8.8(а) приведено реальное изображение, сфотографированное смартфоном с киноформа, изготовленного с помощью электроннолучевой технологии. На рисунке 8.8(б)

приведено распределение интенсивности изображения  $F(x,y)$ , формируемого фазовым оптическим элементом, представленным на рисунке 8.8(а). Изображение на рисунке 8.8(б) вполне пригодно для автоматизированного контроля подлинности с помощью смартфона.

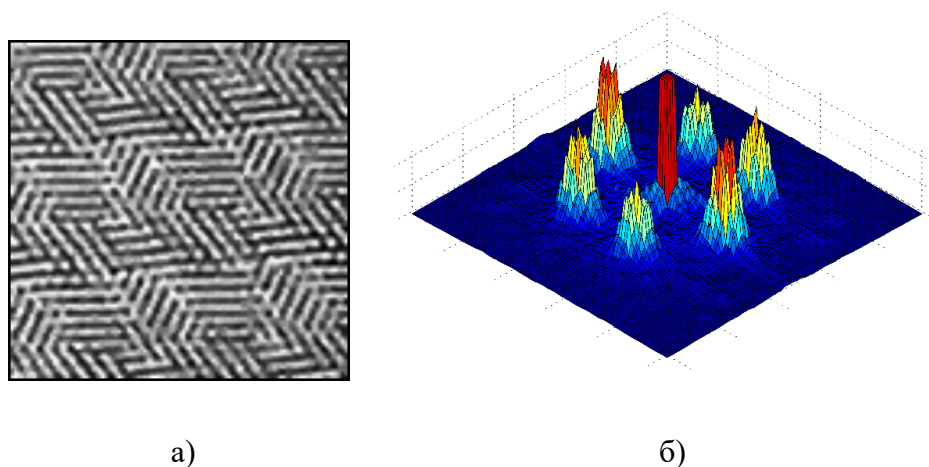


Рисунок 8.8. Изображение для автоматизированного контроля, сформированное процессором смартфона (б) на основе сфотографированного фрагмента реального киноформа (а).

Киноформ как плоский оптический элемент обладает одним очень важным свойством – каждый фрагмент киноформа формирует всё изображение. Как следствие, даже повреждение значительной части микрорельефа плоского фазового оптического элемента не очень значительно влияет на формируемое изображение.

Проиллюстрируем это свойство рассматриваемых оптических элементов на примере киноформа, формирующего изображение, представленное на рисунке 8.5. На рисунке 8.9(а) приведено сфотографированное смартфоном изображение киноформа, в котором 50% микрорельефа утрачено. На рисунке 8.9(б) представлено изображение, формируемое этим киноформом.

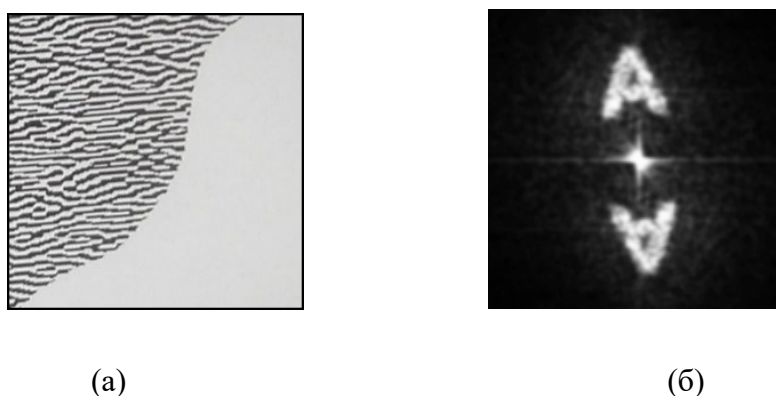


Рисунок 8.9. Изображение киноформа при 50% утраченном микрорельефе (а) и формируемое им изображение (б).

Как видно из рисунка, качество изображения ухудшается незначительно, заметно лишь увеличение интенсивности в нулевом порядке. Несмотря на потерю большой площади киноформа, восстановленное изображение буквы «А» вполне пригодно для визуальной идентификации с помощью смартфона.

Аналогичная ситуация имеет место и в случае, когда изображение  $F(x,y)$  представляет собой набор из 6 ярких точек. Это изображение может быть использовано для автоматизированного контроля.

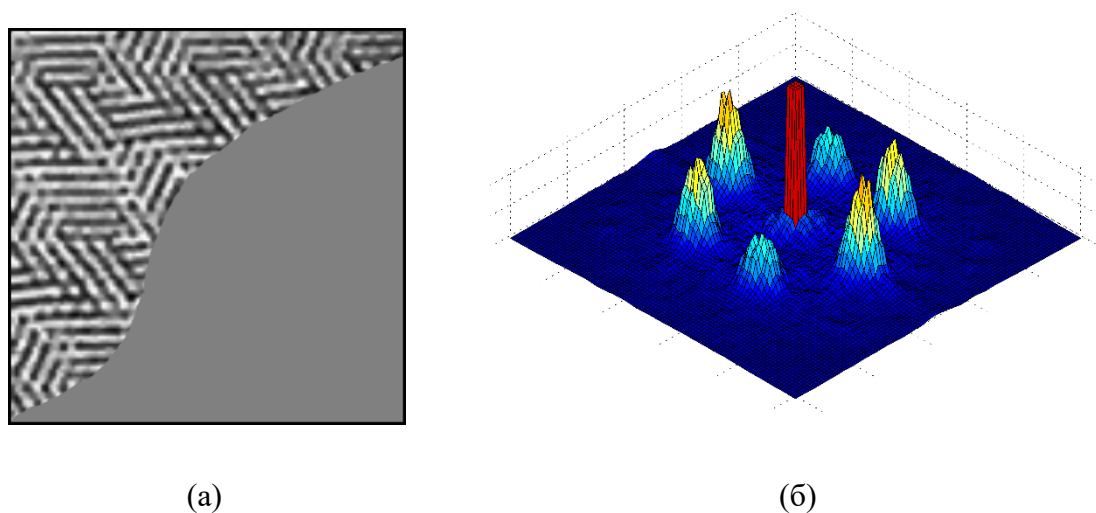


Рисунок 8.10. Изображение киноформа при 50% утраченном микрорельефе (а) и формируемое им изображение для автоматизированного контроля (б).

На рисунке 8.10(а) приведено реальное изображение сфотографированного смартфоном киноформа для автоматизированного контроля, в котором 50% изображения утрачено. На рисунке 8.10(б) приведено распределение интенсивности изображения  $F(x,y)$ , формируемого этим киноформом. Многочисленные тесты показали, что формируемое изображение вполне пригодно для автоматического контроля подлинности с помощью смартфона.

Изображение киноформа, считываемое смартфоном, вообще говоря, не является бинарным. В настоящее время существуют сканеры высокого разрешения, с помощью которых можно пытаться скопировать изображение киноформа, если характерные размеры зон достаточно велики. Важным элементом защиты от подделки является то, что нанооптические элементы могут включать в себя защитные признаки, которые невозможно скопировать с помощью распространённых технологий. В качестве таких признаков можно использовать, например, фрагменты дифракционных решёток с периодом 0.4 – 0.5 мкм, размер которых не превосходит 50 мкм. На рисунке 8.11(а) приведена структура такого нанооптического элемента. В микроструктуре нанооптического элемента на рисунке 8.11(а) выделены области размером

менее 30 микрон, заполненные дифракционными решетками. Дифракционные решетки имеют разную ориентацию и периоды.

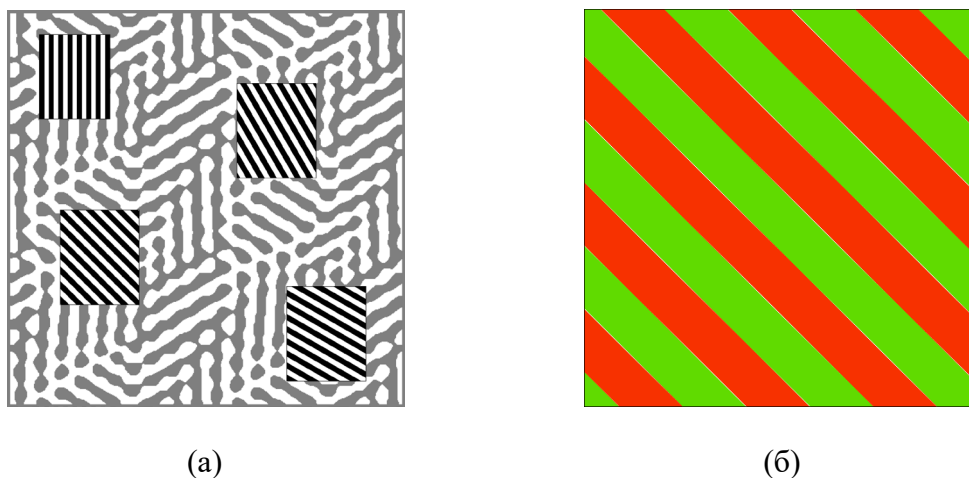


Рисунок 8.11. Структура микрорельефа киноформа для формирования дополнительного цветного изображения при больших углах дифракции (а) и формируемое им изображение (б).

На рисунке 8.11(б) представлено цветное изображение, формируемое дифракционными решётками и видимое при больших углах дифракции – более  $60^\circ$ . Таким образом, при больших углах дифракции наблюдатель видит не изображение киноформа, а другое цветное изображение. Фрагменты дифракционных решёток настолько малы, что разрешения человеческого глаза недостаточно, чтобы увидеть разбиение. Наличие второго изображения при больших углах дифракции является гарантией подлинности оптического защитного элемента. Регистрация изображения защитной метки смартфоном осуществляется при небольших углах, поэтому фрагменты дифракционных решёток на нём не видны.

## 8.2. Автоматизированный контроль подлинности защитных нанооптических элементов с помощью смартфона

В предыдущем параграфе подробно обсуждался вариант автоматизированного контроля нанооптического элемента с помощью смартфона, в котором фотографирование фрагмента текстуры осуществляется в ручном режиме. Этот вариант имеет ряд проблем. Первая из них заключается в том, что при массовом использовании нельзя ориентироваться на высокий профессионализм пользователя в фотографии. Изображение может получиться смазанным, если камера не будет неподвижной во время съемки. Изображение может быть дефокусированным, если не сработала автоматизированная фокусировка. Дополнительной проблемой может быть наличие дополнительных источников света, кроме источника света в смартфоне, на который



ориентированы алгоритмы распознавания. В такой ситуации трудно гарантировать стабильный высокий показатель достоверности контроля.

Для того чтобы обеспечить высокий уровень достоверности контроля можно использовать специальные приставки, которые широко распространены для мобильных телефонов. Этот вариант хорошо подходит для экспертного контроля. Существуют приставки, которые позволяют за счет использования дополнительного объектива в десятки раз увеличить разрешение при съемках с помощью мобильного телефона. На рисунке 8.12 приведена фотография, на которой съемка фрагмента защитного элемента производится с помощью смартфона, вставленного в специальную приставку с объективом.



Рисунок 8.12. Регистрация изображений с помощью смартфона с использованием приставки с увеличением.

На рисунке 8.13 (а,б) приведены два варианта дизайна нанооптического защитного элемента, которые отличаются только разрешением текстуры. Вариант 8.13(а) ориентирован на ручное фотографирование с использованием смартфона. Расстояние от камеры смартфона до защитного элемента составляет порядка 20-40 см. Существующее разрешение современных камер позволяет использовать киноформы с характерным периодом порядка 50~100 микрон.

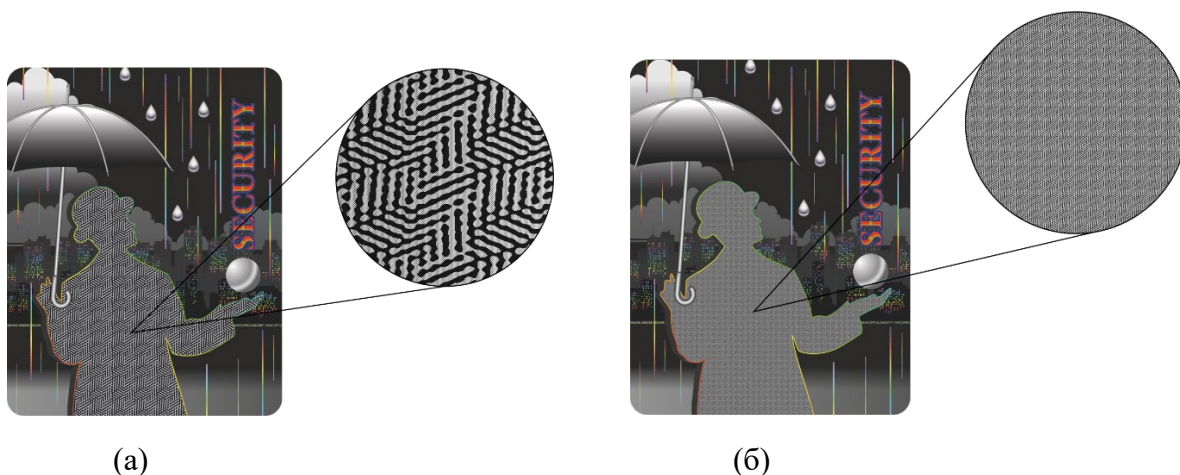


Рисунок 8.13. Дизайн изображения для автоматизированного контроля:

(а) с руки, (б) с помощью приставки с увеличением.

Вариант, представленный на рисунке 8.13(б) ориентирован на фотографирование с использованием приставки. Расстояние от камеры смартфона до защитного элемента составляет порядка 1 см и съемка происходит через дополнительный объектив. Существующее разрешение современных камер позволяет использовать киноформы с характерным периодом порядка 10 микрон. Дополнительное преимущество в этом варианте заключается в том, что при фотографировании полностью блокируются все дополнительные источники света. Фотография осуществляется при фиксированном положении приставки на защитном элементе, что обеспечивает высокое качество изображения. Все это позволяет обеспечить высокую эффективность автоматизированного контроля. К недостаткам этого варианта необходимо отнести использование дополнительного оборудования (приставки). Вариант с приставкой вполне подходит для экспертного контроля.

### 8.3. Выводы

1. В диссертации предложены принципиально новые нанооптические элементы, позволяющие с использованием широко распространённой технологии дополненной реальности контролировать подлинность защитных меток с помощью мобильных устройств. Подробно обсуждаются возможности автоматизированного контроля защитных меток на основе бинарных киноформов [А9,А14].

2. Использование киноформов как оптических элементов для распознавания образов в системах дополненной реальности имеет ряд преимуществ. Восстановленное смартфоном изображение устойчиво к повреждению или перекрытию части поверхности киноформа во время съёмки. Как показали эксперименты, для устойчивого распознавания достаточно даже 30% площади киноформа.

3. Рассмотрены два варианта: ручной съёмки и съёмки с помощью специальной приставки с увеличивающим объективом. Нанооптические элементы для ручной съёмки и съёмки с объективом отличаются характерными параметрами киноформов. Для ручной съёмки, которая производится с расстояния порядка 20-40 см, характерные периоды киноформов составляют порядка 50~100 микрон. Использование дополнительного объектива приставки позволяет существенно увеличить разрешение текстуры и использовать киноформы порядка 10 микрон. Вариант съёмки с приставкой является наиболее подходящим для экспертного контроля.

4. Нанооптические элементы можно изготавливать большими тиражами с помощью стандартного оборудования, что обеспечивает их невысокую цену. Разработанная технология может быть использована для защиты документов, ценных бумаг, товаров народного потребления и т.п.

5. Проведенные исследования показали, что для контроля с помощью смартфона можно использовать только бинарные нанооптические элементы. С точки зрения защищенности от подделки более перспективным для автоматизированного контроля является использование

многоградационных нанооптических элементов. В следующей главе предложены методы автоматизированного контроля многоградационных нанооптических элементов.

## **Глава 9. Разработка многоградационных нанооптических элементов и портативных приборов для автоматизированного контроля**

*В данной главе используются материалы, опубликованные в статьях [A3], [A4], [A22], [A24], A[28], A[29], A[31], A[32].*

### **9.1. Выбор основных технических решений и разработка принципиальной оптической схемы прибора автоматизированного контроля**

Главы 1-7 диссертации посвящены разработке признаков для визуального контроля подлинности защитных элементов. Не менее важной является проблема их автоматизированного контроля. Существуют технологии автоматизированного контроля защитных элементов, основанные на использовании магнитных меток [150], люминесцентных красок, инфракрасных и ультрафиолетовых изображений [151] и т.п. В настоящее время в подавляющем большинстве банкнот используются оптические защитные элементы. Приборов автоматизированного контроля оптических защитных элементов не существует по следующим причинам. Формируемое оптическим элементом изображение зависит от источника света и его положения, от яркости и спектрального состава света. Формируемое оптическим элементом изображение также зависит от того насколько изношенной и измятой является банкнота. Поэтому проблема разработки приборов для автоматизированного контроля оптических элементов на банкнотах является очень сложной. Такие же проблемы возникают и при попытке разработать автоматизированные устройства для контроля подлинности оптических защитных элементов на паспортах и ID картах. Примером таких разработок может служить экспериментальный вариант опто-электронного сканера для проверки подлинности защитных голограмм на документах [152, 153, 154, 155, 156] Этот экспериментальный вариант устройства позволяет регистрировать оптические изображения защитных элементов под разными углами. Процесс идентификации заключается в сравнении зарегистрированных изображений с эталонными. Устройство является стационарным, время идентификации составляет порядка одной минуты. В публикациях указано, что вероятность правильной идентификации составляет 90%. Необходимо отметить, что устройство не проверяет защитные признаки оптического элемента. На самом деле оптические элементы для автоматизированного контроля должны быть очень надежно защищены от подделки.

В диссертации впервые разработаны нанооптические элементы, надежно защищенные от подделок, сформулирован специальный признак для автоматизированного контроля и разработаны портативные приборы автоматизированного контроля весом не более 100 граммов [A22].

Глава 9 посвящена разработке прибора автоматизированного контроля подлинности нанооптических элементов, предназначенных для защиты банкнот, паспортов, документов, акцизных марок и брендов от подделок. Синтез таких элементов базируется на технологии электронно-лучевой литографии, которая позволяет изготавливать нанооптические элементы с асимметричным микрорельефом. Разработан специальный защитный признак для автоматизированного контроля, инвариантный относительно сдвига и поворота оптического элемента.

Прибор автоматизированного контроля является компактным, его вес не превосходит 80 граммов. Процедура контроля инвариантна относительно поворота и сдвига оптического элемента. Прибор обеспечивает надежный контроль подлинности, при этом ошибка неверной верификации подлинности защитного элемента не превышает 0.1%.

Прибор предназначен для эксплуатации в крытых отапливаемых помещениях. Тем не менее прибор может транспортироваться при более широком диапазоне температур и влажности. Проведенные климатические испытания в диапазоне температур от -18 до 40 градусов и влажностью от 50-70% продемонстрировали высокую надежность и эффективность прибора автоматизированного контроля нанооптических защитных элементов.

Разработанный прибор автоматизированного контроля нанооптических элементов является уникальным, прямых его аналогов в мире не существует. Остановимся более подробно на выборе технических решений.

Все основные технические решения защищены патентом «Способ защиты и идентификации оптических защитных меток (варианты) и устройство для его осуществления» [A24].

Возможны два варианта использования источников света: источники белого света либо монохроматические источники. Используемые в проекте оптические элементы представляют собой плоские фазовые оптические элементы. Оптический элемент называется плоским, если преобразование фазы падающей волны осуществляется на малых расстояниях, порядка длины волны. Для формирования изображений используются оптические элементы – киноформы, подробно описанные в главе 1. Эффективность киноформ для формирования изображений при использовании когерентного света намного выше, чем при использовании источников белого света. Отсюда можно сделать однозначный вывод, что в качестве источников света в разрабатываемом приборе должны использоваться монохроматические источники излучения – лазерные диоды.

Автоматизированный прибор контроля подлинности оптических защитных элементов должен обеспечивать инвариантный контроль относительно сдвига прибора и его поворота на контролируемом оптическом элементе. На основе сформированного в фокальной плоскости

изображения необходимо выделить инвариантный относительно сдвига и поворота прибора контроля специальный признак. Для решения этой задачи в фокальной плоскости формируется изображение, которое состоит из нескольких кольцевых секторов, асимметрично расположенных на концентрических окружностях детекторов. В качестве контролируемого признака в этом случае используются угловые расстояния между формируемыми кольцевыми секторами изображения на кольцах детекторов. Контролируя этот признак (сравнивая его с эталоном), одновременно проверяется и асимметричность изображения.

Оптическая схема прибора автоматизированного контроля базируется на патенте [A24]. Для приборов автоматизированного контроля используется когерентное излучение компактного лазерного диода. Принципиальная оптическая схема представлена на рисунке 9.1.

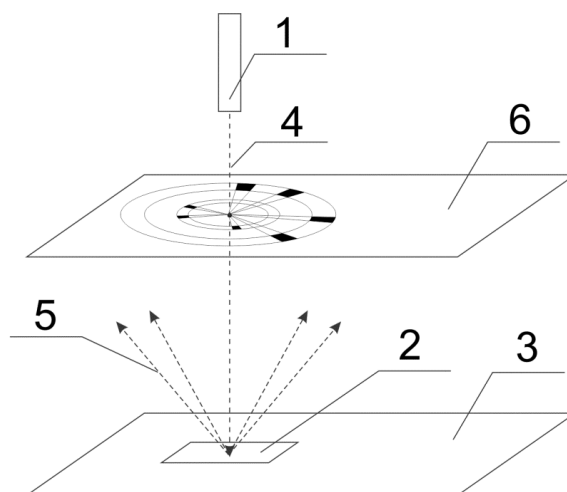


Рисунок 9.1. Схема прибора автоматизированного контроля.

Излучение от лазерного диода 1 падает на оптический элемент 2. Оптический элемент 2 является элементом защиты документа 3. В фокальной плоскости симметрично относительно луча лазера 4 расположены два кольца детекторов. Использование двух колец детекторов позволяет значительно увеличить количество различных защитных признаков и повышает надежность распознавания.

Отраженное от оптического элемента излучение 5 формирует в фокальной плоскости 6 CLR-изображение. Детекторы регистрируют формируемое в фокальной плоскости изображение. Сигналы детекторов после предварительного усиления и оцифровки на АЦП обрабатываются микропроцессором, который принимает решение о подлинности контролируемого оптического элемента.

Для обеспечения компактности прибора выбрана конструктивная схема, в которой луч от лазерного диода распространяется параллельно фокальной плоскости, как это показано на рисунке 9.2.

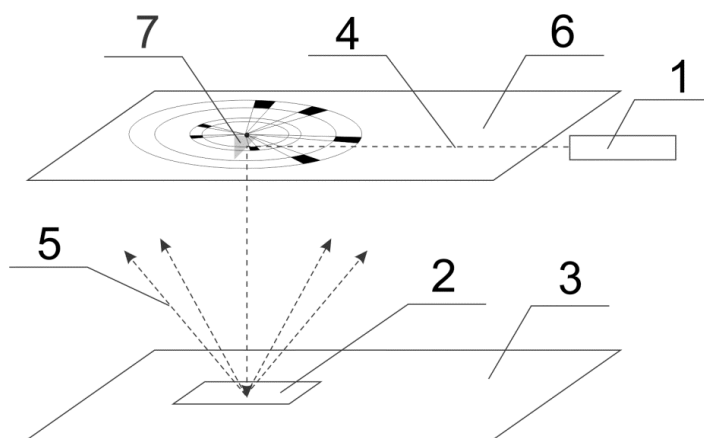


Рисунок 9.2. Схема прибора автоматизированного контроля с горизонтальным расположением лазерного диода.

После отражения от призмы 7 луч отражается перпендикулярно и падает на оптический элемент 2. Во всем остальном оптические схемы прибора на рисунке 9.1 и на рисунке 9.2 совпадают.

Определим требования, предъявляемые к CLR-изображению в задачах автоматизированного контроля подлинности нанооптических элементов. Центральным моментом разработанной технологии автоматизированного контроля является использование асимметричных CLR-изображений. На рисунке 9.3 приведено изображение, формируемое в фокальной плоскости прибора.

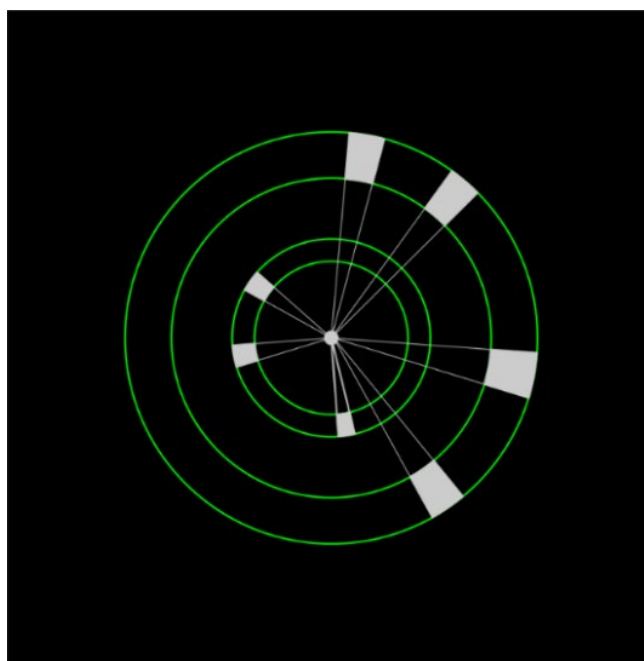


Рисунок 9.3. Пример асимметричного CLR-изображения.

На внутренней окружности расположены три лепестка изображения, а на наружной окружности расположены – четыре. Это изображение является асимметричным. Приведем еще несколько примеров асимметричных изображений, используемых в автоматизированном контроле.

На рисунке 9.4 приведены различные варианты асимметричных изображений. Как видно из рисунка 9.4, все приведенные изображения не являются симметричными относительно нулевого порядка дифракции. Не симметричность изображений является следствием асимметричности микрорельефа киноформов.

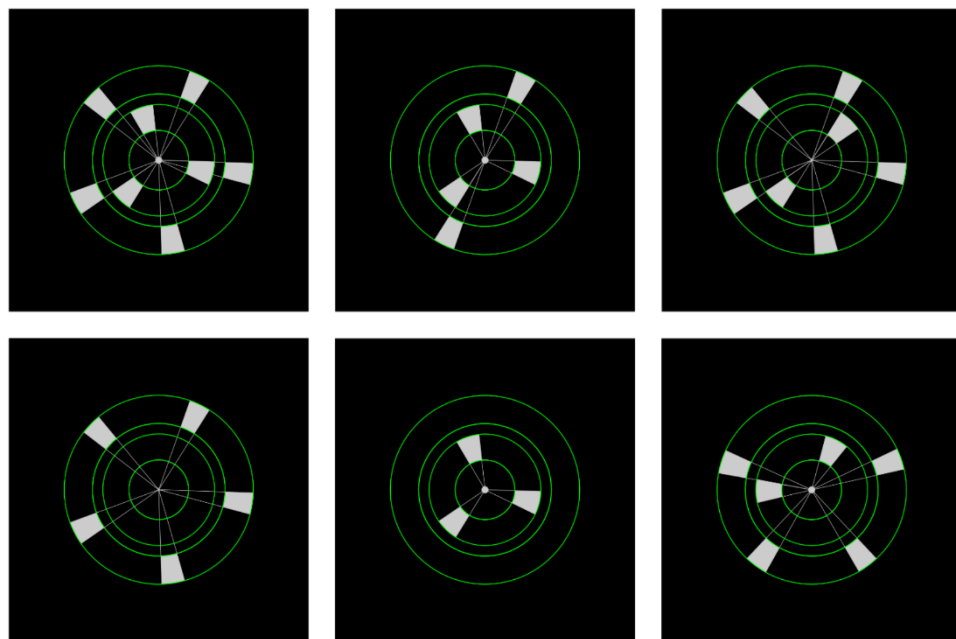


Рисунок 9.4. Примеры асимметричных CLR-изображений.

Как видно из рисунка 9.4, CLR-изображение может быть сформировано либо на обеих окружностях, либо на одной из них. Для асимметричности изображения достаточно, чтобы оно было асимметричным на одной из окружностей.

На рисунке 9.5 приведены различные варианты симметричных изображений. CLR-изображение является симметричным относительно нулевого порядка дифракции (точки с координатами  $(0,0)$ ), если из того что точка с координатами  $(x,y)$  принадлежит изображению, следует что точка с координатами  $(-x,-y)$  также принадлежит изображению.



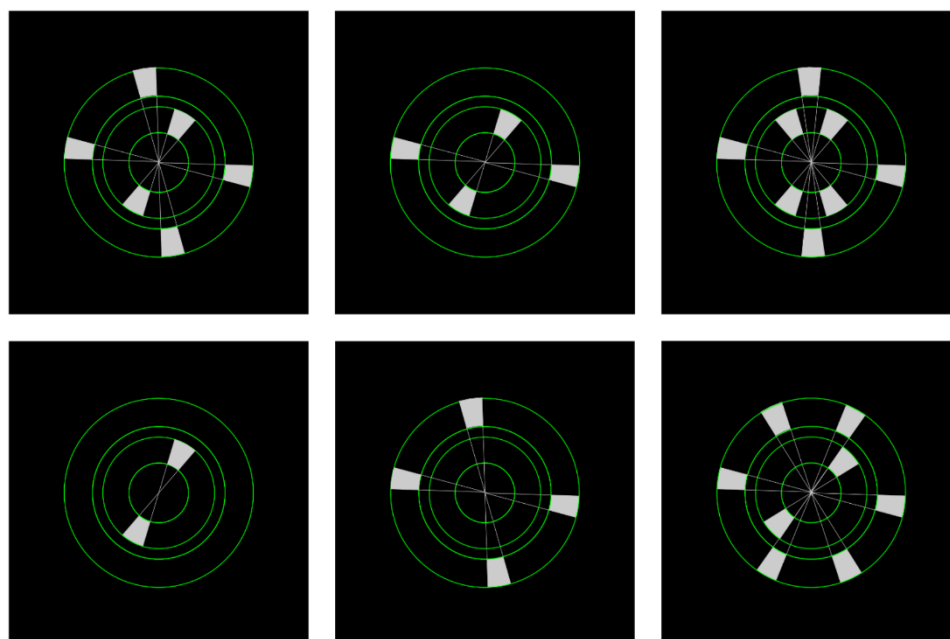


Рисунок 9.5. Примеры ассиметричных CLR-изображений.

Симметричность CLR-изображения является типичной характеристикой любой оптической записи оригиналов. Более 99% всех компаний, работающих в области оптических защитных технологий, используют оптическую запись оригинала. С помощью оптической записи принципиально невозможно изготовить оригиналы, формирующие изображения на рисунке 9.4. Таким образом, использование ассиметричного микрорельефа в нанооптических элементах надежно защищает их от подделок и имитаций.

Сформулируем требования на время, необходимое для принятия решения при верификации нанооптического элемента. Процедура верификации основана на контроле изображения, формируемого лазерным излучением в фокальной плоскости прибора. Область CLR изображений (Covert Laser Readable) на оптическом защитном элементе может представлять из себя линию шириной около 1 мм. Такая ситуация является типичной, например, при контроле защитных оптических нитей на ценных бумагах и банкнотах. Для того чтобы процедура верификации была удобной для проверки подлинности, достаточно чтобы прибор, передвигаясь по поверхности защитного элемента, пересек область CLR изображений. При скорости передвижения рукой оптического элемента порядка нескольких метров в секунду принятие решений о подлинности должно происходить за время порядка 1 мс.

Для определения оптимальных параметров прибора автоматизированного контроля, а также оптимальных параметров защитных оптических элементов был изготовлен стенд, в котором была использована оптическая схема, предложенная на рисунке 9.6.



Рисунок 9.6. Блок-схема стенда.

Стенд предназначен для регистрации сигналов оптических детекторов, их предварительного усиления и оцифровки, и вывода данных на персональный компьютер. Основное назначение стенда – связать оптические детекторы с персональной ЭВМ. Персональная ЭВМ обеспечивает возможности визуализации сигналов с детекторов. Разработка алгоритмов распознавания на ПЭВМ представляется намного более простой по сравнению с программированием на микроконтроллере. По завершении совершенствования программного обеспечения, финальный вариант программного обеспечения был перенесен на микроконтроллер.

На рисунке 9.6 приведена блок-схема электронного тракта стенда для определения оптимальных параметров оптических защитных элементов и оптимизации конструкции прибора автоматизированного контроля на базе ПЭВМ.

Для осуществления связи между детекторами и персональной ЭВМ была спроектирована и изготовлена печатная плата. На плате смонтировано два кольца детекторов, предусилитель и АЦП, микроконтроллер. Размеры одиночного детектора  $2 \times 1.25$  мм. Внешнее кольцо состоит из 32, внутреннее – из 16 детекторов. В качестве одиночных детекторов использовались фототранзисторы RPM-075PT. В качестве аналого-цифрового преобразователя использовались 8-битные АЦП AD7908 с частотой оцифровки 1 МГц. В качестве микропроцессора использовался 8-битный микроконтроллер ATmega88 с тактовой частотой 20 МГц. Последовательный порт микроконтроллера ATmega88 через интерфейсную плату соединялся с USB-портом персонального компьютера. Стенд на первом этапе проекта использовался для визуализации формируемых в фокальной плоскости прибора CLR-изображений.

В процессе разработки были изготовлены различные нанооптические защитные элементы, формирующие как симметричные, так и асимметричные изображения. Результаты визуализации изображений на стенде приведены на рисунках 9.7-9.9. Представление данных на рисунках 9.7-9.9 позволяет визуализировать большое количество информации в форме, удобной для оптимизации параметров алгоритма и прибора контроля. На рисунках 9.7 и 9.8 приведены данные визуализации нанооптических элементов с асимметричным микрорельефом. На рисунке 9.9 приведены данные визуализации нанооптических элементов с симметричным микрорельефом.

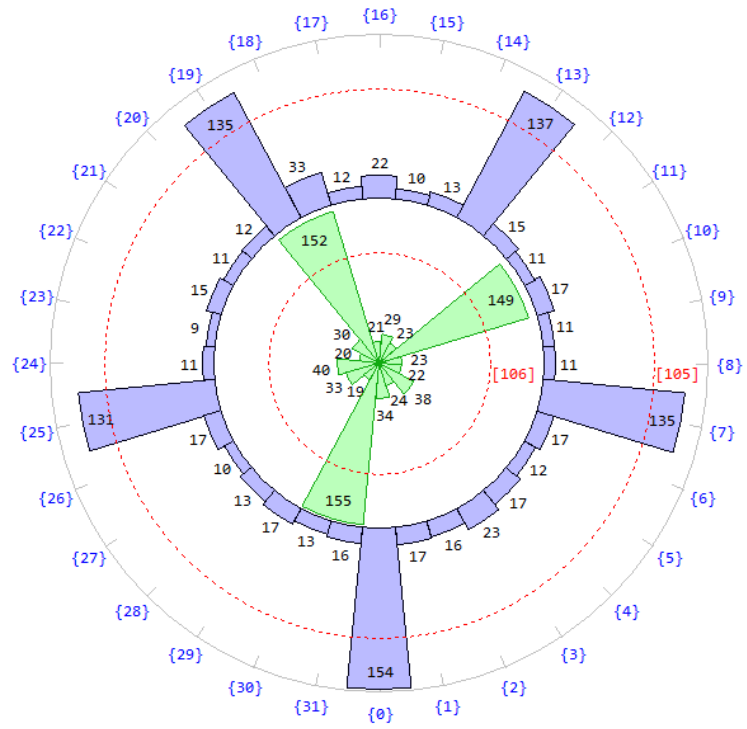


Рисунок 9.7. Данные детекторов на внешнем и внутреннем кольце (асимметричное CLR-изображение).

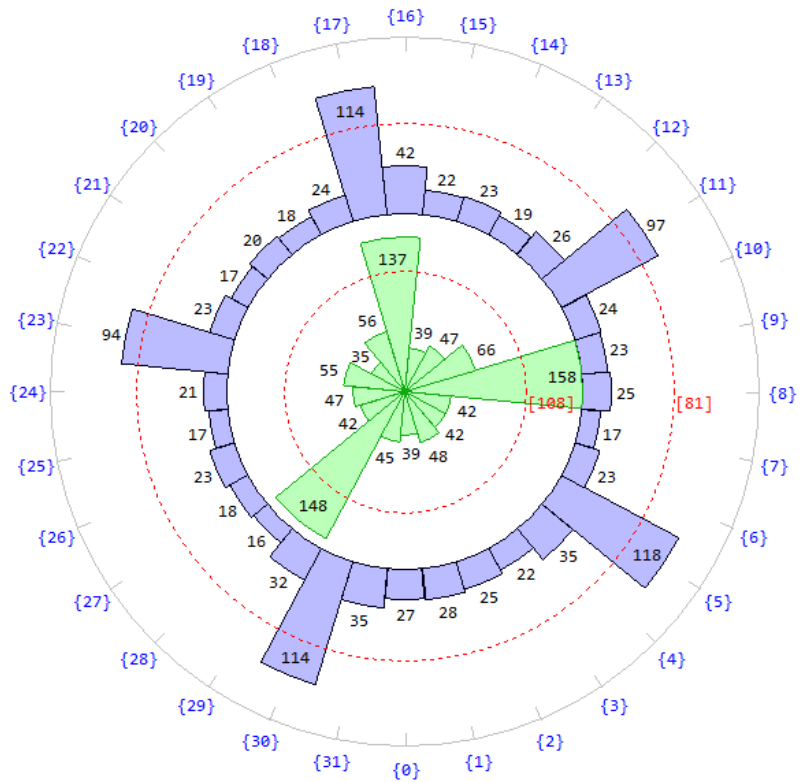


Рисунок 9.8. Данные детекторов на внешнем и внутреннем кольце (асимметричное CLR-изображение).

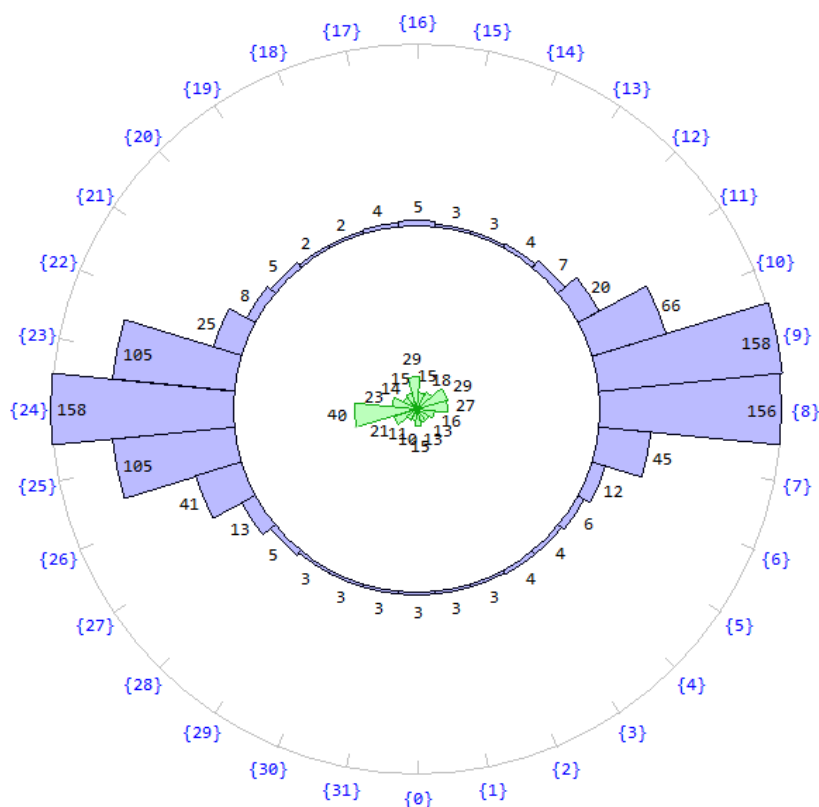


Рисунок 9.9 Данные детекторов на внешнем и внутреннем кольце (симметричное CLR-изображение).

Некоторые результаты экспериментов на стенде иллюстрируются на рисунках 9.7 – 9.9. На внешней окружности приведены порядковые номера детекторов в порядке возрастания против часовой стрелки. Лепестки изображения на внутреннем кольце приведены зеленым цветом. Интенсивность изображения на каждом секторе задана цифрами внутри лепестка (или снаружи для маленьких лепестков). Интенсивность изображения на лепестках внешнего сектора иллюстрируется сиреневым цветом.

Рисунок 9.7 соответствует изображению, полученному с использованием металлизированной мастер-матрицы (оригинала нанооптического элемента). Рисунок 9.8 соответствует копии нанооптического элемента с того же оригинала на металлизированной фольге. Небольшое отличие интенсивностей лепестков является естественным и связано с разными коэффициентами отражения от металлизированной мастер-матрицы и от копии нанооптического элемента на металлизированной фольге. Каждый из пяти лепестков внешнего изображения надежно различим, как и каждый из трех лепестков внутреннего изображения. Видно, что инвариантный признак, представляющий собой угловые расстояния между лепестками изображений на окружности детекторов, можно надежно контролировать. Это означает, что существуют технологические режимы массового производства, при которых тиражные копии мало отличаются от оригиналов.

Можно ожидать, что нанооптические элементы для автоматизированного контроля могут пытаться подделывать с помощью оборудования для записи и тиражирования рельефных голограмм. Количество компаний, работающих в этой области, исчисляется сотнями. Как упоминалось выше, широко распространенные голографические оптические технологии могут формировать только симметричное изображение. На рисунке 9.9 приведено изображение стандартного голографического защитного элемента, оригинал которого выполнен с использованием оптической технологии записи оригинала. Хорошо видна симметричная структура изображения на внешнем кольце.

## 9.2. Разработка спец. признака для распознавания на основе сформированного CLR-изображения

Вместе с прибором автоматизированного контроля разрабатываются и специально спроектированы для этой цели нанооптические элементы. Разработаны два типа нанооптических защитных элементов. В элементах первого типа существует выделенная область, которая предназначена для формирования CLR-изображения. На рисунке 9.10 приведен пример дизайна нанооптического элемента первого типа. Выделенная область, предназначенная для формирования CLR-изображения, на дизайне выглядит как полоса серого цвета.

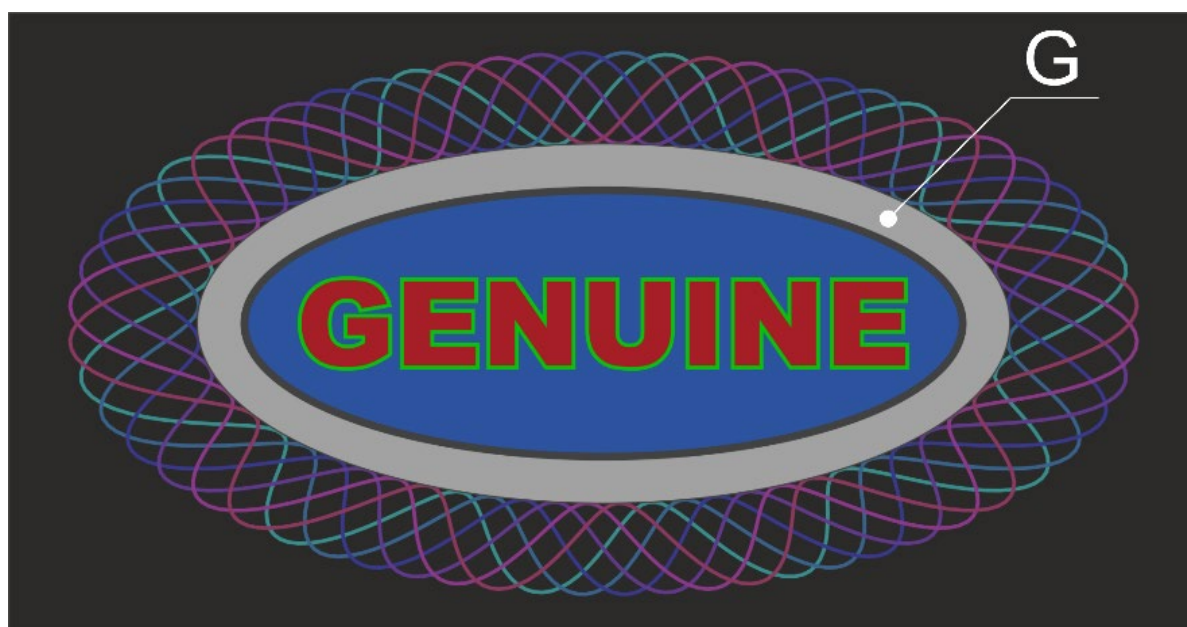


Рисунок 9.10. Пример дизайна нанооптического элемента для автоматизированного контроля первого типа.

Область G для формирования CLR-изображений представляет собой полосу шириной порядка 0,8-1 мм. При освещении когерентным светом области G все 100% энергии рассеянного света идут на формирование CLR-изображения. На рисунке 9.11 представлено фото нанооптического элемента второго типа.



Рисунок 9.11. Пример дизайна нанооптического элемента для автоматизированного контроля второго типа.

Приведенное визуальное изображение является видимым для наблюдателя при освещении нанооптического элемента белым светом. Визуальное изображение увеличено в 16 раз. Фрагмент данного изображения, увеличенный в 70 раз, относительно истинного размера, представлен на рисунке 9.12.



Рисунок 9.12. Фрагмент изображения на рис.11 (увеличение в 16 раз).

Далее, фрагмент изображения на рисунке 9.12 был увеличен до 160 раз относительно истинного размера (рисунок 9.13).

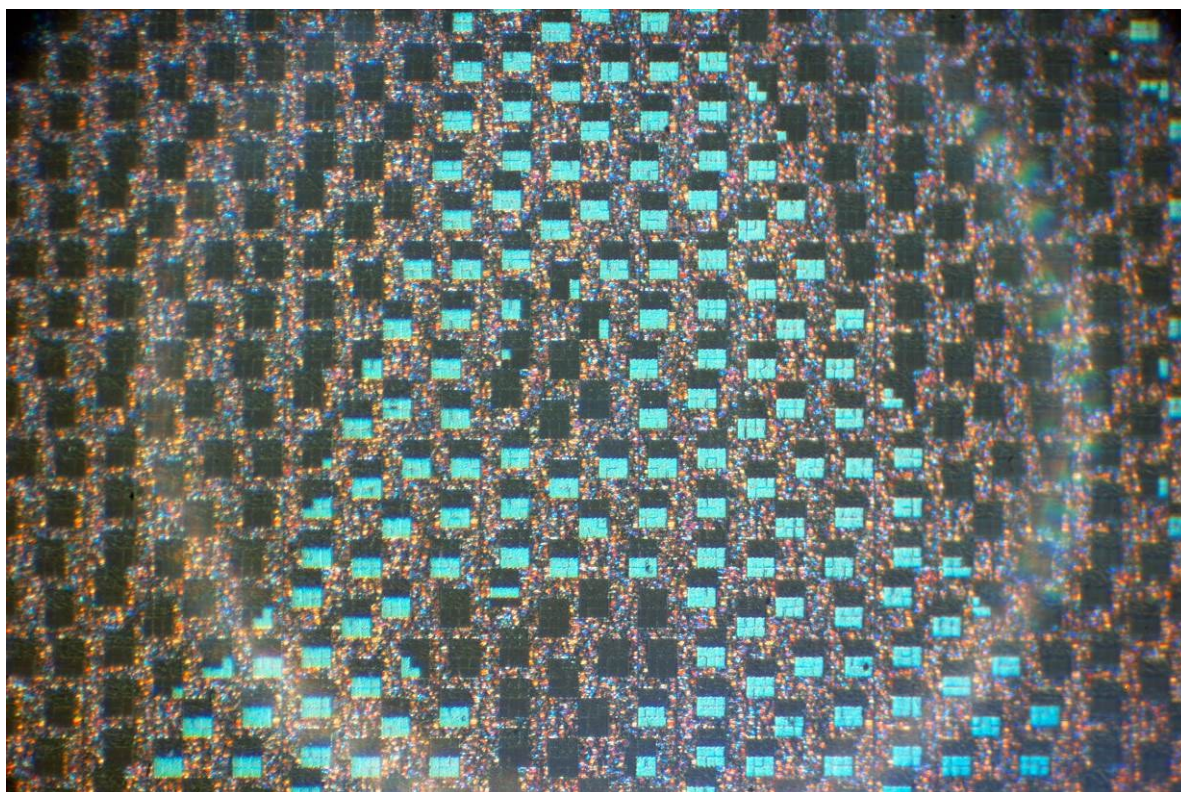


Рисунок 9.13. Фрагмент изображения на рис.11 (увеличение в 160 раз).

Структура нанооптического элемента второго типа разработана и изготовлена таким образом, чтобы обеспечить возможность автоматизированного контроля в любой точке нанооптического элемента. Схематическое изображение структуры нанооптического элемента второго типа приведено на рисунке 9.14.

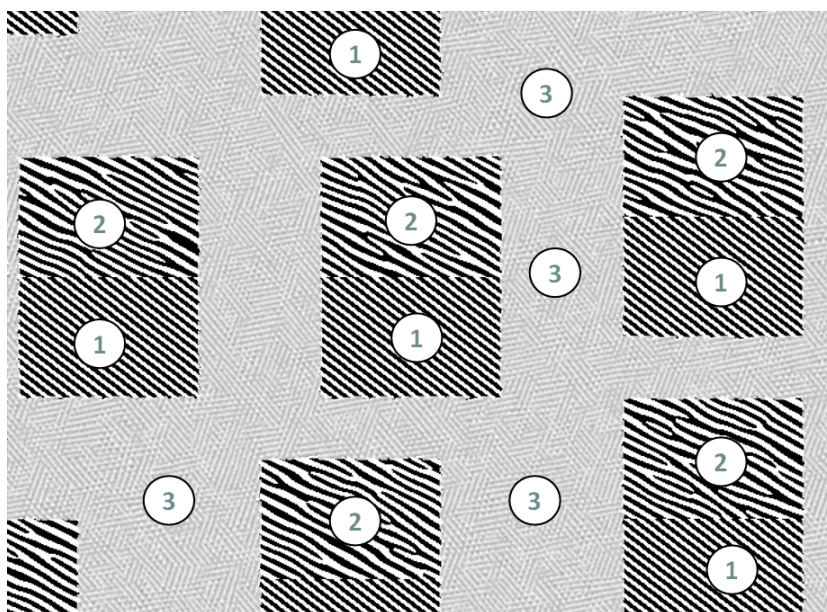


Рисунок 9.14. Фрагмент микроструктуры нанооптического элемента второго типа.

Области  $G_i$ , помеченные цифрами 1 и 2, представляют собой киноформы, формирующие CLR-изображения на внутреннем и внешнем кольце детектора. Область, помеченная цифрой 3, может быть заполнена дифракционными решетками, которые создают визуальное изображение [A28,A29,A31,A32]. Размер областей  $G_i$  не превосходит 50 микрон, что находится за пределами разрешения человеческого глаза. Расстояние между соседними элементарными областями  $G_i$  не превышает 100 микрон. Поскольку диаметр лазерного луча составляет порядка 1 мм, то процедуру идентификации прибора автоматизированного контроля можно осуществлять в любой точке нанооптического элемента.

Существуют различные методы распознавания 2D изображений. Оптимальным вариантом, легко реализуемым на микроконтроллерах, может быть процедура распознавания, основанная на сравнении с эталоном. Основные проблемы в реализации подобных методов связаны с тем, что прибор контроля может поворачиваться на произвольный угол относительно контролируемой метки. Поворот прибора на угол  $\varphi$  означает поворот на тот же угол и изображения в фокальной плоскости прибора. В этом случае для реализации методов распознавания, основанных на сравнении с эталоном, необходимо сравнение и с повернутым эталоном. Угол поворота прибора неизвестен. Это означает, что одновременно нужно проводить процедуру контроля более, чем с сотней эталонов. Такие процедуры легко реализуются одновременно на суперкомпьютерах на графических картах. Время реализации подобных алгоритмов на обычном микроконтроллере возрастет в сотни раз.

В настоящем проекте проблема инвариантного распознавания решается выбором спец. признака. Спец. признак, обеспечивающий инвариантный контроль, связывает вместе формирование изображения, систему детектирования и принцип распознавания. В проекте использованы линейные детекторы, расположенные на концентрических окружностях. Оптический элемент, при освещении его лазером, формирует на кольцевых детекторах изображение, состоящее из кольцевых секторов.

Пусть  $\varphi_1, \varphi_2 \dots \varphi_n$  – это угловые расстояния между кольцевыми секторами на большей окружности, а  $\psi_1, \psi_2 \dots \psi_m$  – это угловые расстояния между кольцевыми секторами на меньшей окружности. При повороте прибора происходит поворот изображения, однако, угловые расстояния между кольцевыми секторами не меняются. Таким образом, в качестве спец. признака для автоматизированного контроля в проекте выбраны угловые расстояния  $\varphi_1, \varphi_2 \dots \varphi_n$ , и  $\psi_1, \psi_2 \dots \psi_m$  между кольцевыми секторами изображения, которые в процессе контроля сравниваются с заданными эталонными величинами.

Отметим, что одновременно контролируется и симметричность либо асимметричность изображения. Примеры асимметричного изображения были приведены на рисунке 9.4. Пример симметричного изображения в фокальной плоскости прибора был приведен на рисунке 9.5.



Изображения такого типа (симметричные) формируются обычными, стандартными голографическими защитными элементами.

### **9.3. Метрологические исследования микрорельефа нанооптических элементов для автоматизированного контроля**

Для тестирования алгоритмов на стенде были изготовлены различные нанооптические элементы первого и второго типа. В мире существует несколько технологий для измерения микрорельефа поверхности: механические и оптические профилометры, оптические микроскопы, лазерные сканирующие микроскопы, электронные микроскопы, сканирующие зондовые микроскопы и т.д. Каждая из технологий имеет свою область наиболее эффективного применения. Наша задача – произвести измерения микрорельефа твердой полимерной поверхности со следующими характеристиками: глубина микрорельефа – 0,1 – 0,5 мкм, характерные периоды дифракционных структур – 0,4 – 2,0 мкм. Наиболее подходящей для задачи является атомно-силовая микроскопия. Эта технология позволяет максимально точно измерять микрорельеф широкого класса материалов – как проводников, так и диэлектриков. При этом не требуется сложной подготовки образца и условий измерения.

Существует широкий спектр атомных силовых микроскопов. Для измерения микрорельефа в настоящем проекте использовался атомный силовой микроскоп NTMDT (Россия). Для определения рельефа поверхностей непроводящих тел используется подвижная пластина с иглой-зондом (кантилевер), отклонение которой регистрируется лазерным интерферометром. Кончик иглы-зонда, обычно, имеет радиус порядка десяти ангстрем. Атомно-силовой микроскоп позволяет получать изображения с разрешением до нескольких нанометров, то есть порядка десяти миллионов точек на дюйм (dpi).

С помощью атомного силового микроскопа зондировались нанооптические элементы первого типа с выделенной областью CLR-изображения и элементы второго типа с распределенным скрытым CLR-изображением.

Кроме этого, с помощью атомного силового микроскопа сканировалось несколько образцов обычных защитных голограмм, оригиналы которых изготовлены оптическим путем. Пример структуры микрорельефа такого оптического микрорельефа приведен на рисунке 9.15.

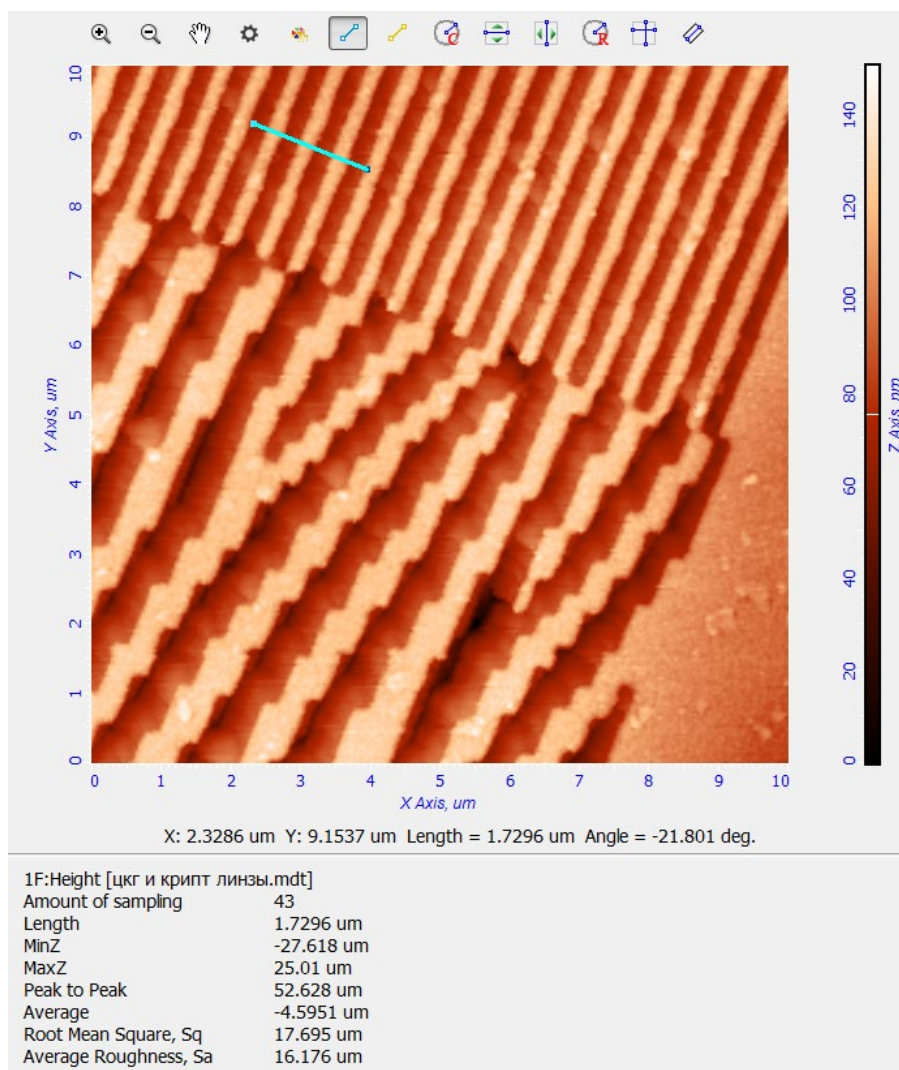


Рисунок 9.15. Фрагмент микрорельефа nanoоптического элемента с симметричным микрорельефом (атомный силовой микроскоп).

На рисунке 9.16 приведен профиль микрорельефа защитного оптического элемента вдоль линии, обозначенной на рисунке 9.15 бирюзовым цветом. Оптические защитные элементы, оригиналы которых записаны оптическим путем, имеют симметричную структуру, что хорошо видно на рисунке 9.16. Глубина микрорельефа составляет порядка 0.05 мкм, период дифракционной структуры – 0.5 мкм.

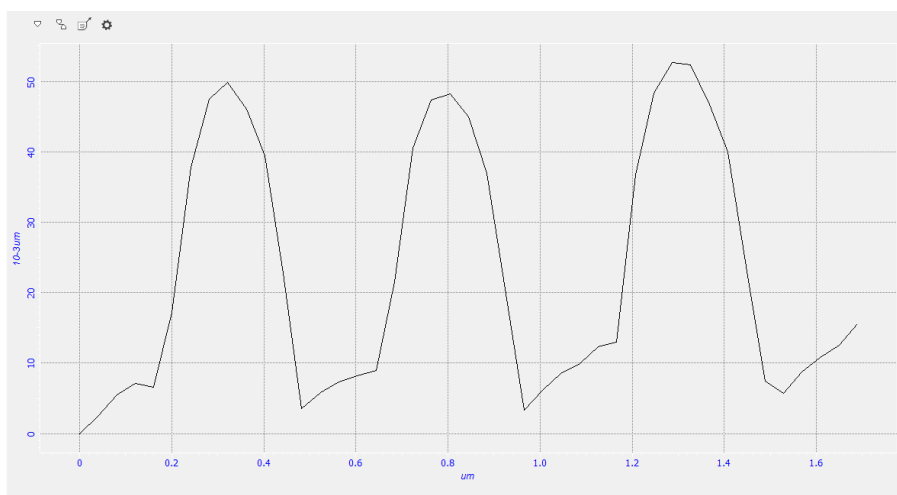


Рисунок 9.16. Профиль микрорельефа нанооптического элемента с симметричным микрорельефом (атомный силовой микроскоп).

На рисунке 9.17 представлена структура многоградационного рельефа, используемого при создании нанооптических элементов.

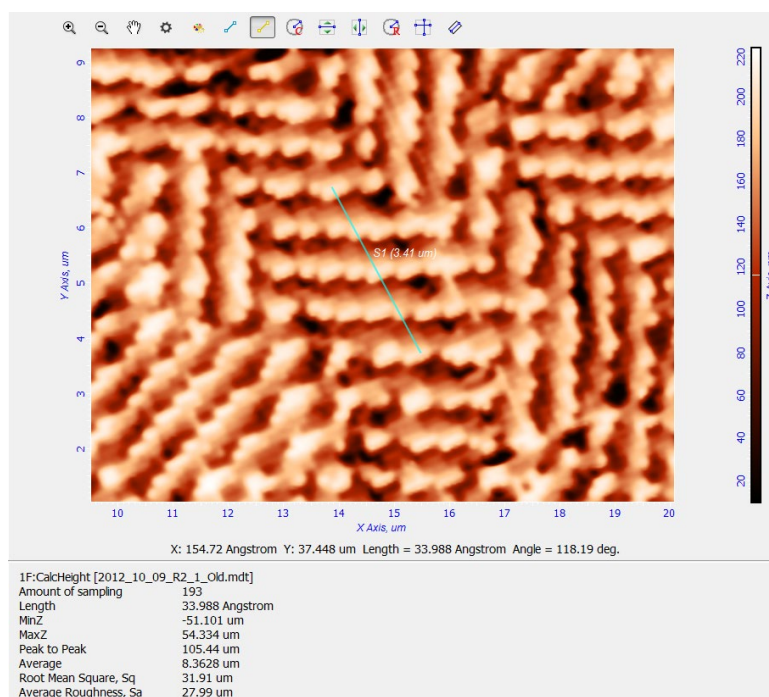


Рисунок 9.17. Фрагмент микрорельефа нанооптического элемента второго типа (атомный силовой микроскоп).

Профиль рельефа в месте, указанном отрезком бирюзовой линии, представлен на рисунке 9.18, где можно проследить асимметричную форму рельефа. Глубина такого микрорельефа составляет порядка 0.1 мкм, период дифракционной структуры порядка 0.8 мкм.

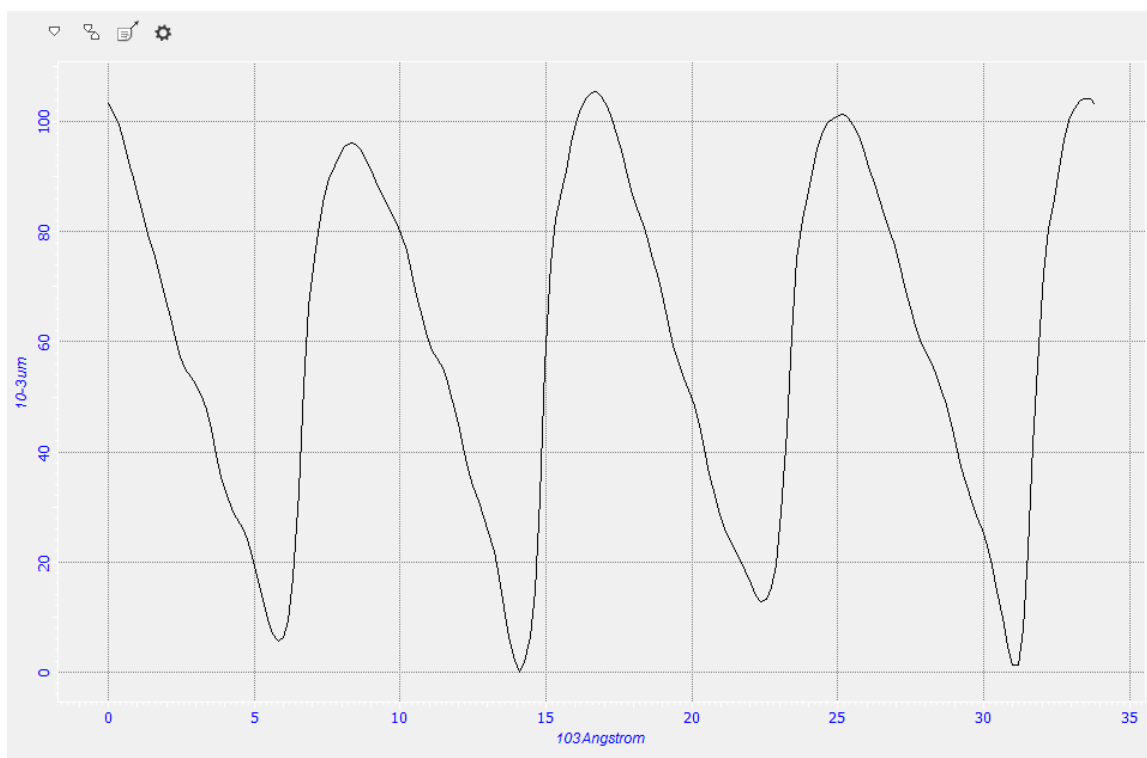


Рисунок 9.18. Профиль микрорельефа nanoоптического элемента второго типа (атомный силовой микроскоп).

В ходе работы на втором этапе были проведены многочисленные эксперименты по контролю микрорельефа изготовленных образцов, как первого, так и второго типа. Полученные результаты позволяют утверждать, что точность микрорельефа изготовленных образцов 1-го и 2-го типа составляет порядка 20 нм по высоте микрорельефа. Такие точности изготовления формирования микрорельефа обеспечивает только электронно-лучевая технология [А28, А3, А4]. Именно эта технология и является базовой технологией синтеза микрорельефа в настоящем проекте.

#### 9.4. Тестирование изготовленных образцов nanoоптических элементов на стенде

Тестирование и оптимизация алгоритмов распознавания специального признака для автоматизированного контроля осуществлялись на стенде на базе персонального компьютера. Стенд использует систему детектирования на базе фототранзисторов RPM-075PT, расположенных на двух концентрических окружностях. Оцифрованный с помощью АЦП сигнал от фотоприемников поступает на последовательный коммуникационный порт персонального

компьютера. В качестве языка программирования для обработки цифровых сигналов и решения задачи распознавания образов использовался язык C++.

Результаты приводятся в виде графиков в полярной системе координат (рисунки 9.19-9.22), что хорошо отражает физическое расположение фоточувствительных детекторов на электронной плате прибора автоматизированного контроля. Для внутреннего кольца минимальное значение находится в начале координат графика, максимальное – на середине радиус-вектора окружности графика. Для внешнего кольца диапазон значений лежит на второй половине радиус-вектора полярной системы координат графика. С внешней стороны графика в фигурных скобках указаны индексы цифровых значений из массива данных, полученных от соответствующих фоточувствительных датчиков. Для каждого датчика на графике указывается относительное значение сигнала, которое соответствует уровню освещенности данного детектора. Также, на графике присутствуют опорные уровни в виде концентрических окружностей, которые соответствуют уровням детектирования, присутствующим на промежуточных этапах работы алгоритма. Зеленым цветом обозначен уровень максимального значения для текущей выборки, красным цветом обозначается относительный уровень, на котором был обнаружен искомый сигнал, соответствующий заложенному в память прибора автоматизированного контроля шаблону. Синие линии обозначают относительные уровни, которые вычисляются относительно максимального значения в текущей выборке. Сам факт обнаружения искомого шаблона, соответствующего скрытому защитному признаку, отображается красными линиями – уровнями, на которых было принято решение об обнаружении признака «Свой». Решение «Свой» было принято для нанооптических элементов, представленных на рисунке 9.19 и 9.20. Для нанооптических элементов, формирующих изображение, представленное на рисунках 9.21 и 9.2 решение «Свой» не принято. Хорошо видно, что CLR-изображение на рисунках 9.21 и 9.22 является симметричным.

Приведем более подробную информацию о нанооптических элементах, формирующих изображения на рисунках 9.19-9.22. На рисунке 9.19 представлено графическое изображение данных при нормальном расположении прибора автоматизированного контроля относительно плоскости оптического элемента. Фокальная плоскость прибора параллельна плоскости оптического элемента.



Сравнивая рисунки 9.20 и 9.21 можно найти незначительные различия, которые не влияют на результат процедуры верификации. Подробные исследования показали, что при проектировании прибора важно обеспечить параллельность плоскости прибора и плоскости оптического элемента с точностью не менее 5 градусов. Хорошо видно, что изображения на рисунках 9.20 и 9.21 являются асимметричными. Автоматизированный контроль принял оба эти изображения с присвоением признака «свой».

На рисунках 9.7 и 9.8 были приведены данные визуализации нанооптических элементов с асимметричным микрорельефом, которым в процессе идентификации также был присвоен признак «свой». На рисунках 9.21 и 9.22 приведены данные, снятые с обычных голограмм, оригиналы которых записаны оптическим образом. Хорошо видно, что оба эти изображения являются симметричными.

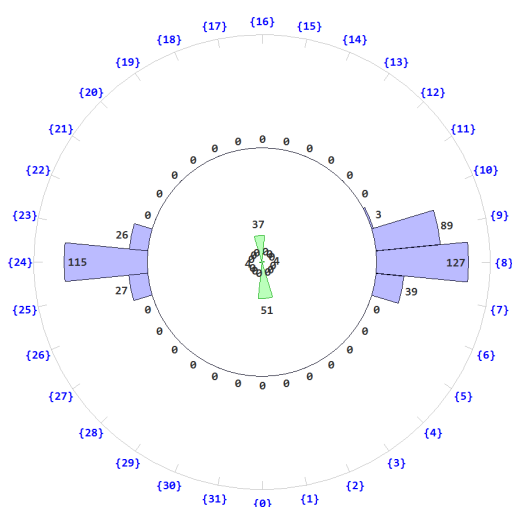


Рисунок 9.21. Пример данных детекторов для нанооптического элемента с симметричным микрорельефом.

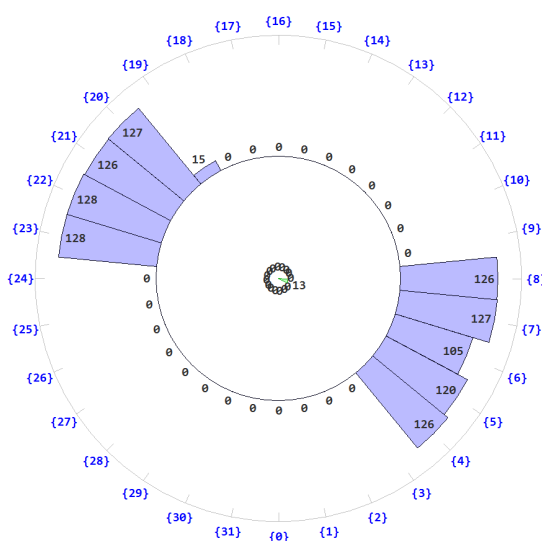


Рисунок 9.22. Пример данных детекторов для нанооптического элемента с симметричным микрорельефом.

В процессе идентификации прибором автоматизированного контроля они не идентифицированы признаком «свой».

Хорошо видно, что изображения, формируемые обычными нанооптическими элементами, являются симметричными и при распознавании будут надежно идентифицироваться как чужие.

#### **9.5. Разработка алгоритмов распознавания образов для процедуры идентификации и их тестирование на стенде на базе персонального компьютера**

На стенде на базе ПК была реализована программа анализа формируемых изображений с двумя уровнями. Проведен анализ на различных изображениях, который показал, что на всех изображениях надежно с высокой вероятностью контролируются образцы нанооптических элементов. «свой» распознаются с высоким уровнем достоверности, а любые другие, записанные с помощью голографических технологий, как «чужие». Проведены испытания на большом количестве образцов. Решение по выбору формы защитных изображений принято верно.

Алгоритм автоматизированного контроля подлинности оптических защитных элементов представлен в виде блок-схемы на рисунке 9.23. В блоке 1 производится выборка цифровых значений сигналов, сформированных на выходе оптически чувствительных датчиков –  $Data[N]$ . После захвата данных в блоке 2 производится поиск максимального значения  $Max$ , которое в дальнейшем используется для вычисления относительных уровней бинаризации. Далее (блок 3) создается цикл по уровням бинаризации, значения которых предварительно заданы в массиве  $Level[L]$ . На следующем шаге (блок 4) объявляется массив бинарных значений сигнала для выбранного уровня бинаризации, имеющий размерность такую же, как и у массива исходных данных.



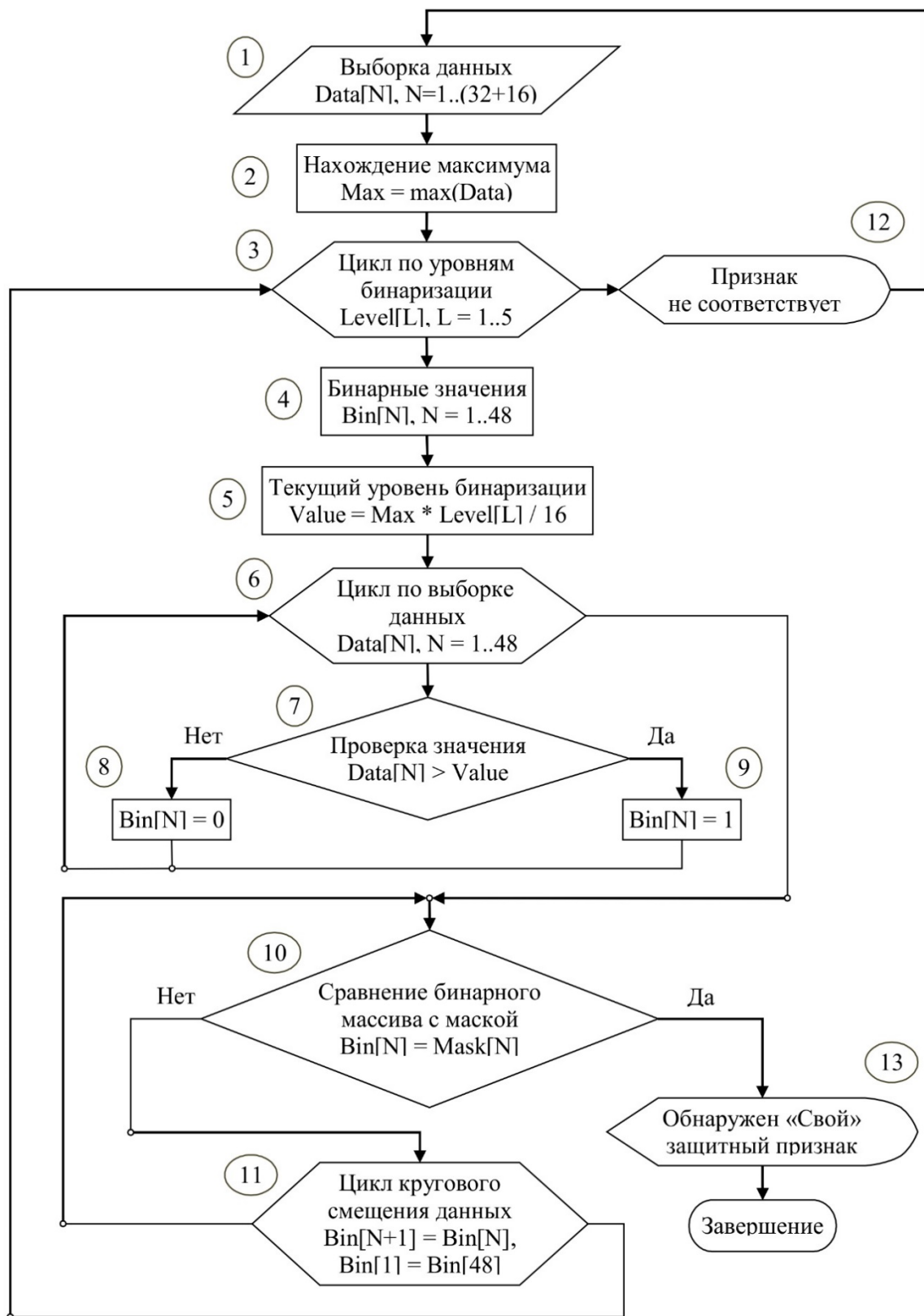


Рисунок 9.23. Блок-схема алгоритма распознавания.

В блоке 5 вычисляется абсолютное значение Value уровня бинаризации. Далее создается цикл (блок 6), в котором каждое значение из исходного массива данных Data сравнивается со значением Value (блок 7). Если исходное значение больше порогового в бинарном массиве в

соответствующем месте устанавливается 1 (блок 8), в противном случае – 0 (блок 9). После получения бинарного массива последний сравнивается с шаблоном маски достоверного признака  $Mask[N]$ , который находится в начальном нулевом смещении (блок 10). Если совпадение установлено, то устройство переходит в состояние обнаружения «Своего» признака (блок 13) и исполнение программы приостанавливается. В противном случае создается цикл кругового смещения данных в двоичном массиве (блок 11). Если ни для одного смещения не найдено соответствия, программа возвращается к блоку 3, где происходит выбор следующего уровня бинаризации. Если же проанализирован последний уровень, то происходит переход к блоку 12, сигнализирующему о несоответствии исходного набора данных «своему» признаку. После этого программа не завершается, а повторяется с начала (блок 1), и так до тех пор, пока не будет найден признак «свой».

### 9.6. Блок-схема прибора автоматизированного контроля

Блок-схема прибора автоматизированного контроля приведена на рисунке 9.24.

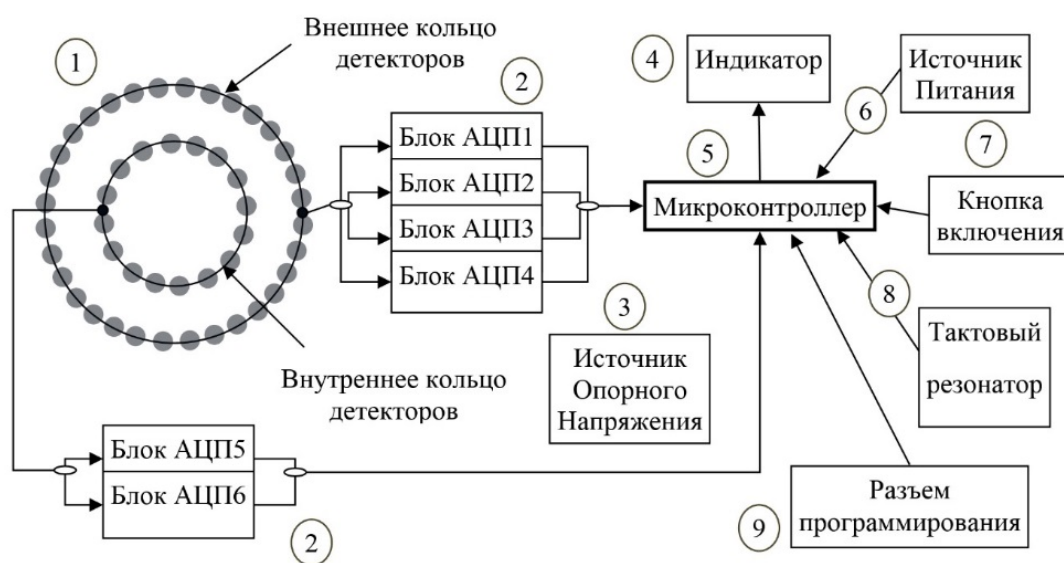


Рисунок 9.24. Блок-схема прибора автоматизированного контроля.

На схеме два ряда фотодетекторов, расположенные на концентрических окружностях, обозначенных на рисунке цифрой 1, через резисторные сборки подключаются к входам АЦП, обозначенным на рисунке цифрой 2. Для работы АЦП используется источник опорного напряжения REF192ES, который условно обозначен на рисунке цифрой 3.

После оцифровки аналоговых сигналов, полученный массив данных пересылается в микроконтроллер ATmega88PA, обозначенный на рисунке цифрой 5, по последовательному интерфейсу SPI. В микроконтроллере с максимально возможной частотой производится в цикле сохранение полученных от АЦП данных, их анализ и сравнение с искомым признаком. Для

работы контроллера на частоте, приближенной к максимально возможной, используется внешний тактовый резонатор на 14.75 МГц, обозначенный на рисунке цифрой 8.

Питание схемы производится от автономного батарейного источника с номинальным напряжением 3.3В, обозначенного на рисунке цифрой 6. Для подачи питания в схему используется коммутирующая кнопка, обозначенная на рисунке цифрой 7. Для осуществления визуального контроля работы алгоритма анализа и распознавания данных, полученных от оптических детекторов, существует трехцветный индикатор, обозначенный на рисунке цифрой 4. Факт обнаружения признака «Свой» индицируется зеленым цветом светодиода. Когда искомый признак отсутствует, светодиод горит красным цветом. Также, индикатор способен сигнализировать о дополнительных событиях, не касающихся самого процесса обнаружения скрытых защитных образов. К таким событиям относится, например, критический уровень напряжения источника питания.

Также в схеме устройства присутствует интерфейс программирования, который позволяет не только загружать программный код во внутреннюю память контроллера, но и производить интерактивную внутрисхемную отладку программы. Запись программы анализа и распознавания скрытого защитного признака, формируемого микрорельефами первого и второго типов, осуществляется на этапе сборки печатной платы в соответствии с принципиальной схемой устройства.

## 9.7. Элементы конструкции прибора автоматизированного контроля

*Печатные платы* являются многослойными и содержат 4 слоя. На рисунках 9.25-9.26 приведены изображения слоёв печатных плат.

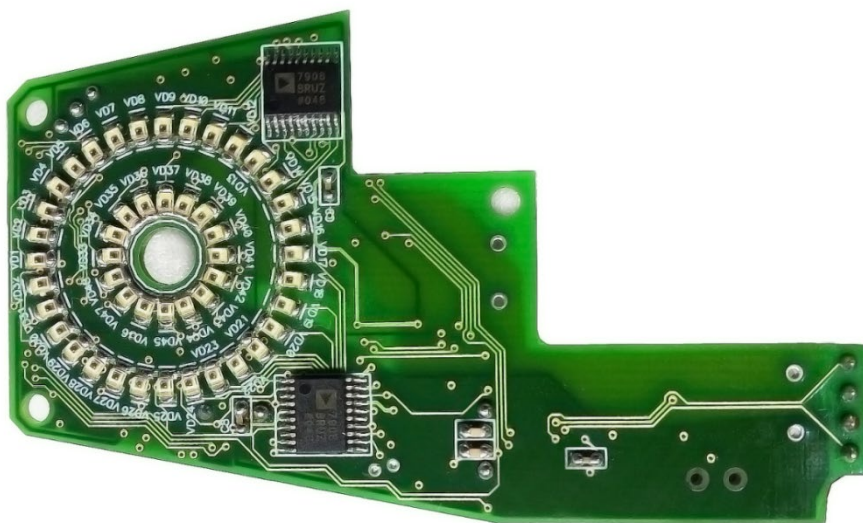


Рисунок 9.25. Печатная плата прибора автоматизированного контроля (вид снизу).

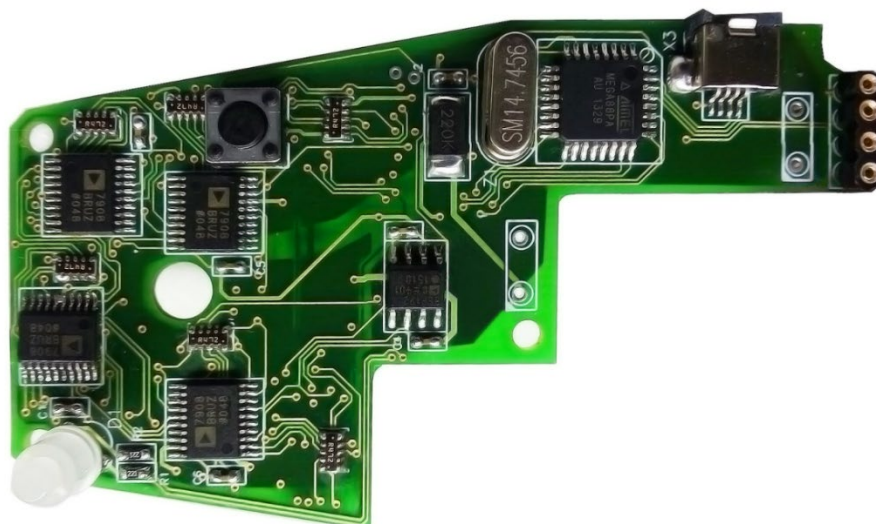


Рисунок 9.26. Печатная плата прибора автоматизированного контроля (вид сверху).

Минимальная ширина токоведущих дорожек 0.2 мм. На рисунках 9.25-9.26 приведены изображения смонтированных печатных плат с двух сторон. На одной из сторон размещены приёмники оптического излучения (фототранзисторы) с максимумом чувствительности в области 650 нм. Фототранзисторы располагаются в виде концентрических колец радиусами  $R_1=16$  мм. и  $R_2=22$  мм. Внешнее кольцо детекторов содержит 32 фототранзистора, внутреннее кольцо содержит 16 фототранзисторов. Поскольку фототранзисторы имеют значительный разброс по чувствительности, проведены калибровочные испытания, после которых калибровочные коэффициенты внесены в постоянную память микроконтроллера с помощью программатора AVR. Также в постоянную память микропроцессора занесена программа визуализации и программа идентификации подлинности оптических защитных элементов, основанная на сравнении полученного оптоэлектрического сигнала с маской защитного признака, инвариантного к повороту прибора.

В качестве основных компонентов разрабатываемой принципиальной электронной схемы прототипа устройства автоматизированного контроля можно выделить два чипа: чип АЦП фирмы AnalogDevices, модель AD7908 и микроконтроллерный чип фирмы Atmel, модель ATmega88PA.

Основными характеристиками микроконтроллера являются:

- расширенная 8-битная AVR-RISC-архитектура с низким энергопотреблением;
- наличие статической энергозависимой памяти SRAM объёмом 1 кБ;
- наличие энергонезависимой памяти программ объёмом 8кБ и памяти данных объёмом 512 байт с большим количеством циклов перезаписи;

- 8/16-битные таймеры-счётчики, счётчик реального времени, широтно-импульсные модуляторы, многоканальные аналоговые и цифровые преобразователи, программируемые последовательный порт USART, последовательный интерфейс SPI, двухпроводной последовательный интерфейс I2C, программируемый сторожевой таймер, аналоговый компаратор, порты ввода-вывода;

- специальные возможности, среди которых: сброс по питанию, детектор провалов напряжения, внутренний калиброванный осциллятор, внешние и внутренние источники прерываний, несколько режимов сна – ждущий, энергосберегающий, глубокий сон и несколько других;

- рабочее напряжение: при тактовых частотах 0 – 4 МГц составляет 1.8 – 5.5 В, при частотах 0 – 10 МГц составляет 2.7 – 5.5 В.

Основными характеристиками АЦП являются:

- высокая пропускная способность при низком энергопотреблении – AD7908 осуществляет преобразование со скоростью до одного миллиона выборок в секунду (1MSPS);

-8 несимметричных аналоговых входов АЦП;

-независимый выбор уровней напряжений для опорного источника и цифровых сигналов последовательного интерфейса;

-гибкое управление энергопотреблением и частотой выборок;

-отсутствие задержек на конвейере данных при использовании преобразования с последовательным приближением.

Питание схемы производится от источника с номинальным напряжением 3.3 В. Для осуществления визуального контроля работы алгоритма анализа и распознавания данных, полученных от оптических детекторов, существует двухцветный светодиодный индикатор. Факт обнаружения признака «свой» индицируется зелёным цветом. Когда искомый признак отсутствует, светодиод горит красным цветом. Также, индикатор способен сигнализировать о дополнительных событиях, не касающихся самого процесса обнаружения скрытых защитных образов. К таким событиям относится, например, критический уровень напряжения источника питания.

Для подачи питания в схему используется коммутирующая кнопка высотой 7 мм, рассчитанная на коммутационный ток 50 мА и максимальное напряжение 12 В, максимальное сопротивление контактов 0.5 Ом.

*Корпус прибора* изготовлен из пластика. Ниже приведен состав разработанного и изготовленного корпуса и пластиковых деталей прибора автоматизированного контроля:

1.крышка прибора

2.корпус прибора

- 3.кнопка прибора
- 4.крышка батарейного отсека
- 5.крышка USB разъёма
- 6.планка 1 (крепления лазерного модуля)
- 7.планка 2 (крепления лазерного модуля)

Сборочный чертёж корпуса прибора приведён на рисунке 9.27.

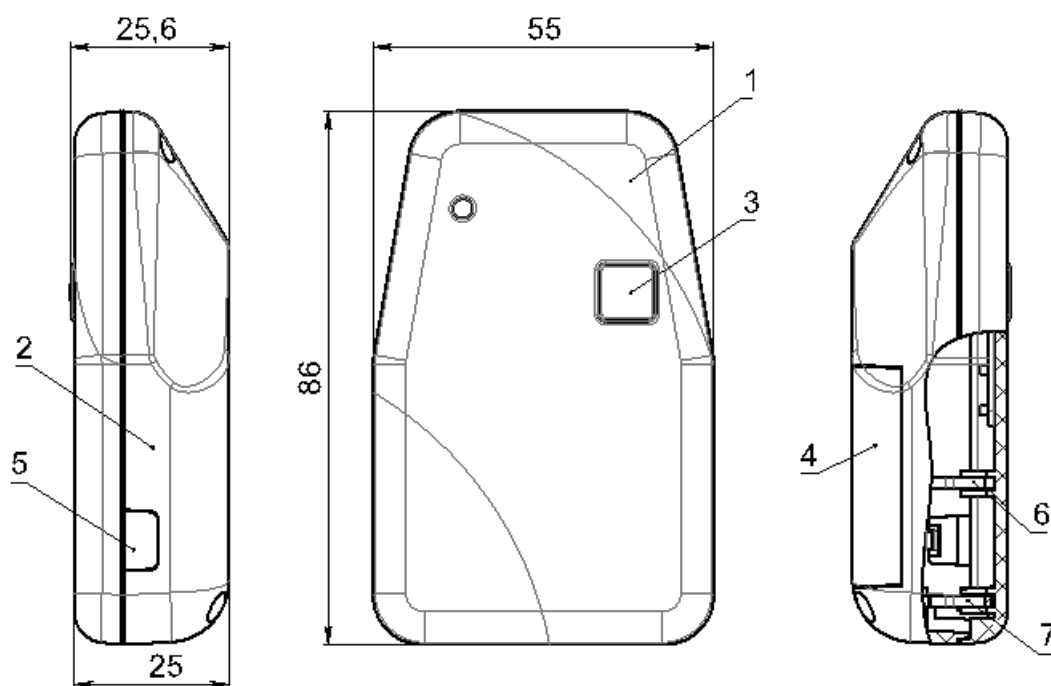


Рисунок 9.27. Сборочный чертёж корпуса прибора.

На рисунке 9.27 представлен чертёж корпуса прототипа прибора, на рисунке 9.28 – чертёж крышки прототипа. Используя 3D-модель, были изготовлены пластиковые детали корпуса прибора, приведенные на рисунках 9.27-9.29.

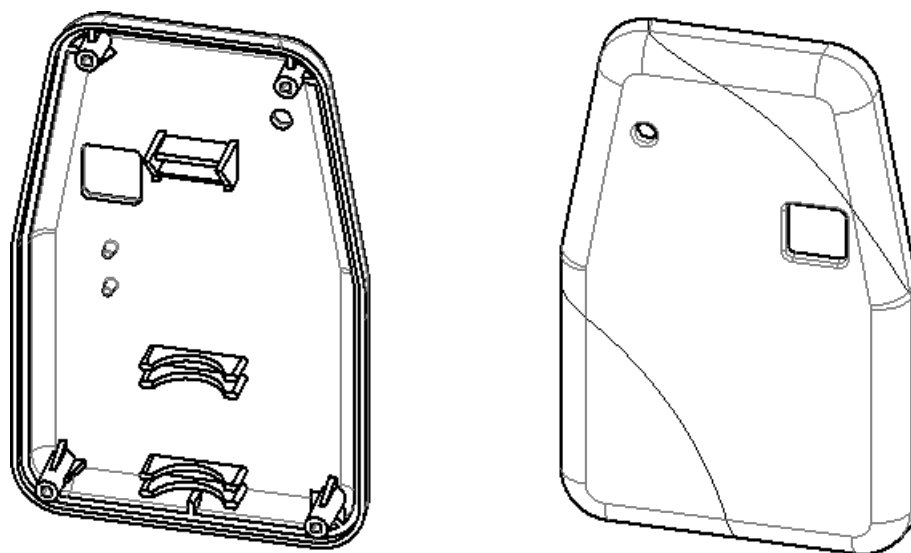


Рисунок 9.28. Чертеж верхней крышки прибора.

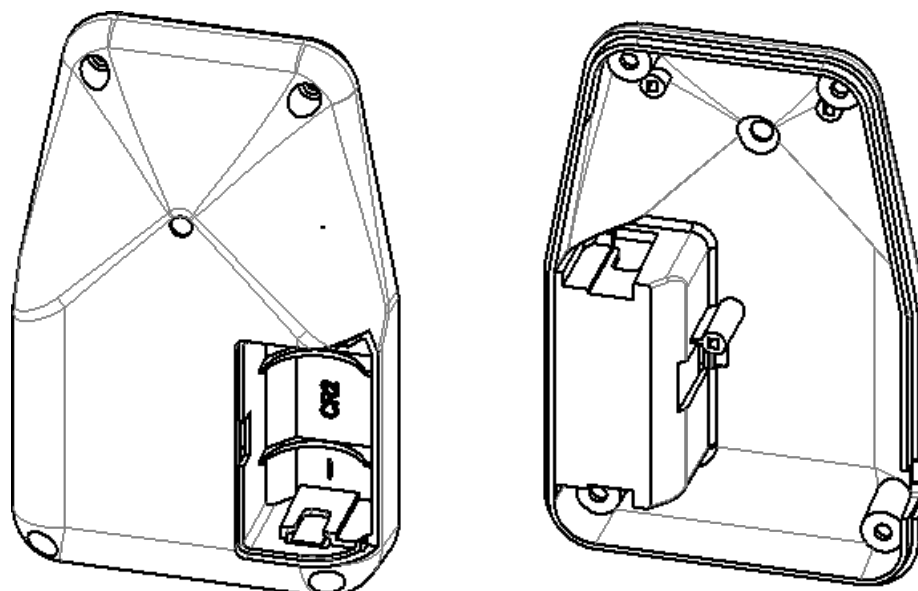


Рисунок 9.29. Чертеж нижней крышки прибора.

К точности изготовления корпуса прибора и монтажу оптических элементов устройства (лазера и отклоняющего зеркала) предъявляются жёсткие требования. Оптическая схема прибора рассчитана так, что луч лазера, отражаясь от зеркала, должен падать на оптический элемент строго перпендикулярно (рисунок 9.1). Для юстировки и окончательной фиксации лазера в корпусе устройства предусматриваются две направляющие (рисунок 9.28). Отклоняющее зеркало располагается вместе с лазером на верхней крышке устройства под углом 45 градусов, что жёстко фиксирует ход луча на начальном участке.

Луч лазера проходит над верхней платой, попадает на отклоняющее зеркало и проходит сквозь отверстие в электронной плате. Луч лазера сфокусирован на такое расстояние, при

котором он оказывается на плоскости микрорельефа в виде сфокусированного пятна требуемого размера (не более 1 мм). После отражения от микрорельефа рассеянное лазерное излучение формирует CLR-изображение на нижней части платы устройства, где размещены фоточувствительные приёмники в виде двух колец. Данная конфигурация детекторов и разработанные алгоритмы обеспечивают инвариантность контроля относительно поворота устройства. Скрытый защитный признак разработан так, что обеспечивается максимально надёжное распознавание «своего» признака и отсеивание поддельных голограмм.

Фотография прибора приведена на рисунке 9.30.



Рисунок 9.30. Фотография прибора автоматизированного контроля.

## **9.8. Проведение итоговых испытаний прибора автоматизированного контроля**

Итоговые испытания проводились в два этапа. На первом этапе испытания включали в себя тестирование прибора автоматизированного контроля в климатической камере. На втором этапе испытания определялись вероятности ошибок автоматизированного контроля.

*1.Климатические испытания* проводились с целью определения работоспособности прибора автоматизированного контроля в экстремальных условиях. Наиболее оптимальным



режимом использования прибора является его эксплуатация в закрытом отапливаемом помещении с температурой от +15 до +30°C и влажности от 30 до 60%. Тем не менее, испытания были проведены в широком диапазоне параметров – от -18°C до +40°C и влажности от 50 до 70%. Климатические испытания проводились с использованием климатической камеры ESPEC, позволяющей тестировать работоспособность прибора в диапазоне температур от -40 до +100°C, влажности – от 20% до 98%. Проведение таких испытаний представляется важным, поскольку доставка прибора может осуществляться в разных климатических условиях, включающих как низкие, так и высокие температуры. Тестирование работоспособности прибора осуществлялось при температуре от -18 до +40°C. Испытания проводились на изготовленных нанооптических элементах первого и второго типа. Испытания показали, что прибор является работоспособным даже при температуре -18 и +40°C, то есть вполне выдерживает условия транспортировки. Тем не менее, после транспортировки в экстремальных условиях рекомендуется адаптация прибора в течение 30 минут.

*2. Проведение испытаний для определения ошибок автоматизированного контроля первого и второго рода.* Ошибка первого рода – когда в результате контроля «своего» объекта объект идентифицируется как «чужой». Ошибка второго рода – когда в результате контроля «чужого» объекта объект идентифицируется как «свой».

На первом этапе идентифицировались образцы нанооптических элементов первого типа («свой»). Вероятность правильного распознавания определялась при повторении процедуры контроля 250 раз. В 100% испытаний оптический элемент был корректно распознан как «свой».

На втором этапе идентифицировались образцы нанооптических элементов второго типа («свой»). Вероятность правильного распознавания определялась при повторении процедуры контроля 250 раз. В 100% испытаний оптический элемент был корректно распознан как «свой».

На третьем этапе был проведён контроль работы прибора автоматизированного контроля на двух оптических элементах, на которых нет защитных оптических CLR-признаков («чужой»). Для проведения испытаний были выбраны два оптических защитных элемента, не содержащих защитный CLR-признак для автоматизированного контроля. Для каждого образца процедура автоматизированного контроля повторялась 250 раз. В 100% испытаний оптический элемент был корректно распознан как «чужой».

Таким образом, испытания, проведённые на изготовленных образцах нанооптических элементов, позволяют утверждать, что достоверность правильного распознавания составила не хуже 0.1%.

## 9.9. Выводы

1. В Главе 9 диссертации впервые разработаны нанооптические элементы для автоматизированного контроля подлинности [А24]. Предложены два варианта нанооптических элементов. В первом варианте для автоматизированного контроля используется выделенная область оптического элемента. Во втором варианте автоматизированный контроль можно осуществлять в любой точке оптического элемента. Нанооптические элементы являются многоградационными и изготавливаются с помощью электронно-лучевой технологии и надежно защищены от подделок.

2. Впервые разработан защитный признак инвариантный относительно поворота и сдвига прибора автоматизированного контроля.

3. Впервые разработаны портативные приборы автоматизированного контроля с высоким уровнем достоверности. Вес портативного прибора менее 80 грамм.

4. Проведены климатические и тестовые испытания портативного прибора автоматизированного контроля нанооптических элементов, которые продемонстрировали высокую надежность и эффективность автоматизированного контроля.

## Заключение

На основании проведенной в диссертации работы можно сделать следующие выводы:

1. Разработаны методы синтеза нанооптических элементов для формирования 2D и 3D изображений, их регистрации и обработки. Нанооптические элементы представляют собой плоские рельефные микроструктуры глубиной до 300 нанометров. Синтез нанооптических элементов включает в себя как расчет микрорельефа, так и его формирование. Для формирования микрорельефа используется электронно-лучевая литография. Разработаны методы формирования многоградационного микрорельефа с точностью 10 нанометров по глубине. Нанооптические элементы предназначены для визуального, экспертного и автоматизированного контроля подлинности банкнот, ценных бумаг, паспортов, ID, пластиковых карт, акцизных марок, брендов.

2. Разработаны эффективные методы расчета микрорельефа бинарных нанооптических элементов, формирующих 2D изображения с кинетическими эффектами движения при изменении положения оптического элемента относительно наблюдателя. Расчет микрорельефа нанооптических элементов осуществляется в два этапа. Область оптического элемента разбивается на элементарные области размером менее 100 микрон, общее количество элементарных областей составляет несколько сотен тысяч. На первом этапе алгоритма в каждой элементарной области рассчитывается диаграмма направленности рассеянного излучения. Диаграмма направленности в каждой элементарной области однозначно определяется заданием

нескольких сот кадров 2D изображений. Каждая элементарная область может участвовать в формировании всех кадров изображения. На втором этапе алгоритма по заданной диаграмме направленности рассчитывается фазовая функция киноформа в каждой элементарной области и микрорельеф всего нанооптического элемента.

3. Впервые разработаны и изготовлены бинарные нанооптические элементы на основе бинарных киноформов, формирующие 2D изображения, фрагменты которых смещаются друг относительно друга при изменении положения оптического элемента относительно наблюдателя.

4. Впервые разработаны и изготовлены нанооптические элементы на основе плоских внеосевых линз Френеля с параболической и седлообразной фазовой функцией и дифракционных решеток с периодами менее 500 нанометров. Размер минимальной зоны линз составляет 1 микрон. Фрагменты изображения (цифр, букв, символов) состоят из ярких точек. При наклоне оптического элемента фрагменты изображений сдвигаются друг относительно друга. Максимальный эффект сдвига достигается, если соседние фрагменты изображения имеют разные знаки фазовых функций, а линзы Френеля пересекаются на половину диаметра. Эффект движения фрагментов изображение наблюдается при углах дифракции менее 40 градусов. При углах дифракции более 60 градусов наблюдатель видит на всей области оптического элемента другое 2D изображение, формируемое дифракционными решетками.

5. Впервые разработаны и изготовлены многоградационные нанооптические элементы на основе многоградационных киноформов, формирующие эффект смены двух 2D изображений при повороте оптического элемента на 180 градусов. Предложены два варианта реализации эффекта. В первом варианте наблюдатель видит разные 2D изображения при повороте элемента на 180 градусов. Во втором варианте реализации эффекта изображение при повороте на 180 градусов меняет свою цветность и контрастность. Многоградационный микрорельеф нанооптических элементов сформирован с помощью электронно-лучевой литографии с точностью 10 нанометров по глубине.

6. Предложен новый плоский многоградационный оптический элемент, фазовая функция которого равна сумме киноформа, формирующего изображение символа, и поверхности второго порядка, определяющей характер движения символа. Исследованы несколько вариантов реализации нового оптического элемента, которые позволяют формировать движение символов нескольких символов при наклонах оптического элемента вверх/вниз и влево/вправо. С помощью электронно-лучевой литографии изготовлены образцы нанооптических элементов с точностью формирования микрорельефа 10 нанометров по глубине, которые продемонстрировали как эффект движения символов, так и эффект превращения одного символа в другой.

7. Разработаны и изготовлены нанооптические элементы на основе плоских многоградационных осевых линз Френеля и дифракционных решеток с периодами менее 500 нанометров, формирующие 2D изображения с кинетическими эффектами движения по одной из координат. Это визуальный эффект ориентирован в первую очередь на использование для

защиты в узких банкнотных нитях. Формируемое изображение состоит из светлых и темных полос, перпендикулярных направлению нити. В предпочтительном варианте нить разбивается на две полосы вдоль ее направления, при этом знаки фазовых функций плоских многоградационных линз противоположны в этих полосах, что обеспечивает легко контролируемый эффект разнонаправленного движения полос, наблюдаемый в углах дифракции менее 40 градусов. Фрагменты дифракционных решеток формируют дополнительное цветное 2D изображение, видимое наблюдателю при углах дифракции более 60 градусов.

8. Разработаны эффективные методы расчета микрорельефа нанооптических элементов, формирующих 3D изображения. Расчет микрорельефа нанооптических элементов осуществляется в два этапа. Область оптического элемента разбивается на элементарные области размером менее 100 микрон. На первом этапе алгоритма в каждой элементарной области рассчитывается диаграмма направленности рассеянного излучения. Диаграмма направленности в каждой элементарной области однозначно определяется заданием 2D-кадров изображений, видимых наблюдателю из разных точек наблюдения. Двумерные кадры изображений получаются из компьютерной 3D-модели объекта. Каждая элементарная площадка может участвовать в формировании всех кадров изображения. На втором этапе алгоритма по заданной диаграмме направленности рассчитывается фазовая функция киноформов в элементарных областях.

9. Разработаны и изготовлены образцы бинарных нанооптических элементов, формирующие 3D изображения с полным параллаксом в первом порядке дифракции. Разработаны и изготовлены многоградационные нанооптические элементы, формирующие 3D изображения с полным параллаксом в нулевом порядке дифракции. Точность формирования микрорельефа элементов составляет 10 нанометров по глубине. Особенностью 3D изображения в нулевом порядке дифракции является возможность наблюдения 3D изображение при повороте элемента на 360 градусов.

10. Разработаны и изготовлены образцы нанооптических элементов, формирующих эффект смены двух 3D-изображений при наклоне оптического элемента. Нанооптические элементы формируют 3D-изображения с помощью бинарных и многоградационных дифракционных решеток разной направленности и периодов. Использование многоградационных элементов позволяет обеспечить угловой зазор 25 градусов между областями наблюдения 3D изображений, что обеспечивает чистый эффект смены двух 3D изображений при освещении элемента белым светом.

11. Разработаны и изготовлены нанооптические элементы формирующие 3D изображения на неплоской поверхности. В качестве примера рассчитан и изготовлен плоский нанооптический элемент, который при помещении на цилиндрическую поверхность формирует заданное 3D изображение с углом обзора 360 градусов. Для формирования микрорельефа нанооптического элемента использовались дифракционные решетки с минимальным периодом 540 нанометров.

12. Исследованы возможности использования смартфонов для автоматизированного контроля подлинности нанооптических элементов. Предложено использование киноформных структур

для формирования рельефа нанооптических элементов. Показано, что для автоматизированного контроля в этом случае можно использовать только бинарные структуры оптических элементов. Показано, что в предпочтительном варианте реализации автоматизированного контроля с помощью смартфона для увеличения разрешения необходимо использовать специальную увеличивающую приставку с объективом.

13. Разработаны и изготовлены нанооптические элементы для автоматизированного контроля. Предложены два типа нанооптических элементов на основе многоградационных киноформов. Элементы первого типа содержат выделенную область, предназначенную для автоматизированного контроля. Элементы второго типа позволяют осуществлять контроль подлинности оптического элемента в любой его точке. В нанооптических элементах второго типа на всей области оптического элемента расположены фрагменты многоградационных киноформов размером не более 100 микрон. Расстояние между соседними фрагментами киноформа также составляет порядка 100 микрон, что делает возможным проводить верификацию подлинности оптического элемента в любой его точке. Разработан защитный признак для автоматизированного контроля инвариантный относительно сдвига и поворота прибора контроля.

14. Разработаны и изготовлены портативные приборы автоматизированного контроля подлинности нанооптических защитных элементов с использованием когерентного излучения. Регистрация изображений осуществляется кольцевыми детекторами. Процедура верификации подлинности защитного элемента осуществляется микропроцессором с помощью разработанного алгоритма распознавания менее чем за 10 миллисекунд. Вес портативного прибора 80 граммов. Процедура контроля относительно сдвига и поворота прибора контроля.

### **Рекомендации по использованию результатов**

Разработанные в диссертации методы синтеза защитных плоских оптических элементов уже используются в продукции АО “Гознак” с 2010 года по настоящее время.

Все разработки нанооптических элементов в диссертации прежде всего ориентированы на защитные технологии. В настоящее время подделывают все: банкноты, ID, пластиковые карты, документы, акцизные марки, бренды. Подделывают и защитные оптические элементы. Разработанные технологии синтеза ориентированы на использование электронно-лучевой технологии. Изготовленные нанооптические элементы имеют разрешение 0,1 микрона при точности изготовления микрорельефа по глубине порядка 10-15 нанометров. Разработанные нанооптические элементы невозможно подделать с помощью широко распространенных оптических методов записи оригиналов защитных элементов, которые используются практически всеми изготовителями оптических защитных голографических элементов.

Нанооптические элементы, разработанные в диссертации, могут быть тиражированы, что обеспечивает их низкую цену при массовом производстве.

Новые защитные элементы не имеют аналогов. Визуальные защитные признаки являются простыми и легко контролируемые. Особое место в разработке методов защиты занимает автоматизированный контроль. Процедура идентификации в этом случае не требует от проверяющего квалификации. Вероятность ошибки при верификации не превышает 0,1%.

Полученные результаты позволяют рекомендовать разработанные методы расчета оптических элементов, формирующих 3D изображения в разрабатываемых системах синтеза 3D изображений. К таким разработкам относится, например, системы формирования 3D изображений на основе жидкокристаллических кристаллов. Разработанные в диссертации методы позволяют рассчитывать фазовую функцию в элементарных областях, что может быть использовано в новых 3D проекторах. При необходимости время расчета фазовых функций нанооптического элементов для формирования 3D изображений может быть сокращено в сотни раз при использовании суперкомпьютерных технологий. Поскольку расчет фазовых функций в каждой элементарной области производится независимо распараллеливание вычислений можно сделать очень эффективным. Среди суперкомпьютерных платформ для расчета фазовых функций нанооптических элементов наиболее приемлемой является GPU платформа. Последние годы появились прорывные технологии в области супервычислений к которым безусловно относится разработка плат с 400 000 ядер (Cerebras WaferScaleEngine). Использование этих технологий вполне может позволить сократить время расчетов до долей секунды.

Большая часть банкнот в настоящее время выпускается на бумажном носителе. Пластиковым носителям отдают предпочтение страны с жарким и влажным климатом. В последнее время появилась тенденция, когда банкноты на пластиковом носителе выпускаются и странами, в которых большая часть банкнот циркулирует на бумажном носителе. К числу этих стран можно отнести и Россию. Разработанные в диссертации нанооптические элементы и методы их контроля с большой эффективностью могут быть использованы для защиты банкнот на пластиковом носителе.

В последнее время повышаются требования к защите документов, паспортов и ID карт. Разработанные в диссертации нанооптические элементы для формирования как 2D, так и 3D изображений могут быть использованы для этих целей.

## Список опубликованных работ по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих  
Положению о присуждении учёных степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова:

- A1. Гончарский А.А.,** Нестеров А.В., Низьев В.Г., Новикова Л.В., Якунин В.П. *Оптические элементы лазерного резонатора для генерации луча с осесимметричной поляризацией* // Оптика и спектроскопия, 2000, Т. 89, № 1, С.146–149. **IF = 0,904 (РИНЦ)**. Общий объём статьи = 0,8 п.л.; личный вклад = 0,4 п.л.
- A2. Гончарский А.А.,** Туницкий Д.В. *Об обратной задаче синтеза оптических элементов для лазерного излучения* // Вычислительные методы и программирование, 2006, Т. 7, № 1, С. 138–162. **IF = 0,516**. Общий объём статьи = 1,8 п.л.; личный вклад = 1,0 п.л.
- A3. Гончарский А.А.** *Об одной задаче синтеза нанооптических элементов* // Вычислительные методы и программирование, 2008, Т. 9, № 4, С. 405–408. **IF = 0,516 (РИНЦ)**. Общий объём статьи = 0,5 п.л.
- A4. Гончарский А.А.** *О некоторых задачах синтеза плоской дифракционной оптики в оптическом диапазоне длин волн* // Вычислительные методы и программирование, 2009, Т. 10, № 3, С. 286–289. **IF = 0,516 (РИНЦ)**. Общий объём статьи = 0,5 п.л.
- A5. Гончарский А.А.,** Дурлевич С.Р. *Нанооптические элементы для формирования 2D-изображений* // Вычислительные методы и программирование, 2010, Т. 11, № 3, С. 246–249. **IF = 0,516 (РИНЦ)**. Общий объём статьи = 0,5 п.л.; личный вклад = 0,3 п.л.
- A6. Гончарский А.А.,** Дурлевич С.Р. *Об одной задаче синтеза нанооптических элементов для формирования динамических изображений* // Вычислительные методы и программирование, 2013, Т. 14, № 3, С. 343–347. **IF = 0,516 (РИНЦ)**. Общий объём статьи = 0,5 п.л.; личный вклад = 0,3 п.л.
- A7. Гончарский А.А.,** Дурлевич С.Р. *Об одной задаче синтеза нанооптических защитных элементов* // Вычислительные методы и программирование, 2015, Т. 16, № 2, С. 290–297. **IF = 0,516 (РИНЦ)**. Общий объём статьи = 0,6 п.л.; личный вклад = 0,4 п.л.
- A8. Goncharsky A.V., Goncharsky A.A., Durlevich S.R.** *Diffraction optical element with asymmetric microrelief for creating visual security features* // Optics Express, 2015, Vol. 23, No. 22, P. 29184–29192. **JIF = 3,561 (WoS)**. Общий объём статьи = 0,6 п.л.; личный вклад = 0,4 п.л.
- A9. Гончарский А.А.,** Серёжников С.Ю. *Об одной задаче синтеза бинарных нанооптических элементов* // Вычислительные методы и программирование, 2016, Т. 17, № 4, С. 415–424. **IF = 0,516 (РИНЦ)**. Общий объём статьи = 0,8 п.л.; личный вклад = 0,5 п.л.
- A10. Goncharsky A.V., Goncharsky A.A., Durlevich S.R.** *Diffraction optical element for creating visual 3D images* // Optics Express, 2016, Vol. 24, No. 9, P. 9140–9148. **JIF = 3,561 (WoS)**. Общий объём статьи = 0,6 п.л.; личный вклад = 0,4 п.л.
- A11. Goncharsky A.V., Goncharsky A.A., Durlevich S.R.** *High-resolution full-parallax computer-generated holographic stereogram created by e-beam technology* // Optical Engineering, 2017, Vol. 56, No. 6, P. 063105. **JIF = 0,993 (WoS)**. Общий объём статьи = 0,9 п.л.; личный вклад = 0,5 п.л.

- A12. Goncharsky A.A., Durlevich S.R.** *Cylindrical computer-generated hologram for displaying 3D images* // Optics Express, 2018, Vol. 26, No. 17, P. 22160–22167. **JIF = 3,561 (WoS)**. Общий объём статьи = 0,5 п.л.; личный вклад = 0,3 п.л.
- A13. Goncharsky A.A., Durlevich S.R.** *High-resolution computer-generated hologram for creating 2D images with kinematic effects of motion* // Journal of Optics, 2020, Vol. 22, No. 11, P. 115702. **JIF = 2,516 (WoS)**. Общий объём статьи = 0,5 п.л.; личный вклад = 0,3 п.л.
- A14. Гончарский А.А., Дурлевич С.Р.** *Об одной обратной задаче синтеза нанооптических защитных элементов для визуального и автоматизированного контроля* // Вычислительные методы и программирование, 2020, Т. 21, № 1, С. 56–63. **IF = 0,516 (РИНЦ)**. Общий объём статьи = 0,5 п.л.; личный вклад = 0,3 п.л.
- A15. Goncharsky A.A., Durlevich S.R.** *DOE for the formation of the effect of switching between two images when an element is turned by 180 degrees* // Scientific reports, 2020, Vol. 10, P. 10606. **JIF = 4,379 (WoS)**. Общий объём статьи = 0,7 п.л.; личный вклад = 0,4 п.л.
- A16. Goncharsky A.V., Goncharsky A.A., Melnik D.V., Durlevich S.R.** *Nanooptical elements for visual verification* // Scientific reports, 2021, Vol. 11, P. 2426. **JIF = 4,379 (WoS)**. Общий объём статьи = 0,6 п.л.; личный вклад = 0,4 п.л.
- A17. Goncharsky A.V., Goncharsky A.A., Durlevich S.R., Melnik D.V.** *Synthesis of nano-optical elements for zero-order diffraction 3D imaging.* // Scientific reports, 2022, Vol. 12, P. 8639. **JIF = 4,379 (WoS)**. Общий объём статьи = 0,7 п.л.; личный вклад = 0,4 п.л.

#### Патенты:

- A18. Гончарский А.А., Гончарский А.В., Дурлевич С.Р., Мельник Д.В.** Патент ЕАПО № EA017394B1 «Микрооптическая система формирования визуальных изображений».
- A19. Goncharsky A.A., Goncharsky A.V., Durlevich S.R.** Patent No. EP2546070B1 “Microoptical system for forming visual images” (European Patent Organization).
- A20. Гончарский А.А., Гончарский А.В., Дурлевич С.Р.** Патент ЕАПО № EA018197B1 «Микрооптическая система формирования динамических визуальных изображений».
- A21. Гончарский А.А., Гончарский А.В., Дурлевич С.Р., Мельник Д.В.** Патент ЕАПО № EA031691B1 «Микрооптическая система для формирования изображений с кинематическими эффектами движения».
- A22. Goncharsky A.V., Goncharsky A.A., Durlevich S.R., Melnik D.V.** Patent No. EP3466712B1 “Micro-optic system for forming visual images with kinematic effects of movement” (European Patent Organization).
- A23. Гончарский А.А., Гончарский А.В., Дурлевич С.Р., Сережников С.Ю.** Патент ЕАПО № EA031709B1 «Микрооптическая система для формирования 2D изображений с кинематическими эффектами движения».
- A24. Гончарский А.А., Гончарский А.В., Чернышев А.В.** Патент ЕАПО № EA018419B1 «Способ защиты и идентификации оптических защитных меток (варианты) и устройство для его осуществления».



**A25. Гончарский А.А.,** Гончарский А.В., Дурлевич С.Р., Мельник Д.В. Патент ЕАПО № ЕА030058В1 «Микрооптическая система формирования визуальных изображений с кинематическими эффектами движения».

**A26. Гончарский А.А.,** Гончарский А.В., Дурлевич С.Р., Мельник Д.В. Патент ЕАПО № ЕА036455В1 «Способ синтеза плоских дифракционных оптических элементов для формирования визуальных 3D-изображений в нулевом порядке дифракции».

*Другие рецензируемые издания:*

**A27. Goncharsky A.A.,** Goncharsky A.V., Durlevich S.R., Melnik D.V. *3D zero-order imaging – a new holographic principle* // Optics and Photonics News, 2022, Vol. 12, Optics in 2022, p. 57. **JIF = 2,377 (WoS)**

*Книги:*

**A28. Goncharsky A.V., Goncharsky A.A.** Computer Optics & Computer Holography. — Moscow University Press, 2004. — 294 p.

*Публикации в сборниках трудов:*

**A29. Гончарский А.В., Гончарский А.А., Агаян Г.М.** *Об одной задаче обработки изображений при формировании компьютерно-синтезированных голограмм в натуральных цветах* // Прикладная математика и информатика: Труды факультета ВМиК МГУ имени Ломоносова, 1999, №3, С. 56–64.

**A30. Гончарский А.А., Романов С.Ю., Туницкий Д.В.** *О некоторых обратных задачах синтеза плоской компьютерной оптики* // Численный анализ: теория, приложения, программы: Сборник научных трудов, 1999, С. 163–172.

**A31. Goncharsky A.A.** *Advantages of e-beam origination technology* // The Holography Times, 2008, Vol. 2, No. 3, P. 13–14.

**A32. Goncharsky A.A., Durlevich S.R.** *E-beam origination technology: current state and development prospects* // The Holography Times, 2012, Vol. 6, No. 19, P. 15–18.

## Список литературы

1. **Fresnel A.** Mémoire sur la diffraction de la lumière (Memoir on the diffraction of light). // *Annales de Chimie et de Physique*, 1816, Ser. 2, vol. 1, p. 239–281.

2. **Van Renesse R.L.** Optical Document Security // Artech House optoelectronics library (Artech Housed), Norwood, 2005. ISBN 1580532586.

3. **Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.** Методы решения некорректных задач. // М. Наука, 1974.

4. **Тихонов А.Н.** Об устойчивости обратных задач. // ДАН СССР, 1943, № 39(5), с. 195-198.

5. **Тихонов А.Н.** О решении некорректно поставленных задач и методе регуляризации. // ДАН СССР, 1963, № 151(3), с.501-504.

6. **Тихонов А.Н., Леонов А.С., Ягола А.Г.** Нелинейные некорректные задачи. // М. Наука, 1995.
7. **Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г.** Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. // М.: Наука, 1983, 200 с.
8. **Bakushinsky A.B, Goncharsky A.V.** Ill-posed problems: Theory and applications. // Kluwer Acad Publ., Dordrecht/Boston/, London, 1994.
9. **Kabanikhin S.I., Bakanov G.V.** The optimization al method for solving the discrete inverse problem for hyperbolic equation. // *J. Inverse Ill-Posed Probl.*, 1996, Vol. 6, No. 4, p.513–530.
10. **Лаврентьев М.М.** Об одном классе обратных задач для дифференциальных уравнений. // *Докл. АН СССР*, 1965, Т. 160, № 1, с.32-35.
11. **Lavrentyev M.M., Romanov V.G., Shishatskii S.P.** Ill-posed problems of mathematical physics and analysis, translations of mathematical monographs. // *Memoirs of the American Mathematical Society*, 1986, Vol. 64, p.290.
12. **Лаврентьев М.М., Бухгейм А.Л.** Об одном классе операторных уравнений первого рода. // *Функциональный анализ и его приложения*, 1973, Т. 7, № 4, с.44.
13. **Ramm A.G.** Regularization of ill-posed problems with unbounded operators. // *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 2002, Vol. 271, № 2, p.542-545.
14. **Кабанихин С.И., Искаков К.Т.** Обобщенное решение обратной задачи для уравнения колебания. // *Доклады Академии наук*, 2000, Т. 375, № 1, с.22-24.
15. **Romanov V.G., Kabanikhin S.I.** Direct and inverse problems of electromagnetoelasticity. // *Physics and Chemistry of the Earth*, 1998, Vol. 23, № 9-10, p.883-893.
16. **Klibanov M.V.** Carleman weight functions for solving ill-posed cauchy problems for quasilinear PDEs. // *Inverse Problems*, 2015, Vol. 31, № 12, p.125007.
17. **Tikhonov A.N.** Ill Posed Problems in the Natural Sciences. // *MIR Publishers*, 1987, ISBN 0828537399.
18. **Furman S.A., Tikhonravov A.V.** Basics of optics of multilayer systems. // *Editions Frontiers Gif-sur Yvette*, 1992, p.242.
19. **Tikhonravov A.V.** Some theoretical aspects of thin film optics and their applications. // *Applied Optics*, 1993, Vol. 32, № 28, p.5417-5426.
20. **Amotchkina T.V., Trubetskov M.K., Tikhonravov A.V. et al.** Quality control of oblique incidence optical coatings based on normal incidence measurement data. // *Optics Express*, 2013, Vol. 21, № 18, p.21508–21522.
21. **Grigoriev F.V., Sulimov V.B., Tikhonravov A.V.** Application of a large-scale molecular dynamics approach to modelling the deposition of tio2 thin films. // *Computational Materials Science*, 2021, Vol. 188, p.110202.

22. **Zhang J., Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K. et al.** Design and fabrication of ultra-steep notch filters. // *Optics Express*, 2013, Vol. 21, №18, p.21523–21529.
23. **Grigoriev F.V., Sulimov V.B., Tikhonravov A.V.** Anisotropy of glancing angle deposited films: results of atomistic simulation. // *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, Vol. 1730, p.012032.
24. **Сисакян И.Н., Шорин В.П., Сойфер В.А., Мордасов В.И., Попов В.В.** Технологические возможности применения фокусаторов при лазерной обработке материалов. // *Компьютерная оптика*, 1988, том 3, с.94-97.
25. **Голуб М.А., Дегтярева В.П., Климов А.Н., Попов В.В., Прохоров А.М., Сисакян Е.В., Сисакян И.Н., Сойфер В.А.** Машинный синтез фокусирующих элементов для СО2-лазера. // *Письма в журнал технической физики*, издательство Наука (СПб.), 1982, том 8, № 8, с.449-451.
26. **Данилов В.А., Попов В.В., Прохоров А.М., Сагателян Д.М., Сисакян И.Н., Сойфер В.А.** Синтез оптических элементов, создающих фокальную линию произвольной формы. // *Письма в журнал технической физики*, издательство Наука (СПб.), 1982, том 8, № 13, с.810-815.
27. **Goncharsky A.V., Stepanov V.V.** The existence of smooth solution in problems of electromagnetic-radiation focusing. // *Doklady Akademii nauk SSSR, Akademiia Nauk Sssr*, 1984, Vol. 279, № 4, p.788-792.
28. **Гончарский А.В., Степанов В.В.** Обратные задачи когерентной оптики. Фокусировка в линию. // *Журнал вычислительной математики и математической физики*, издательство Наука (М.), 1986, том 26, № 1, с.80-91.
29. **Гончарский А.В., Данилов В.А., Попов В.В., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Сойфер В.А., Степанов В.В.** Фокусаторы лазерного излучения, падающего под углом. // *Квантовая электроника*, издательство Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (Москва), 1984, том 11.
30. **Гончарский А.В., Данилов В.А., Попов В.В., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Сойфер В.А., Степанов В.В.** Решение обратной задачи фокусировки лазерного излучения в произвольную кривую. // *Доклады Академии наук*, издательство Наука (М.), 1983, том 273, № 3.
31. **Акопян В.С., Карпеев С.В., Краснов М.М., Наумиди Л.П., Попов В.В., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Сойфер В.А.** Способ изготовления оптического корректирующего элемента. // *патент 1544045*, 1989.
32. **Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Soifer V.A., Perlo P., Repetto P.** Design of DOEs for wavelength division and focusing. // *Journal of Modern Optics*, 2005, Vol. 52, № 6, p.917-926.
33. **Сойфер В.А.** Нанопотоника и дифракционная оптика. // *Компьютерная оптика*, 2008, Т. 32, № 2, с.110-118.
34. **Головашкин Д.Л., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Котляр В.В., Павельев В.С., Скиданов Р.В., Сойфер В.А., Хонина С.Н.** Дифракционная компьютерная оптика. // Москва, 2007.

- 35. Kotlyar V.V., Kovalev A.A., Soifer V.A.** Subwavelength focusing with a Mikaelian planar lens. // *Optical Memory & Neural Networks (Information Optics)*, 2010, Vol. 19, № 4, p.273-278.
- 36. Pavelev V.S., Soifer V.A., Volkov A.V., Konov V.I., Kononenko V.V.** Diffractive microoptics for technological IR-lasers. // *High-Power and Femtosecond Lasers: Properties, Materials and Applications*, Nova Science Publishers, Inc., 2009, p. 125-158.
- 37. V.A., Kotlyar V.V., Khonina S.N.** Subwavelength focusing of laser light by microoptics devices. // *Soifer Computational Nanotechnology*, 2014, № 1, p.52-53.
- 38. Soifer V.A., Golovashkin D.L., Doskolovich L.L., Kazansky N.L., Kotlyar V.V., Pavelev V.S., Skidanov R.V., Khonina S.N.** Computer design of diffractive optics. // *Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials*, Cambridge, 2013, Vol. 50.
- 39. Soifer V.A., Kotlyar V.V., Khonina S.N.** Optical microparticle manipulation: advances and new possibilities created by diffractive optics. // *Physics of Particles and Nuclei*, 2004, Vol. 35, № 6, p.733-766.
- 40. Stafeev S.S., Kotlyar V.V., Nalimov A.G., O'Faolain L.** Focusing of laser light by sectoral spiral metalens. // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 12, Metamaterials XII, 2019, p.110250Z.
- 41. Khonina S.N., Kotlyar V.V., Soifer V.A., Lautanen J., Honkanen M., Turunen J.** Generating a couple of rotating non-diffracting beams using a binary-phase DOE. // *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 1999, Vol.110, № 3, p.137-144.
- 42. Ковалев М.С., Красин Г.К., Малинина П.И., Одинокоев С.Б.** Датчик волнового фронта на основе голограммных оптических элементов. // *V Международная конференция по фотонике и информационной оптике. Сборник научных трудов*, 2016, с.209-210.
- 43. Бетин А.Ю., Град Я.А., Николаев В.В., Одинокоев С.Б., Соломашенко А.Б.** Голографический индикатор на основе рельефно-фазовых дифракционных решеток. // *V Международная конференция по фотонике и информационной оптике. Сборник научных трудов*, 2016, с.225-226.
- 44. Odinkov S.B., Solomashenko A.B., Stsepuro N.G.** The use of holographic optical elements in optical systems sights. // *Indian Journal of Science and Technology*, 2016, Vol.9, № 47, p.104552.
- 45. Лушников Д.С., Маркин В.В., Одинокоев С.Б., Усович Е.А., Вереникина Н.М., Гончаров А.С., Николаев А.И., Колесников В.Ю.** Устройство записи мультиплексных голограмм в системе оптико-голографической памяти (варианты). // *Патент на полезную модель RU80968U1*, 27.02.2009.
- 46. Lesem L.B., Hirsch P.M., Jordan J.A.Jr.** The kinoform: a new wavefront reconstruction device. // *IBM J. Res. Dev.*, 1969, Vol.13, p.105-155.

47. **Gerchberg R.W., Saxton W.O.** A practical algorithm for the determination of the phase from image and diffraction plane pictures. // *Optik*, 1972, Vol.35, p.237–246.
48. **Palmer C.** Diffraction Grating Handbook. // Newport Corporation, 2005.
49. **Palmer C.** Diffraction Grating Handbook. // Newport Corporation, 2020, eighth edition.
50. **Gabor D.** A new microscopic principle. // *Nature*, 1948, Vol.161, p.777-778.
51. **Zech R.G., Siebert L.D.** Pulsed laser reflection holograms. // *Appl. Phys. Lett.*, 1968, Vol.13, p. 417-418.
52. **Benton S.A.** Hologram reconstructions with extended incoherent sources. // *Optical Society of America*, 1969, Vol.59, p.1545-1546.
53. **Денисюк Ю.Н.** Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения. // *Докл. АН СССР*, 1962, 144:6, с.1275-1278.
54. **Денисюк Ю. Н., Суханов В. И.** Голограмма с записью в трехмерной среде как наиболее совершенная форма изображения. // *Успехи физических наук*, 1970, Вып. № 6.
55. **Blanche, P.A. et al.** Holographic three-dimensional telepresence using large-area photorefractive polymer. // *Nature*, 2010, Vol.468, p.80-83.
56. **Park J.H.** Recent progress in computer-generated holography for three-dimensional scenes. // *Journal of Information Display*, 2017, Vol.18:1, p. 1-12.
57. **Cho J., Kim H., Yeom J., Li G., and Lee B.** Rendering of reflective surfaces in polygon based computer generated holograms. // *Imaging and Applied Optics, OSA Technical Digest (online)*, 2015, paper JT5A.21.
58. **Vasconcellos F.C., Yetisen A.K., Montelongo Y., Butt H., Grigore A., Davidson Colin A.B., Blyth J., Monteiro M.J., Wilkinson T.D., Lowe C.R.** Printable Surface Holograms via Laser Ablation. // *ACS Photonics*, 2014, Vol.10.
59. **Tamulevičius T., Juodenas M., Klinavičius T., Paulauskas A., Jankauskas K., Ostreika A., Žutautas A., Tamulevičius S.** Dot-matrix hologram rendering algorithm and its validation through direct laser interference patterning. // *Scientific Reports*, 2018, Vol.8, p.14245.
60. **Zhao Q.Z., Qiu J.R., Jiang X.W., Dai E.W., Zhou C.H., Zhu C.S.** Direct writing computer-generated holograms on metal film by an infrared femtosecond laser. // *Opt. Express*, 2005, Vol.13, p.2089-2092.
61. **Wædegaard K.J., Balling P.** High-resolution computer-generated reflection holograms with three-dimensional effects written directly on a silicon surface by a femtosecond laser. // *Opt. Express*, 2011, Vol.19, p.3434-3439.
62. **Manfrinato V.R., Zhang L., Su D., Duan H., Hobbs R.G., Stach E.A., Berggren K. K.** Resolution Limits of Electron-Beam Lithography toward the Atomic Scale. // *Nano Lett.*, 2013, Vol.13, p. 1555-1558.

- 63. Petrov N.I., Danilov V.A., Popov V.V., Usievich B.A.** Large positive and negative goos-hänchen shifts near the surface plasmon resonance in subwavelength grating. // *Optics Express*, 2020, Vol. 28, no. 5, p.7552–7564.
- 64. Petrov N.I., Danilov V.A., Popov V.V., Usievich B.A.** Resonance absorption of visible light by subwavelength gratings. // *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, Vol.1461, p.012131–012131.
- 65. Zvyagina A.I., Ezhov A.A., Meshkov I.N. et al.** Plasmon resonance-enhanced absorption of visible light in ultrathin hybrid films of organic dyes and gold nanoparticles. // *V International Conference on Colloid Chemistry and Physicochemical Mechanics. Book of Abstracts.*, 2018, p.73.
- 66. Zvyagina A.I., Ezhov A.A., Ivanov V.K. et al.** Highly tunable plasmonic assemblies of gold nanoparticles: in-plane manipulation of plasmon coupling with nanometer precision. // *Journal of Materials Chemistry*, 2015, Vol.3, 45, p.11801–11805.
- 67. Lopushenko I.V., Wriedt T., Zavestovskaya I.N.** Effect of spatial dispersion on plasmon resonance in silver nanoparticles. // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2019, Vol. 46, №12, p. 400–404.
- 68. Hao J., Kaminska. B., Porras H., Raymond M., Kapus T.** Microlens Arrays above Interlaced Plasmonic Pixels for Optical Security Devices with High-Resolution Multicolor Motion Effects. // *Advanced Optical Materials*, 2019, Vol.7, 1900237.
- 69. Сухоруков А.П., Сапарина Д.О., Калиш А.Н.** Поверхностные плазмон-поляритонные волны терагерцового диапазона в оптически активных средах. // *Вестник НГУ. Серия: Физика*, 2010, Т. 5, Вып. 4, с. 154-157. ISSN 1818-7994.
- 70. Лёвкина Г.Ю., Сапарина Д.О., Калиш А.Н., Сухоруков А.П.** Поверхностные плазмон-поляритонные волны в оптически активных средах. // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*, 2010, Т.74, № 12, с.1778–1781.
- 71. Хохлов Н.Е., Игнатьева Д.О., Белотелов В.И., Сухоруков А.П.** Управление формой и скоростью импульса плазмон-поляритонов посредством фотовозбуждения электронов металла. // *Ученые записки физического факультета Московского Университета*, 2014, № 4, с.144336.
- 72. Lancaster I.M., Mitchell A.** The growth of optically variable features on banknotes. // *Processing of SPIE 5310, Optical Security and Counterfeit Deterrence Techniques V*, 2004.
- 73. Lee R.A.** Pixelgram: an application of electron-beam lithography for the security printing industry Holographic Optical Security Systems. // *SPIE*, 1991, 1509, p. 48 – 54.
- 74. Firsov An., Firsov A., Loechel B., Erko A., Svintsov A., Zaitsev S.** Fabrication of digital rainbow holograms and 3D imaging using SEM based e-beam lithography. // *Optics Express*, 2014, Vol.22, p. 28756-28770.

75. Yasuda T., Kitamura M., Watanabe M., Tsumuta M., Yamaguchi T., Yoshikawa H. Computer simulation of reconstructed image for computer-generated holograms. // *Practical Holography XXIII: Materials and Applications*, 2009, Vol. 7233.
76. Lancaster I.M. Use and Efficacy of DOVIDS and other Optical Security Devices. // *Processing of SPIE 6075, Optical Security and Counterfeit Deterrence Techniques VI*, 2006.
77. Hirsch P.M., Jordan J.A., Lesem L.B. Method of Making an Object-Dependent Diffuser. // *U.S. Patent 3,619,022*, 9 Nov 1971.
78. Борн М., Вольф Э. Основы оптики, 1973.
79. Groetsch C.W., Neubauer A. Regularization of ill-posed problems: Optimal parameter choice in finite dimensions. // *Journal of Approximation Theory*, 1989, Vol.58, Issue 2, p.184-200.
80. Gallagher N.C., Liu B. Method for Computing Kinoforms that Reduces Image Reconstruction Error. // *Appl. Opt.*, 1973, Vol.12, p.2328-2335.
81. Gan M.A. Fifty years of kinoform optics. Results and prospects of development. // *Opt. Technol.*, 2006, Vol.73, p.432-437.
82. Lewy H. Über das Anfangswertproblem einer hyperbolischen nichtlinearen partiellen Differentialgleichung zweiter Ordnung mit zwei unabhängigen Veränderlichen. // *Mathematische Annalen*, 1928, Vol.98, p.179-191.
83. Lewy H. Eindeutigkeit der Lösung des Anfangsproblems einer elliptischen Differentialgleichung zweiter Ordnung in zwei Veränderlichen. // *Mathematische Annalen*, 1931, Vol.104, p.325–339.
84. Goncharsky A.V., Zakgarov E.V., Manakova G.I., Nikitina E.V. On the boundaries of applicability of kirchoff and Fresnel approximation in the inverse problems of plane optics synthesis. // *Doklady Akademii nauk SSSR*, издательство Akademiia Nauk Sssr, Год, Т.301, № 4, с. 840-844.
85. Патент US7468842B2. Image presentation and micro-optic security system.
86. Jackin B.J., Yatagai T. Fast calculation method for computer-generated cylindrical hologram based on wave propagation in spectral domain. // *Opt. Express*, 2010, Vol.18, Issue 25, p.25546–25555.
87. Yamada K., Watanabe W., Li Y., Itoh K. Multilevel phase-type diffractive lenses in silica glass induced by filamentation of femtosecond laser pulses. // *Opt. Lett.*, 2004, Vol. 29, p.1846-1848.;
88. Bendickson J.M., Glytsis E.N., Gaylord T.K. Metallic surface-relief on-axis and off-axis focusing diffractive cylindrical mirrors. // *J. Opt. Soc. Am. A*, 1999, Vol.16, p.113- 130.
89. Mawet D., Riaud P., Surdej J., Baudrand J. Subwavelength surface-relief gratings for stellar coronagraphy. // *Appl. Opt.*, 2005, Vol.44, p.7313-7321.
90. Zhang Y., Poonja S., Roorda A. MEMS-based adaptive optics scanning laser ophthalmoscopy. // *Opt. Lett.*, 2006, Vol.31, p.1268-1270.
91. Chen Y., Sun K., Beker B., Mitra R. Unified Matrix Presentation of Maxwell's and Wave Equations Using Generalized Differential Matrix Operators. // *IEEETrans. Education*, 1998, Vol.41,

p.61-69.

- 92. Johnson S.G., Joannopoulos J.D.** Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis. // *Opt. Exp.*, 2001, Vol.8, p.173-190.
- 93. Rumpf R., Johnson E.G.** Fully three-dimensional modeling of the fabrication and behavior of photonic crystals formed by holographic lithography. // *Journal of the Optical Society of America A*, 2004, Vol.21, p.1703-1713.
- 94. Gimkiewicz C., Hagedorn D., Jahns J., Kley E. B., Thoma F.** Fabrication of microprisms for planar optical interconnections by use of analog gray-scale lithography with high-energy-beam-sensitive glass. // *Applied Optics*, 1999, Vol.38, p.2986-2990.
- 95. Luo R.** Effective medium theories for the optical properties of three-component composite materials. // *Appl. Opt.*, 1997, Vol.36, p.8153-8158.
- 96. Ding Y., Magnusson R.** Doubly resonant single-layer bandpass optical filters. // *Opt. Lett.*, 2004, Vol.29, p.1135-1137.
- 97. Ding F. et al.** Gradient metasurfaces: a review of fundamentals and applications. // *Rep. Prog. Phys.*, 2018, Vol.81, p.026401.
- 98. Lim K.T.P., Liu H., Liu Y. et al.** Holographic colour prints for enhanced optical security by combined phase and amplitude control. // *Nat. Commun.*, 2019, Vol.10, Article 25.
- 99. Rai-Choudhury P., Cerrina F.** Handbook of Microlithography, Micromachining, and Microfabrication. Volume 1: Microlithography, 1997.
- 100. Rai-Choudhury P.** Handbook of Microlithography, Micromachining, and Microfabrication: Microlithography. // *SPIE Optical Engineering Press*, 1997, Ch.2.5.
- 101. Chen Y.** Nanofabrication by electron beam lithography and its applications: a review. // *Microelectron. Eng.*, 2015, Vol.135, p.57–72.
- 102. Ekberg M., Nikolajeff F., Larsson M., Hård S.** Proximity-compensated blazed transmission grating manufacture with direct-writing, electron-beam lithography. // *Appl. Opt.*, 1994, Vol.33, p.103–107.
- 103. Ruffato G. et al.** Design, fabrication and characterization of computer-generated holograms for anti-counterfeiting applications using OAM beams as light decoders. // *Sci. Rep.*, 2017, Vol.7, 18011.
- 104. Hergert J.E., Glugla D.J., Sullivan A.C., Alim M.D., McLeod R.R.** High efficiency Fresnel lens design and fabrication in a two-stage photopolymer. // *Opt. Lett.*, 2019, Vol.44, p.1540-1543.
- 105. Ye C., McLeod R.R.** GRIN lens and lens array fabrication with diffusion-driven photopolymer. // *Opt. Lett.*, 2008, Vol.33, p.2575-2577.
- 106. Milster T.D.** Horizons for Optical Data Storage. // *Optics & Photonics News*, 2005, Vol.16(3), p.28-33.



- 107. Li G., Lee D., Jeong Y., Cho J., Lee B.** Holographic display for see-through augmented reality using mirror-lens holographic optical element. // *Opt. Lett.*, 2016, Vol.41, p.2486-2489.
- 108. Flores A., Wang M.R., Yang J.J.** Achromatic hybrid refractive-diffractive lens with extended depth of focus. // *Appl. Opt.*, 2004, Vol.43, p.5618-5630.
- 109. Fuchs U., Zeitner U.D., Tünnermann A.** Hybrid optics for focusing ultrashort laser pulses. // *Opt. Lett.*, 2006, Vol.31, p.1516-1518.
- 110. Гончарский А.В., Попов В.В., Степанов В.В.** Введение в компьютерную оптику. // Изд. Московского университета, 1991, с.312.
- 111. Patent US9216605B2** Security thread or stripe comprising oriented magnetic particles in ink, and method and means for producing same.
- 112. Patent EP2361188B1.** Magnetically oriented ink on primer layer, 2008.
- 113. Patent US8668848B2.** Metal nanoparticle compositions for reflective features, 2005.
- 114. Patent US8557403B2.** Method and means for magnetically transferring indicia to a coating composition applied on a substrate, 2006.
- 115. Patent EP2542417B1.** Security thread or stripe comprising oriented magnetic particles in ink, and method for producing same, 2010.
- 116. Benzie P., Watson J., Surman P., Rakkolainen I., Hopf K., Urey H., Sainov V., von Kopylow C.** A Survey of 3DTV Displays: Techniques and Technologies. // *IEEE Transactions on circuits and Systems for Video Technology*, November 2007, Vol.17, №11.
- 117. Favalora G.E.** Volumetric 3D Displays and Application Infrastructure. // *Computer*, August 2005, Vol.38.
- 118. Sullivan A.** DepthCube solid-state 3D volumetric display. // *Proc. SPIE 5291, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XI*, 21 May 2004.
- 119. Wakunami K., Hsieh P.Y., Oi R., Senoh T., Sasaki H., Ichihashi Y., Okui M., Huang Y.P., Yamamoto K.** Projection-type see-through holographic three-dimensional display. // *Nature Communications*, 2016, Vol.7, Article number 12954.
- 120. Smalley D.E., Smithwick Q.Y.J., Bove V.M., Barabas J., Jolly S.** Anisotropic leaky-mode modulator for holographic video displays. // *Nature*, 2013, Vol.498, p.313-317.
- 121. Westheimer G.** Three-dimensional displays and stereo vision. // *Proc Biol Sci.*, 2011, Aug 7, Vol.278(1716), p.2241-2248.
- 122. Im H.J., Lee B.J., Hong H., Shin H.H.** Auto\_stereoscopic 60 view 3D using slanted lenticular lens arrays. // *Journal of Information Display*, 8:4, p.23-26.
- 123. Okaichi N., Miura M., Arai J., Kawakita M., Mishina T.** Integral 3D display using multiple LCD panels and multi-image combining optical system. // *Optics Express*, 2017, Vol.25, No.3, p.2805-2817.

- 124. Fattal D., Peng Z., Tran T., Vo S., Fiorentino M., Beausoleil R.G.** A multi-directional backlight for a wide-angle, glasses-free 3D display. // *Nature*, 2013, 495, 348-51.
- 125. Kawakita M., Iwasawa S., Lopez-Gulliver R., Inoue N.** Glasses-free large-screen three-dimensional display and super multiview camera for highly realistic communication. // *Optical Engineering*, 2018, Vol.57(6), 061610.
- 126. Kurtzner E.T., Haines K.A.** Multicolor Images with Volume Photopolymer Holograms. // *Appl. Opt.*, 1971, Vol.10, p.2194-2195.
- 127. Денисюк Ю.Н.** Художественная голография с записью в трехмерных средах на основе Липпмановских эмульсий. // *ЖТФ*, 1978, 48, №.8, с.1683-1687.
- 128. Matsushima K., Arima Y., Nakahara S.** Digitized holography: modern holography for 3D imaging of virtual and real objects. // *Appl. Opt.*, 2011, Vol.50, p.278–284.
- 129. Matsushima K., Nakahara S.** A High-Definition Full-Parallax CGH Created by the Polygon-Based Method. // *Conference: Digital Holography and Three-Dimensional Imaging*.
- 130. Lohmann A.W., Paris D.P.** Binary Fraunhofer Holograms, Generated by Computer. // *Appl. Opt.*, 1967, Vol.6, p.1739-1748.
- 131. Brown B.R., Lohmann A.W.** Computer-generated binary holograms. // *IBM J. Res. Dev.*, 1969, Vol.13, p.160–168.
- 132. Yamaguchi I., Matsumura T., Kato J.** Phase-shifting color digital holography. // *Opt. Lett.*, 2002, Vol.27, p.1108-1110.
- 133. Lee C.K., Wu J.W.J., Yeh S.L., Tu C.W., Han Y.A., Liao E.H.Z., Chang L.Y.Y., Tsai I.E., Lin H.H., Hsieh J.C.T., Lee J.T.W.** Optical configuration and color-representation range of a variable-pitch dot matrix holographic printer. // *Appl. Opt.*, 2000, Vol.39, p.40-53.
- 134. Mattelin M.A., Radosavljevic A., Missinne J., Cuypers D., Van Steenberge G.** Design and fabrication of blazed gratings for a waveguide-type head mounted display. // *Opt. Express*, 2020, Vol.28, p.11175-11190.
- 135. Mouroulis P., Hartley F., Wilson D., White V., Shori A., Nguyen S., Zhang M., Feldman M.** Blazed grating fabrication through gray-scale X-ray lithography. // *Opt. Express*, 2003, Vol.11, p.270-281.
- 136. Jeong T.H.** Cylindrical holography and some proposed applications. // *J. Opt. Soc. Am.*, 1967, Vol.57(11), p.1396–1398.
- 137. Soares O.D.D., Fernandes J.C.A.** Cylindrical hologram of 360 degrees field of view. // *Appl. Opt.*, 1982, Vol.21(17), p.3194–3196.
- 138. Sato R., Murata K.** Cylindrical rainbow hologram. // *Appl. Opt.*, 1985, Vol.24(14), p.2161–2165.
- 139. Sando Y., Itoh M., Yatagai T.** Fast calculation method for cylindrical computer-generated holograms. // *Opt. Express*, 2005, Vol.13(5), p.1418–1423.

- 140. Jackin B.J., Yatagai T.** 360° reconstruction of a 3D object using cylindrical computer-generated holography. // *Appl. Opt.*, 2011, Vol.50(34), H147–H152.
- 141. Aleksy M., Vartiainen E., Domova V., Naedele M.** Augmented Reality for Improved Service Delivery. // *IEEE 28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*, 2014. p.382-389.
- 142. Belloni F., Monneret S.** Quadrant kinoform: an approach to multiplane dynamic three-dimensional holographic trapping. // *Applied Optics*, 2007, Vol.46, p.4587-4593.
- 143. Karvinen P. et al.** Kinoform diffractive lenses for efficient nano-focusing of hard X-rays. // *Optics Express*, 2014, Vol.22, p.16676–16685.
- 144. Zhang H., Liu H., Lu Z., Zhang H.** Modified phase function model for kinoform lenses. // *Applied Optics*, 2008, Vol.47, p.4055-4060.
- 145. Tasso R. M. Sales, G. Michae Morris.** Diffractive–refractive behavior of kinoform lenses. // *Applied Optics*, 1997, Vol.36, p.253-257.
- 146. Yuan X-C., Ahluwalia B.P.S., Cheong W.C., Bu J., Niu H.B., Peng X.** Direct electron beam writing of kinoform micro-axicon for generation of propagation-invariant beams with long non-diffracting distance. // *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2007, Vol.9, p.329–334.
- 147. Mohammad F., Anarase J., Shingote M., Ghanwat P.** Optical Character Recognition Implementation Using Pattern Matching // *IJCSIT*, 2014, Vol.5, p.2088-2090.
- 148. Mollah A.F., Majumder N., Basu S., Nasipuri M.** Design of an Optical Character Recognition System for Camera-based Handheld Devices // *IJCSI*, 2011, Vol.8, p.283-289.
- 149. Lowe D.G.** Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. // *International Journal of Computer Vision*, 2004, Vol.60, p.91–110.
- 150. Patent US7591428B2.** Magnetic detection system for use in currency processing and method and apparatus for using the same.
- 151. Patent US8159657B2.** Method and ink sets for marking and authenticating articles.
- 152. Tsyganov I. K., Kolyuchkin V.V., Talalaev V.E., Piryutin N.V., Odinokov S.B., Naiden L.A., Cheburkanov V.D., Zlokazov E.Y.** Opto-electronic scanner for operational control of security holograms authenticity on documents. // *Proc. SPIE 10679, Optics, Photonics, and Digital Technologies for Imaging Applications V*, 24 May 2018, 106791V.
- 153. Tsyganov I. K., Kolyuchkin V.V., Talalaev V.E., Piryutin N.V., Odinokov S.B., Naiden L.A., Cheburkanov V.D., Zlokazov E.Y.** Opto-electronic scanner for operational control of security holograms authenticity on documents. // *Proc. SPIE 10679, Optics, Photonics, and Digital Technologies for Imaging Applications V*, 24 May 2018, 106791V.
- 154. Tsyganov I. K., Kolyuchkin V.V., Talalaev V.E., Piryutin N.V., Odinokov S.B., Naiden L.A., Cheburkanov V.D., Zlokazov E.Y.** New high-performance opto-electronic scanner for authentication.

*// Proc. SPIE 10818, Holography, Diffractive Optics, and Applications VIII, 2 November 2018, 108181S.*

**155. Цыганов И.К., Колючкин В.В., Талалаев В.Е., Пирютин Н.В., Одиноков С.Б., Злоказов Е.Ю.** Оптико-электронный сканер для оперативного контроля подлинности защитных голограмм на документах. *// Голография. Наука и практика. XIV международная конференция HOLOEXPO 2017: тезисы докладов. Общество с ограниченной ответственностью "Микро и наноголографические системы", 2017, с.84-87.*

**156. Колючкин В.В., Злоказов Е.Ю., Одиноков С.Б., Талалаев В.Е., Цыганов И.К.** Оптико-электронный прибор контроля подлинности голограмм на паспортных документах. *// V Международная конференция по фотонике и информационной оптике. Сборник научных трудов, 2016, с.462-463.*