

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

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.

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в лаборатории разработки систем автоматизации обработки изображений Научно-исследовательского вычислительного центра Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Официальные оппоненты:

Короленко Павел Васильевич

доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры оптики, спектроскопии и физики наносистем
физического факультета Московского государственного университета
имени М.В. Ломоносова.

Петров Николай Иванович

доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник отдела твердотельных лазеров и акустооптики
Научно-технологического центра уникального приборостроения
Российской академии наук (НТЦ УП РАН).

Шишленин Максим Александрович

доктор физико-математических наук, профессор РАН,
заместитель директора по науке Института математики имени
С.Л. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук
(ИМ СО РАН).

Защита диссертации состоится «17» октября 2024 года в 15 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета МГУ.013.6, на физическом факультете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, северная физическая аудитория.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций Научной библиотеки Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (119192, г. Москва, Ломоносовский пр-т, д. 27) и в сети Интернет: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3061>

Автореферат разослан «_____» _____ 2024 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета МГУ.013.6
доктор физико-математических наук, доцент
kosareva@physics.msu.ru



О.Г. Косарева

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Разработка методов синтеза оптических элементов в настоящее время является актуальной темой. Нанооптические элементы представляют собой плоские рельефные дифракционные элементы, микрорельеф которых при освещении его белым или когерентным светом формирует 2D или 3D изображения. Первые плоские оптические элементы были предложены Френелем более 200 лет назад. В настоящее время плоские дифракционные элементы широко используются в оптике в различных прикладных задачах. Одним из основных применений плоской оптики являются оптические элементы для защиты банкнот, документов, ID карт, брендов и т.п.

Первые защитные оптические элементы в больших тиражах появились более 30 лет назад. Плоские рельефные голограммы украшают карты VISA и до сих пор, хотя уже давно не относятся к защитным элементам. Оригинал голограммы был записан аналоговым образом. В это же время рельефные голограммы были использованы впервые и для защиты от подделок банкнот. В 1988 году была выпущена банкнота 5000 австрийских шиллингов с защитной голограммой. В том же году в Австралии была выпущена банкнота, защищенная компьютерно-синтезированной голограммой. Оригинал голограммы был изготовлен фирмой CSIRO с помощью электронно-лучевой литографии. В настоящее время плоские оптические элементы широко используются в защите банкнот, как на бумажном, так и пластиковом носителе [1, A25]. Оптические защитные элементы являются неотъемлемой частью современных документов, удостоверяющих личность, пластиковых карт, акцизных марок и брендов.

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, актуальной задачей является разработка приборов 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 разработка новых оптических элементов ориентирована 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 подлинности оптических защитных элементов. Вес прибора составляет 80 г.

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 А.Н. 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. Разработаны численные методы решения широкого круга прикладных некорректно поставленных задач как линейных, так и нелинейных [2]. К числу последних относятся итерационные методы решения нелинейных операторных уравнений. Разработанные математические методы позволили получить прорывные результаты в различных отраслях науки и техники [3], в том числе в физике тонких оптических покрытий [4].

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. В работе [5] в модели геометрической оптики были разработаны методы синтеза плоских оптических элементов для фокусировки лазерного излучения в отрезок прямой с заданной интенсивностью сфокусированного излучения. Построенная фазовая функция является гладкой. При фокусировке в кривую фазовая функция является гладкой везде кроме, быть может, множества меры ноль. Разработанные элементы нашли применение в задачах маркировки изделий, лазерной закалке, в коррекции волновых фронтов и т. п. [6, A1, A2].

Во второй половине прошлого столетия в оптике появился новый оптический элемент — киноформ. Элемент тесно связан с решением обратных задач формирования 2D изображений в математической 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 [7] был предложен итерационный процесс для решения этой нелинейной обратной задачи. Позднее в литературе метод получил название ИФА или Гершберг-Сакстон алгоритм [8]. 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. Киноформ как новый оптический элемент широко используется в приложениях [9,10,A28].

Для синтеза 2D изображений также широко используются дифракционные решетки. Методы расчета дифракции света на дифракционных решетках хорошо изучены [11]. Обратную задачу расчета характеристик дифракционных решеток, формирующих заданное 2D изображение можно рассматривать как конечно-параметрическую, поскольку каждый фрагмент дифракционной решетки задается небольшим количеством параметров.

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 [12]. В дальнейшем аналоговая запись 3D изображений была продолжена в работах [13]. Российским ученым Ю.Н. Денисюком была разработана технология записи цветных объемных голограмм [14]. Аналоговые 3D голограммы широко используются не только для создания арт дизайнов, но и для большого числа приложений [15]. Однако в последние 15 лет наибольшее развитие получили компьютерно-синтезированные голограммы.

В области компьютерного синтеза 3D голограмм существует несколько направлений. 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 несколько миллионов, рассчитать суммарное волновое поле на современных ЭВМ не представляет проблемы, тем более, если использовать параллельные вычисления. 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 технология [16]. В простейшем случае поверхность 3D 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 [19, 20]. 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 несколько вариантов таких устройств [21, 22], 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 [23]. Но наиболее важным является то, что с ее помощью можно с высокой точностью формировать многоградационный микрорельеф, который обеспечивает высокую эффективность плоского оптического элемента.

Остановимся на одном важном приложении плоских оптических элементов. Начиная с 90-х годов одним из основных приложений становятся защитные оптические технологии. Первый защитный элемент на пластиковой карте Виза и первый защитный оптический элемент на банкноте появились более 25 лет назад. [24]. 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. Использование одной и той же технологии записи оригиналов не способствовало и повышению уровня защищенности оптических элементов от подделок.

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 [25]. 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. Электронно-лучевая технология дает возможность синтезировать асимметричный микрорельеф с высокой точностью, достигающей 10 нанометров [А3,А4].

Особенностью электронно-лучевой 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. Наукоемкость и высокая цена оборудования ограничивают распространение технологии.

Аналогичная ситуация имеет место и в задачах синтеза плоских оптических элементов для формирования 3D изображений с использованием электронно-лучевой технологии. Можно перечислить лишь несколько публикаций [26, 27]. В работе [26] 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 [27] 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.

В последнее время появились публикации, посвященные синтезу нанооптических элементов, в научном направлении получившем название плазмоны. Синтезированные с помощью электронно-лучевой технологии нанооптические элементы позволяют, например, менять спектральный состав отраженного излучения при наклоне оптического элемента [28].

Резюмируя обзор по методам синтеза плоских оптических 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 техническим параметрам, но и позволяет формировать ассиметричный микрорельеф с высокой точностью. Современные литографы могут записать электронным лучом изображения размером в десять на десять сантиметров и более. Нанооптические элементы уже зарекомендовали себя в защитных технологиях. Возникла необходимость в разработке новых методов синтеза защитных нанооптических элементов на базе электронно-лучевой технологии.

Цель диссертационной 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 работы

1. Впервые разработаны методы расчета микрорельефа бинарных нанооптических защитных элементов, формирующих 2D изображения с кинетическими 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°

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 кинетическими 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 света. На втором этапе для каждой элементарной области рассчитывается фазовая функция по заданной диаграмме направленности. 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.

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. Разработан прибор автоматизированного контроля подлинности защитных нанооптических элементов. Разработанные в диссертации методы синтеза защитных плоских оптических элементов используются в продукции АО «Гознак».

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 кинематическими 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 точностью 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 (± 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 точностью 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 ± 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 полученных 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.

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-2020. Россия; 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; 2014 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 - 2013, Москва, Россия; 2015 Об одной задаче синтеза защитных изображений для визуального контроля Ломоносовские чтения - 2012, Москва; 2011 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 - 2011, Москва; 2011 Nanotechnology for automatic examination of optical protection elements. Holo-print Holo-pack 2011 conference, Las-Vegas, USA.

Публикации по теме диссертации

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 работ автора приведён в конце автореферата.

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 и основных технических решений, заложенных в конструкцию прибора автоматизированного контроля.

Структура и объем диссертационной работы

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 диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, девяти глав и заключения.

Во **введении** обоснована актуальность исследования, проведен обзор литературы по изучаемой проблеме, сформулированы цели и задачи работы, ее научная новизна, практическая значимость и положения, выносимые на защиту.

Диссертация посвящена разработке методов синтеза оптических элементов для формирования 2D изображений с кинетическими эффектами и 3D изображений. Синтез нанооптических элементов включает в себя разработку методов, расчет фазовых функций нанооптических элементов и прецизионные методы формирования их микрорельефа с помощью электронно-лучевой литографии. Расчет фазовых функций осуществляется в два этапа. Область нанооптического элемента разбивается на элементарные области размером меньше 100 микрон. На первом этапе алгоритма рассчитывается диаграмма направленности в каждой элементарной области. Диаграмма направленности однозначно определяется заданием кадров изображений K_n , $n=1, \dots, N$. На втором этапе по заданной диаграмме направленности рассчитывается фазовая функция нанооптического элемента в каждой элементарной области. Разработанные методы

синтеза позволяют тиражировать нанооптические элементы, что обеспечивает их низкую цену при массовом изготовлении. Важнейшим применением в разработанных оптических элементах является защита банкнот, акцизных марок, идентификационных документов, пластиковых карт и брендов от подделок.

В каждой главе диссертации описаны рассматриваемые задачи, приводится обзор публикаций. В конце глав приводятся основные результаты.

В **главе 1** впервые предложены методы расчета нанооптических элементов, формирующих 2D изображения с кинематическими эффектами [A23]. Новый оптический элемент, разработанный в диссертации, принципиально отличается от киноформа. Элемент разбит на элементарные области G_{ij} $i=1, \dots, I$, $j=1, \dots, J$, причем каждая элементарная область участвует в формировании всех кадров изображений K_n $n=1, \dots, N$. В элементе, введенном в оптику Лиземом [7], киноформ участвует в формировании только одного изображения.

Разработанный метод расчета фазовой функции оптического элемента состоит из двух этапов [A13]. На первом этапе рассчитывается диаграмма направленности в каждой элементарной области G_{ij} . Диаграмма направленности однозначно определяется заданием кадров K_n . Расчет производится прямым вычислением в рамках геометрической оптики. На рисунке 1 приведена схема формирования диаграммы направленности для элементарной области G_{ij} . На рисунке 2 приведены пять кадров изображений, видимых наблюдателю из разных точек наблюдения. Обычно для формирования диаграммы направленности элементарных площадок используется несколько сотен кадров.

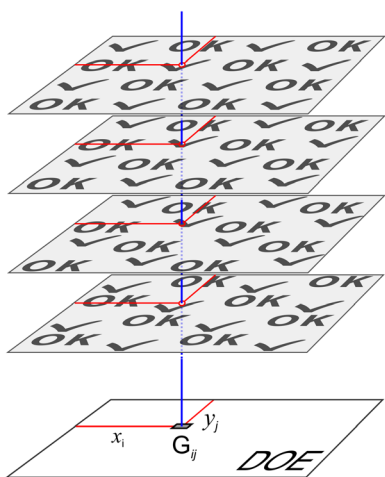


Рисунок 1

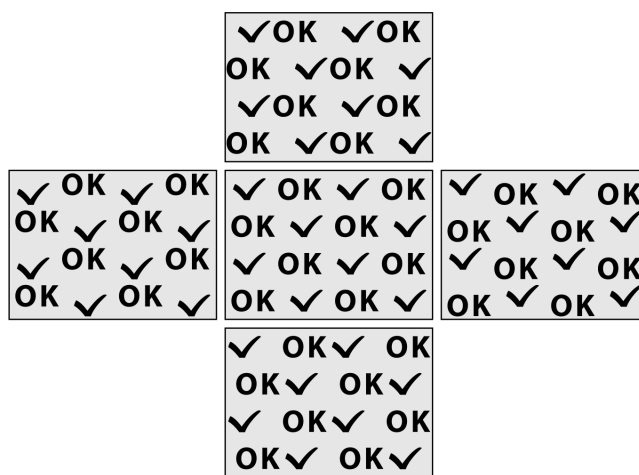


Рисунок 2

На втором этапе алгоритма по заданной диаграмме направленности рассчитывается фазовая функция в каждой элементарной области G_{ij} . Эта задача является типичной обратной задачей и сводится к решению нелинейного интегрального уравнения относительно фазовой функции $\varphi(\xi, \eta)$ в каждой элементарной области G_{ij} :

$$A\varphi = \left| \gamma \iint_{G_{ij}} u(\xi, \eta, 0 - 0) \exp(ik\varphi(\xi, \eta)) \exp\left(ik \frac{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}{2f}\right) d\xi d\eta \right| = F(x, y). \quad (1)$$

Здесь $F(x,y)$ – заданная функция, однозначно определяемая диаграммой направленности элементарной площадки. Уравнение (1) является нелинейным операторным уравнением относительно неизвестной функции $\varphi(\xi, \eta)$. Задача (1) является некорректно поставленной [2]. Для ее решения используется итерационный метод.

Решая обратную задачу (1) относительно $\varphi(\xi, \eta)$, при заданном изображении $F(x,y)$ и фиксированной длине волны λ , мы получаем фазовую функцию оптического элемента, которая определяет глубину микрорельефа в точке (ξ, η) элементарной области G_{ij} . Приведём итерационный алгоритм расчёта фазовой функции, следуя работе [7]. Введём обозначения:

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

Здесь $\Phi\{v\}(x, y)$ – прямое преобразование Френеля от функции v . Итерационный процесс построения приближенного решения для фазовой функции, являющейся решением обратной задачи (1), строится следующим образом. Для того, чтобы сделать одну итерацию в итерационном алгоритме решения задачи (1), 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) $w^{(k)}(x, y) = A_1(x, y) \exp\left(ik\varphi_1^{(k)}(x, y)\right) \quad (3)$
- 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 Φ^{-1} – обратное преобразование Френеля. Функция $\varphi_0^{(k+1)}$ представляет собой приближенное решение уравнения (1) на $k+1$ итерации.

В качестве начального приближения можно использовать распределение фазы, равное константе. Известно, что описанный итерационный процесс является релаксационным [8]. Последнее означает, что $R_{k+1} \leq R_k$. Здесь $R_k = R(\varphi^{(k)}) = \|A\varphi^{(k)} - F\|^2$. 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 становится намного меньше.

Рассчитав фазовую функцию в каждой элементарной области, мы можем получить фазовую функцию всего нанооптического элемента. При нормальном падении излучения на элемент фазовая функция однозначно определяет глубину микрорельефа в каждой его точке (x,y) . Для элемента работающего на отражение глубина микрорельефа $h(x,y)$ равняется $0.5 \cdot \varphi(x,y)$.

Впервые разработан и изготовлен нанооптический элемент на основе бинарных киноформов, формирующий 2D изображения с эффектом сдвигов фрагментов изображений друг относительно друга при наклоне оптического элемента. На рисунке 2 приведен вариант ортопараллактического смещения фрагментов изображений «ОК». При наклонах оптического элемента вверх/вниз фрагменты соседних изображений сдвигаются влево/вправо. Задавая другие кадры изображений, можно получать другие варианты смещения фрагментов изображения.

В главе 1 также рассмотрен вариант синтеза бинарных нанооптических элементов на основе внеосевых линз Френеля, формирующих 2D изображения с кинематическими эффектами движения. В этом случае изображение символов (букв, цифр, и т.п.) состоит из отдельных ярких точек. При наклоне оптического элемента фрагменты изображения перемещаются друг относительно друга. Для того чтобы увеличить относительный сдвиг фрагментов изображений, используются внеосевые пересекающиеся линзы Френеля. Для того чтобы получить максимальный сдвиг соседние фрагменты изображения имеют разные знаки фазовых функций [A18,A19].

В **главе 2** осуществлена постановка и разработаны методы решения обратной задачи синтеза нанооптических элементов на основе многоградационных киноформов, формирующих эффект смены 2D изображения при повороте на 180 градусов [A15]. Предложены два варианта синтеза многоградационных нанооптических элементов, формирующих этот эффект смены изображений. Задачей диссертации является разработка новых оптических элементов, формирующих легко контролируемые визуальные эффекты при максимальной защите разработанных элементов от подделок. Контроль эффекта смены двух изображений при повороте на 180 градусов не требует квалификации. Нанооптический элемент является многоградационным, для его изготовления необходима точность формирования микрорельефа 10-15 нанометров по глубине. Последнее надежно защищает элемент от подделок.

В варианте 1 нанооптический элемент задается двумя изображениями, видимыми наблюдателю при угле поворота $\theta=0^\circ$ и $\theta=180^\circ$, приведенными на рисунке 3. Для синтеза нанооптического элемента можно задать и дополнительные кадры изображений в окрестности первого и минус первого порядков дифракции.

В диссертации впервые разработан нанооптический элемент, который формирует разные изображения при повороте на 180 градусов. На рисунке 3 представлены фотографии нанооптического элемента при $\theta=0^\circ$ и $\theta=180^\circ$. Сформулирован новый защитный признак для визуального контроля, заключающийся в том, что изображение при повороте на 180 градусов меняется.

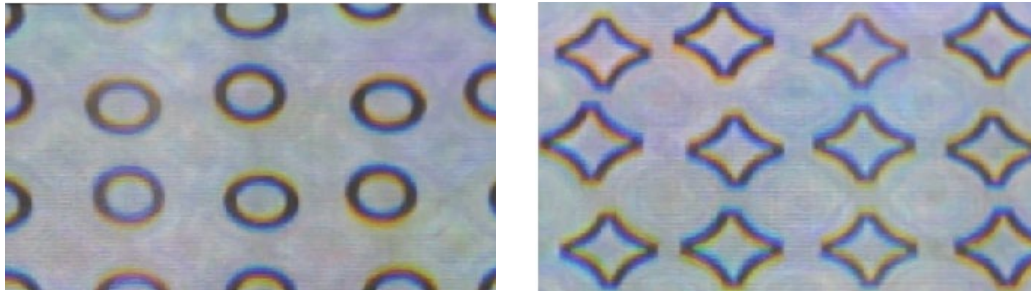


Рисунок 3

Разработаны методы расчета фазовой функции нанооптического элемента с эффектом смены двух изображений при повороте на 180 градусов. Расчет фазовой функции осуществляется в два этапа. На первом этапе для каждой элементарной области рассчитывается диаграмма направленности. Диаграмма направленности в каждой элементарной площадке однозначно определяется заданием кадров изображений, видимых наблюдателю. По заданной диаграмме направленности аналогично первой главе диссертации реконструируется фазовая функция в элементарных областях нанооптического элемента. Фазовая функция $\varphi(x,y)$ находится из решения уравнения (1), в котором функция $F(x,y)$ имеет вид, представленный на рисунке 4. Приближенное решение задачи (1) находится с помощью итерационного алгоритма (3).



Рисунок 4

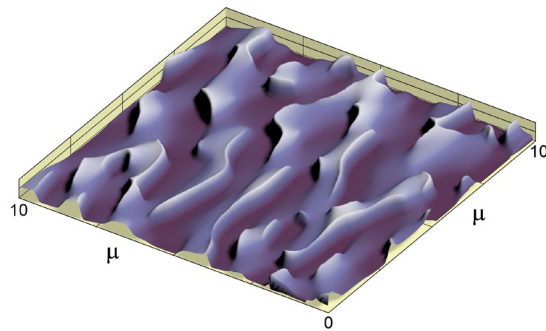


Рисунок 5

Фрагмент микрорельефа нанооптического элемента приведен на рисунке 5. Размер фрагмента на рисунке 5 составляет 10 x 10 микрон, максимальная глубина микрорельефа составляет 280 нанометров.

Можно предложить другой вариант защитного признака при повороте оптического элемента на 180 градусов. В этом варианте используется другой эффект смены изображений при повороте на 180 градусов [А8]. Наблюдатель при $\theta=0^\circ$ видит цветное изображение, которое при повороте на 180 градусов теряет свою цветность и становится серым. На рисунке 6 этот эффект сформирован в области изображения птицы. В этой области нанооптический элемент является многоградационным, в остальной области нанооптический элемент является бинарным и формируется бинарными дифракционными решетками.

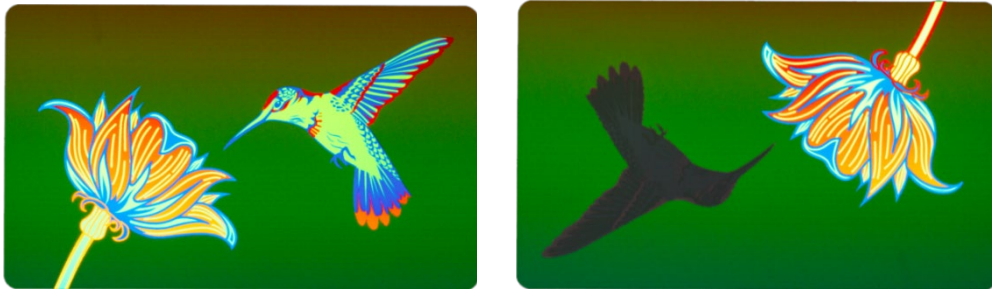


Рисунок 6

Обратная задача синтеза нанооптического элемента решается в параметрическом представлении. Диаграмма направленности каждой элементарной области состоит из двух прямоугольников, площадь прямоугольника в области $Z>0$ и $Z<0$ отличаются в десятки раз. Верхний прямоугольник решает задачу формирования цветного изображения, видимого наблюдателю в окрестности $\theta=0^\circ$. Соответственно нижний прямоугольник обеспечивает потерю цветности изображения при повороте на 180 градусов.

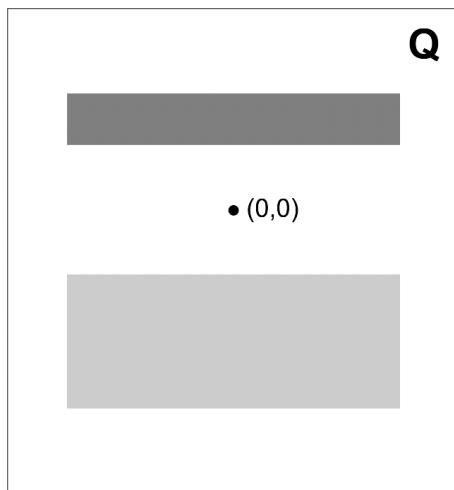


Рисунок 7

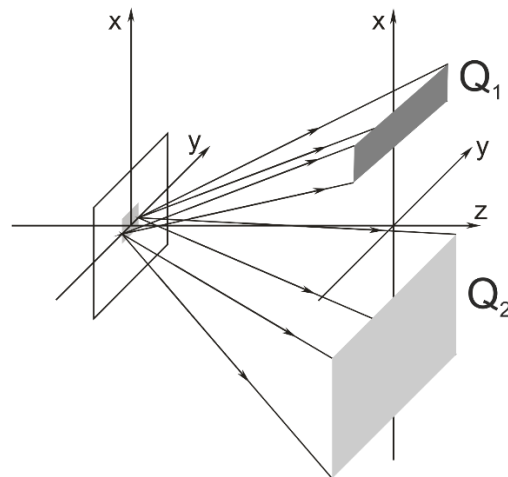


Рисунок 8

На рисунке 7 представлена правая часть $F(x,y)$ уравнения (1), на рисунке 8 представлена оптическая схема формирования диаграммы направленности элементарной области.

В **главе 3** предложен новый защитный признак. 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. Впервые разработан и изготовлен нанооптический элемент, фазовая функция которого равняется сумме фазовой функции киноформа, формирующего изображение символа, и параболической или седлообразной фазовой функции внеосевой линзы Френеля [А6,А20]. На рисунке 9 приведена оптическая схема формирования изображения с помощью нанооптического элемента. При освещении оптического элемента рассеянным светом наблюдатель видит в области оптического элемента выпуклую (вогнутую) поверхность. При освещении точечным источником белого света наблюдатель видит яркое изображение символа, которое перемещается при наклоне оптического элемента.

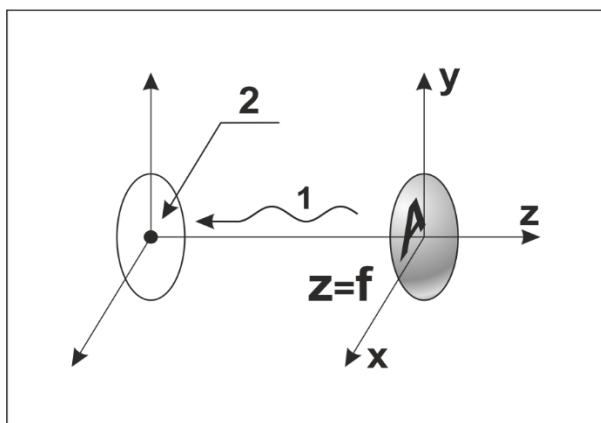


Рисунок 9

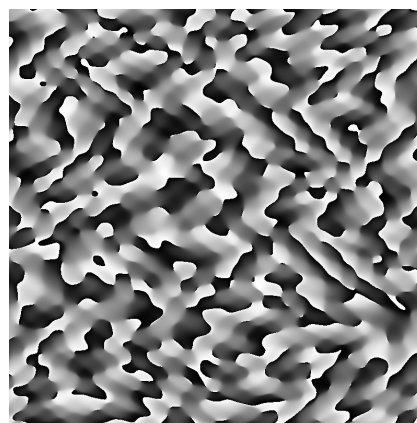


Рисунок 10

На рисунке 10 приведен фрагмент фазовой функции nanoоптического элемента. Глубина микрорельефа в каждой точке рисунка 10 пропорциональна потемнению в этой точке. Размер фрагмента на рисунке 10 составляет 50 на 50 микрон. Идея нового nanoоптического элемента нашла продолжение в разработке уникальных дифракционных элементов, которые при освещении оптического элемента белым светом, формируют несколько символов, передвигающихся по области оптического элемента, при изменении положения элемента относительно наблюдателя. На рисунке 11 (слева-направо) приведено изображение nanoоптического элемента в рассеянном свете и два изображения элемента при освещении точечным источником при разных положениях оптического элемента. Везде, кроме области G, имитирующей линзу лупы, для синтеза использованы бинарные решетки, которые формируют цветное изображение. В области G микрорельеф является многоградационным. Именно в этой области при освещении оптического элемента точечным источником белого света наблюдатель видит яркие символы, перемещающиеся в области G.

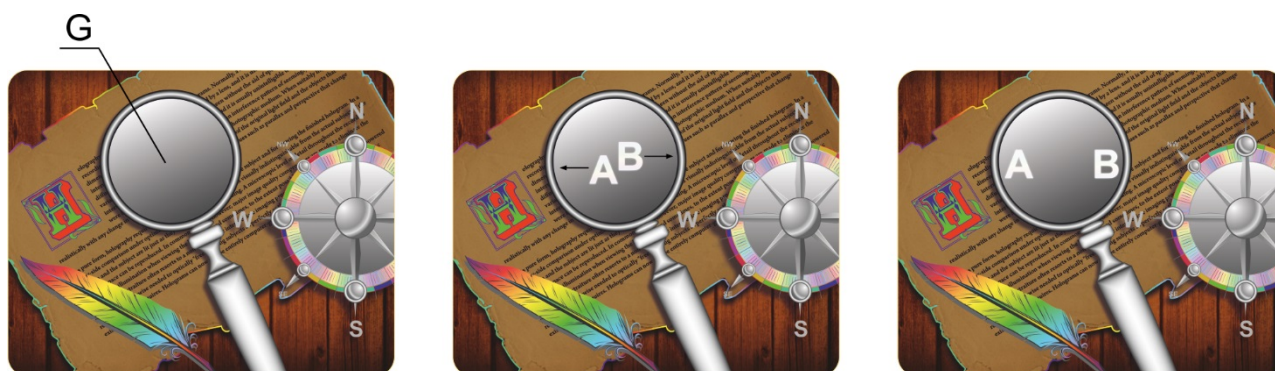


Рисунок 11

Изображение линзы лупы в рассеянном свете выглядит как серая поверхность. При освещении точечным источником света, в области G появляются два символа «А» и «В», которые при наклоне оптического элемента передвигаются друг относительно друга [A16,A21,A22].

На рисунке 12 приведен дизайн nanoоптического элемента, который при его освещении точечным источником света, формирует изображение трех символов «А»,«В»,«С». Как видно из

рисунка 12, при наклоне оптического элемента вверх-вниз, буквы передвигаются от центра оптического элемента к его периферии [A16,A21,A22].



Рисунок 12

Для того, чтобы синтезировать нанооптический элемент, формирующий кинетические эффекты, представленные на рисунках 11 и 12, необходимо чтобы нанооптический элемент имел специальную структуру. На рисунках 13 и 14 приведен вариант разбиения области G оптического элемента на элементарные области G_{ij} .

На рисунке 13 черным цветом выделены области, в которых $i+j$ является четным. Белым цветом выделены области, в которых $i+j$ является нечетным.

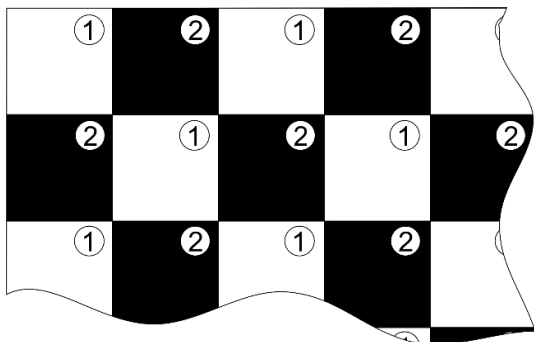


Рисунок 13

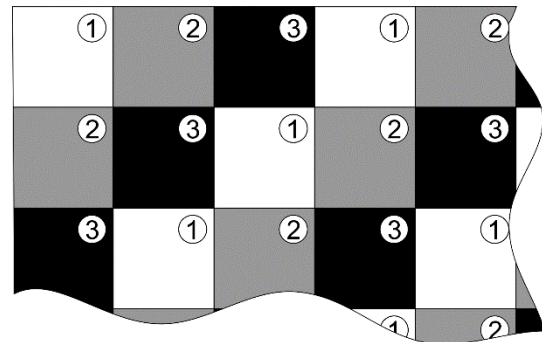


Рисунок 14

В тех элементарных областях G_{ij} , где значение $(i+j)$ чётно, фазовая функция оптического элемента представляет собой сумму заданной функции $h^{(1)}(x,y) = C \cdot \rho^\alpha \cos(2\varphi)$ в полярной системе координат, и фазовой функции $\Phi^{(1)}_{ij}(x,y)$ многоградационного киноформа, формирующего в фокальной плоскости $z=\text{const}$ изображение символа «А». Здесь C — заданный положительный параметр. Параметр α принадлежит интервалу $1 < \alpha < 3$. В тех областях G_{ij} , где значение $(i+j)$ нечётно, фазовая функция оптического элемента представляет собой сумму заданной функции $h^{(2)}(x,y) = C \cdot \rho^\alpha \sin(2\varphi)$ и фазовой функции $\Phi^{(2)}_{ij}(x,y)$ многоградационного киноформа, формирующего в фокальной плоскости $z=\text{const}$ изображение символа «В». При этом при освещении нанооптического элемента точечным источником света наблюдатель видит одновременно символы «А» и «В». При наклонах оптического элемента символы «А» и «В» двигаются во взаимно противоположных направлениях, перемещаясь по всей области нанооптического элемента.

На рисунке 15 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, α принадлежит интервалу $1 < \alpha < 3$.

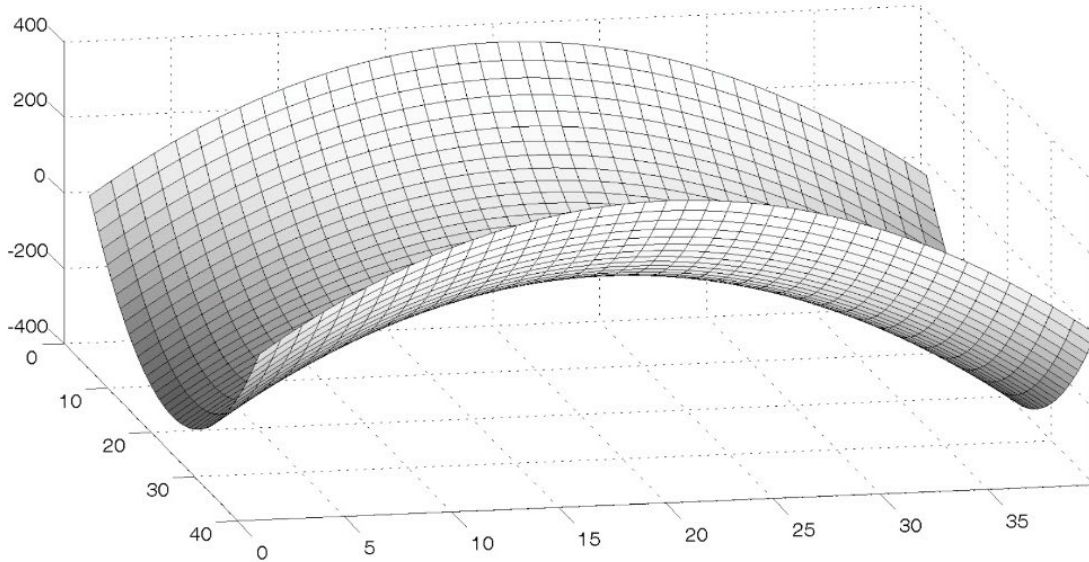


Рисунок 15

На рисунке 16 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, α принадлежит интервалу $1 < \alpha < 3$. При значении параметра $\alpha = 2$ график функции на рисунках 15 и 16 представляет собой седлообразный параболоид.

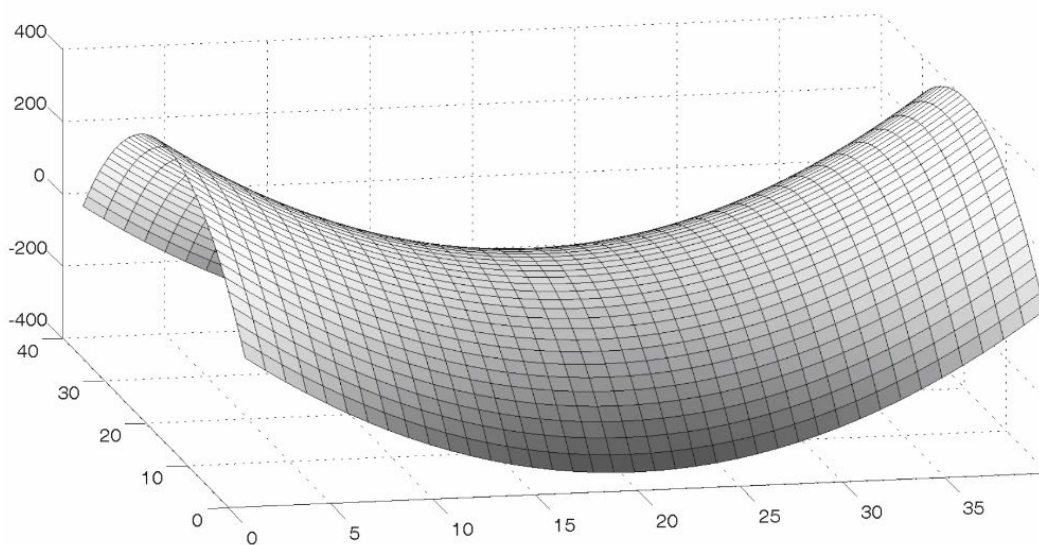


Рисунок 16

При значении параметра $\alpha = 2$ символы, видимые наблюдателю при освещении точечным источником белого света, передвигаются внутри области G не меняя своего размера.

На рисунке 14 приведен вариант синтеза нанооптического элемента, который позволяет формировать изображение трех символов. В этом случае в каждой из областей, выделенных цифрами «1», «2», «3» на рисунке 14 в каждой из областей в формировании изображения участвуют поверхности $h^{(1)}_{ij}(x,y)$, $h^{(2)}_{ij}(x,y)$, $h^{(3)}(x,y)$, которые равны соответственно $h^{(1)}(x,y) = C \cdot \rho^\alpha \cos(2\varphi)$, $h^{(2)}(x,y) = C \cdot \rho^\alpha \cos(2 \cdot (\varphi + \pi/3))$, $h^{(3)}(x,y) = C \cdot \rho^\alpha \cos(2 \cdot (\varphi - \pi/3))$. Фазовая функция нанооптического элемента в каждой из областей, выделенных цифрами «1», «2», «3», является суммой фазовой функции киноформа, формирующего изображение символа A_i и фазовой функции поверхности $h^{(i)}(x,y)$ $i=1,2,3$. Символы $A_1 = A$, $A_2 = B$, $A_3 = C$.

В диссертации приведены примеры синтеза нанооптических элементов, формирующих 2D изображения с полным параллаксом, в частности изображения, представленные на рисунках 11 и 12.

В **главе 4** предложен новый защитный признак. При освещении нанооптического элемента точечным источником белого света наблюдатель при углах дифракции менее 60 градусов видит яркие полосы на оптическом элементе, которые сдвигаются при его наклоне в одном направлении навстречу друг-другу. При углах наклона более 60 градусов, наблюдатель видит другое цветное изображение (рисунок 17). Для формирования изображений используется специальная структура нанооптического элемента на основе многоградационных линз Френеля. Оказывается возможным выписать фазовую функцию нанооптического элемента в каждой элементарной области в явном виде.

Обозначим за Q область оптического элемента, которая представляет собой прямоугольник $|x| \leq L_x/2$ $|y| \leq L_y/2$. 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_ψ и Δ – заданные параметры. Периоды T_ψ и T_ψ не равны друг-другу и отличаются не более чем на 5% [A26]. Области оптического элемента с функцией $\psi(y)=0$ заполняются дифракционными решетками разного периода и наклона, которые формируют изображение при больших углах дифракции (рисунок 18).

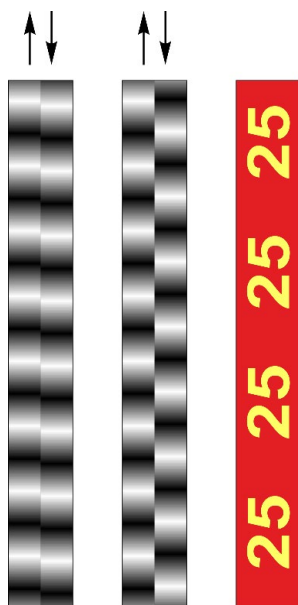


Рисунок 17

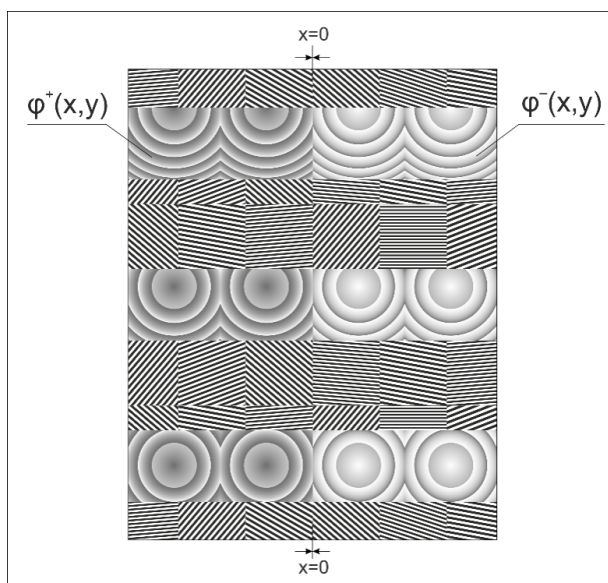


Рисунок 18

При освещении нанооптического элемента точечным источником света при углах дифракции менее 60° 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 $-30^\circ < \alpha < 30^\circ$ [A26]. Угол α является углом поворота оптического элемента вокруг оси Ox , угол β является углом поворота оптического элемента вокруг оси Oy .

Разработанный нанооптический элемент в первую очередь ориентирован на защиту от подделки банкнотных нитей шириной в несколько миллиметров. Защитный признак, заключающийся во встречном движении изображений в левой и правой полосах нити, легко контролируем визуально. Этот признак контролируется при углах дифракции менее 60 градусов. При углах дифракции более 60 градусов наблюдатель видит другое цветное изображение.

В **главе 5** диссертации рассматриваются задачи синтеза нанооптических элементов, формирующих 3D изображения. Осуществлена постановка и разработаны эффективные методы расчета фазовой функции нанооптических элементов, формирующих 3D изображения с полным параллаксом [A11]. Изображение формируется в первом порядке дифракции с использованием бинарных киноформ. Для формирования изображений в нулевом порядке дифракции используются многоградационные киноформы.

Расчет фазовой функции нанооптического элемента осуществляется в два этапа. Оптический элемент разбивается на элементарные области размером меньше 100 микрон. На первом этапе для каждой элементарной области рассчитывается диаграмма направленности. Диаграмма направленности однозначно определяется заданием кадров K_n изображений, видимых наблюдателю из разных точек наблюдения. Кадры изображений K_n рассчитываются с использованием 3D-модели, общее количество кадров составляет несколько сотен. На втором этапе алгоритма по заданным диаграммам направленности рассчитываются фазовые функции

рассеянного излучения для каждой элементарной области G_{ij} . На рисунке 19 точки наблюдения обозначены как V_n . на рисунке 20 приведена схема формирования диаграммы направленности.

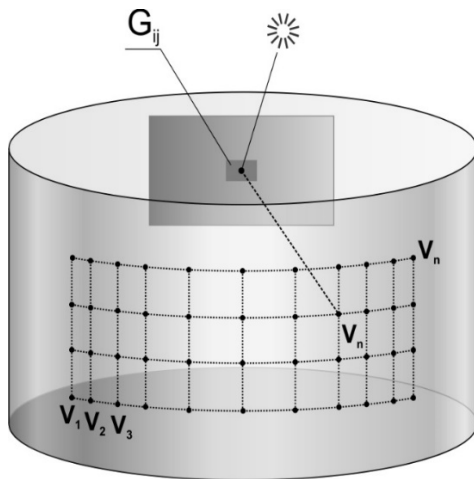


Рисунок 19

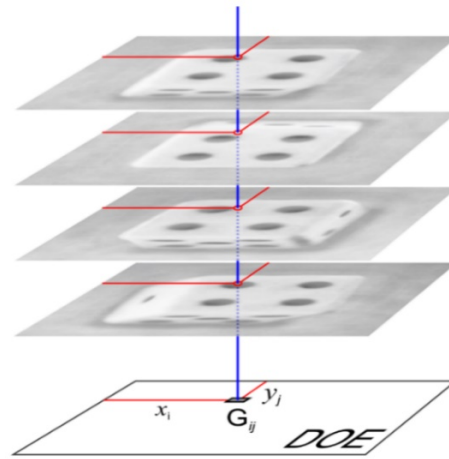


Рисунок 20

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 (θ_n, φ_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 (θ_n, φ_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 втором этапе алгоритма по заданной диаграмме направленности рассчитывается фазовая функция в каждой элементарной области G_{ij} . Расчет фазовой функции сводится к решению уравнения (1), правая часть которого $F(x, y)$ однозначно определяется заданием диаграммы направленности. Фрагмент функции $F(x, y)$ приведен на рисунке 21.

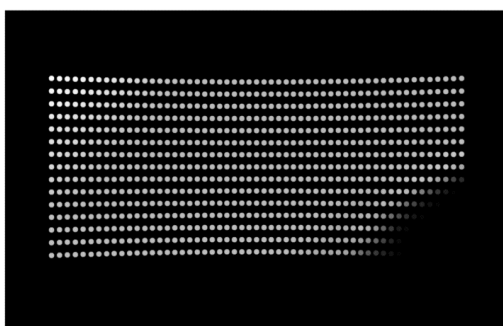


Рисунок 21

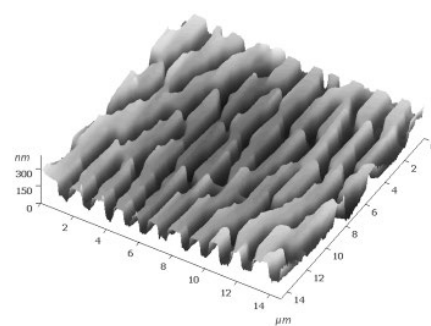


Рисунок 22

Фазовая функция однозначно определяет микрорельеф nanoоптического элемента. На рисунке 22 приведен фрагмент микрорельефа nanoоптического элемента полученный с помощью атомного силового микроскопа. Размер фрагмента составляет 14×14 микрон. Максимальная глубина микрорельефа – $0,3$ микрона. На рисунке 23 приведены кадры

изображений, использованные для расчета микрорельефа нанооптического элемента. На рисунке 24 представлены кадры изображения, снятые с реального оптического элемента в белом свете.

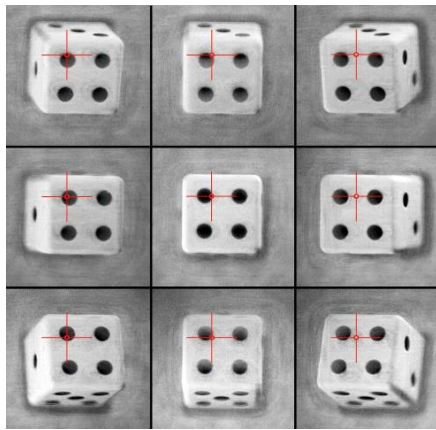


Рисунок 23

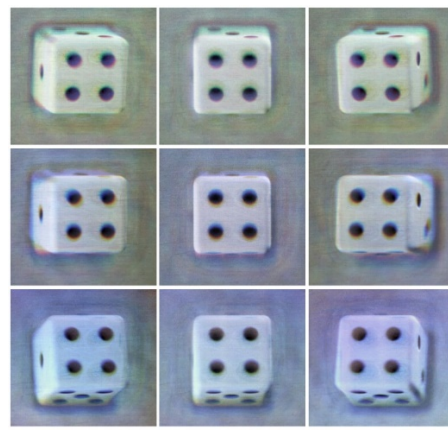
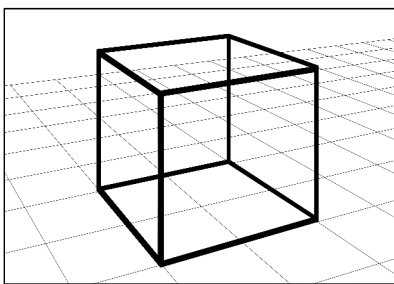


Рисунок 24

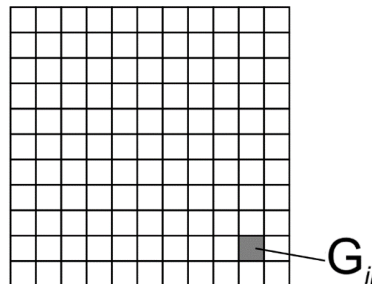
Как видно из сравнения рисунков 23 и 24, полученные реальные изображения хорошо совпадают с кадрами, сформированными с компьютерной 3D-модели. Кадры получены под разными углами наблюдения в первом порядке дифракции.

В главе 5 также рассмотрена задача синтеза нанооптических элементов для формирования 3D изображений нулевого порядка [A26,A27,A17]. В этом случае необходимо использовать многоградационные нанооптические элементы. Расчет фазовой функции оптического элемента осуществляется в два этапа.

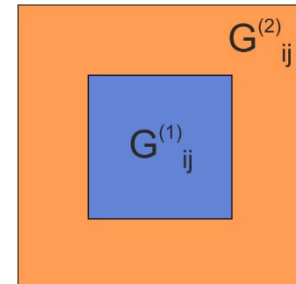
На рисунке 25(а) представлена 3D-модель куба. Область оптического элемента разбивается на элементарные области G_{ij} (рисунок 25(б)). Область G_{ij} разбита на две подобласти $G^{(1)}_{ij}$ и $G^{(2)}_{ij}$ (рисунок 25(в)).



а)



б)



в)

Рисунок 25

Область $G^{(2)}_{ij}$ заполняется дифракционными решетками, формирующими изображение при углах дифракции более 60 градусов. Область $G^{(1)}_{ij}$ заполнена киноформом, формирующим изображение при углах дифракции менее 60 градусов. Схема формирования изображения при углах дифракции менее 60 градусов приведена на рисунке 26.

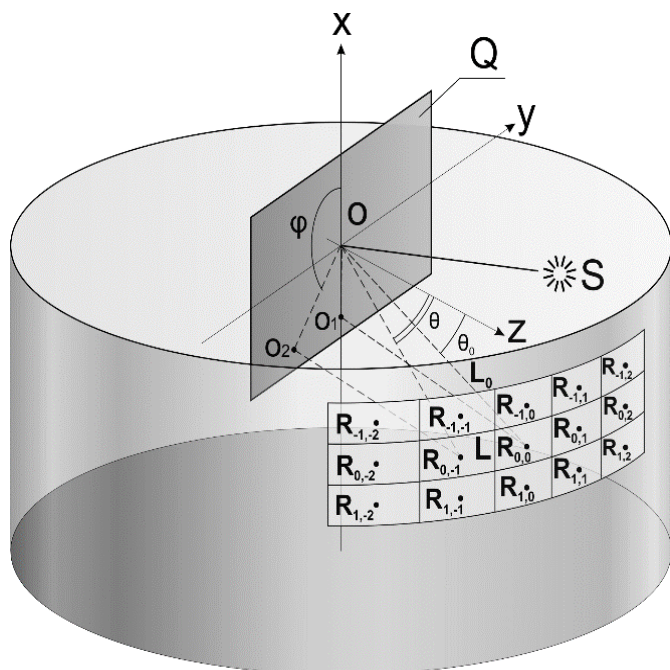


Рисунок 26

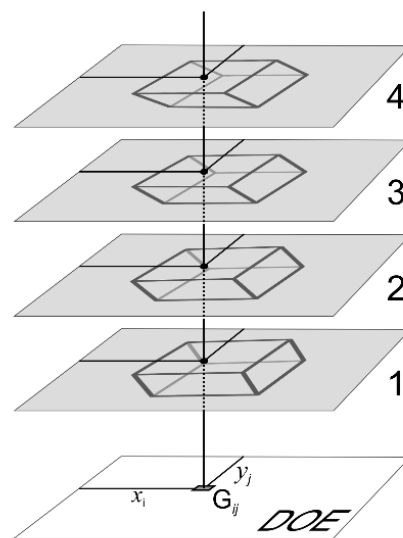


Рисунок 27

На первом этапе для каждой области G_{ij} рассчитывается диаграмма направленности рассеянного излучения. Схема расчета диаграмм направленности в выделенной элементарной области представлена на рисунке 27. По заданной диаграмме направленности на втором этапе алгоритма рассчитывается фазовая функция нанооптического элемента. Диаграмма направленности однозначно определяет функцию $F(x,y)$ в правой части уравнения (1), используемого для расчета фазовой функции в элементарных областях.



Рисунок 28

На рисунке 28 приведены варианты $F(x,y)$ для трех элементарных областей. На рисунке 29 приведены фотографии нанооптического элемента, снятые из разных точек наблюдения при его освещении точечным источником белого света.

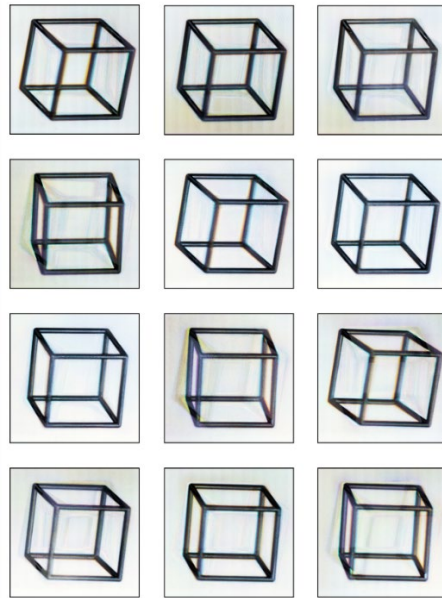


Рисунок 29

Фотографии на рисунке 29 получены в окрестности нулевого порядка дифракции. Синтезированное нанооптическим элементом 3D изображение можно наблюдать как при наклонах оптического элемента, так и при повороте в диапазоне 360 градусов.

В **главе 6** предложен принципиально новый визуальный защитный признак – эффект смены двух 3D-изображений при наклоне нанооптического элемента вверх-вниз. В диссертации разработаны методы расчета и синтеза этого защитного признака [A10]. Признак базируется на электронно-лучевой технологии. Признак легко контролируется визуально и надёжно защищён от подделок. Для синтеза нанооптического элемента в главе 6 используются дифракционные решетки различной ориентации и периода. На рисунке 30 приведена схема формирования изображений нанооптическим элементом. Центры кадров первого изображения обозначены буквой «R», а центры кадров второго изображения – буквой «K». Свет от источника белого света рассеивается в каждой элементарной области G_{ij} . Каждая элементарная область может участвовать в формировании всех кадров двух изображений.

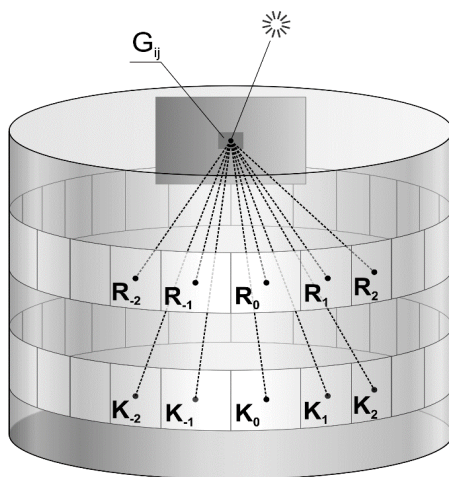


Рисунок 30

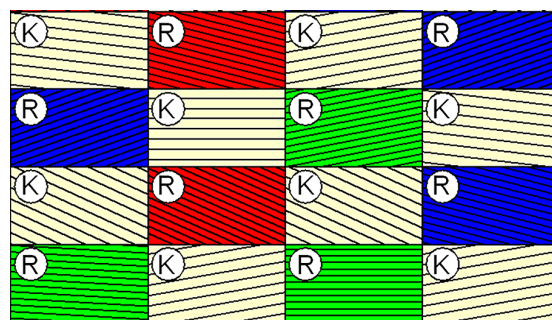


Рисунок 31

Наборы кадров 3D-сцены с заданных направлений получаются 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 $R_0 \dots R_{\pm N}$. Кадры получают из компьютерной 3D-модели.

Каждая элементарная область представляет собой дифракционный пиксель, в каждый из которых записывается дифракционная решетка с заданным периодом и ориентацией. Размеры дифракционных решеток составляют порядка 10 микрон. Структура дифракционного пикселя приведена на рисунке 31. Таким образом, обратная задача решается в конечно-параметрической модели, в которой число неизвестных параметров, задающих дифракционные решетки, составляет порядка двух миллионов. Для расчета параметров дифракционных решеток используют кадры изображений $K_0 \dots K_{\pm N}$ и $R_0 \dots R_{\pm N}$.

На рисунке 32 приведены фотографии изображений, демонстрирующие эффект смены двух 3D изображений при наклоне оптического элемента.

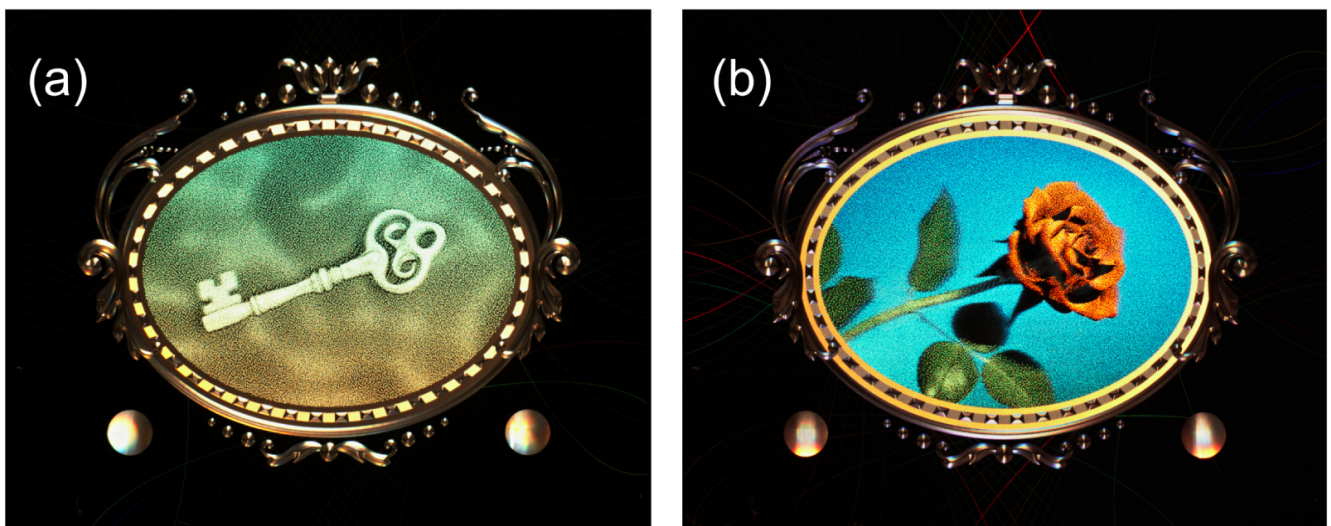


Рисунок 32

В главе 7 предложен эффективный метод расчета плоского нанооптического элемента, который будучи помещен на цилиндрическую поверхность, формирует 3D изображения с обзором на 360° (рисунок 33).

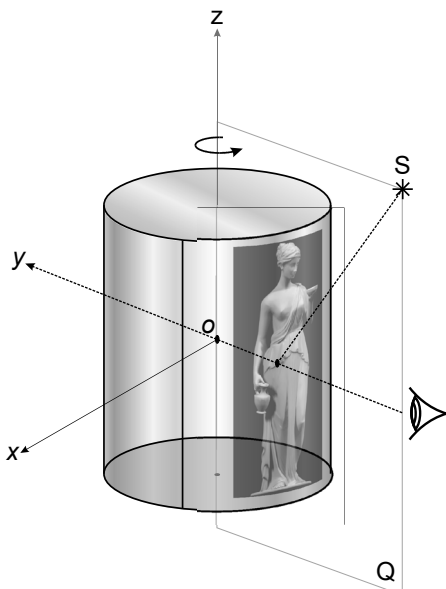


Рисунок 33

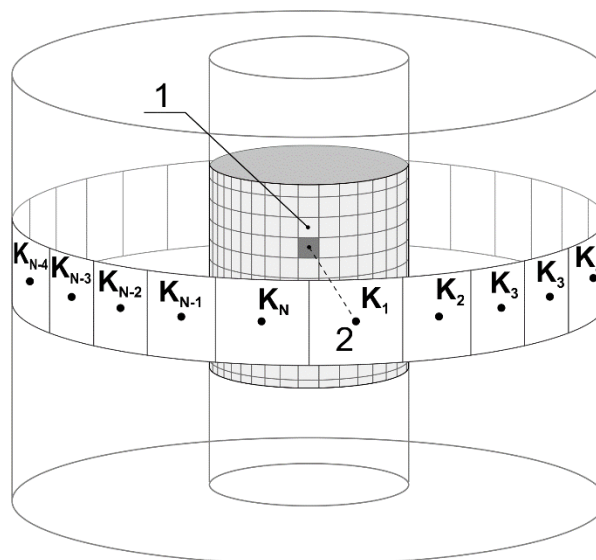


Рисунок 34

Схема формирования кадров K_n 3D изображения приведена на рисунке 34. Оптический элемент разбит на элементарные области, размером менее 50 микрон (рисунок 35) Элементарные области заполнены бинарными дифракционными решетками, размером не более 10 микрон (рисунок 36). Минимальный период дифракционной решетки составил 0.58 микрона.

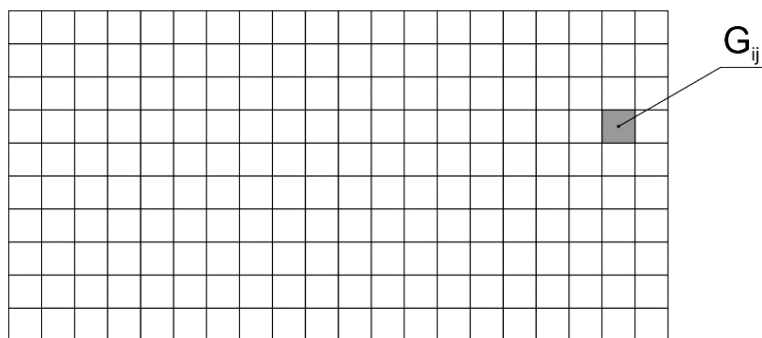


Рисунок 35

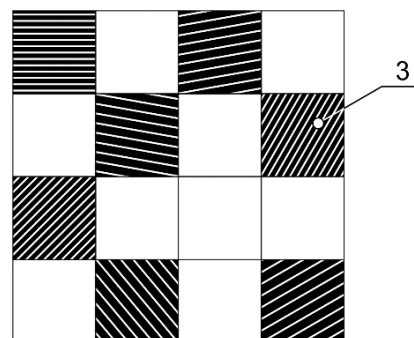


Рисунок 36

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 . На втором этапе определяются параметры дифракционных решеток в каждой элементарной области. На рисунке 37 приведена фотография изготовленного плоского нанооптического элемента при освещении его источником белого света.

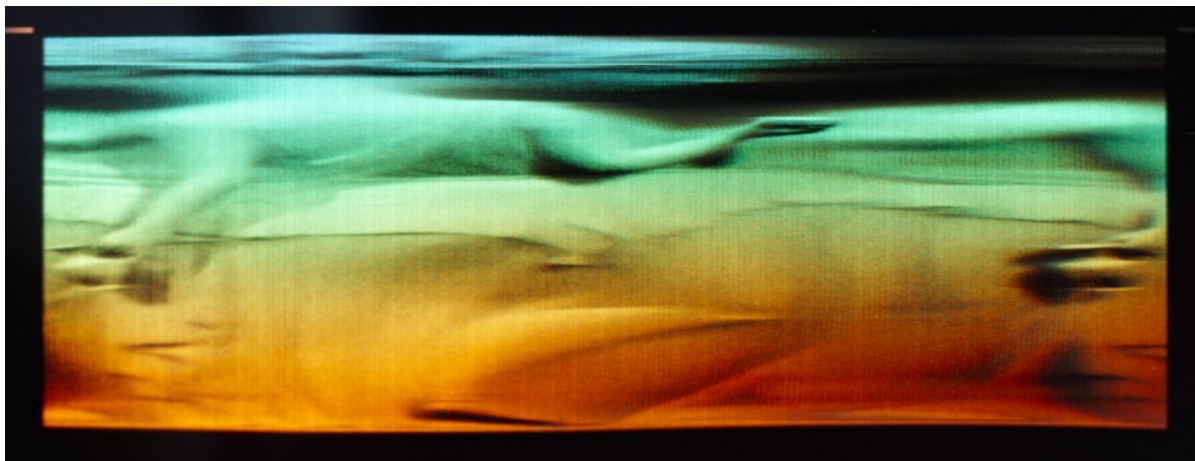


Рисунок 37

Как видно из рисунка 37, плоский нанооптический элемент формирует изображение не похожее на 3D объект.

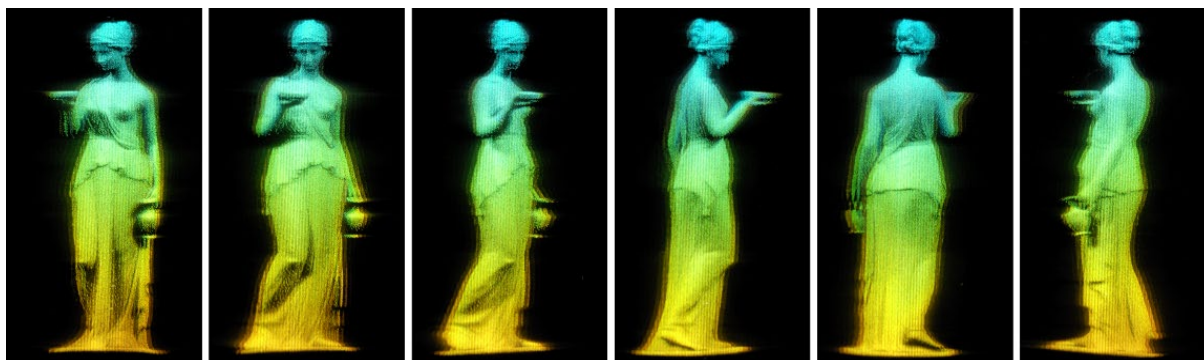


Рисунок 38

После помещения нанооптического элемента на цилиндр заданного радиуса, наблюдатель видит 3D изображение на поверхности цилиндра с обзором на 360 градусов [A12]. Фотографии нанооптического элемента, полученные с разных точек наблюдения, приведены на рисунке 38.

В **главе 8** предложены новые нанооптические элементы, позволяющие контролировать подлинность защитных меток с помощью мобильных устройств. В диссертации предложен вариант автоматизированного контроля защитных меток на основе бинарных киноформов [A9,A14].



Рисунок 39



Рисунок 40

Защитная метка в выделенной области фотографируется с помощью смартфона (рисунки 39 и 40). Изображение представляет собой текстуру (киноформ) с разными характерными параметрами [A5]. Более грубая текстура (слева на рисунке 41) используется для автоматизированного контроля в режиме ручной съемки. Более мелкая текстура (справа на рисунке 42) используется для автоматизированного контроля с помощью специальной приставки, оснащенной увеличивающим объективом (рисунок 40).

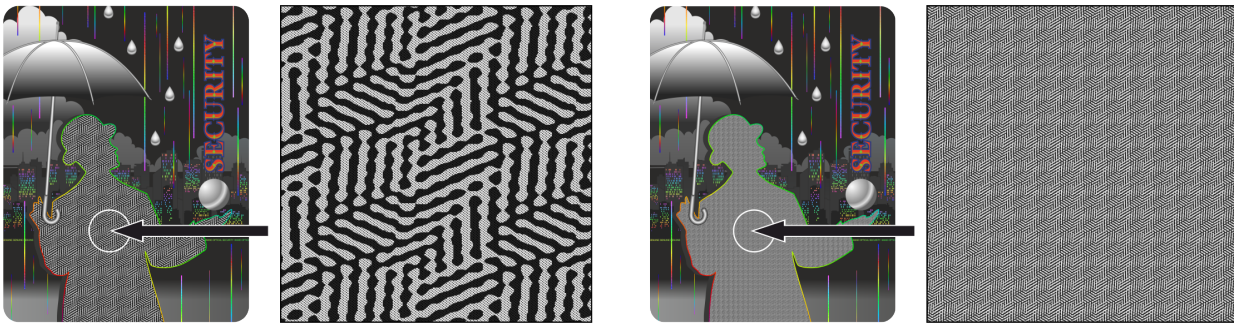


Рисунок 41

Полученное изображение интерпретируется как дифракционный оптический элемент, который формирует изображение в фокальной плоскости, параллельной плоскости оптического элемента (рисунок 42). Это изображение рассчитывается смартфоном и используется для автоматизированного контроля [A7,A9].

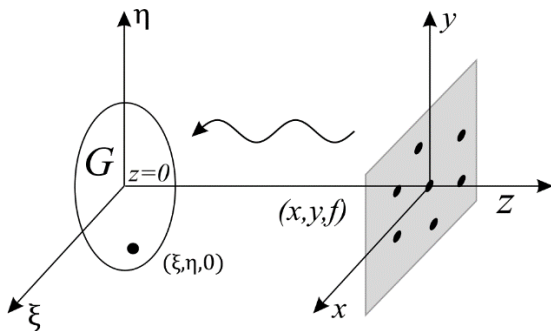


Рисунок 42

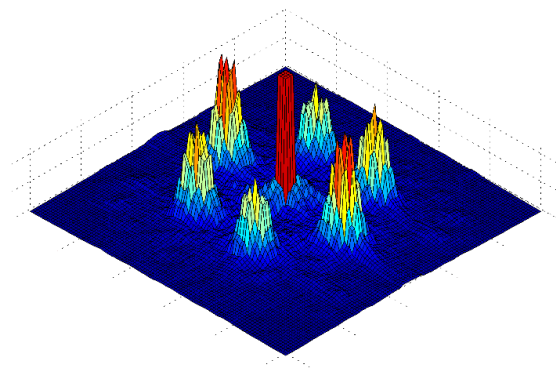


Рисунок 43

На рисунке 43 приведено реальное изображение, сформированное смартфоном для текстуры на рисунке 41 (справа). Изображение состоит из семи ярких точек, это рассчитанное смартфоном изображение используется для верификации подлинности оптического элемента.

Глава 9 посвящена разработке прибора автоматизированного контроля подлинности нанооптических элементов, предназначенных для защиты банкнот, паспортов, документов, акцизных марок и брендов от подделок. В диссертации получены прорывные результаты в области автоматизированного контроля подлинности оптических элементов [A24]. Впервые разработаны многоградационные нанооптические элементы специально для автоматизированного контроля. 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 [A24]. Впервые разработан портативный прибор автоматизированного контроля подлинности оптических защитных элементов [A24].

На рисунке 44 приведена оптическая схема прибора автоматизированного контроля, фотография которого приведена на рисунке 45. В качестве источника света используется лазерный диод (1). Рассеянное оптическим элементом (2) излучение формирует в фокальной плоскости (6) асимметричное изображение (7), состоящее из кольцевых секторов на двух концентрических окружностях.

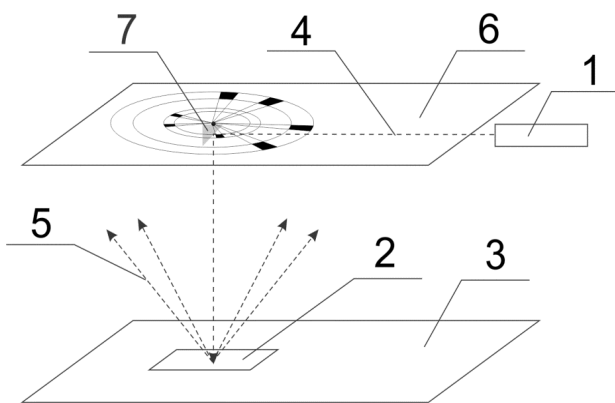


Рисунок 44



Рисунок 45

Изображение контролируется двумя кольцами детекторов. Контролируемый признак состоит в угловом расстоянии между яркими точками изображения на кольцах детекторов. На рисунке 46 приведена блок-схема прибора автоматизированного контроля.

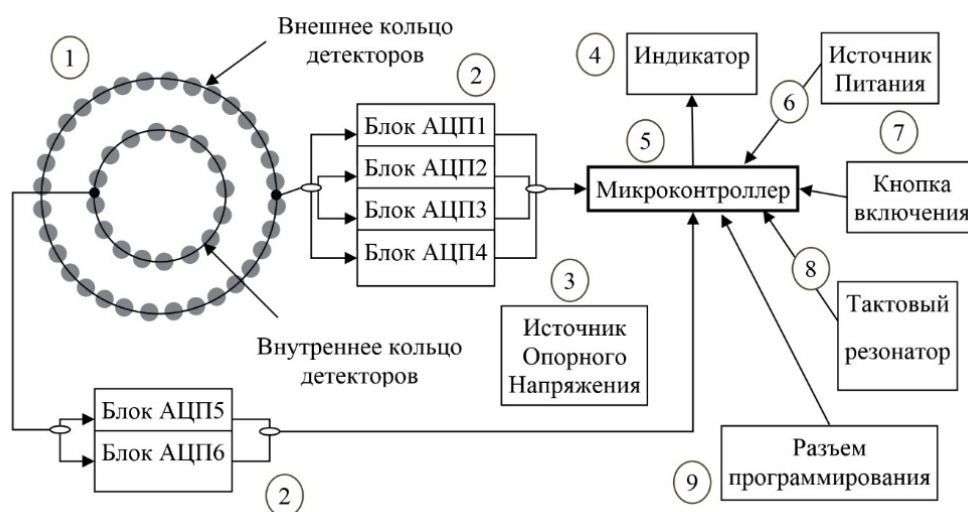


Рисунок 46

Аналоговые сигналы детекторов поступают на АЦП. 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 14.75МГц, обозначенный на рисунке цифрой 8. Время реализации решения (свой/чужой) о подлинности составляет порядка 10 мс. Питание схемы производится от автономного батарейного источника с номинальным напряжением 3.3В, обозначенного на рисунке цифрой 6.

Разработаны два типа нанооптических элементов для автоматизированного контроля. Первый тип нанооптических элементов содержит выделенную область G, формирующую CLR (Covert Laser Readable) изображение. Микрорельеф оптического элемента в области G является многоградационным, что позволяет формировать на кольцах детекторов асимметричные изображения. Пример дизайна нанооптического элемента приведен на рисунке 47. В процессе контроля подлинности нанооптического элемента первого типа луч лазера должен пересечь область G по любой траектории.

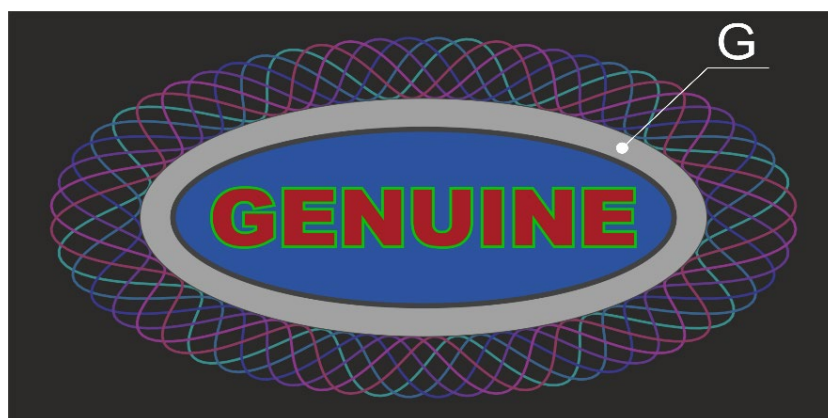


Рисунок 47

Нанооптические элементы второго типа позволяют осуществлять контроль подлинности оптического элемента в любой его точке. На рисунке 48 приведено изображение нанооптического элемента второго типа с увеличением в 70 раз. По всей области оптического элемента расположены фрагменты киноформ размером не более 100 микрон. Расстояние между соседними фрагментами киноформа также составляет порядка 100 микрон. Размер пятна лазера на оптическом элементе составляет порядка 0,5 мм, что делает возможным проводить верификацию подлинности оптического элемента в любой его точке. В пятно лазера попадает несколько фрагментов киноформ, формирующих в фокальной плоскости изображение для автоматизированного контроля. Процедура контроля инвариантна относительно сдвига и поворота оптического элемента.



Рисунок 48

Разрешающая способность человеческого глаза не позволяет видеть микроструктуру киноформ. Наблюдатель видит только цветное изображение, представленное на рисунке 49.



Рисунок 49

Для изготовления нанооптических элементов используются многоградационные киноформы. Оригиналы оптических элементов изготавливаются по электронно-лучевой технологии. Точность формирования микрорельефа составляет 10-15 нанометров, что обеспечивает надежную защиту нанооптических элементов от подделок. Вероятность ошибки при идентификации подлинности элемента не превышает 0,1%.

В **заключении** перечислены основные результаты работы.

Основные результаты работы

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 изображения 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 кинформов 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 изображения 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 составляет 80 граммов. Процедура контроля инвариантна относительно сдвига и поворота прибора контроля.

Рекомендации по использованию результатов

Все разработки нанооптических элементов в диссертации прежде всего ориентированы на защитные технологии. 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%. Изготовленные с помощью электронно-лучевой литографии нанооптические элементы имеют точность изготовления микрорельефа по глубине порядка 10-15 нанометров. Разработанные нанооптические элементы невозможно подделать с помощью широко распространенных оптических методов записи

оригиналов защитных элементов. Нанооптические элементы, разработанные в диссертации, могут быть тиражированы, что обеспечивает их низкую цену при массовом производстве.

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 как на бумажном, так и 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.

Полученные в диссертации результаты по разработке методов расчета фазовых функций для формирования 3D изображений могут быть использованы при разработке 3D проекторов [27], в частности при разработке проекторов на основе жидкокристаллических систем [28].

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 № ЕА017394В1. «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 № ЕА018197В1 «Микрооптическая система формирования динамических визуальных изображений».
- A21.** Гончарский А.А., Гончарский А.В., Дурлевич С.Р., Мельник Д.В. Патент ЕАПО № ЕА031691В1 «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 № ЕА031709В1. «Микрооптическая система для формирования 2D изображений с кинематическими эффектами движения».
- A24.** Гончарский А.А., Гончарский А.В., Чернышев А.В. Патент ЕАПО № ЕА018419В1 «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 цитированной литературы

1. **Van Renesse R.L.** Optical Document Security // Artech House optoelectronics library (Artech Housed), Norwood, 2005. ISBN 1580532586.
2. **Тихонов А.Н.** О решении некорректно поставленных задач и методе регуляризации. // ДАН СССР, 1963, № 151(3), с.501-504.
3. **Tikhonov A.N.** Ill Posed Problems in the Natural Sciences. // MIR Publishers, 1987, ISBN 0828537399.
1. **Furman S.A., Tikhonravov A.V.** Basics of optics of multilayer systems. // *Editions Frontiers Gif-sur Yvette*, 1992, p.242.
5. **Гончарский А.В., Степанов В.В.** О существовании гладких решений в задаче фокусировки электромагнитного излучения. // *Доклады Академии наук*, 1984, Т. 279, № 4, с. 778-792.
6. **Гончарский А.В., Данилов В.А., Попов В.В., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Соيفер 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.
7. **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.
8. **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.
9. **Gan M.A.** Fifty years of kinoform optics. Results and prospects of development. // *Opt. Technol.*, 2006, Vol.73, p.432-437.
10. **Hunt H.C., Wilkinson J.S.** Kinoform microlenses for focusing into microfluidic channels. // *Opt. Express*, 2012, Vol.20, p. 9442-9457.
11. **Palmer C.** Diffraction Grating Handbook. // Newport Corporation, 2005.
12. **Gabor D.** A new microscopic principle. // *Nature*, 1948, Vol.161, p.777-778.
13. **Benton S.A.** Hologram reconstructions with extended incoherent sources. // *Optical Society of America*, 1969, Vol.59, p.1545-1546.
14. **Денисюк Ю.Н., Суханов В.И.** Голограмма с записью в трехмерной среде как наиболее совершенная форма изображения // *Успехи физических наук*, 1970, Т. 101, № 2, с. 337–338.
15. **Blanche P.A. et al.** Holographic three-dimensional telepresence using large-area photorefractive polymer. // *Nature*, 2010, Vol.468, p. 80-83.
16. **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.

17. **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.
18. **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.
19. **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.
20. **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.
21. **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.
22. **Lancaster I.M.** Holograms and authentication: meeting future demands. // *Processing of SPIE 5290, Practical Holography XVIII: Materials and Applications*, 2004.
23. **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.
24. **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.
25. **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.
26. **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.
27. **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.
28. **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.