

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе Гончарского Антона Александровича “Разработка методов синтеза нанооптических элементов для формирования 2D и 3D изображений”, представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальностям

1.3.6. Оптика

1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Разработка методов синтеза плоских оптических элементов для видимого диапазона длин волн является актуальной проблемой современной оптики. В диссертации Гончарского А.А. разработаны методы синтеза нанооптических элементов для формирования 2D и 3D изображений. В каждой из глав диссертации разработаны методы расчета фазовых функций плоских оптических элементов решающих эту задачу. Для расчета фазовых функций в диссертации используется скалярная волновая модель, в которой фазовая функция однозначно определяет микрорельеф плоского оптического элемента. Нанооптические элементы могут быть как бинарными, так и многоградационными. Для синтеза микрорельефа разработанных наноструктур используется электронно-лучевая литография. Наибольшую сложность представляет задача формирования микрорельефа многоградационных элементов.

В главе 1 для решения задач синтеза используются бинарные плоские оптические элементы. При освещении элементов белым светом наблюдатель видит 2D изображения с эффектами движения при наклонах оптического элемента. Рассмотрены два примера. В первом из них изображение состоит из 2D символов (цифр или букв), которые при наклоне оптического элемента изменяют свое положение друг относительно друга. Характер смещения определяется заданием набора 2D кадров, число которых может составлять несколько сотен. Оптический элемент разбивается на элементарные области размером менее 100 микрон. В рамках лучевой модели диссертантом разработан эффективный метод расчета диаграмм направленности в каждой элементарной области по заданному набору 2D кадров, видимых под разными углами наблюдения. Вторая задача состоит в том, как по заданной диаграмме направленности рассчитать фазовую функцию в каждой элементарной области.

С математической точки зрения эта задача сводится к решению двумерного нелинейного интегрального уравнения Фредгольма первого рода. Для решения этой задачи используются известные итерационные процедуры. Разработанные методы реализованы на персональном компьютере. Расчет фазовых функций в каждой элементарной площадке можно осуществлять независимо. Время расчетов фазовой функции элемента, например, с

помощью GPU, можно сократить в десятки и даже в сотни раз. Рассчитанные характерные параметры микроструктур нанооптических элементов имеют размер более одного микрона, что вполне оправдывает использование скалярной волновой модели. Изготовленные образцы нанооптических элементов продемонстрировали высокую эффективность разработанных методов синтеза.

Во втором примере для формирования микрорельефа нанооптических элементов используются плоские линзы Френеля. Есть два отличия от классических линз Френеля. Диссертант предлагает использовать пересекающиеся внеосевые линзы Френеля. Кроме стандартных линз Френеля с параболической фазовой функцией в диссертации для решения поставленных задач синтеза используются линзы, фазовая функция которых является седлообразной. Сформированные дифракционным оптическим элементом 2D изображения состоят из набора ярких точек. Задачей диссертанта является обеспечение максимально возможного кинетического эффекта сдвигов фрагментов изображения. Показано, что использование пересекающихся линз Френеля позволяет в два раза увеличить диапазон сдвига фрагментов изображения. Решена нетривиальная задача расчета микрорельефа в области пересечения линз. Если использовать для формирования фрагментов изображения линз с разными знаками фазовых функций, то сдвиг фрагментов увеличивается еще в два раза. Характерный размер линз Френеля может составлять от одного до нескольких миллиметров. Количество зон Френеля может составлять несколько сотен. Минимальный размер крайних зон Френеля составляет порядка одного микрона. В зависимости от выбора типа фазовых функций (параболической или седлообразной) меняется направление смещений фрагментов изображений.

В главе 2 диссертации для формирования микрорельефа нанооптических элементов используются многоградационные структуры. Задачей решаемой диссертантом в этой главе является синтез нанооптических элементов, которые формируют эффект смены 2D изображений при повороте на 180 градусов. Заметим, что, если для формирования микрорельефа используются бинарные структуры, то достаточно просто синтезировать оптический элемент, который формирует разные изображения при повороте на 90 градусов. Однако при повороте на 180 градусов такой элемент всегда будет формировать то же самое перевернутое изображение, что и в нормальном положении. Задача синтеза многоградационного нанооптического элемента, формирующего эффект смены 2D изображений при повороте 180 градусов, решена диссертантом впервые в мире. Предложены два варианта решения этой задачи. В варианте 1 оптический элемент разбивается на элементарные области. Каждая из областей формирует как нормальное

изображение, так и изображение после поворота на 180 градусов. Область оптического элемента так же как в главе 1 разбивается на элементарные области, в которых рассчитываются диаграммы направленности по заданному набору двумерных изображений видимых в нормальном положении и после поворота на 180 градусов. По рассчитанным диаграммам направленности с помощью итерационных методов рассчитываются фазовые функции в каждой из элементарных областей. Максимальная глубина рассчитанного микрорельефа составляет 280 нанометров. Для изготовления микрорельефа использован электронно-лучевой литограф с разрешением 0.1 микрона, точность формирования микрорельефа составляет 10 нанометров по глубине.

В другом варианте реализации поставленной задачи также используются многоградационные структуры. Формируемое в нормальном положении изображение является цветным. После поворота на 180 градусов цветность изображения исчезает, и видимое изображение становится однородно серым. Такой эффект легко проверяется визуально. Идея синтеза таких изображений заключается в том, что диаграмма направленности элементарных областей состоит из двух частей. В верхней полуплоскости диаграмма представляет собой узкий прямоугольник, формирующий цветное изображение в +1 порядке дифракции. В нижней полуплоскости диаграмма направленности очень широкая, что и приводит к изменению цветности изображения в -1 порядке дифракции при повороте на 180 градусов. Изготовленные элементы подтвердили высокую эффективность разработанных методов синтеза.

В главе 3 диссертации диссертант предложил новый оптический элемент, фазовая функция которого равняется фазовой функции киноформа, формирующего изображение символа и параболической или седлообразной фазовой функции. Используя эту идею, диссертантом разработаны различные нанооптические элементы, которые при освещении точечным источником формируют изображения двух, трех или четырех символов. При наклоне оптического элемента символы перемещаются по всей области оптического элемента. Характер движения определяется выбором параболической или седлообразной фазовой функции. Для каждой из этих задач детально описывается алгоритм расчета фазовой функции. Рассмотренная в главе 3 обратная задача может быть решена только с помощью многоградационных элементов. Изготовленные экспериментальные нанооптические элементы продемонстрировали высокую эффективность предложенных методов синтеза.

В главе 4 диссертант исследовал возможности синтеза многоградационных нанооптических элементов с кинематическими эффектами движения по одной координате

для использования в первую очередь в тонких банкнотных нитях. Как правило, ширина таких нитей составляет от 2 до 4 миллиметров. Разработанный нанооптический элемент имеет многоградационный микрорельеф. При освещении нанооптического элемента источником белого света наблюдатель при углах дифракции менее 60 градусов видит на оптическом элементе яркие полосы, которые при наклонах сдвигаются навстречу друг к другу. При углах дифракции более 60 градусов наблюдатель видит другое цветное 2D изображение. Для формирования таких визуальных эффектов используются массивы микролинз Френеля и субволновые дифракционные решетки с периодом менее 500 нанометров. С помощью дифракционных решеток решается задача формирования цветного изображения при больших углах дифракции. Использование многоградационных микролинз Френеля с разными знаками фазовых функций формирует эффект встречного движения черно-белых полос при наклонах оптического элемента вверх-вниз в широком диапазоне углов наблюдения ± 30 градусов. Эффект сохраняется и при наклонах оптического элемента влево-вправо на ± 15 градусов. Подробно исследована зависимость формируемых нанооптическим элементом изображений от параметров, задающих его микроструктуру. Методами математического моделирования определен диапазон параметров микролинз и субволновых решеток для формирования заданного эффекта движения. Синтезированные образцы элементов продемонстрировали возможность их использования для защиты тонких банкнотных нитей.

В главе 5 диссертации рассматривается задача синтеза нанооптических элементов формирующих 3D изображений с полным параллаксом (трехмерность видимого изображения сохраняется как при наклонах элемента влево/вправо, так и при наклонах вверх/вниз). Для расчета фазовых функций оптических элементов с использованием компьютерной 3D модели рассчитываются 2D изображения (кадры), видимые наблюдателю из разных точек наблюдения. Расчет фазовой функции осуществляется в два этапа. Оптический элемент разбивается на элементарные области размером менее 100 микрон. В каждой из элементарных областей по заданным кадрам 2D изображений рассчитывается диаграмма направленности в приближении геометрической оптики. На втором этапе в каждой элементарной области рассчитывается фазовая функция плоского оптического элемента, формирующего рассчитанную диаграмму направленности.

В диссертации рассмотрено две схемы формирования 3D изображений с полным параллаксом. В первом случае 3D изображение формируется в окрестности первого порядка дифракции. В этом случае микрорельеф нанооптического элемента является бинарным. Приведен пример реального синтеза нанооптического элемента 3D объекта,

который представляет из себя игральную кость. Размер синтезированного элемента составил 20мм x 20мм. Для синтеза использовалось 825 2D кадров. Приведены фотографии изготовленного элемента из разных точек наблюдения, которые демонстрируют высокую эффективность метода синтеза.

Наибольший интерес представляет задача синтеза нанооптических элементов для формирования 3D изображений в окрестности нулевого порядка дифракции. Для формирования таких изображений необходимо использовать многоградационный микрорельеф. 3D модель выбранная для демонстрации метода синтеза в этом случае представляла собой проволочный куб. Формальная простота 3D модели позволяет лучше продемонстрировать расчет диаграмм направленности в различных элементарных областях элемента. Приведенные в диссертации диаграммы направленности элементарных областей имеют весьма сложную структуру даже для такой простой 3D модели. Для демонстрации возможностей разработанного метода синтеза был изготовлен многоградационный оптический элемент размером 20мм x 20мм. Размер элементарных областей составил 50x50микрон, общее количество использованных кадров составило 825. Изготовленный экспериментальный образец показал эффективность предложенного автором метода. При этом сформированное в окрестности нулевого порядка дифракции 3D изображение обладает следующими свойствами. Оно имеет полный параллакс при наклонах элемента влево/вправо и от себя на себя. Трехмерность видимого изображения сохраняется также и при поворотах элемента на 360 градусов. Разработанные в диссертации методы синтеза 3D изображений в окрестности нулевого порядка могут быть использованы и для формирования 3D изображений с использованием более сложных 3D моделей.

В главе 6 диссертации показано, что для синтеза 3D изображений могут быть использованы и такие микроструктуры как дифракционные решетки. С их помощью можно синтезировать дифракционные оптические элементы, формирующие в первом порядке дифракции цветное 3D изображение. В диссертации поставлена более сложная задача – разработать дифракционный оптический элемент, формирующий эффект смены двух 3D изображений, при наклоне оптического элемента вверх-вниз. Область оптического элемента разбивается на элементарные области. В диссертации разработаны методы расчета параметров дифракционных решеток в элементарных областях. Изготовлен экспериментальный образец элемента размером 40мм x 30мм. Количество дифракционных решеток составляет порядка 5×10^6 . Диапазон периодов решеток от 0.6 микрона до 1.4 микрона. Приведенные в диссертации фотографии сформированного

эффекта смены двух 3D изображений демонстрируют высокую эффективность разработанного метода синтеза.

В главе 7 рассматривается задача синтеза нанооптических элементов для формирования 3D изображений на неплоских поверхностях. Во всех главах диссертации для формирования микрорельефа оптических элементов используется электронно-лучевая литография. В диссертации демонстрируется, что можно рассчитать микрорельеф плоского оптического элемента так, что, будучи помещенным на цилиндрическую поверхность, он будет формировать трехмерное изображение с углом обзора на 360 градусов. Для расчета 3D изображения использована компьютерная 3D модель (скульптура), с использованием которой были рассчитаны 240 2D кадров. Для формирования изображения так же как в предыдущей главе использованы дифракционные решетки. Разработан эффективный метод расчета параметров дифракционных решеток для формирования 3D изображений на цилиндре. С помощью электронно-лучевой литографии был изготовлен микрорельеф плоского оптического элемента. Методом гальванопластики с этого плоского элемента была выращена тонкая никелевая копия толщиной порядка 40 микрон. Снятая с этой плоской копии фотография демонстрирует, что ничего похожего на исходную 3D модель скульптуры нет. Однако, после наложения этой тонкой копии на цилиндр радиусом 15 миллиметров, дифракционный оптический элемент успешно формирует 3D изображение с полным углом обзора 360 градусов. Фотографии полученных кадров демонстрируют эффективность разработанного метода синтеза.

В главах 8 и 9 диссертации обсуждается проблема синтеза нанооптических элементов для автоматизированного контроля их подлинности. Требования к автоматизированному контролю подлинности защитных элементов можно сформулировать следующим образом. Во-первых, оптический элемент должен быть надежно защищен от подделки. Во-вторых, прибор для автоматизированного контроля в идеальном случае должен быть портативным и процедура проверки подлинности не должна требовать квалификации от пользователя. В-третьих, необходимо обеспечить очень высокую надежность распознавания свой/чужой.

Поскольку в настоящее время современной тенденцией в мире является широкое использование смартфонов для различных целей, то в первую очередь представляется вполне естественным использовать смартфоны для автоматизированного контроля оптических защитных меток. В настоящее время количество камер в смартфонах увеличивается и их качество постоянно улучшается. Поэтому диссертантом в главе 8 была

поставлена задача исследования возможностей использования смартфонов для автоматизированного контроля подлинности. Проведенные диссертантом исследования можно коротко сформулировать следующим образом. В настоящее время бесперспективно использовать многоградационные защитные элементы для контроля с помощью смартфонов. Ситуация с использованием бинарных защитных меток представляется лучше если использовать специальные приставки оснащенные увеличивающим объективом. Однако оптические элементы для такого контроля подлинности имеют бинарный микрорельеф, который намного легче подделать, чем многоградационный микрорельеф.

В главе 9 задача автоматизированного контроля защитных меток решена с использованием многоградационных нанооптических защитных элементов. Разработан портативный прибор автоматизированного контроля, вес которого менее 100 граммов. В качестве источника света используется красный лазерный диод. Рассеянное оптическим элементом излучение формирует в фокальной плоскости, параллельной плоскости оптического элемента, асимметричное 2D изображение. Изображение состоит из кольцевых секторов на двух концентрических окружностях. Для регистрации изображения используются два кольца детекторов. Аналоговые сигналы с детекторов поступают на АЦП. Решение свой/чужой принимается микроконтроллером прибора. Контролируемый признак подлинности состоит из угловых расстояний между яркими точками изображения на кольцах детекторов. Признак является простым, инвариантным относительно поворота прибора, что обеспечивает эффективный алгоритм распознавания свой/чужой. Время реализации процедуры на микроконтроллере прибора не превышает 10 миллисекунд.

Для прибора автоматизированного контроля в диссертации предлагается использовать два типа многоградационных защитных элементов. Первый тип содержит выделенную область для формирования CLR (Covert Laser Readable) изображения. Примером такой области может быть любая выделенная полоса шириной не более 2мм. Во втором типе элементов области, микроструктуры для формирования CLR изображения рассредоточены по всему оптическому элементу. Проведенные испытания показали, что разработанный прибор позволяет с очень высокой надежностью идентифицировать подлинность элемента.

В конце диссертационной работы приведены основные результаты и выводы, список публикаций автора диссертации, а также список дополнительно цитируемой литературы.

Основные результаты диссертации изложены в 32-х печатных работах, в том числе в одной монографии, 17-и статьях в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих Положению о присуждении учёных степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова, 9-х международных патентах на изобретения и 5-и публикациях в сборниках трудов. Результаты диссертации полностью отражены в этих публикациях, а также неоднократно докладывались на международных конференциях и научных семинарах.

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

По диссертационной работе Гончарского А.А. можно сделать несколько замечаний:

1. В главе 1: “Точность формирования микрорельефа в электронно-лучевой технологии составляет 10 нанометров. По этой причине новые защитные элементы в диссертации называются «нанооптическими элементами»”. В диссертации рассматриваются поверхности с глубиной микрорельефа 0.1 - 0.5 мкм и характерными периодами дифракционных структур от 0.4 до 2.0 мкм. Определение “нанооптические элементы” обычно относится к самому объекту, а не к точности изготовления.
2. В диссертации для решения задач дифракции волн на микрорельефе плоских оптических элементов используется как скалярная волновая модель Френеля, так и модель геометрической оптики. Поляризационные эффекты при этом не учитываются. Однако, дифракционные эффективности, полученные с использованием скалярной и векторной теориями, могут отличаться. Известно, что, когда длина волны падающего поля намного меньше периода решетки, дифракционные эффективности совпадают. Но когда длина волны составляет величину порядка периода решетки, возникают большие различия между скалярным и векторным решениями. В частности, для ТМ поляризации при определенном угле падения имеет место явление поверхностного плазмонного резонанса, когда в нулевом порядке дифракции отраженная волна отсутствует.
3. В главе 3 во всех формулах, определяющих фазовую функцию нанооптических элементов с кинематическими эффектами движения, присутствует параметр α , который во всех изготовленных элементах равен 2. Однако, из текста диссертации не ясно, проводились ли исследования возможностей разработанных элементов в формировании 2D изображений с кинематическими эффектами движений в случае, когда параметр α больше или меньше двух?
4. В диссертации (Главы 5, 6 и 7) рассмотрены методы синтеза нанооптических элементов для формирования 3D-изображений. Основными проблемами, определяющими качество изображения, являются угол обзора, перепутанные ракурсы, несоответствие глубины, несоответствие по цвету, расхождение в фокусе

и геометрические искажения. В диссертации приведены оценки только для угла обзора 3D изображений. Желательно было бы привести оценку качества 3D изображений и по другим критериям.

5. В главе 6 приводятся результаты расчета и синтеза 3D изображения на цилиндрической поверхности, которые показывают эффективность предложенного диссертантом метода синтеза. Так же в главе 6 утверждается, что аналогичный метод может быть использован для синтеза 3D изображений на конических поверхностях, однако в тексте диссертации не приведены экспериментальные обоснования этого утверждения.

Указанные замечания не носят принципиального характера и не снижают заслуг соискателя в получении важных результатов, полученных им в диссертации.

Представленная диссертация «Разработка методов синтеза нанооптических элементов для формирования 2D и 3D изображений» соответствует специальностям 1.3.6 — «Оптика» и 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», а также критериям, определенным пп. 2.1–2.5 «Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», предъявляемым к докторским диссертациям, и оформлена согласно приложениям № 8 и 9 «Положения о совете по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова», а её автор — Гончарский Антон Александрович — заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальностям 1.3.6 — «Оптика» и 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент:

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).

117342, Москва, улица Бутлерова, 15

Телефон: +7 (495) 333-61-02, e-mail:

Подпись

Петров Н.И.

Дата составления отзыва: “30” сентября 2024 года.

Подпись Петрова Н.И. заверяю:

Исполняющий обязанности
директора НТЦ УП РАН

М.С. Афанасьев

