

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе Антона Александровича Гончарского “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

Диссертация Гончарского А.А. “Разработка методов синтеза нанооптических элементов для формирования 2D и 3D изображений” посвящена разработке методов синтеза нанооптических элементов. В отличие от аналоговых методов, широко распространенных для записи 3D голограмм, разработанные в диссертации подходы связаны с компьютерным синтезом. Нанооптический элемент представляет собой плоский дифракционный фазовый элемент, имеющий микрорельеф. С математической точки зрения все задачи, рассмотренные в диссертации, принадлежат к обратным. Сложность решения рассмотренных в диссертации обратных задач связана с их нелинейностью и большим количеством неизвестных искомых величин. Для решения обратных задач в диссертации используются различные методы, которые объединены одной общей целью - разработке методов расчета нанооптических элементов для формирования 2D и 3D изображений. Во всех главах диссертации для решения обратных задач использована скалярная волновая модель. Для формирования микрорельефа используется электронно-лучевая технология, позволяющая сформировать рассчитанный микрорельеф с высокой точностью. Разработанные методы синтеза могут быть применены непосредственно или в виде общей идеи в практических задачах оптики. Важнейшим приложением разработанных методов является синтез нанооптических элементов для защиты от подделки. Диссертация состоит из введения, девяти глав и заключения.

В главе 1 разработаны методы расчета нанооптических элементов, формирующих 2D изображения с кинематическими эффектами. В этой главе нанооптические элементы имеют бинарный микрорельеф. Область дифракционного оптического элемента разбивается на элементарные области размером менее 100 микрон. Расчет фазовой функции дифракционного оптического элемента осуществляется в скалярной волновой модели. Применение этой модели вполне оправданно, поскольку характерные размеры микрорельефа оптического элемента превышают длину волны видимого оптического излучения. Разработанные методы расчета фазовой функции оптического элемента состоят из двух этапов. На первом этапе по заданным двумерным изображениям, видимым из

разных точек наблюдения, рассчитывается диаграмма направленности для каждой из элементарных областей. Алгоритм расчета диаграммы направленности элементарной области достаточно прост для реализации на персональном компьютере. Заметим, что каждая элементарная область может участвовать в формировании всех видимых 2D изображений. На втором этапе алгоритма по заданной диаграмме направленности рассчитывается фазовая функция дифракционного оптического элемента, которая однозначно определяет его микрорельеф. С математической точки зрения эта задача сводится к решению нелинейного интегрального уравнения Фредгольма первого рода. Для решения этой задачи используется итерационный алгоритм, который является релаксационным, то есть на каждой итерации уменьшает значение функционала невязки. С помощью электронно-лучевой литографии были изготовлены образцы нанооптических элементов формирующих 2D изображения с кинематическими эффектами движения. Изготовленные образцы оптических элементов продемонстрировали эффективность разработанных методов синтеза.

Другой пример синтеза бинарных нанооптических элементов на основе внеосевых линз Френеля позволяют формировать изображения, состоящие из набора отдельных точек. В отличие от классических линз Френеля, используемые в этой главе линзы являются пересекающимися. Основным визуальным эффектом является сдвиг фрагментов изображения. Определены оптимальные параметры и оптимальное расположение линз для обеспечения максимально возможного диапазона сдвига фрагментов изображений.

В главе 2 осуществлена постановка и разработаны эффективные методы решения обратной задачи синтеза нанооптических элементов на основе многоградационных киноформов. При повороте оптического элемента на 180 градусов наблюдатель видит эффект смены 2D изображений. Предложены два варианта решения этой задачи. Для того чтобы синтезировать такой элемент необходимо, чтобы его рельеф был многоградационным и асимметричным, а точность формирования его микрорельефа должна составлять порядка 10 нанометров по глубине.

В первом варианте для расчета микрорельефа многоградационных нанооптических элементов область оптического элемента разбивается на элементарные области, размер которых не превосходит 100 микрон. Общее количество элементарных областей в реально синтезированных оптических элементах составляет порядка 10^5 . В каждой из элементарных областей рассчитывается диаграмма направленности. Далее для каждой элементарной области в приближении Френеля численно решается обратная задача расчета фазовой

функции. Эта задача является нелинейной. Приближенное решение ищется с помощью итерационных алгоритмов.

Во втором варианте разработанный нанооптический элемент формирует в нормальном положении цветное 2D изображение. При повороте на 180 градусов видимое наблюдателю изображение теряет цветность и становится серым. Такой эффект легко контролируется визуально. Этот нанооптический элемент также имеет многоградационный микрорельеф.

В главе 2 приведены фотографии экспериментальных оптических элементов при углах поворота оптического элемента в нормальном положении и при повороте на 180 градусов. Приведенные данные показывают высокую эффективность работы элементов при освещении источником белого света. В диссертации показано, что эффект смены изображений при повороте на 180 градусов может быть реализован только с помощью асимметричного микрорельефа. Любой бинарный оптический элемент всегда формирует одинаковые изображения при нормальном положении и при повороте на 180 градусов.

В главе 3 диссертантом предложен новый оптический элемент, фазовая функция которого является суммой поверхности второго порядка и фазовой функции киноформа. Как показано в этой главе эта идея оказалась очень плодотворной. Простейший вариант реализуется оптическим элементом киноформом формирующим изображение символа (буквы или цифры) и плоской многоградационной линзы Френеля. В рассеянном свете такой элемент выглядит как выпуклая поверхность. Если осветить оптический элемент точечным источником белого света, то внутри нее появляется изображение 2D символа, которое меняет свое положение при наклонах оптического элемента.

На основе этой идеи в диссертации предложены нанооптические элементы формирующие изображения двух, трех и четырех символов, которые при наклоне оптического элемента перемещаются по всей области оптического элемента. Подробно описано как для каждой из этих задач рассчитываются фазовые функции оптических элементов. Для каждой из задач фазовая функция оптического элемента состоит из суммы разных киноформов, формирующих изображения символов, и медленно меняющихся функций отвечающих за характер движения.

В главе 4 разработаны нанооптические элементы, ориентированные в первую очередь на защиту банкнотных нитей, ширина которых составляет несколько миллиметров. Визуальный оптический эффект состоит в разнонаправленном кинематическом движении черных и белых полос по одной координате. Для формирования такого эффекта

использованы массивы внеосевых выпуклых и вогнутых плоских линз Френеля. Определены оптимальные параметры нанооптических элементов, формирующих такой эффект движения.

В главе 5 разработаны методы синтеза нанооптических элементов для формирования 3D изображений. 3D изображения задаются набором 2D кадров видимых наблюдателю под разными углами. Для расчета микрорельефа область оптического элемента разбивается на элементарные области размером менее 100 микрон. Для каждой из элементарных областей по заданным наборам 2D кадров рассчитывается диаграмма направленности. Оптический элемент в каждой элементарной области представляет собой киноформ, формирующий рассчитанную диаграмму направленности. Подробно рассмотрены два варианта. В первом из них микрорельеф является бинарным и 3D изображение формируется в первом порядке дифракции. Сформированное 3D изображение по сути дела является стереограммой. В разных точках наблюдения изображения отличаются друг от друга, что и формирует объемный эффект изображения видимый наблюдателю.

Во втором примере в качестве модели 3D куба намеренно выбрана простая модель проволочного куба. В этом случае многоградационный элемент является многоградационным и формирует 3D изображение в окрестности нулевого порядка дифракции. Для каждой элементарной области приведены примеры диаграмм направленности элементарных областей. Несмотря на кажущуюся простоту 3D модели рассчитанные диаграммы направленности для элементарных площадок имеют весьма сложную структуру. Сформированное 3D изображение обладает полным параллаксом так что 3D изображение можно наблюдать и при повороте оптического элемента на 360 градусов. Изготовленные образцы оптических элементов продемонстрировали высокую эффективность предложенных методов синтеза.

В главе 6 разработаны методы синтеза нанооптических элементов, которые формируют эффект смены двух цветных 3D изображений. Для формирования изображения используются дифракционные решетки, каждая из которых задается периодом и наклоном штрихов. Подробно описаны методы расчета параметров дифракционных решеток для обеспечения эффекта смены двух 3D изображений. Изготовлен пример нанооптического элемента включающего в себя порядка двух миллионов дифракционных решеток. Фотографии полученные с реального оптического элемента подтверждают эффективность разработанных методов.

В главе 7 разработаны методы синтеза нанооптических элементов на неплоских поверхностях. Для формирования микрорельефа нанооптических элементов в диссертации используется электронно-лучевая технология. Существующие электронные литографы могут формировать изображения только на плоской поверхности. Тем не менее, в диссертации показано, что можно рассчитать микрорельеф плоского оптического элемента таким образом, что будучи помещенным на цилиндрическую поверхность, он будет формировать 3D изображения. Для расчета фазовой функции такого элемента область плоского оптического элемента разбивается на элементарные области размером менее 50 микрон. В каждой области помещаются дифракционные решетки, параметры которых задаются периодом и наклоном. В диссертации разработан метод расчета параметров дифракционных решеток по заданному набору кадров формирующих 3D изображение. Объемное изображение формируется за счет стереопары поскольку разные глаза наблюдателя видят разные 2D кадры формируемого 3D изображения. Изготовлен образец такого оптического элемента, демонстрирующий эффективность предложенного метода синтеза.

В главах 8 и 9 диссертации разработаны методы автоматизированного контроля подлинности защитных нанооптических элементов. В главе 8 исследованы возможности современных смартфонов для задач автоматизированного контроля. Показано, что для регистрации изображений защитных меток можно использовать только бинарные оптические элементы. Использование смартфонов для ручного контроля подлинности (фотографирование с руки) является бесперспективным. Использование специальной приставки с увеличивающим объективом может улучшить ситуацию. Тем не менее возможности использования смартфонов в задачах автоматизированного контроля весьма ограничены.

В главе 9 решена задача автоматизированного контроля защитных оптических меток решена с помощью многоградационных киноформов. Разработанные оптические элементы формируют специальные 2D изображения. Для формирования изображений используется излучение лазерного диода. Изображения формируются в фокальной плоскости, параллельной плоскости оптического элемента. Изображение состоит из кольцевых секторов на двух концентрических окружностях. Признаком для автоматизированного контроля являются угловые расстояния между кольцевыми секторами. Последнее дает возможность разработки прибора, для которого процедура контроля является инвариантной относительно сдвига и поворота. Разработан портативный прибор весом менее 100 грамм, осуществляющий эффективный контроль подлинности защитных меток с высокой

надежностью. Контроль подлинности осуществляется микропроцессором за время менее 10 миллисекунд. Образцы изготовленных приборов показали высокую эффективность. Микрорельеф оптических элементов записывается с помощью электронно-лучевой литографии с точностью 10 нанометров по глубине.

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 1-й монографии, 17-и статьях в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих Положению о присуждении учёных степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова, 9-х патентах на изобретения и 5-и публикациях в сборниках трудов. Результаты диссертации полностью отражены в этих публикациях, а также неоднократно докладывались на научных конференциях и семинарах.

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

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

1. В главе 1 рассматривается задача формирования диаграммы направленности элементарных областей с использованием бинарных киноформов. Изображения состоят из бинарных символов (букв, цифр и т.п.). Предложен эффективный метод прямого расчета диаграмм направленности. Возникает вопрос можно ли рассчитать диаграммы направленности элементарных площадок в случае если изображения символов являются полутоновыми, а не бинарными?
2. В главе 5 рассматривается задача синтеза нанооптических элементов для формирования 3D изображений к окрестности нулевого порядка дифракции. Специально, чтобы продемонстрировать как работает алгоритм расчета диаграмм направленности в элементарных областях, диссертант выбрал простейшую 3D модель проволочного куба. Как показано в диссертации, даже в простейшей 3D модели сформированные в элементарных областях диаграммы направленности являются совсем не очевидными. Возникает вопрос будут ли эффективными разработанные методы синтеза для более сложных 3D моделей?
3. Не очень понятно, какие численные методы использованы при решении задач, и используются ли какие-то технологии параллельного программирования при решении больших задач?

Указанные замечания не носят принципиального характера и не снижают заслуг соискателя в получении важных и интересных теоретических и экспериментальных результатов, полученных им на протяжении последних тридцати лет.

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, определённым 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:

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

Шишленин Максим Александрович

Институт математики имени С.Л. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИМ СО РАН).

630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, д. 4

Телефон: +7 (383) 333-28-92 **E-mail:** maxim.shishlenin@math.nsc.ru

Дата составления отзыва: “ 30 ” сентября 2024 года.

Подпись Шишленина М.А. заверяю:

