

УДК 519.6; 517.958:5

doi 10.26089/NumMet.v18r102

ОБ ОДНОЙ ЗАДАЧЕ КОМПЬЮТЕРНОГО СИНТЕЗА ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ 3D-ИЗОБРАЖЕНИЙ

С. Р. Дурлевич¹

Предложен метод расчета и синтеза микрорельефа дифракционного оптического элемента, формирующего новый визуальный защитный признак — эффект смены одного 3D-изображения на другое 3D-изображение при повороте дифракционного оптического элемента на 90 градусов. Разработаны эффективные алгоритмы расчета микрорельефа дифракционного оптического элемента. Методами математического моделирования определены оптимальные параметры дифракционного оптического элемента. С помощью электронно-лучевой технологии изготовлены образцы оптических защитных элементов, формирующих визуальный эффект смены 3D-изображений при освещении оптического элемента белым светом. Разработанные оптические элементы могут тиражироваться с помощью стандартного оборудования, используемого для изготовления защитных голограмм. Новый защитный признак легко контролируется визуально, надежно защищен от подделки и предназначен для защиты банкнот, документов, идентификационных карт и др.

Ключевые слова: нанооптические элементы, плоская компьютерная оптика, электронно-лучевая литография, идентификация защитных меток.

1. Введение. Оптические защитные технологии являются одним из актуальных и востребованных направлений в оптике. Одной из задач современных оптических защитных технологий является разработка новых визуальных защитных признаков. Важнейшим этапом в производстве оптических защитных элементов является изготовление оригинала. Именно на этом этапе в оптический элемент закладывается большая часть защитных признаков. Для изготовления оригиналов используются различные технологии, такие как оптическая запись [1], дот-матрикс [2] и электронно-лучевая технология. Оптическая запись оригиналов является аналоговой и осуществляется с помощью интерференции лазерных пучков с использованием физического объекта. Распространенные технологии dot-matrix и Kinemath используются для изготовления компьютерно-синтезированных голограмм. В этих технологиях для записи микрорельефа оптического элемента тоже используется оптическое лазерное излучение. Подавляющее большинство компаний, работающих в области разработки защитных технологий, используют именно оптические технологии для записи оригиналов. Всего несколько компаний в мире обладают технологией электронно-лучевой записи оригиналов.

Современные электронные литографы позволяют с высокой точностью формировать микрорельеф с помощью электронного пучка. Минимальный размер пучка в современных литографах может составлять до 5 нанометров [3]. Электронная литография позволяет формировать бинарные структуры, линзы Френеля [4] и многоградационные структуры [5]. Электронно-лучевая технология позволяет синтезировать оптические элементы, которые невозможно подделать с помощью стандартных технологий. Примером разработки оптического элемента на базе электронно-лучевой технологии является публикация [6], в которой оптический элемент при его освещении белым светом формирует визуальный эффект смены двух 2D-изображений при повороте оптического элемента на 180°. Такой защитный признак невозможно подделать или имитировать с помощью оптических методов записи оригинала.

В настоящей статье предложен принципиально новый защитный признак — эффект смены одного 3D-изображения на другое 3D-изображение при повороте дифракционного оптического элемента на 90 градусов (свитч-эффект 3D/3D). Микрорельеф ДОЭ (Дифракционно-Оптических Элементов) для формирования свитч-эффекта изготавливается с помощью электронно-лучевой литографии. Новый защитный признак легко контролируется визуально и надежно защищен от подделки. Фотографии изготовленного образца подтверждают эффективность предложенного метода расчета микрорельефа оптического элемента.

¹ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Ленинские горы, 119992, Москва; вед. программист, e-mail: sdurlevich@yandex.ru

Кроме того, нами показана возможность создания другого варианта защитного признака — визуального эффекта переключения двух 3D-изображений при наклоне оптического элемента влево–вправо относительно нормального положения. Методом математического моделирования были определены параметры, при которых данный защитный признак может быть изготовлен с помощью электронно-лучевой литографии.

С математической точки зрения рассматриваемая задача синтеза является обратной. В качестве математической модели используется скалярная волновая модель распространения света. Обратная задача решается в рамках классического подхода, основанного на использовании конечно-параметрической модели. Этот подход был впервые предложен в работах академика А. Н. Тихонова [7]. Общая теория методов решения некорректно поставленных задач была создана во второй половине прошлого века и является одним из основных математических результатов того времени [8, 9]. Использование конечно-параметрических моделей предполагает наличие априорной информации об искомом решении обратной задачи. Именно этот подход применен в настоящей статье.

2. Постановка задачи синтеза дифракционных оптических элементов для формирования эффекта смены 3D-изображений при повороте на 90 градусов. Ниже рассматривается задача компьютерного синтеза дифракционных оптических элементов, формирующих 3D-изображения. Хорошо известно, что наблюдатель видит объемное изображение, если синтезировать 2D-кадры для разных ракурсов наблюдения. Этот классический подход широко применяется в аналоговой записи голографических стереограмм [10, 11].

Для формирования компьютерно-синтезированного 3D-изображения используют набор 2D-кадров 3D-объекта, снятых с разных ракурсов. Когда каждый глаз наблюдателя видит изображение из набора 2D-кадров, соответствующее ракурсу наблюдения, наблюдатель воспринимает изображение объекта в объемном виде. Кадры для первого 3D-изображения будем обозначать символами $K_0, \dots, K_{\pm N}$. Общее количество кадров для формирования первого 3D-изображения равняется $2N + 1$.

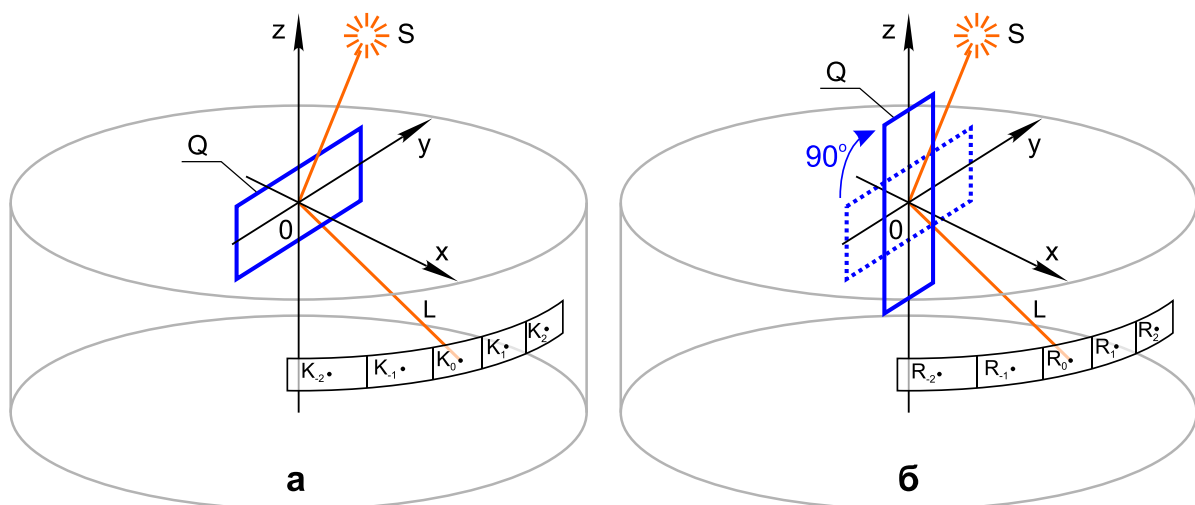


Рис. 1. Схема формирования визуального защитного признака “свитч-эффект 3D/3D”: а) наблюдение в нормальном положении; б) оптический элемент повернут на 90 градусов

На рис. 1а представлена схема формирования объемного изображения. Источник дневного света S освещает белым светом плоский дифракционный оптический элемент Q , расположенный в плоскости $x = 0$. В результате дифракции на микрорельефе оптического элемента свет рассеивается так, что при определенных ракурсах наблюдения на поверхности оптического элемента Q формируется заданное 2D-изображение. А именно: точки $K_0, \dots, K_{\pm N}$ на рис. 1а обозначают позицию глаза наблюдателя, из которой виден соответствующий кадр из набора 2D-кадров. Будем считать, что глаза наблюдателя находятся на одной высоте, т.е. голова не наклонена ни вправо, ни влево. Первое 3D-изображение будет видно при наблюдении с позиций $K_0, \dots, K_{\pm N}$.

На рис. 1б представлена схема формирования второго 3D-изображения, когда оптический элемент повернут на 90 градусов. Здесь позиция источника света и возможные направления наблюдения остаются неизменными. Позиции глаза наблюдателя, из которых виден соответствующий кадр второго трехмерного изображения, обозначены символами $R_0, \dots, R_{\pm N}$. Угол между направлениями наблюдения крайних кадров K_{-N} и K_N (или R_{-N} и R_N) определяет сектор обзора защитного признака. Для устойчивого

стереоскопического восприятия 3D-изображения важно, чтобы оба глаза получали соответствующую визуальную информацию, а значит, величина этого угла должна быть заметно больше углового расстояния между глазами наблюдателя. Заметим, что при такой схеме стереоэффект можно наблюдать с произвольного расстояния от оптического элемента.

На рис. 2 приведены схемы наблюдения трехмерных изображений. На рис. 2а оптический элемент находится в нормальном положении. Наблюдатель с направления L может наблюдать первое 3D-изображение. Направление L совпадает с направлением первого порядка дифракции рассеянного света. Абсолютно та же схема используется и для наблюдения второго 3D-изображения, которое наблюдатель видит с того же направления L . Единственная разница между схемами на рис. 2а и рис. 2б заключается в том, что на рис. 2б оптический элемент повернут на 90 градусов вокруг оси Ox .

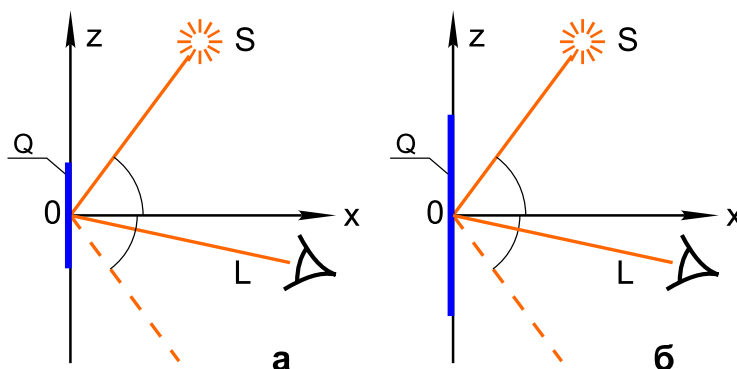


Рис. 2. Схема расположения источника света и наблюдателя для случая: а) оптический элемент в нормальном положении; б) оптический элемент повернут на 90 градусов

3. Метод расчета микрорельефа дифракционного оптического элемента для формирования эффекта смены 3D-изображений при повороте на 90 градусов. Рассматриваемая задача синтеза является обратной. Необходимо рассчитать микрорельеф оптического элемента так, чтобы с каждого заданного направления наблюдатель видел на поверхности оптического элемента соответствующий цветной двумерный кадр. Общее количество кадров равно $2 \times (2N + 1)$. В представленном в статье оптическом элементе используется 34 двумерных кадра. Примеры используемых при расчете 2D-кадров показаны на рис. 3. Микрорельеф оптического элемента изготавливается с разрешением 0.2 мкм. При размере оптического элемента 20×20 мм число неизвестных обратной задачи составляет порядка 10^{10} . Тем не менее, как показано в статье, можно предложить эффективные алгоритмы решения поставленной задачи синтеза дифракционного оптического элемента.

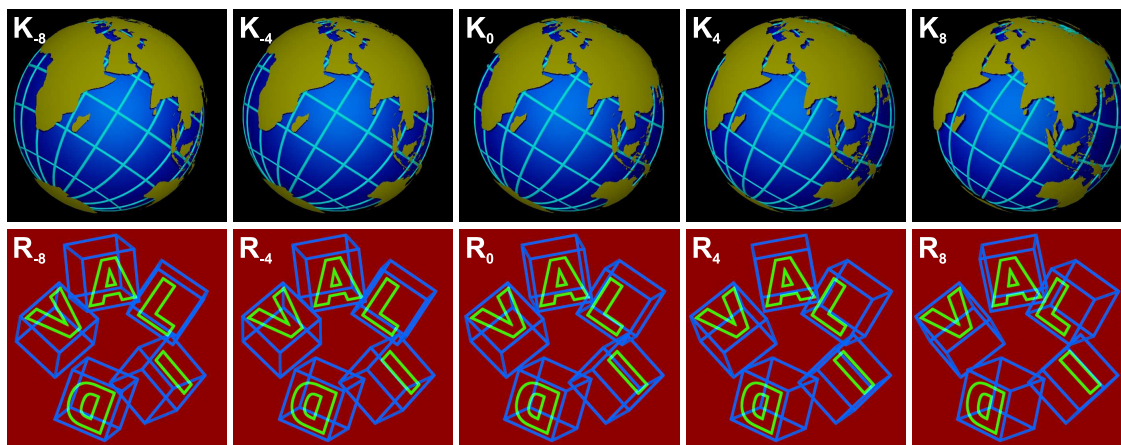


Рис. 3. Примеры 2D-кадров для формирования 3D-изображений

Для этого разобьем оптический элемент на элементарные области, представляющие собой равные прямоугольники. Пусть количество элементарных областей равно $m \times n$. Идея разбиения дифракционного оптического элемента на элементарные области, в которых формируется различный микрорельеф, известна и широко используется в защитных технологиях [12]. Максимальный размер области определяется разрешением человеческого глаза. Наблюдатель не должен видеть разбиения оптического элемента на элементарные области. Исходя из того, что предполагаемое минимальное комфортное расстояние от глаза наблюдателя до оптического элемента будет составлять около 20 см, получим, что размер элементарной области не должен превосходить 80 мкм. С другой стороны, нельзя делать размеры элементарных областей слишком маленькими. Диаграмма направленности, формируемая элементарной областью, является достаточно сложной, и при размерах элементарных областей менее 30 мкм качество синтезируемых 3D-изображений существенно падает. В настоящей статье использовалось разбиение на квадратные эле-

ментарные области размером 80×80 мкм.

Будем считать, что 2D-кадры подготовлены таким образом, что количество пикселей изображения тоже равно $m \times n$; таким образом, общее количество пикселей в кадре совпадает с количеством элементарных областей оптического элемента. Рассмотрим пиксель 2D-кадра с координатами (i, j) , где i — строка, а j — столбец пикселя. Геометрическое положение центра каждой элементарной области в позиции (i, j) внутри оптического элемента соответствует геометрическому положению центра пикселя изображения с теми же координатами (i, j) для любого 2D-кадра. Оптический элемент сформирован так, что при наблюдении с любого из заданных направлений цвет элементарной области с координатами (i, j) будет такой же, что и цвет пикселя с координатами (i, j) кадра, соответствующего этому направлению. Например, цвет пикселя с координатами (i, j) 2D-кадра R_0 формируется только одной элементарной областью с координатами (i, j) при наблюдении из точки R_0 .

Оптический элемент устроен так, что каждая элементарная область участвует в формировании всех 2D-кадров. Любая элементарная область формирует пиксели как одного, так и другого 3D-изображения. Поскольку кадры являются цветными, то необходимо формировать 2D-изображения в трех цветах (RGB — Red, Green, Blue). Таким образом, задача расчета микрорельефа в каждой элементарной области является достаточно сложной, поскольку излучение, дифрагированное от микрорельефа одной элементарной области, участвует в формировании большого числа цветовых пикселей.

Существуют различные способы расчета микрорельефа дифракционного оптического элемента с заданными характеристиками рассеянного излучения [13]. Для рассматриваемой в данной статье задачи используется подход, основанный на разбиении элементарных областей на отдельные, заполненные различными дифракционными решетками участки — дифракционные пиксели. При таком подходе задача состоит в том, чтобы рассчитать для каждого дифракционного пикселя всего два параметра: период и угол наклона штрихов дифракционной решетки. Фрагмент элементарной области схематично показан на рис. 4. Символом K обозначены дифракционные пиксели, формирующие первое 3D-изображение (направление штрихов решеток близко к горизонтальному), а символом R обозначены дифракционные пиксели, формирующие второе 3D-изображение.

Количество дифракционных пикселей в элементарной области составляет несколько десятков. Общее число дифракционных пикселей на оптическом элементе размером 20×20 мм можно оценить в 5 миллионов. Элементарные области состоят не только из дифракционных пикселей, они содержат и пустые места. Общее количество неизвестных параметров обратной задачи при таком подходе составляет порядка 10 миллионов. Такого количества параметров вполне достаточно для формирования эффекта смены двух 3D-изображений. Оказывается, что можно предложить конструктивные методы расчета периодов и направлений дифракционных решеток в каждом дифракционном пикселе.

Будем считать, что каждый дифракционный пиксель отвечает за формирование одного цветового канала одного кадра. Таким образом, параметры дифракционной решетки каждого дифракционного пикселя рассчитываются при заданной длине волны и с заданным направлением на наблюдателя. Дифракция на решетках при наклонном падении света хорошо изучена даже в моделях, учитывающих поляризацию света [14]. В скалярной волновой модели, которая используется в настоящей статье, ситуация значительно упрощается. Хорошо известно соотношение, связывающее компоненты волновых векторов падающей и дифрагированной волны [15]:

$$\mathbf{k}_{Q,M} = \mathbf{k}_{Q,i} + M\mathbf{D}. \quad (1)$$

Здесь $\mathbf{k}_{Q,i}$ — проекция волнового вектора падающего излучения \mathbf{k}_i на поверхность оптического элемента Q , а $\mathbf{k}_{Q,M}$ — проекция на ту же плоскость волнового вектора \mathbf{k}_M излучения, дифрагированного в направлении M -го порядка дифракции. Вектор выражается формулой $\mathbf{D} = \frac{2\pi}{d} \mathbf{e}_d$, где d — период решетки,

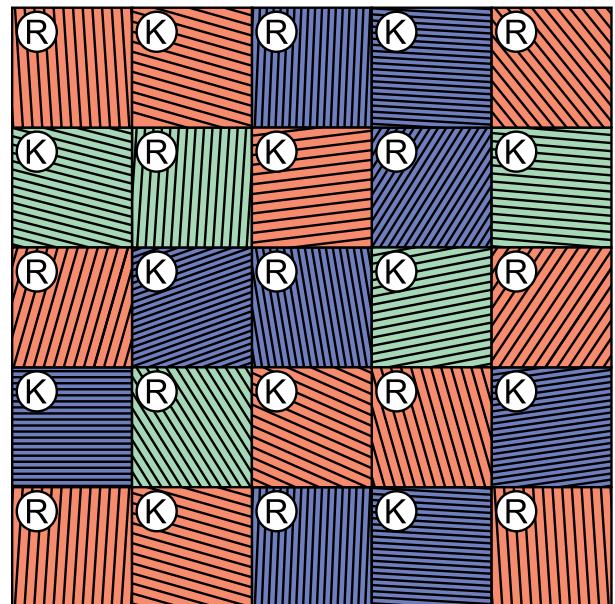


Рис. 4. Схема формирования микрорельефа фрагмента элементарной области плоского оптического элемента

а e_d — единичный вектор в плоскости оптического элемента, перпендикулярный штрихам дифракционной решетки.

В нашем случае вектор k_i коллинеарен вектору SO , а вектор k_M коллинеарен направлению наблюдения соответствующего кадра OK_j для первого изображения или направлению OR_j для второго изображения. Векторы k_i и k_M имеют длину, равную $2\pi/\lambda$, где λ — длина волны. Поскольку координаты векторов k_i и k_M известны, нетрудно вычислить координаты их проекций k_{Qi} и k_{QM} на плоскость оптического элемента $x = 0$. В нашем случае мы формируем изображения в первом порядке дифракции; таким образом, $M = 1$. Из соотношения (1) следует, что вектор $D = k_{Q,M} - k_{Q,i}$, таким образом определяются как направления штрихов решеток в каждом пикселе, так и периоды дифракционных решеток для каждой длины волны λ , соответствующей красному, зеленому и синему цвету.

Синтезированный оптический элемент был разбит на квадратные дифракционные пиксели размером 8 мкм. В каждом пикселе расположена дифракционная решетка, которая полностью характеризуется двумя параметрами — периодом и углом наклона штрихов. Таким образом, в предложенном методе синтеза общее количество параметров конечно-параметрической задачи составляет порядка 10^7 , что уже много меньше первоначальной оценки 10^{10} , сделанной в начале этого раздела статьи. Тем не менее, количество параметров порядка 10^7 тоже является очень большим.

Решение обратной задачи синтеза в предложенном методе расчета микрорельефа дифракционного оптического элемента заключается в возможности независимого определения параметров дифракционной решетки в каждом пикселе — исходя только из яркости и цвета соответствующего пикселя 2D-кадра. Что касается яркости пикселя, то ее можно модулировать разными способами. Например, можно заполнять решеткой не всю площадь пикселя, а только его часть.

4. Изготовление дифракционного оптического элемента. Наборы “снимков” 3D-сцены с заданных направлений были получены с помощью компьютерной программы 3D-моделирования. В настоящее время существует большое количество программ для 3D-моделирования и библиотек профессионально созданных 3D-моделей различных объектов. В нашей работе для создания трехмерных сцен и для получения кадров с разных ракурсов использовалась программа 3D Studio Max. Модели трехмерных объектов были созданы самостоятельно. При выбранной ширине сектора обзора 3D-эффекта в 30 градусов для получения хорошего по качеству 3D-изображения обычно достаточно 16–20 2D-кадров. Было использовано по 17 кадров для формирования каждого из 3D-изображений. Первое 3D-изображение формируется набором кадров $K_0, \dots, K_{\pm 8}$, а второе 3D-изображение формируется другим набором кадров $R_0, \dots, R_{\pm 8}$, при этом направления наблюдения “снимков” 3D-сцены соответствуют схеме, представленной на рис. 1. На рис. 3 выборочно показаны по пять кадров из каждого набора. Каждый 2D-кадр состоит из порядка 50 000 пикселей.

Стереозффект наблюдается в том случае, когда глаза наблюдателя находятся в позициях $K_{\pm N}$ или $R_{\pm N}$, как показано на рис. 1. Эффект смены 3D-изображений можно наблюдать при повороте оптического элемента на 90 градусов относительно оси Ox , если позиция наблюдателя и источника света не меняется.

Эффективность предложенных методов синтеза дифракционного оптического элемента для формирования 3D-изображений иллюстрируется фотографиями, полученными с изготовленных оптических элементов. На рис. 5а приведено фото первого изображения, а на рис. 5б — второго. Диапазон периодов дифракционных решеток определяет диапазон видимых цветов сформированных 3D-изображений. Для синтеза визуального эффекта “свитч 3D/3D” в настоящей статье используются дифракционные решетки с периодами от 0.7 до 1.0 мкм. Этого диапазона периодов дифракционных решеток вполне достаточно для формирования изображения в натуральных цветах от красного до синего.

Трехмерное изображение формируется благодаря тому, что левый и правый глаз наблюдателя видят разные кадры изображения. Если свет падает сверху, а оптический элемент находится в нормальном (не

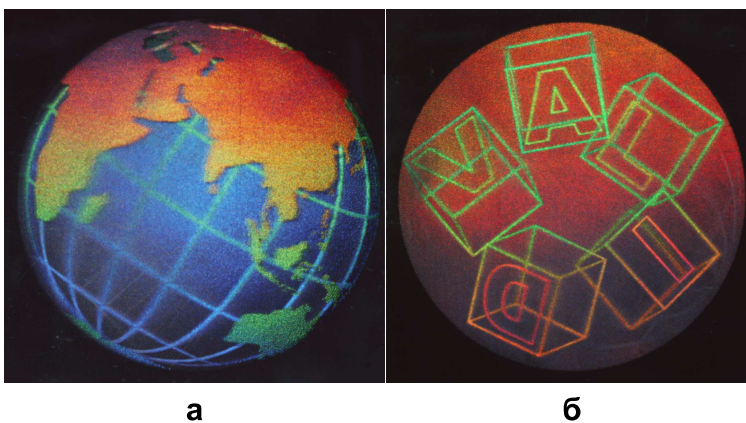


Рис. 5. Фотографии оптического элемента из точки наблюдения центрального кадра K_0 (а) и R_0 (б)

повернутом) положении (рис. 1а), то наблюдатель может видеть трехмерное изображение глобуса. Это изображение остается трехмерным при небольших наклонах оптического элемента вправо–влево, пока глаза наблюдателя находятся между кадрами K_{-8} и K_{+8} . Если свет падает сверху, а оптический элемент повернут на 90 градусов относительно нормального положения (рис. 1б), то наблюдатель может видеть трехмерное изображение кубиков с буквами. Это изображение тоже остается трехмерным при небольших наклонах оптического элемента вправо–влево, пока глаза наблюдателя находятся между кадрами R_{-8} и R_{+8} . Переключение между изображениями глобуса и кубиков наблюдается при повороте оптического элемента на 90 градусов.

Для изготовления оригинала дифракционного оптического элемента использовался электронно-лучевой генератор с размером минимального пикселя 0.1×0.1 мкм. Такой размер пикселя вполне достаточен для формирования высококачественных дифракционных решеток. Общий размер записанного микрорельефа составил 20×20 мм. Глубина микрорельефа составила порядка 100 нм. Точность формирования микрорельефа дифракционных решеток по глубине составляет 20 нанометров.

Используя стандартные процедуры гальваноластики и рекомбинации, была изготовлена мастер-матрица, включающая в себя 20 копий микрорельефа оптического элемента. С мастер-матрицы была изготовлена рабочая матрица, с помощью которой на стандартном оборудовании для эмбоссирования были изготовлены тиражные образцы оптических защитных элементов на полиэстере толщиной 23 мкм.

На рис. 5 приведены фотографии реального образца оптического элемента после тиражирования. Это подтверждает факт, что разработанная технология синтеза визуального защитного признака “свитч 3D/3D”, изготовленного на основе электронно-лучевой технологии, допускает массовое тиражирование с помощью стандартного оборудования.

5. Дифракционные оптические элементы для формирования горизонтального эффекта смены 3D-изображений. В настоящей статье предложена общая схема формирования “свитч-эффектов” с участием двух 3D-изображений. Разработаны методы синтеза для формирования “свитч-эффекта” при повороте оптического элемента на 90 градусов. Аналогично можно решать задачи синтеза для формирования горизонтального “свитч-эффекта”. В этом случае схема формирования эффекта (рис. 1) меняется на схему, приведенную на рис. 6.

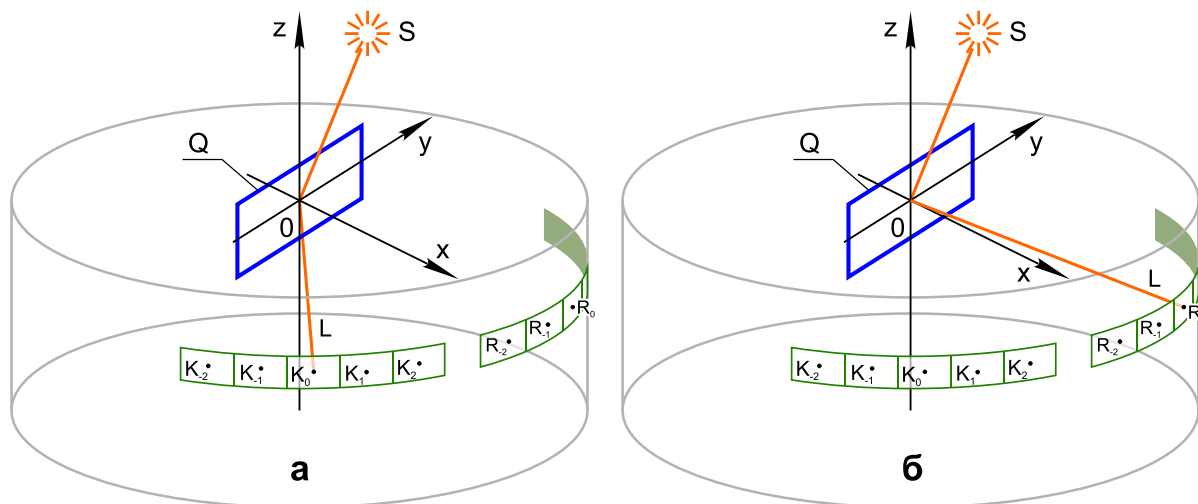


Рис. 6. Схема формирования визуального защитного признака “горизонтальный свитч-эффект 3D/3D”

Источник дневного света S освещает белым светом плоский дифракционный оптический элемент Q , расположенный в плоскости $x = 0$. В результате дифракции на микрорельефе оптического элемента свет рассеивается так, что с определенных ракурсов наблюдения на поверхности оптического элемента Q формируется заданное 2D-изображение. А именно: точки $K_0, \dots, K_{\pm N}$ на рис. 6а обозначают позицию глаза наблюдателя, из которой виден соответствующий кадр из набора 2D-кадров. Будем считать, что глаза наблюдателя находятся на одной высоте и позиция наблюдателя располагается левее плоскости Oxz , тогда первое (левое) 3D-изображение будет видно при наблюдении с ракурсов $K_0, \dots, K_{\pm N}$.

На рис. 6б представлена схема формирования второго (правого) 3D-изображения, когда позиция глаз наблюдателя располагается правее плоскости Oxz . Расположение источника света и оптического элемента остаются неизменными. Позиции глаза наблюдателя, из которых виден соответствующий кадр второго трехмерного изображения, обозначены через $R_0, \dots, R_{\pm N}$.

Переключение между двумя 3D-изображениями можно также наблюдать, поворачивая оптический элемент на небольшой угол вправо–влево вокруг оси Oz , не меняя положения глаз.

Угловой зазор между секторами наблюдения каждого из 3D-изображений (угол между K_N и R_{-N} на схеме) должен быть достаточным для того, чтобы обеспечить отдельное наблюдение каждого из 3D-изображений. Например, можно выбрать этот угол равным угловому расстоянию между глазами наблюдателя при наблюдении с минимального комфортного расстояния.

Схема наблюдения остается той же, что и на рис. 2а. В горизонтальном “свитч-эффекте” левое 3D-изображение формируется кадрами K_1, \dots, K_n , правое — кадрами R_1, \dots, R_n (см. рис. 6). Угол между направлениями наблюдения крайних кадров K_{-N} и K_N (или R_{-N} и R_N) определяет сектор обзора защитного признака. Для устойчивого стереоскопического восприятия 3D-изображения важно, чтобы величина этого угла была заметно больше углового расстояния между глазами наблюдателя. Заметим, что при такой схеме, как и в случае эффекта смены изображений при повороте оптического элемента на 90 градусов, стереоэффект можно наблюдать с произвольного расстояния от оптического элемента.

Метод расчета микрорельефа дифракционного оптического элемента для формирования эффекта смены 3D-изображений при повороте на 90 градусов полностью подходит для “горизонтального свитч-эффекта 3D/3D”. Как и в первом варианте, оптический элемент разбивается на элементарные области. С помощью программы 3D-моделирования получаем двумерные “снимки” трехмерной сцены с нужных ракурсов. Количество пикселей 2D-кадра по вертикали и горизонтали приводится к соответствующему числу элементарных областей оптического элемента. Затем каждая элементарная область разбивается на подобласти (дифракционные пиксели), заполненные разными дифракционными решетками. Каждый дифракционный пиксель отвечает за один из трех цветовых каналов (RGB) одного пикселя одного 2D-кадра. Для расчета периода и направления штрихов дифракционной решетки каждого дифракционного пикселя используется уравнение (1) для случая первого порядка дифракции.

Для нахождения оптимальных параметров был проведен ряд численных экспериментов по расчету микрорельефа дифракционного оптического элемента с эффектом горизонтального переключения 3D-изображений. В результате были определены такие параметры, как угол падения света, диапазоны углов наблюдения 3D-изображений и зазор между ними, количество кадров и др. При этом ставилось условие получения чистого визуального эффекта и условие возможности производства оптического элемента с помощью электронно-лучевой литографии с дальнейшим использованием стандартной голографической технологии массового производства.

6. Заключение. В настоящей статье предложены новые методы синтеза дифракционных оптических элементов для защиты ценных бумаг и документов от подделки. Представленные защитные признаки “свитч 3D/3D” легко контролируются визуально. Разработанные защитные элементы надежно защищены от подделки и допускают массовое тиражирование, что обеспечивает их низкую цену.

Обратная задача синтеза решается в рамках конечно-параметрических моделей. Предложен эффективный метод расчета микроструктуры дифракционных оптических элементов, формирующих визуальные 3D-изображения. Эффективность рассмотренных методов подтверждена изготовлением реальных защитных оптических элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Saxby G.* Practical holography. Boca Raton: CRC Press, 2003.
2. *Davis F.S.* Holographic image conversion method for making a controlled holographic grating. 1993. US Patent 5,262,879.
3. *Rai-Choudhury P.* Handbook of microlithography, micromachining, and microfabrication. Microlithography. Vol. 1. Bellingham: SPIE Press, 1997.
4. *Zhou Z., Lee S.H.* Two-beam-current method for e-beam writing gray-scale masks and its application to high-resolution microstructures // Appl. Opt. 2008. **47**, N 17. 3177–3184.
5. *Shiono T., Hamamoto T., Takahara K.* High-efficiency blazed diffractive optical elements for the violet wavelength fabricated by electron-beam lithography // Appl. Opt. 2002. **41**, N 13. 2390–2393.
6. *Goncharsky A., Goncharsky A., Durevich S.* Diffractive optical element with asymmetric microrelief for creating visual security features // Opt. Express. 2015. **23**, N 22. 29184–29192.
7. *Тихонов А.Н.* О решении некорректно поставленных задач и методе регуляризации // Докл. АН СССР. 1963. **151**, № 3. 501–504.
8. *Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г.* Численные методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1990.
9. *Bakushinsky A., Goncharsky A.* Ill-posed problems: theory and applications. Dordrecht: Kluwer, 1994.
10. *Yatagai T.* Stereoscopic approach to 3-D display using computer-generated holograms // Appl. Opt. 1976. **15**, N 11.

2722–2729.

11. Takaki Y., Taira K. Speckle regularization and miniaturization of computer-generated holographic stereograms // Opt. Express. 2016. **24**, N 6. 6328–6340.
12. Van Renesse R.L. Optical document security. Boston: Artech House, 2005.
13. Гончарский А.В., Гончарский А.А. Компьютерная оптика. Компьютерная голография. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004.
14. Goray L.I., Schmidt G. Solving conical diffraction grating problems with integral equations // J. Opt. Soc. Am. A. 2010. **27**, N 3. 585–597.
15. Popov E. Gratings: theory and numeric applications. Marseille: Institut Fresnel, 2014.

Поступила в редакцию
29.11.2016

Computer Synthesis of Diffractive Optical Elements for Forming 3D Images

S. R. Durlevich¹

¹ *Research Computing Center, Lomonosov Moscow State University; Leninskie Gory, Moscow, 119992, Russia; Leading Programmer, e-mail: sdurlevich@yandex.ru*

Received November 29, 2016

Abstract: A method is proposed to compute and synthesize the microrelief of a diffractive optical element to produce a new visual security feature: alternation of two 3D color images when the diffractive element is rotated by 90 degrees. Effective algorithms for computing the micro-relief of an optical element are developed. Optimal parameters of the diffractive optical element are determined using methods of mathematical modeling. Sample optical security elements that produce 3D to 3D visual switch effect when illuminated by white light were manufactured using the electron-beam lithography. The optical elements developed can be replicated using a standard equipment employed for manufacturing security holograms. The new optical security feature is easy to control visually, safely protected against counterfeit, and designed to protect banknotes, documents, ID cards, etc.

Keywords: nano-optical elements, flat computer optics, electron beam lithography, security label verification.

References

1. G. Saxby, *Practical Holography* (CRC Press, Boca Raton, 2003).
2. F. S. Davis, *Holographic Image Conversion Method for Making a Controlled Holographic Grating*. US. Patent No. 5,262,879 (16 November 1993).
3. P. Rai-Choudhury (Ed.), *Handbook of Microlithography, Micromachining, and Microfabrication*, Vol. 1: *Microlithography* (SPIE Press, Bellingham, 1997).
4. Z. Zhou and S. H. Lee, “Two-Beam-Current Method for E-Beam Writing Gray-Scale Masks and Its Application to High-Resolution Microstructures,” *Appl. Opt.* **47** (17), 3177–3184 (2008).
5. T. Shiono, T. Hamamoto, and K. Takahara, “High-Efficiency Blazed Diffractive Optical Elements for the Violet Wavelength Fabricated by Electron-Beam Lithography,” *Appl. Opt.* **41** (13), 2390–2393 (2002).
6. A. Goncharsky, A. Goncharsky, and S. Durlevich, “Diffractive Optical Element with Asymmetric Microrelief for Creating Visual Security Features,” *Opt. Express* **23** (22). 29184–29192 (2015).
7. A. N. Tikhonov, “Solution of Incorrectly Formulated Problems and the Regularization Method,” *Dokl. Akad. Nauk SSSR* **151** (3), 501–504 (1963) [*Sov. Math. Dokl.* **5** (4), 1035–1038 (1963)].
8. A. N. Tikhonov, A. V. Goncharsky, V. V. Stepanov, and A. G. Yagola, *Numerical Methods for the Solution of Ill-Posed Problems* (Kluwer, Dordrecht, 1995).
9. A. Bakushinsky and A. Goncharsky, *Ill-Posed Problems: Theory and Applications* (Kluwer, Dordrecht, 1994).
10. T. Yatagai, “Stereoscopic Approach to 3-D Display Using Computer-Generated Holograms,” *Appl. Opt.* **15** (11), 2722–2729 (1976).

11. Y. Takaki and K. Taira, “Speckle Regularization and Miniaturization of Computer-Generated Holographic Stereograms,” *Opt. Express* **24** (6), 6328–6340 (2016).
12. R. L. van Renesse, *Optical Document Security* (Artech House, Boston, 2005).
13. A. V. Goncharsky and A. A. Goncharsky, *Computer Optics and Computer Holography* (Mosk. Gos. Univ., Moscow, 2004) [in Russian].
14. L. I. Goray and G. Schmidt, “Solving Conical Diffraction Grating Problems with Integral Equations,” *J. Opt. Soc. Am. A* **27** (3), 585–597 (2010).
15. E. Popov (Ed.), *Gratings: Theory and Numeric Applications* (Institut Fresnel, Marseille, 2014).