
ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

OPTICAL INSTRUMENTS

УДК 535.543.1

СОЗДАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ МИКРОЛИНЗОВЫХ ЗАЩИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ОПТИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ ЭФФЕКТОМ

Л. В. ТАНИН¹⁾, А. И. ГОРЧАРУК¹⁾

¹⁾Голографическая индустрия, пер. Калинина, 12, 220012, г. Минск, Беларусь

Аннотация. Отмечено, что оптические защитные элементы на основе полимерных микрооптических систем являются перспективной платформой для создания новых визуальных признаков, которые можно применять в технологиях защиты ценных бумаг и документов. Представлены физические принципы формирования стерео- и вариоизображений с помощью матрицы микролинз. Показано, что в результате комплексного взаимодействия между массивом микролинз и массивом микроизображений формируются мнимые синтезированные изображения, которые смещаются при изменении угла наблюдения, т. е. плавающие изображения. Такие изображения используются как защитный признак. С применением технологии цифровой записи голограмм получены решетки микроизображений с высоким разрешением, которое невозможно достичь с помощью традиционных методик печати. Разработан способ повышения контрастности между областями, содержащими микроизображения, и чистой пленкой.

Ключевые слова: голографический защитный элемент; голограмма; оптическая система; микролинза; микролинзовый массив; стереоэффект; параллакс; графическое изображение.

Образец цитирования:

Танин ЛВ, Горчарук АИ. Создание полимерных микролинзовых защитных элементов с оптически изменяющимся эффектом. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2024;2:99–107.
EDN: WSWVGT

For citation:

Tanin LV, Harcharuk AI. Creation of polymer microlens security elements with an optically varying effect. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2024;2:99–107. Russian.
EDN: WSWVGT

Авторы:

Леонид Викторович Танин – доктор физико-математических наук, академик Международной инженерной академии; председатель совета директоров, главный советник.
Андрей Иванович Горчарук – начальник отдела матриц.

Authors:

Leonid V. Tanin, doctor of science (physics and mathematics), academician of the International Academy of Engineering; chairman of the board of directors and chief adviser.
leonidtanin@gmail.com
Andrey I. Harcharuk, head of the matrix department.
gaiholin@gmail.com

CREATION OF POLYMER MICROLENS SECURITY ELEMENTS WITH AN OPTICALLY VARYING EFFECT

L. V. TANIN^a, A. I. HARCHARUK^a

^aHolography Industry, 12 Kalinina Lane, Minsk 220012, Belarus

Corresponding author: A. I. Harcharuk (gaiholin@gmail.com)

Abstract. It is noted that optical security elements based on polymer microoptical systems are a promising platform for creating new visual features that can be used in technologies for protecting securities and documents. The physical principles of stereo and vario image formation using a microlens matrix are presented. It is shown that as a result of the complex interaction between an array of microlenses and an array of microimages, virtual synthesised images are formed, which shift when the viewing angle changes, i. e. floating images. Such images are used as a security feature. With the use of digital hologram recording technology, microimage arrays with high resolution have been obtained, which cannot be achieved using traditional printing techniques. A method has been developed to increase the contrast between areas containing microimages and blank film.

Keywords: holographic security element; hologram; optical system; microlens; microlens array; stereo effect; parallax; graphic image.

Введение

Сегодня такие ценные бумаги, как банкноты, обычно содержат оптически изменяющиеся устройства, а именно дифракционные решетки или голографические оптические микроструктуры, что является признаком защиты от подделки и копирования. Данный факт обусловлен прогрессом в сфере технологий, при котором традиционные способы печати защищенных бумаг, в частности глубокая и офсетная печать, становятся более уязвимыми для попыток подделки и копирования. Дифракционные решетки и голографические оптические микроструктуры применяются повсеместно, и, следовательно, области техники по их изготовлению становятся все более доступными фальсификаторам. Оптические защитные элементы также можно создать с помощью неголографической микрооптики. Достоинство данной технологии состоит в том, что механическое копирование микрооптических элементов, таких как сферические микролинзы, имеющие характерный размер 1–50 мкм, весьма сложно реализовать, поскольку при любом незначительном изменении размеров или геометрических искривлениях происходит ухудшение либо подавление требуемых оптических свойств [1–3]. Кроме того, объемные изображения на основе линзово-растровой пленки дополнительно ограничены необходимостью точного совмещения микролинз и отпечатанных изображений и, как следствие, очень сложны в изготовлении с помощью технологий серийного производства, что препятствует их коммерческому использованию [4–6].

Цель настоящего исследования – разработка оптического защитного элемента, который содержит подложку с решеткой сферических микролинз на одной стороне и одной или несколькими решетками микроизображений на другой стороне.

Структура защитного устройства

В работе предложено линзово-растровое устройство (рис. 1) для применения в технологиях защиты ценных бумаг и документов. Устройство представляет собой двумерную периодическую матрицу микролинз, помещенных через оптическую прокладку над периодически сформированными микроизображениями. На рис. 2 приведено сечение устройства плоскостью, ортогональной его основанию, позволяющее описать конструктивные параметры системы. Микролинза l , как правило, имеет диаметр менее 50 мкм, зазор z между микролинзами обычно составляет 5 мкм или менее. Микроизображение 4 фокусируется микролинзой l и проецируется в направлении 9 . Эта система используется при наличии естественного освещения. Микроизображение 4 является одним из элементов периодической матрицы микроизображений с размерами и периодом $l\theta$, сопоставимыми с размерами и периодом матрицы микролинз. Толщина 5 оптической прокладки такова, что изображение формируется в фокальной плоскости микролинз (точка ll). Матрицу микроизображений защищает герметизирующий слой 6 . Он может быть прозрачным, металлическим, пигментированным, матовым, магнитным, полупрозрачным, окрашенным, с изменяющимися оптическими характеристиками или иметь любую комбинацию перечисленных свойств, что обеспечивает требуемые оптические эффекты либо дополнительные способы защиты ценных бумаг и документов.

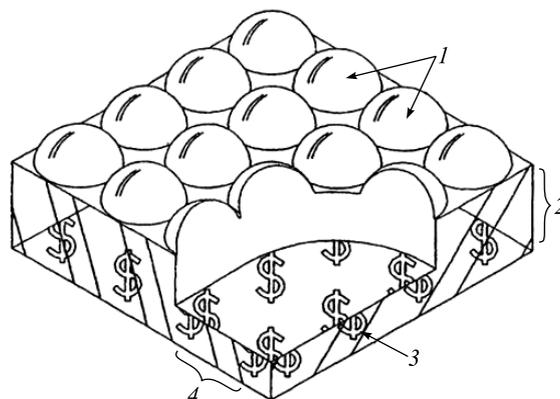


Рис. 1. Изометрический вид защитного устройства:
1 – микролинзы; 2 – толщина оптической прокладки;
3 – микроизображение; 4 – период микроизображения

Fig. 1. Isometric view of the security device:
1 – microlenses; 2 – optical spacer thickness;
3 – microimage; 4 – microimage period

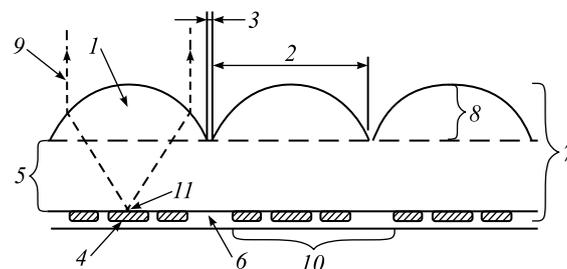


Рис. 2. Вид защитного устройства в ортогональной проекции:
1 – микролинза; 2 – диаметр микролинзы; 3 – расстояние (зазор) между микролинзами;
4 – микроизображение; 5 – толщина оптической прокладки; 6 – герметизирующий слой;
7 – общая толщина системы; 8 – высота микролинзы; 9 – ход луча;
10 – период микроизображения; 11 – фокусная точка

Fig. 2. View of the security device in orthogonal projection:
1 – microlens; 2 – microlens diameter; 3 – distance (gap) between microlenses;
4 – microimage; 5 – optical spacer thickness; 6 – sealing layer; 7 – total system thickness;
8 – microlens height; 9 – beam path; 10 – microimage period; 11 – focal point

Практическая проблема с линзово-растровыми устройствами заключается в том, что толщина защитного элемента зависит от ширины и количества чередующихся полос микроизображений [7]. Для функционирования оптического устройства обратное фокусное расстояние F микролинзы l должно быть таким, чтобы оно фокусировалось на полосах микроизображений 4 , а период повторения полос 10 должен быть равен диаметру 2 микролинзы (обозначим его через D). Обратное фокусное расстояние микролинзы l задается от задней поверхности линзы до фокусной точки 11 . Общий принцип для полимерных пленок – $F \geq 1,0-1,5D$.

Таким образом, чтобы устройство имело толщину 30 мкм, диаметр микролинз должен быть не более 30 мкм. Как следствие, период повторения полосы микроизображений также не должен превышать 30 мкм. Однако это невозможно при традиционных методиках печати, которые в лучшем случае могут обеспечить разрешение 1200 dpi, что составляет 20 мкм/пк.

В настоящей работе изображения с высоким разрешением созданы методом цифровой голографической записи оптических структур на фоторезист с последующим переносом полученных микрорельефных структур с помощью никелевой матрицы на поверхность полимерной пленки.

Рассмотрим подробно технологию изготовления защитного элемента для формирования двумерных и трехмерных изображений с использованием матрицы микролинз. Оптически изменяющееся устройство основано на взаимодействии между решеткой микролинз и соответствующим набором идентичных микроизображений. Когда решетки идеально совмещены, каждая микролинза имеет под собой микроизображение в точном соответствии, так что наблюдатель видит только одно увеличенное изображение.

Введение несовпадения шага между решеткой микролинз и решеткой микроизображений расщепляет одно увеличенное изображение на регулярную решетку изображений с увеличением числа видимых изображений и уменьшением их отдельного размера по мере того, как возрастает несовпадение шага. Также несовпадение шага может быть легко сформировано в результате вращения данных решеток друг относительно друга.

Перекрывающиеся области изображения, по сути, определяются посредством муаровой картинки, сформированной между решеткой линз и решеткой изображений, и поэтому данное оптическое устройство можно назвать увеличителем муара. Остановимся на эффекте формирования муара более подробно. Эффект муара двух периодических структур может быть объяснен при рассмотрении частотных векторов этих структур. Направление частотного вектора совпадает с направлением периодичности, а его длина определяет частоты решеток. Вектор выражается посредством декартовых координат (u, v) , где u и v – горизонтальная и вертикальная компоненты частоты.

Одномерная решетка представляется парой точек в частотной плоскости (решетка должна быть синусоидальной, чтобы иметь только две точки в частотной плоскости). Представление двух одномерных решеток с одинаковой частотой, но разной ориентацией как частотных векторов показано на рис. 3.

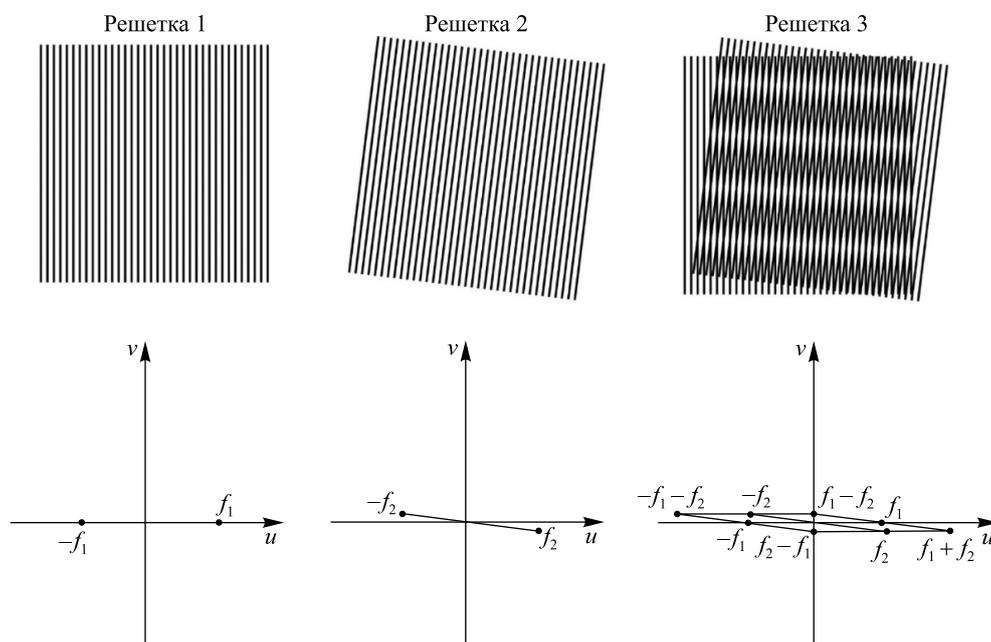


Рис. 3. Образование периодической муаровой структуры
 Fig. 3. Formation of a periodic moiré structure

Решетка 1 может быть представлена посредством точек f_1 и $-f_1$, а решетка 2 – посредством точек f_2 и $-f_2$, где f – пространственная частота, величина которой обратно пропорциональна периоду решетки. Спектр, генерируемый из свертывания двух частотных представлений (решетка 3), указывает, что возникают частоты муара. Муар, наблюдаемый при наложении двух решеток на рис. 3, соответствует точкам $f_1 - f_2$ и $f_2 - f_1$ в частотной плоскости. Для двумерных прямолинейных решеток применяется тот же принцип, но он реализуется в двух ортогональных направлениях одновременно.

Значительное увеличение микроизображения соответствует низкочастотному муару. Из частотного представления на рис. 3 можно видеть, что низкочастотный муар требует близкого совпадения частоты и ориентации решеток. Также из рис. 3 следует, что результирующий частотный вектор муара находится под углом примерно 90° к отдельным частотным векторам. Если вместо двух одномерных решеток имеем наложение решетки микролинз и решетки микроизображений, то результирующий частотный вектор муара соответствует решетке увеличенных изображений, которая ориентирована под углом примерно 90° к решеткам микролинз и микроизображений. Степень увеличения микроизображения зависит от соотношения частоты микроизображения и частоты увеличенного изображения (муара), т. е. $f_{\text{microimage}}/f_{\text{moiré}}$. В большинстве случаев степень ротационного смещения между решеткой микроизображений и решеткой микролинз находится в диапазоне $0,1-2,0^\circ$, что приводит к увеличению $\times 25-500$ для решетки микроизображений.

Формирование решетки микроизображений

На рис. 1 показано взаимодействие между решеткой микролинз и решеткой микроизображений. В этом примере решетка 3 символа \$ просматривается посредством решетки 1 микролинз. Типичная решетка 3 содержит множество символов, многократно повторяющихся в каждом направлении с регулярным шагом. В рассматриваемом примере диаметр микролинз D и, следовательно, шаг решетки 1 составляют 30 мкм. Поскольку решетки микроизображений и микролинз должны иметь одинаковый шаг, то микроизображение должно быть создано в рамках квадратной области размером 30×30 мкм или менее, так как предпочтительно оставлять зазор между микроизображениями. В квадратной области размером 30×30 мкм размер пиксела 1 мкм создает решетку изображений, содержащую 900 пк, что обеспечивает возможность формирования идентифицирующих изображений, таких как буквы и цифры. Если размер пиксела дополнительно уменьшается до 0,5 мкм, более сложные идентифицирующие изображения могут быть сформированы из решетки, содержащей 3600 пк.

Как было изложено выше, невозможно создавать такие изображения с высоким разрешением, используя традиционные методики печати. Формирование изображений с высоким разрешением обеспечивает технология цифровой записи голограмм. После этого структура может быть реплицирована в прозрачную полимерную пленку с помощью таких методик, как горячее тиснение и отверждение под действием УФ-облучения. Однако проблема этого подхода состоит в недостаточной контрастности между областью с изображением и областью без изображений. Преимуществом разработанного защитного элемента является то, что он генерирует изображение с высокими разрешением и контрастностью.

В основе повышения контрастности между областью с изображением и областью без изображений лежит тот факт, что периодические субмикронные структуры кажутся черными при металлизации [8]. Следовательно, можно записывать изображение на поверхность полимерной пленки в форме субмикронной структуры. При металлизации пленки обеспечивается высокая степень контрастности между областью с изображением в форме субмикронной структуры, которая отображается черной, и областью без изображений, имеющей яркий металлический оттенок. Микрорельефные структуры могут быть сформированы на покрытой фоторезистом стеклянной подложке посредством голографического экспонирования с помощью УФ-лазера. Формирование решетки микроизображений на поверхности чистой полимерной пленки представлено на рис. 4–6. На первоначальном этапе (см. рис. 4, *a*) формируется микрорельефная структура 2 в слое фоторезиста 3 на стеклянной основе 4.

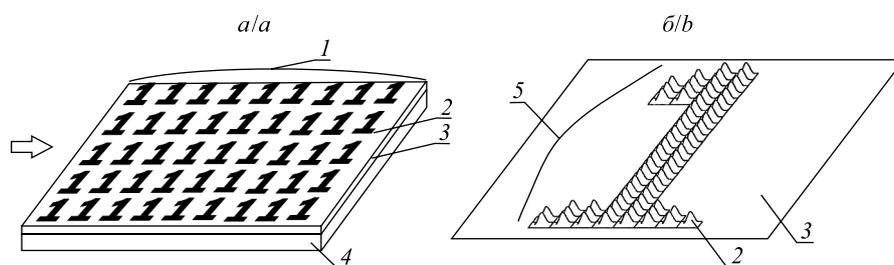


Рис. 4. Формирование микрорельефной структуры в форме решетки микроизображений в слое фоторезиста (*a*). Микрорельеф одного из идентифицирующих микроизображений (*b*): 1 – матрица микроизображений; 2 – микрорельефная структура; 3 – фоторезист; 4 – стеклянная основа; 5 – идентифицирующее изображение

Fig. 4. Formation of a microrelief structure in the form of a microimage array in a photoresist layer (*a*). Microrelief of one of the identifying microimages (*b*): 1 – microimage matrix; 2 – microrelief structure; 3 – photoresist; 4 – glass substrate; 5 – identifying microimage

Методики создания микрорельефной структуры в форме микроизображения включают в себя голографическое экспонирование, фотолитографию, лазерную запись и электронно-лучевые технологии. На рис. 4, *b*, показан микрорельеф одного из идентифицирующих микроизображений после проявления экспонированного фоторезиста. Далее этот оригинал используется для создания негатива микрорельефной структуры микроизображений 1 в никелевой матрице 2 с помощью стандартного процесса электролитического формования, изображенного в поперечном разрезе на рис. 5, *a*.

Структура микроизображений 1 в никелевой матрице 2 затем копируется на поверхность полимерной пленки 3 с использованием стандартных процессов копирования (см. рис. 5, *b*). Наиболее предпочтительными из них в данном случае являются горячее тиснение полимерной пленки и отверждение под

действием УФ-облучения, поскольку оба этих процесса обеспечивают непрерывное рулонное производство защитных элементов. На рис. 5, б, показан процесс копирования под действием УФ-облучения, когда тонкий слой УФ-отверждаемого полимера 4 наносится на чистую полимерную пленку 3, которая затем прижимается к никелевой матрице 2. Далее полимер отверждается до отделения от никелевой матрицы 2, после чего в полимерном слое 4 на поверхности чистой полимерной пленки 3 остается откопированная структура микроизображений. Одно из таких микроизображений представлено на рис. 6. Но при этом существует недостаточная контрастность между изображением и пленкой. Повысить контрастность можно за счет применения тонкого металлического слоя, такого как алюминий, ко всей активной поверхности устройства, в том числе микрорельефной просветляющей структуре. В результате формируется металлизированная пленка, представленная на рис. 6, б.

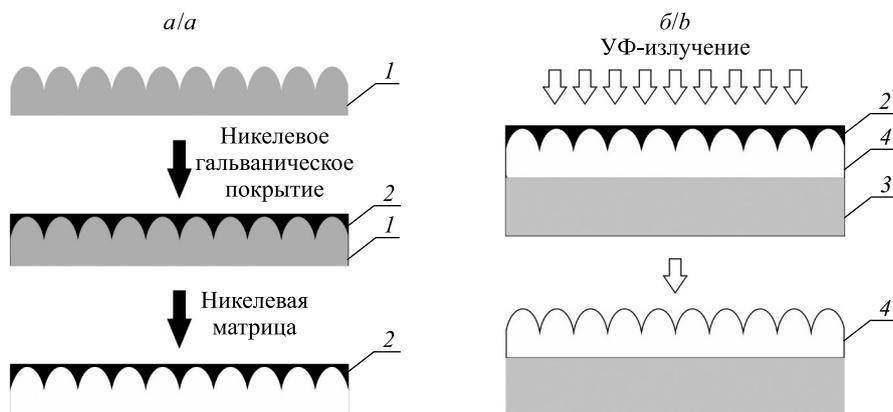


Рис. 5. Создание микрорельефной структуры микроизображений в никелевой матрице с помощью процесса электролитического формования (а) и перенос микрорельефной структуры на полимерную пленку (б):

1 – микрорельефная структура микроизображений; 2 – никелевая матрица; 3 – полимерная пленка; 4 – УФ-отверждаемый полимер

Fig. 5. Creation of microrelief microimage structure in a nickel matrix using an electrolytic molding process (a) and transfer of microrelief structure onto a polymer film (b): 1 – microrelief microimage structure; 2 – nickel matrix; 3 – polymer film; 4 – UV curable polymer

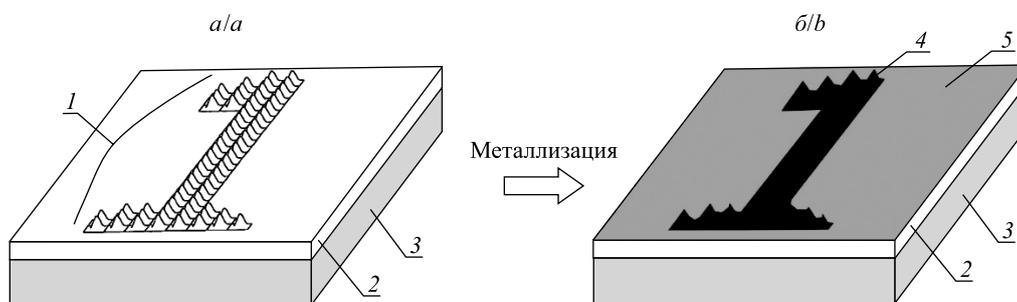


Рис. 6. Повышение контрастности структуры микроизображений на полимерной пленке методом металлизации поверхности полимера: 1 – микроизображение; 2 – УФ-отверждаемый полимер; 3 – полимерная пленка; 4 – микрорельефная просветляющая структура в форме идентифицирующего изображения; 5 – металлизированная пленка

Fig. 6. Increasing the contrast of the structure of microimages on a polymer film by metallisation of the polymer surface:

1 – microimage; 2 – UV curable polymer; 3 – polymer film; 4 – microrelief antireflective structure in the form of an identifying image; 5 – metal-lised film

В данном случае микрорельефная просветляющая структура в форме идентифицирующего микроизображения 4 кажется черной по сравнению с неструктурированными областями пленки, имеющими металлический оттенок. Тонкий металлический слой 5 обычно формируется с помощью вакуумного осаждения.

Формирование двумерных и трехмерных изображений в результате взаимодействия между решеткой микролинз и решеткой микроизображений

Сначала рассмотрим простой пример, когда защитное устройство содержит одну решетку микроизображений «с», объединенную с одной решеткой микролинз. На рис. 7, а, представлено ротационное отношение между частотными векторами решетки 1 изображений «с», решеткой 2 микролинз и результирующей решеткой 3 увеличенных изображений «с», а на рис. 7, б, приведен соответствующий частотный спектр.

Решетка микролинз представлена на рис. 7, б, посредством частотных векторов $f_{\text{microlens}}^h$ и $f_{\text{microlens}}^v$, а решетка микроизображений «с» – посредством частотных векторов f_c^h и f_c^v . Частотный вектор решетки 1 микроизображений «с» повернут под углом α относительно частотного вектора решетки 2 микролинз, как показано на рис. 7. В этой компоновке частотные векторы $f_c^h - f_{\text{microlens}}^h$ и $f_c^v - f_{\text{microlens}}^v$ решетки 3 увеличенных изображений «с» находятся под углом примерно 90° к соответствующим горизонтальным и вертикальным частотным векторам решетки 2 микролинз. На рис. 7 представлены вертикальные и горизонтальные частотные векторы для решеток микролинз и микроизображений, но в последующих примерах, если не заявлено иное, частота решеток микролинз и микроизображений одинакова в двух ортогональных направлениях, и, следовательно, для простоты в соответствующем частотном спектре показан только один из частотных векторов.

В следующем примере в защитное устройство включена дополнительная решетка 3 микроизображений «О» (рис. 8), так что новое защитное устройство содержит две решетки микроизображений – решетку микроизображений «с» и решетку микроизображений «О», объединенные с одной решеткой микролинз.

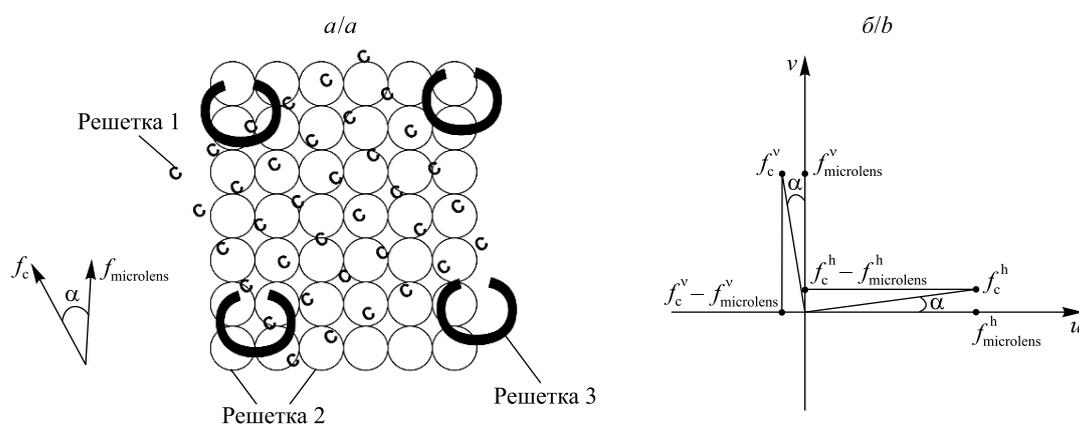


Рис. 7. Оптическая схема (а) и частотный спектр (б) защитного устройства с решеткой микроизображений «с», объединенной с решеткой микролинз

Fig. 7. Optical design (a) and frequency spectrum (b) of a security device with a microimage array «с» combined with a microlens array

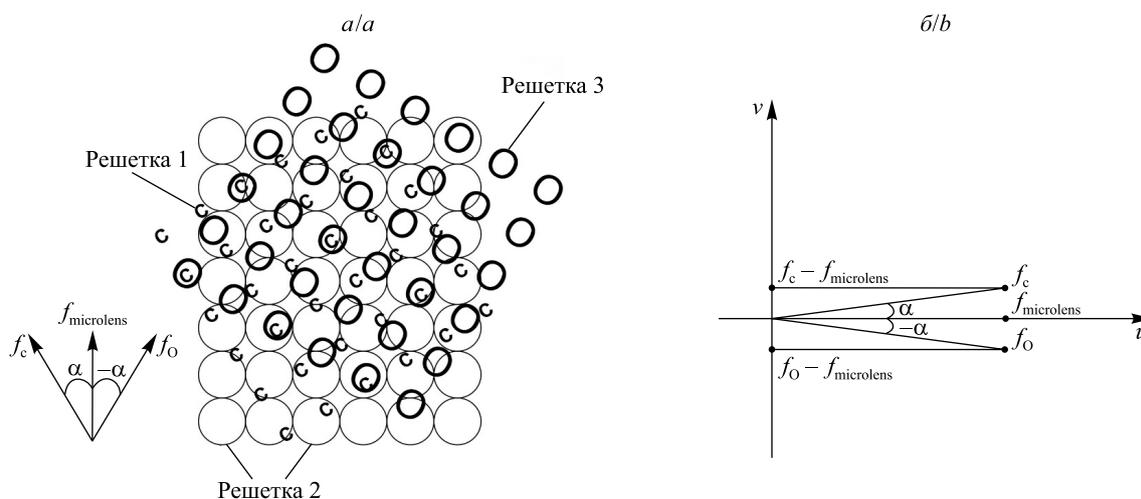


Рис. 8. Оптическая схема (а) и частотный спектр (б) защитного устройства с решетками микроизображений «с» и «О», объединенными с решеткой микролинз

Fig. 8. Optical diagram (a) and frequency spectrum (b) of a security device with microimage arrays «с» and «О» combined with a microlens array

Две решетки микроизображений расположены в одной плоскости, но имеют в ней разное ротационное направление. На рис. 8, б, показана ситуация, когда решетки 1 и 3 микроизображений, представленные посредством частотных векторов f_c и f_o , ориентированы таким образом, что они составляют угол α и $-\alpha$ к частотному вектору $f_{\text{microlens}}$ решетки 2 микролинз соответственно. Решетки увеличенных изображений представлены посредством векторов $f_o - f_{\text{microlens}}$ и $f_c - f_{\text{microlens}}$ и ориентированы под углом примерно 180° друг относительно друга, чтобы перемещаться в противоположных направлениях при наклоне. При определенных углах наклона изображения накладываются друг на друга. Пример этого показан на рис. 9, когда «с» перемещается к центру справа, а «О» – слева (см. рис. 9, изображения 1–3).

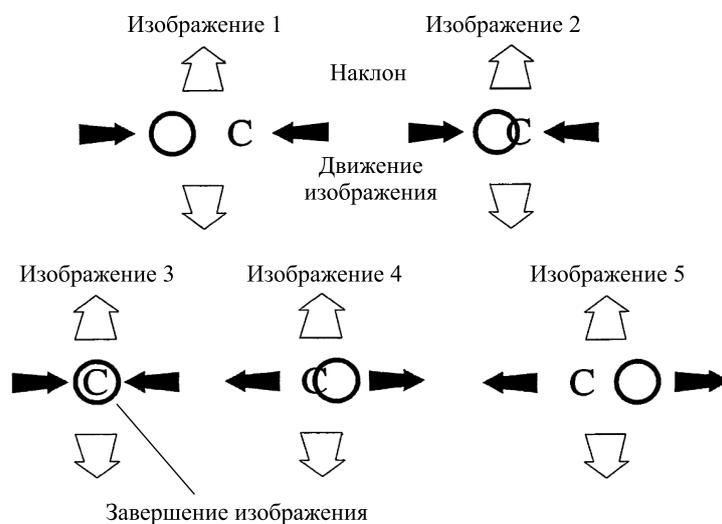


Рис. 9. Визуализация сформированного оптически изменяющегося эффекта
Fig. 9. Visualisation of the generated optically varying effect

При конкретных углах наклона создается законченный символ © (см. рис. 9, изображение 3). Дальнейшее изменение наклона приводит к тому, что изображения продолжают перемещаться, но теперь удаляясь друг от друга (см. рис. 9, изображения 4 и 5). Сформированный оптически изменяющийся эффект повышает восприятие движения посредством того, что, во-первых, решетки изображений перемещаются в противоположном направлении, так что относительное движение дублируется, а во-вторых, решетки изображений перемещаются относительно эталонных точек (т. е. другой решетки изображений), которые находятся в том же поле зрения. Завершение одного изображения посредством перемещения вместе двух компонентных изображений при наклоне представляет легко запоминаемый и распознаваемый вышеописанный способ проверки подлинности, который обеспечивается простым перемещением изображений. Приведенный вариант не ограничивается решетками изображений, перемещающимися в противоположных направлениях. Альтернативно частотные векторы двух решеток увеличенных изображений могут быть модифицированы, чтобы обеспечить относительное перемещение в любом требуемом направлении.

Заключение

Таким образом, в работе предложен способ изготовления полимерных оптических защитных элементов с решеткой сферических микролинз на одной стороне и одной или несколькими решетками микроизображений на другой стороне. Разработана технология формирования микроизображений с высоким разрешением голографическим способом с последующим вакуумным напылением алюминия для повышения их контрастности. Экспериментально изучено влияние на оптический эффект диаметра микролинз и размера микроизображений. Результаты исследования позволяют отметить следующие основные технические характеристики микролинзовых защитных элементов, которые делают их конкурентоспособными с другими видами оптической защиты: толщину не более 30 мкм, высокую степень защиты от копирования оптическим и механическим способами, визуализацию защитных признаков оптического устройства без специального идентификационного оборудования.

Библиографические ссылки

1. Махов ЕМ, Потапов АИ, Махов ВЕ. *Прикладная оптика*. Санкт-Петербург: Северо-Западный государственный заочный технический университет; 2004. 348 с.
2. Джеррард А, Бёрч ДжМ. *Введение в матричную оптику*. Божков АИ, Власов ДВ, переводчики; Коробкин ВВ, редактор. Москва: Мир; 1978. 341 с.
3. Танин ЛВ, Моисеенко ПВ, Маникало ВВ, Бобореко АГ, Лущиков МН, Горчарук АИ и др., авторы; закрытое акционерное общество «Голографическая индустрия», общество с ограниченной ответственностью «Магия света», Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, Белорусский государственный университет, республиканское научно-техническое унитарное предприятие «Криптотех» Департамента государственных знаков Министерства финансов Республики Беларусь, республиканское унитарное предприятие «Минская печатная фабрика» Департамента государственных знаков Министерства финансов Республики Беларусь, правообладатели. *Идентификационная метка*. Патент ВУ 5765 У. 30 декабря 2009 г.
4. Васильев Г. Растровая стереофотография. *Советское фото*. 1970;4:36–37.
5. Fu Y, Ngoi ВКА. Investigation of direct milling of micro-optical elements with continuous relief on a substrate by focused ion beam technology. *Optical Engineering*. 2000;39(11):3008–3013. DOI: 10.1117/1.1312647.
6. Стинблик РА, Хёрт МДж, Джордан ГР, авторы; Визуал Физикс, ЛЛС, правообладатель. *Микрооптическая система безопасности и воспроизведения изображения*. Патент RU 2602397 С2. 22 ноября 2004 г.
7. Баля ВК, Денисюк ИЮ. Получение трехмерных оптических микроструктур с использованием лазерного гравера. *Известия вузов. Приборостроение*. 2012;55(3):51–55. EDN: OXQAZL.
8. Коммандер ЛДж, Истелл КДж, Ишервуд Р, Холмс БУ, авторы; Де Ла Рю Интернэшнл Лимитед, правообладатель. *Защитное устройство*. Евразийский патент 011968 В1. 30 апреля 2004 г.

References

1. Makhov EM, Potapov AI, Makhov VE. *Prikladnaya optika* [Applied optics]. Saint Petersburg: North-West State Correspondence Technical University; 2004. 348 p. Russian.
2. Gerrard A, Burch JM. *Introduction to matrix methods in optics*. London: John Wiley & Sons; 1975. XIII, 355 p. Russian edition: Gerrard A, Burch JM. *Vvedenie v matrichnyuyu optiku*. Bozhkov AI, Vlasov DV, translators; Korobkin VV, editor. Moscow: Mir; 1978. 341 p.
3. Tanin LV, Moiseenko PV, Manikalo VV, Boboreko AG, Lushchikov MN, Gorcharuk AI, et al., inventors; closed joint stock company «Holography Industry», limited liability company «Light Magic», B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Belarusian State University, republican scientific and technical unitary enterprise «Cryptotech» of the Department of State Signs of the Ministry of Finance of the Republic of Belarus, republican unitary enterprise «Minsk Printing Factory» of the Department of State Signs of the Ministry of Finance of the Republic of Belarus, assignee. *Identification mark*. Belarusian patent BY 5765 U. 2009 December 30. Russian.
4. Vasil'ev G. [Raster stereo photography]. *Sovetskoe foto*. 1970;4:36–37. Russian.
5. Fu Y, Ngoi ВКА. Investigation of direct milling of micro-optical elements with continuous relief on a substrate by focused ion beam technology. *Optical Engineering*. 2000;39(11):3008–3013. DOI: 10.1117/1.1312647.
6. Steenblik RA, Hurt MJ, Jordan GR, inventors; Visual Physics, LLC, assignee. *Micro-optical safety and image display system*. Russian Federation patent RU 2602397 C2. 2004 November 22. Russian.
7. Balia VK, Denisiuk IYu. Production of three-dimensional optical microstructures with the laser ablation method. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*. 2012;55(3):51–55. Russian. EDN: OXQAZL.
8. Commander LG, Eastell CJ, Isherwood R, Holmes BW, inventors; De La Rue International Limited, assignee. *Protective device*. Eurasian patent 011968 B1. 2004 April 30. Russian.

Получена 27.02.2024 / исправлена 04.04.2024 / принята 09.04.2024.
Received 27.02.2024 / revised 04.04.2024 / accepted 09.04.2024.