



СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ПО СОЗДАНИЮ НОВЫХ ВИЗУАЛЬНЫХ ЦВЕТОВЫХ ЭФФЕКТОВ ДЛЯ ЗАЩИТНЫХ ГОЛОГРАММ НА ОСНОВЕ ПЛАЗМОННЫХ РЕШЕТОК И ТРЕХМЕРНЫХ ГОЛОГРАММ

С.Б.Одинок¹, А.Ю.Жердев¹, Д.С.Лушников¹,
В.В.Маркин¹, М.В.Шишова¹, А.В.Смирнов²,
Б.В.Акимов²

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия;

²АО "Научно-Производственное Объединение "Криптен", Дубна, Московской обл., Россия

Секреты дизайна защитных голограмм для маркировки продукции от подделки и фальсификаций таятся в визуальных цветовых эффектах. Использование плазмонных дифракционных решеток при изготовлении голограмм создает цветные объемные изображения, цветной микротекст, цветное скрытое изображение, горизонтальный и вертикальный флип-флоп эффекты по цвету и изображению. В обзоре кратко представлены возможности создания новых оптических защитных элементов и защитных голограмм с необычными цветовыми эффектами на основе плазмонных дифракционных решеток и трехмерных голограмм в толстослойной фоточувствительной регистрирующей среде. Предложены методы решения оптических проблем, возникающих при записи визуальных защитных элементов. Также отмечены особенности восприятия визуальных защитных элементов при верификации защитной голограммы по данным элементам.

ВВЕДЕНИЕ

В защитной голографии активно развиваются направления по разработке и созданию новых оптических защитных элементов, встраиваемых в дизайн защитной голограммы для маркировки продукции от подделки и фальсификаций [1]. Наиболее востребованным является разработка

MODERN TRENDS IN THE CREATION OF NEW VISUAL COLOR EFFECTS IN SECURITY HOLOGRAMS BASED ON PLASMON GRATINGS AND THREE-DIMENSIONAL HOLOGRAMS

S.B.Odinokov¹, A.Y.Zherdev¹, D.S.Lushnikov¹,
V.V.Markin¹, M.V.Shishova¹, A.V.Smirnov²,
B.V.Akimov²

¹N.E.Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

²"Scientific and Production Association "Kripten", Dubna, Moscow Region, Russia

The secrets of the design of security holograms for marking products against counterfeiting and falsification hide in visual color effects. The use of plasmon diffraction gratings in the production of holograms creates color volumetric images, color microtext, color hidden image, horizontal and vertical flip-flop effects (colored and imaging). The review briefly presents the possibilities of creating new optical security elements and security holograms with unusual color effects based on plasmon diffraction gratings and tree-dimensional holograms in a thick-layer photosensitive recording medium. Methods to solve optical problems that arise when recording visual security elements are suggested. In addition, the perception features of the visual security elements when verifying the security hologram are noted.

INTRODUCTION

Currently, the directions for the development and creation of new optical security elements integrated in the design of the security hologram are actively developing in the security holography to mark the products against counterfeiting and falsification [1]. The most popular is the development of optical security elements (OSE), forming new color effects, namely:

- the elements that form fading color shades, i.e. so-called pastel colors, which are very



оптических защитных элементов (ОЗЭ), формирующих новые цветовые эффекты, а именно:

- элементы, формирующие плавно изменяемые цветовые оттенки, т.е. так называемые пастельные цвета, которые очень сложно подделать и которые приняты во всем мире как "канон" в защищенной полиграфии, например в бумажных банкнотах и денежных знаках;
- элементы, формирующие четко фиксированные (в определенном угловом поле зрения) цвета в виде визуально наблюдаемого объемного цветного изображения объекта.

Такие работы проводят как ведущие зарубежные компании, так и отечественные. В 2013 году компания SURYS (до 2016 года она носила название Hologram Industries, Франция-Германия) продемонстрировала результаты разработок по созданию оптических защитных элементов на основе одномерных (1D) и двумерных (2D) плазмонных дифракционных решеток (ПДР), встраиваемых в защитные голограммы, www.surys.com. Голографические подразделения компаний DNP (Япония, www.dnp.co.jp) и Bayer (Германия, www.baer.com, www.films.covestro.com) разрабатывают трехмерные цветные защитные голограммы (ТЦ-3Г) на основе трехмерных голограмм, формирующих одноцветное или многоцветное объемные изображения объектов.

В данной статье приводятся результаты некоторых работ по созданию новых оптических защитных элементов и защитных голограмм с необычными цветовыми эффектами на основе плазмонных дифракционных решеток и трехмерных голограмм в толстослойной фотосреде, выполненных совместно МГТУ им. Н.Э.Баумана и АО "НПО "Криптен".

ПОЛУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ЗАЩИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ПЛАЗМОННЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК

В последние годы интенсивно исследуется возможность интегрирования плазмонных спектральных эффектов в защитные голограммы. Поверхностные плазмоны можно определить как осцилляции свободных электронов на поверхности раздела металл-диэлектрик. Явление возбуждения поверхностных плазмонов на резонансной частоте лежит в основе создания нового класса оптических спектральных фильтров на базе волноводов [2,3], дифракционных решеток [4-7].

Плазмонные дифракционные решетки (ПДР) применяются в качестве широкополосных опти-

чески трудных для подделки и которые приняты во всем мире как "канон" в полиграфии, например, в бумажных банкнотах и денежных знаках;

- элементы, формирующие четко фиксированные (в определенном угловом поле зрения) цвета в виде визуально наблюдаемого объемного изображения объекта.

These developments are being conducted both by leading foreign companies and in Russia. In 2013, SURYS (until 2016 named "Hologram Industries", France - Germany) demonstrated the results of developments to create optical protection elements based on one-dimensional (1D) and two-dimensional (2D) plasmon diffraction gratings (PDGs) integrated in security holograms, www.surys.com. Holographic subdivisions of DNP (Japan, www.dnp.co.jp) and Bayer (Germany, www.baer.com, www.films.covestro.com) are developing three-dimensional color security holograms (3D-CSH) based on three-dimensional holograms forming a single-color or multi-color three-dimensional images of objects.

In this article, the results of some works on the creation of new optical security elements and security holograms with unusual color effects based on plasmon diffraction gratings and three-dimensional holograms in a thick-layer photosensitive media made jointly by Bauman Moscow State Technical University and JSC "SPA Kripten" are given.

CREATION OF OPTICAL PROTECTION ELEMENTS BASED ON PLASMON DIFFRACTION GRATINGS

In recent years, the possibility of integrating plasmon spectral effects into security holograms has been extensively studied. Surface plasmons can be defined as the oscillations of free electrons at the metal-insulator interface. The phenomenon of excitation of surface plasmons at the resonant frequency underlies the creation of a new class of optical spectral filters based on waveguides [2, 3], diffraction gratings [4-7].

Plasmon diffraction gratings (PDGs) are used as wideband optical filters wherein the spectrum bandwidth depends on the radiation incidence angle (spectral-angular dependence). A new class of optical security elements (OSE) was created based on them, and their design is provided by nanostructuring of various image areas.

The researches to create a visually perceived optical security element, different from



ческих фильтров, в которых ширина полосы спектра зависит от угла падения излучения (спектрально-угловая зависимость). На их основе создан новый класс оптических защитных элементов (ОЗЭ), причем их дизайн обеспечивается путем наноструктурирования различных областей изображения.

В МГТУ им. Н. Э. Баумана совместно с АО "НПО Криптен" (г. Дубна, Россия) были проведены работы по созданию визуально наблюдаемого оптического защитного элемента, отличающегося от эффектов, воспроизводимых стандартными радужными голограммами. Исследования 2D ПДР ведутся в рамках поиска аномальных пиков в спектре пропускания или отражения (плазмонный резонанс). Было проведено моделирование для трех вариантов рельефа, представляющего собой набор периодически расположенных элементов субволнового масштаба, с квадратной и треугольной упаковкой:

- 1) перфорированная металлическая пленка, выполненная на подложке;
- 2) набор полимерных наноцилиндров или прямоугольных ступеней, покрытых серебром;
- 3) посеребренный полимерный слой с отверстиями на полимерной подложке.

В таблице представлены диапазоны значений исследуемых параметров ПДР.

В результате выполненных исследований прослеживаются следующие закономерности. Во-первых, при рассмотрении структур, выполненных в виде матрицы отверстий или ступеней, покрытых слоем серебра, значение оптимальной толщины слоя напыленного металла находится в диапазоне от 20 до 40 нм. Во-вторых, при рассмотрении структур, выполненных в виде матрицы перфорированных в слое серебра отверстий, оптимальная толщина металлического слоя находится в диапазоне значений от 60 до 120 нм. Причем увеличение толщины покрытия приводит к сужению полосы пропускания. В-третьих, на структуре с гексагональной упаковкой элементов с меньшей периодичностью (200–300 нм) можно добиться эффекта сохранения цвета в широком диапазоне изменения угла наклона образца. Четвертая особенность: при изменении поляризации падающего излучения с ТМ на ТЕ полоса пропускания сужается, оставаясь в коротковолновой области, вместе с этим смещаясь в сторону меньших углов падения излучения.

Разработанное программное обеспечение позволяет визуализировать цветовое поведение

the effects reproduced by standard rainbow holograms, were carried out in Bauman MSTU, together with JSC "SPA Kripten" (Dubna, Russia). The studies of 2D PDGs are carried out within the search for anomalous peaks in the transmission or reflection spectrum (plasmon resonance). The simulation was carried out for three variants of the relief, which is a set of periodically located elements of a subwavelength scale, with square and triangular packing:

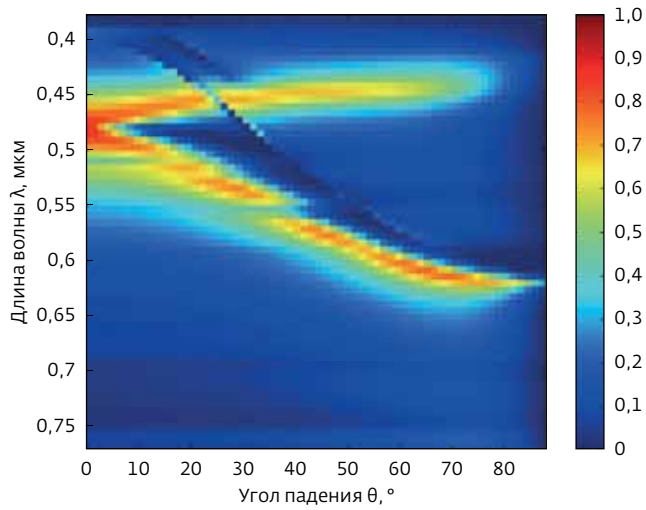
- 1) perforated metal film made on a substrate;
- 2) a set of polymer nanocylinders or rectangular steps coated with silver;
- 3) silver-plated polymer layer with apertures on a polymer substrate.

The table shows the ranges of the parameter values of the investigated PDGs.

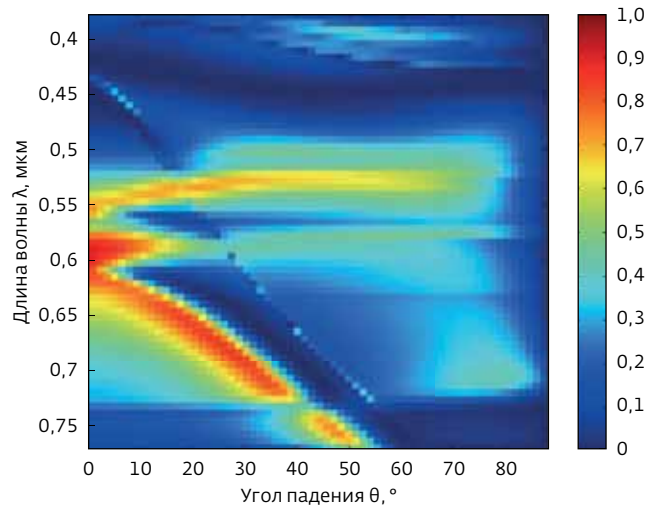
As a result of the performed studies, the following regularities are observed. First, when considering structures made in the form of a matrix of apertures or steps coated with a layer of silver, the value of the optimum layer thickness of the sprayed metal is in the range of 20 to 40 nm.

Параметры исследуемых 2D ПДР
Parameters of the studied 2D PDGs

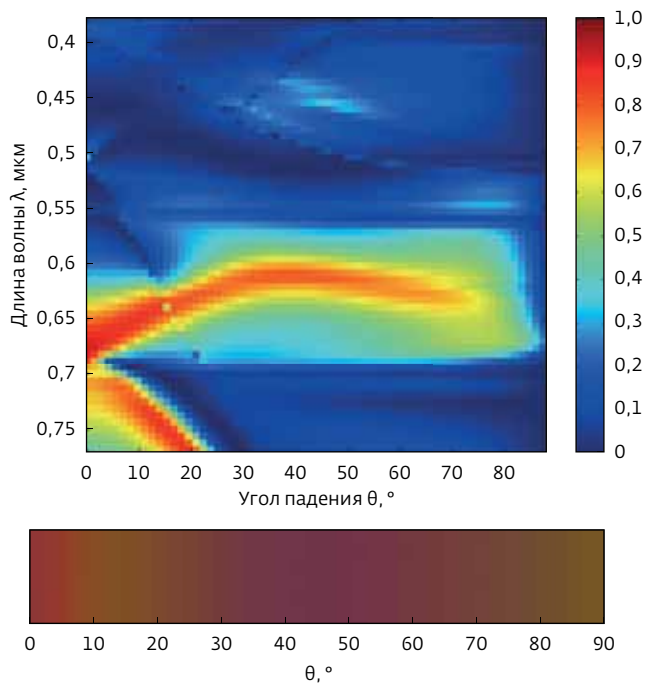
Параметр Parameter	Диапазон значений Values range
Тип элементов Element type	Стержни, отверстия Rods, apertures
Упаковка элементов Element packing	Прямоугольная, гексагональная Rectangular, hexagonal
Период, нм Period, nm	200–600
Высота рельефа, нм Relief height, nm	60–120
Толщина металлического покрытия, нм Metal coating thickness, nm	20–60
Материалы подложки Substrate materials	Полимер Polymer
Материалы покрытий Coating materials	Серебро Ag Silver Ag
Способ нанесения покрытия Coating process	Со стенками, без стенок With walls, without walls
Поляризация Polarization	ТЕ, ТМ



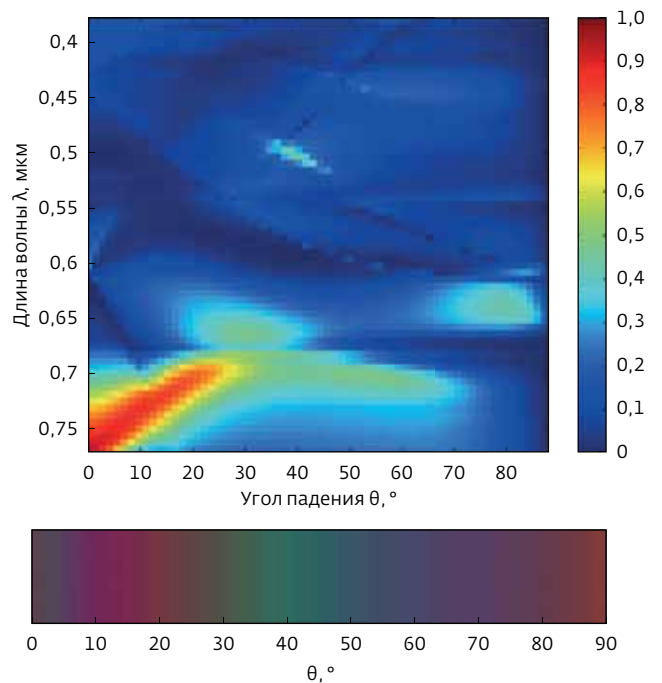
а). Период 300 нм / 300 nm period



б). Период 400 нм / 400 nm period



в). Период 500 нм / 500 nm period



г). Период 600 нм / 500 nm period

Рис.1. Спектрально-угловая диаграммы пропускания 2D ПДР в ТМ-поляризованном излучении и соответствующие цветовые диаграммы

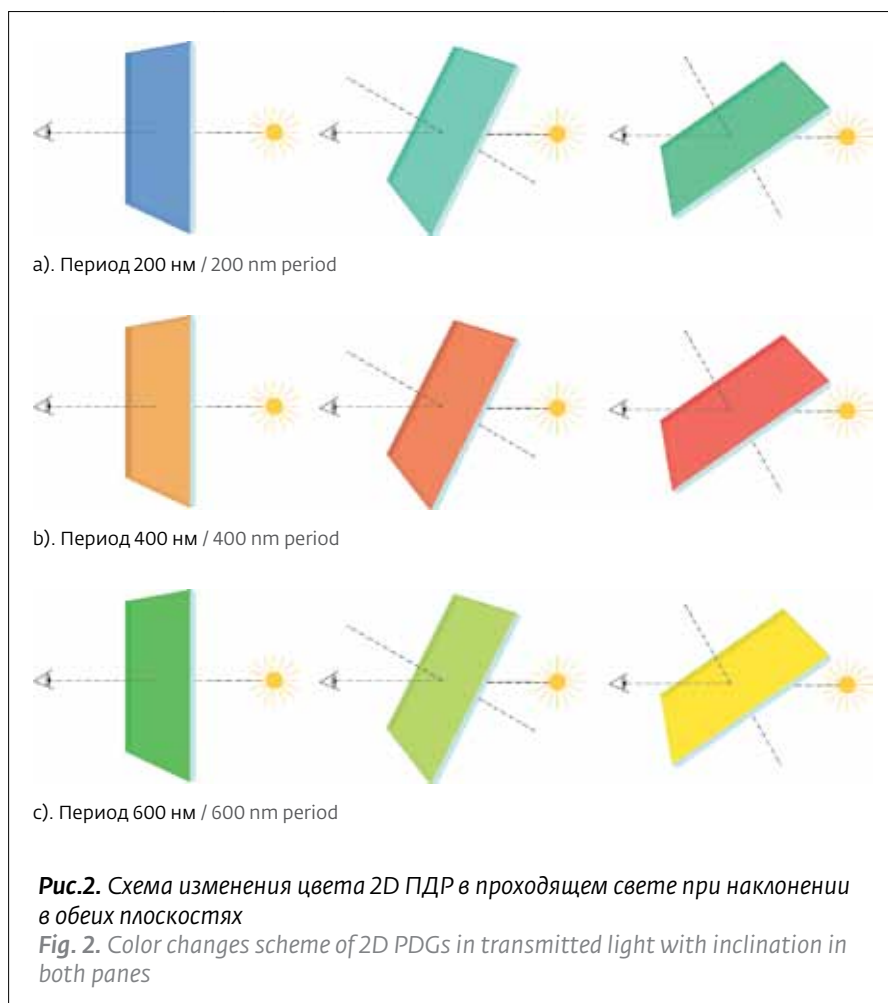
Fig. 1. Spectral-angular transmission patterns of 2D PDGs in TM-polarized radiation and the corresponding color diagrams

образца плазмонной структуры в зависимости от угла наклона образца, что позволяет наглядно представить цвета структур и облегчает разработку дизайна ОЗЭ на основе ПДР, как показано на рис.1.

Были смоделированы ПДР, в которых наблюдается плазмонный эффект, заключающийся в изменении цвета структуры при изменении угла падения. Изменяя размер и форму элементарных наночастиц, можно регулировать частоту плазмонного резонанса, а значит и спектр пропускания или отражения. С увеличением периода горизонтальная полоса во всем диапазоне углов смещается в красную область, а диагональная – в область меньших углов падения. Их совместное влияние на цвет образца показано на соответствующих цветовых диаграммах на рис.1. Например, на ПДР с периодом 300 нм наблюдается изменение цвета с бирюзового на фиолетовый при угле падения, превышающем 35°. Градацию цвета в зависимости от периода можно проследить, выбрав к рассмотрению один угол.

Градацию цвета в зависимости от периода можно проследить, выбрав к рассмотрению один угол. Например, для ПДР на рис.1d при изменении угла освещения от 60° до 0° цвет преобразуется от пурпурного к зеленому, затем к темно-оранжевому и далее к темно-фиолетовому. Также исследовалось влияние толщины серебряного слоя, при увеличении которого получаем укорачивание полосы пропускания по углу. По результатам моделирования на рис.2 показана схема изменения цветовых оттенков в зависимости от угла наклона (или освещения) для ПДР различного периода.

По сравнению с обычными защитными голограммами (ЗГ), защитный признак на основе данных плазмонных эффектов будет восприниматься иначе, поскольку виден не в дифрагировавшем излучении, а в отраженном и проходящем свете. Помимо этого, если на ЗГ радужный



Second, when considering structures made in the form of the matrix of apertures perforated in the silver layer, the optimum thickness of the metal layer is in the range of 60 to 120 nm. Moreover, an increase in the thickness of the coating leads to a narrowing of the bandwidth. Third, one can achieve the effect of color conservation in a wide range of variation in the slope of the sample on the structure with hexagonal packing of elements with a smaller periodicity (200–300 nm). The fourth feature is that with the change of polarization of the incident radiation from TM to TE, the bandwidth is narrowed, while remaining in the short-wavelength region, with displacement towards lower angles of radiation incidence.

The developed software allows visualization of color behavior of plasmon structure sample depending on the angle of sample inclination that makes it possible to clearly visualize the colors of structures and facilitates the development of OSE design based on the PDGs, as shown in Fig. 1.

эффект проявляется в полном спектральном диапазоне (от синего до красного цвета) при малом повороте ЗГ, то эффект в проходящем излучении приводит к изменению окраски образца от синего до красного цвета при полном повороте на 60–90°, как показано для одного из образцов на рис.3.

В результате выполненных теоретических и экспериментальных исследований 2D ПДР был сформирован проект нового защитного признака на основе 2D ПДР для получения нового ОЗЭ, формирующего новые цветовые эффекты при визуальном наблюдении изображений.

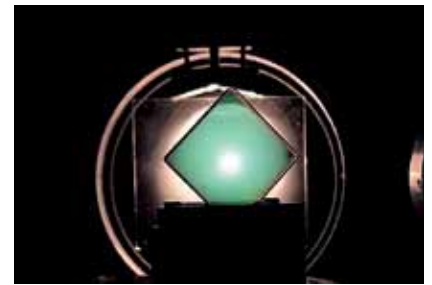
Для получения фиксированных или плавноизменяемых цветовых оттенков в итоговом голографическом изображении были использованы 1D-2D ПДР с наноструктурой "металл-диэлектрик" различающихся периодом: в области логотипа – 400 нм, в области фона – 500 нм, в области надписи "Криптен" – 600 нм. Высота рельефа должна быть в диапазоне 60±20 нм.

Важным отличием данного станет то, что он работает в обеих плоскостях: и в горизонтальной, и в вертикальной, поскольку основан на двумерных ПС. При наклоне ОЗЭ в любой плоскости будет проявляться изменение цвета, как показано на рис.4.

При этом при наклоне образца в диагональной плоскости плазмонный эффект будет проявляться иначе – с иными оттенками переходящих цветов. Это отличает новый ОЗЭ как от радужных голограмм, так и от ОЗЭ на основе 1D ПДР. Последние основаны на одномерных структурах, и оба эффекта: дифракционный (радужный) и плазмонный – проявляются только при наклоне ЗГ и ОЗЭ



a). Угол наклона 0° / Inclination angle 0°



b). Угол наклона 20° / Inclination angle 20°



c). Угол наклона 40° / Inclination angle 40°



d). Угол наклона 60° / Inclination angle 60°

Рис.3. Фотографии экспериментального образца 2D ПДР в проходящем свете при разных углах наклона

Fig. 3. Photos of the experimental sample 2D PDGs in transmitted light at different inclination angles

The PDGs, wherein a plasmon effect is observed, consisting in a change of the structure color with a change in the incidence angle, were simulated. Changing the size and shape of elementary nanoscale sections, it is possible to regulate the

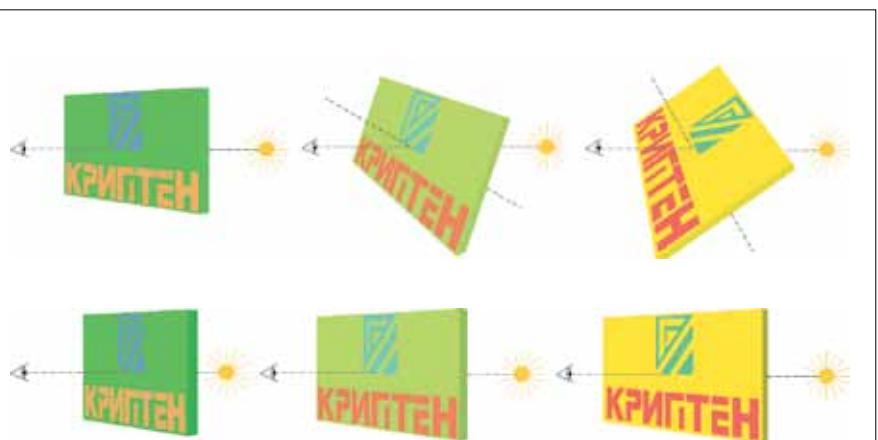


Рис.4. Схема изменения цвета ОЗЭ на основе ДПС при наклонении в обеих плоскостях

Fig. 4. Color changes scheme of the OSE based on 2D PS when inclined in both planes



в плоскости, перпендикулярной штрихам одномерной структуры.

ПОЛУЧЕНИЕ ЦВЕТНЫХ ГОЛОГРАММНЫХ СТЕРЕОГРАММ КАК ОПТИЧЕСКИХ ЗАЩИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Цветные голограммные стереограммы первоначально создавались для широкоформатных (размером до 1,5×2м) изобразительных голограмм, формирующих цветные объемные изображения художественных объектов [8]. В данной статье приведены результаты работы по разработке технологии получения голограммных стереограмм в виде:

- малоформатных (размером до 40×40мм) полностью трехмерных цветных защитных голограмм (ТЦ-ЗГ);
- или встраиваемых в ТЦ-ЗГ точечных трехмерных голограмм в виде отдельных оптических защитных элементов.

В первом случае ТЦ-ЗГ формируют одно многоцветное объемное изображение объектов или два (или более) цветных объемных изображений с горизонтальным и вертикальным переключением (флип-флоп эффект) как по цвету, так и по самому изображению. Во втором случае ТЦ-ЗГ формируют визуальные эффекты в виде цветного микротекста и цветных скрытых объемных изображений.

Такие ТЦ-ЗГ получают методами цифровой голографии и компьютерного синтеза цветных объемных изображений [9]. Была разработана одноэтапная схема получения цветных голограммных стереограмм по модифицированной схеме голограмм Ю. Н. Денисюка, в которой возможно получение однопараллаксных и полнопараллаксных цветных голограммных стереограмм. Голограммные стереограммы в данном случае представляют собой совмещенные цифровые голограммы, при получении которых происходит последовательная запись ракурсов объекта, выводимых на пространственный модулятор света (ПМС). Такой ПМС расположен в предметной ветви оптической схемы и в зависимости от того, что за изображения на него выводятся, могут быть получены следующие ТЦ-ЗГ и оптические защитные элементы:

- отражательные цветные голограммные стереограммы (в этом случае на ПМС отображается набор ракурсов, представляющих собой стереопары);
- отражательные голограммы с флип-флоп эффектами по цвету (на ПМС выводится

frequency of plasmon resonance, and, hence, the transmission or reflection spectrum. With period increase, the horizontal band in the entire range of angles is displaced to the red region, and the diagonal band is displaced to the region of smaller angles of incidence. Their joint influence on the sample color is shown in the corresponding color diagrams in Fig. 1. For example, there is a discoloration from turquoise to violet at an incidence angle exceeding 35° on a PDG with a period of 300 nm. Color gradation depending on the period can be traced by choosing one angle for consideration.

Color gradation depending on the period can be traced by choosing one angle for consideration. For example, for a PDG in Fig. 1d, when the illumination angle changes from 60° to 0°, the color changes from purple to green, then to dark orange, and then to dark purple. The influence of the thickness of the silver layer, increasing which, we obtain a shortening of the bandwidth along the angle has been also investigated. According to simulation results, Fig. 2 shows a diagram of color shades changes depending on the angle of inclination (or illumination) for various period PDGs.

Compared to conventional security holograms (SH), the security feature based on the data of plasmon effects will be perceived differently as it is visible not in diffracted radiation, but in reflected and transmitted radiation. Furthermore, if the rainbow effect appears in the full spectral range from blue to red at small rotation of the SH, the effect in the transmitted radiation results in a change of the sample color from blue to red at full rotation at 60–90°, as shown for one of the samples in Fig. 3.

As a result of the theoretical and experimental studies of 2D PDGs, a new security feature design was developed based on 2D PDGs to obtain a new OSE, forming new color effects in visual observation of the images.

In order to obtain fixed or fading color shades in the resulting holographic image, 1D-2D PDGs with the "metal-insulator" nanostructure with differing period were used: in the logo area - 400 nm, in the background area - 500 nm, in the area of inscription "Kripten" - 600 nm. The relief height should be in the range of 60 ± 20 nm.

An important difference is that it works in both planes: both in horizontal and vertical, since it is based on 2D PDGs. When the OSE is inclined in any plane, a color change will appear, as shown in Fig. 4.

в качестве ракурсов одно и то же изображение, но разные ракурсы записываются разными цветами);

- отражательные голограммы с флип-флоп эффектами по изображению (на ПМС выводятся в качестве ракурсов разные изображения);
- отражательные голограммы со скрытым цветным изображением, восстанавливаемым на отражение;
- отражательные голограммы с цветным микротекстом, локализованным как в плоскости голограммы, так и вне плоскости голограммы.

В качестве ПМС могут быть использованы любые устройства отображения, например ЖК-дисплей, на которые выводятся соответствующие изображения (ракурсы). Далее эти ракурсы регистрируются на фоточувствительную среду.

По вышеописанной схеме были получены полнопараллаксные цветные голограммные стереограммы. Фотографии матриц данных голограмм (дизайна "Земля" и "Кубик"), а также изображения, восстановленные с них с использованием точечного и протяженного восстанавливающих источников, представлены на рис.5. Также были получены однопараллаксные цветные голограммные стереограммы с флип-флоп эффектом (дизайна "Кубок-2018"). На рис.6 представлены изображения набора ракурсов, использовавшихся при получении цветных голограммных стереограмм с флип-флоп эффектом дизайна "Кубок-2018", а на рис.7 представлены матрица голограмм дизайна "Кубок-2018" и фотографии вертикального и горизонтального флип-флоп эффектов в восстановленных изображениях при восстановлении изображений точечным и квазипротяженным источниками.

При этом видно, что горизонтальный флип-флоп эффект является более ярко выраженным, чем вертикальный. Это связано с тем, что горизонтальный флип-флоп эффект в основном связан с аппаратной реализацией схемы получения голограммы. На вертикальный флип-флоп эффект

Furthermore, if the sample is inclined in the diagonal plane, the plasmon effect will be manifested differently, with different shades of changing colors. This distinguishes the new OSE both from rainbow holograms and from the OSE based on 1D PDGs. The latter are based on one-dimensional structures, and the two effects, diffraction (rainbow) and plasmon one, appear only when the SH is inclined, and the OSE is in a plane perpendicular to the strokes of the one-dimensional structure.

CREATION OF COLOR HOLOGRAPHIC STEREOGRAMS AS OPTICAL SECURITY ELEMENTS

Color holographic stereograms originally designed for wide-format (up to 1.5×2 m) visual holograms forming color volumetric images of art objects [8]. This article describes the results of the development of holographic stereograms technology in the form of:

- small-format (up to 40 × 40 mm) fully three-dimensional color security holograms (3D-CSH)
- point three-dimensional holograms in the form of individual optical security elements integrated in 3D-CSH.

In the first case, 3D-CSH form a single multicolor volumetric image of objects or two



накладываются дифракционные эффекты, определяемые угловой и спектральной селективностями голограммы. Эти селективности, в свою очередь, сильно зависят от размера восстанавливающего источника и спектрального состава его излучения. Согласно [10] приблизительные математические оценки данного эффекта возможно производить только при незначительных угловых размерах восстанавливающего источника и при малом отличии длин волн, используемых при восстановлении изображений от длин волн, использовавшихся при регистрации голограммы.

На рис.8 представлен процесс восстановления цветного микротекста. Видно, что возможно применение цветного микротекста в виде визуального защитного элемента. Для этого отдельные цветовые компоненты должны быть смещены относительно друг друга (за счет aberrаций оптических элементов, используемых в схеме или намеренного смещения цветовых компонентов при выводе их на индикатор). При восстановлении данного микротекста возможно использование цветного фильтра (например СЗС - фильтра, как показано на рис.8).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведены результаты работ по созданию новых оптических защитных элементов и защитных голограмм с необычными цветовыми эффектами на основе плазмонных дифракционных решеток и трехмерных голограмм в толстослойной фоточувствительной регистрирующей среде.

Приведены результаты компьютерного моделирования ОЗЭ, формирующих визуально наблюдаемые плавно изменяемые цвета или цветовые оттенки, на основе двумерных ПДР, и результаты экспериментальных исследований таких ОЗЭ. Даны варианты расчета и изготовления наноструктур в виде 2D ПДР для их встраивания в качестве оптического защитного элемента в защитные голограммы, изготовли-

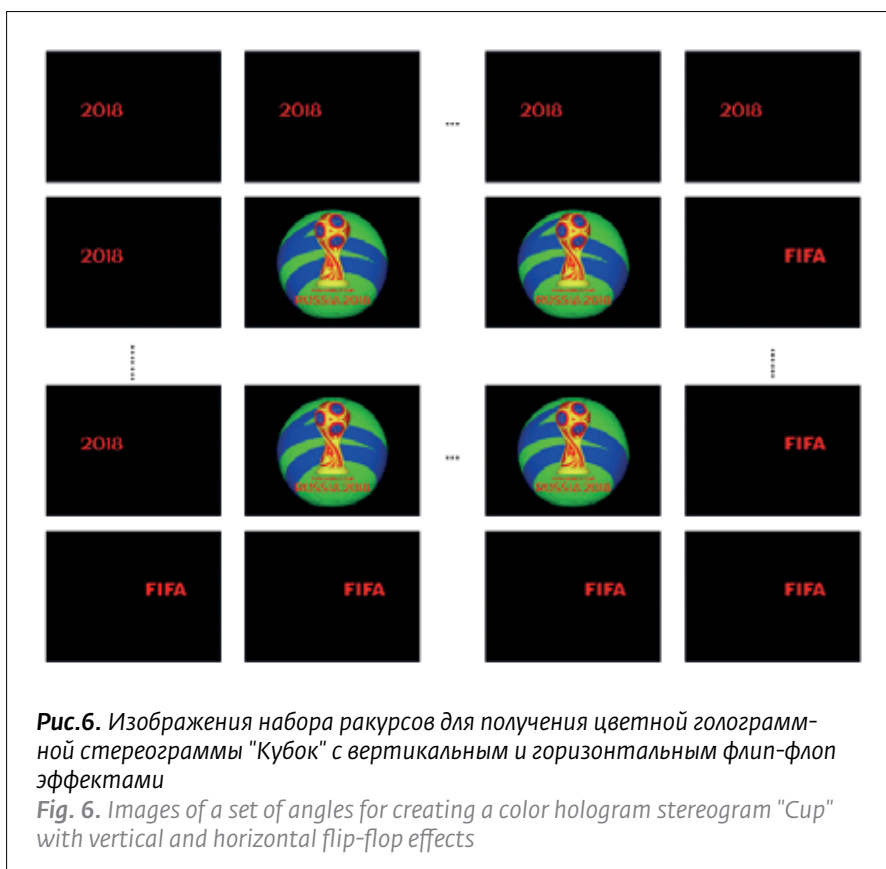


Рис.6. Изображения набора ракурсов для получения цветной голограммной стереограммы "Кубок" с вертикальным и горизонтальным флип-фlop эффектами

Fig. 6. Images of a set of angles for creating a color hologram stereogram "Cup" with vertical and horizontal flip-flop effects

(or more) color volumetric images with horizontal and vertical switching (flip-flop effect), both colored and imaging. In the second case, 3D-CSH form visual effects in the form of color microtext and colored hidden volumetric images.

Such 3D-CSHs are obtained by methods of digital holography and computer synthesis of color volumetric images [9]. A single-stage scheme for creating color hologram stereograms was developed based on hologram modified scheme of Y. N. Denisyuk, wherein one-parallax and full-parallax colored hologram stereograms can be created. In this case, hologram stereograms are the combined digital holograms that, upon creation, consistently record the angles of the object output to the spatial light modulator (SLM). Such SLM is located in the objective branch of the optical scheme and the following 3D-CSHs and optical security elements can be created depending on what images are displayed:

- reflective color hologram stereograms (wherein a set of angles representing stereopairs is displayed on the SLM);
- reflective holograms with colored flip-flop effects (the same image is displayed on the

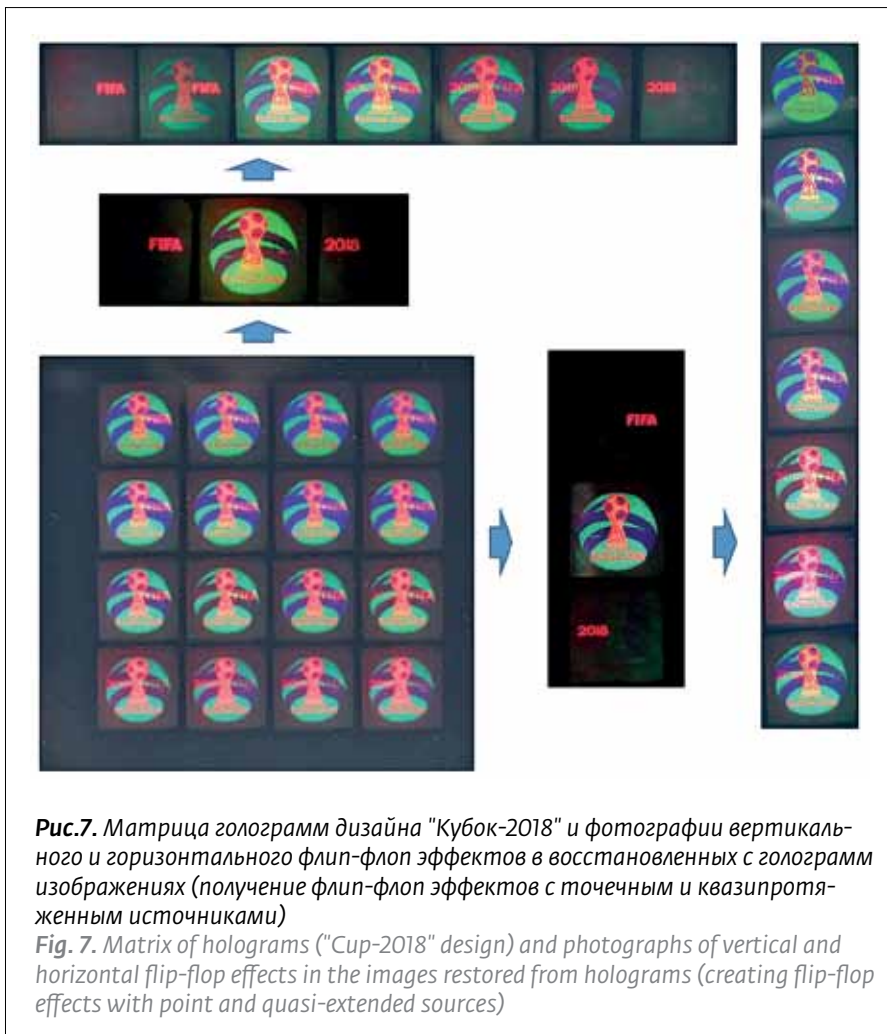


Рис.7. Матрица голограмм дизайна "Кубок-2018" и фотографии вертикального и горизонтального флип-флоп эффектов в восстановленных с голограмм изображениях (получение флип-флоп эффектов с точечным и квазипротяженным источниками)
Fig. 7. Matrix of holograms ("Cup-2018" design) and photographs of vertical and horizontal flip-flop effects in the images restored from holograms (creating flip-flop effects with point and quasi-extended sources)

ваемые как по стандартной рольной технологии эмбоссирования, так и по технологии плоского УФ-эмбоссирования. Были изготовлены экспериментальные образцы ОЗЭ на основе 2D ПДР в проходящем и отраженном свете.

Приведены экспериментальные результаты по созданию трехмерных цветных защитных

SLM as the angles, but different angles are recorded in different colors);

- reflective holograms with imaging flip-flop effects (different images are displayed on the SLM as the angles);
- reflective holograms with a hidden color image, restored to reflection;
- reflective holograms with a color microtext, localized both in the hologram plane and outside the hologram plane.

Any display devices, for example, LC-displays, outputting corresponding images (angles) are used as the SLM. Further, these angles are recorded on the photosensitive medium.

By the above-described scheme, full-parallax colored hologram stereograms were created. Photographs of the data matrixes of these holograms ("Earth" and "Cube" design), as well as the images restored using point and extended regenerating sources, are shown in Fig. 5. One-parallax colored hologram stereograms with a flip-flop effect ("Cup-2018" design) were also created. Fig. 6 presents images of a set of angles used to create color hologram stereograms with a flip-flop effect ("Cup-2018" design) and Fig. 7 shows a matrix of holograms of "Cup-2018" design and photographs of vertical and

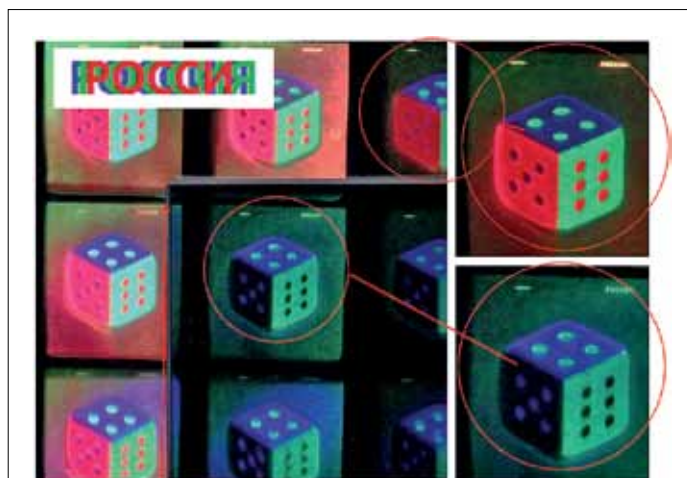


Рис. 8. Цветной микротекст как визуальный защитный элемент. Процесс восстановления цветного микротекста с использованием цветного фильтра
Fig. 8. Color microtext as a visual security element. Process of restoring a color microtext using a color filter

голограмм на основе цветных голограммных стереограмм, полученных по модифицированной схеме голограмм Ю.Н.Денисюка, в которой возможно получение однопараллаксных и полнопараллаксных цветных голограммных стереограмм. Такие ТЦ-ЗГ получают методами цифровой голографии и компьютерного синтеза цветных объемных изображений. При этом ТЦ-ЗГ формируют одно многоцветное объемное изображение объектов или два (или более) цветных объемных изображений с горизонтальным и вертикальным переключением (флип-флоп эффект) как по цвету, так и по самому изображению. Также ТЦ-ЗГ формируют визуальные эффекты в виде цветного микротекста и цветных скрытых объемных изображений. Показано, что цветной микротекст может быть использован в качестве защитного элемента, а горизонтальный флип-флоп эффект более ярко выражен, чем вертикальный.

Работа выполнялась и финансировалась как по заданию АО "Научно-Производственное Объединение "Криптен" (г. Дубна, Московской обл.), так и в рамках соглашения о предоставлении субсидии Министерством образования и науки Российской Федерации № 14.577.21.0197.

ЛИТЕРАТУРА

1. **С.Б.Одинокоев.** Методы и оптико-электронные приборы для автоматического контроля подлинности защитных голограмм. – М.: Техносфера, 2013.

horizontal flip-flop effects in the restored images where the images were restored with point and quasi-extended sources.

It can be further seen that the horizontal flip-flop effect is more pronounced than the vertical one. This is due to the fact that the horizontal flip-flop effect is mainly related to the hardware implementation of the hologram creation scheme. The vertical flip-flop effect is imposed with diffraction effects, determined by the angular and spectral selectivity features of the hologram. These selectivity features, in turn, depend strongly on the size of the reducing source and the spectral composition of its radiation. According to [10], the approximate mathematical estimates of this effect can be made only at small angular sizes of the restoring source and with an insignificant difference in wavelengths used when restoring images from the wavelengths used to record the hologram.

Fig. 8 shows the process of restoring the color microtext. It can be seen that it is possible to use color microtext in the form of a visual security element. To this end, the individual color components must be displaced relative to each other (due to aberrations of optical elements used in the scheme or deliberate displacement of color components when they are output to the indicator). When restoring this microtext, it is possible to use a color filter (e.g., GBG filter, as shown in Fig. 8).

CONCLUSION

The results of work on the creation of new optical security elements and security holograms with unusual color effects based on plasmon diffraction gratings and three-dimensional holograms in a thick-layer photosensitive recording medium are given in this article.

The results of OSE computer modeling, forming visually perceivable fading colors or color shades, based on two-dimensional PDGs and the results of experimental studies of such OSE are given. The variants of calculation and fabrication of nanostructures in the form of 2D PDGs for their integration as an optical security element into security holograms produced both by standard roll embossing technology and by the flat UV embossing technology are given. OSE experimental samples were fabricated based on 2D PDGs in transmitted and reflected light.

The experimental results on the creation of three-dimensional color security holograms



2. **R. Magnusson, D. Shin, and Z.S. Liu.** Guided-mode resonance Brewster filter. – Opt. Lett., 1998, v.23, p. 612–614.
3. **S. Liu, S. Tibuleac, D. Shin, P.P. Young, and R. Magnusson.** High-efficiency guided-mode resonance filter. – Opt. Lett., 1998, v.23, p. 1556–1558.
4. **L. Fu, H. Schweizer, T. Weiss, H. Giessen.** Optical properties of metallic meanders. – J. Opt. Soc. Am. B, 2009, v.26, p. B111–B119.
5. **Fei Cheng, Jie Gao, Ting S. Luk & Xiaodong Yang.** Structural color printing based on plasmonic metasurfaces of perfect light absorption. – Science Reports, 2015, v.5.
6. **Ch. Yang, W. Shen, Yue. Zhang, Zh. Ye, X. Zhang, Kan Li, Xu Fang, Xu Liu.** Color-tuning method by filling porous alumina membrane using atomic layer deposition based on metal–dielectric–metal structure. – Applied optics, 2014, v. 53(4).
7. **M. Ozaki, J. Kato, S. Kawata.** Surface-plasmon holography with white light illumination, "SPIE Proceedings, 2012, v.8455, p. 84550K-6.
8. **G. Saxby, S. Zacharovas.** Practical Holography, 4th Edition. – CRC Press, 2016.
9. **D.S. Lushnikov, V.V. Markin, A.Y. Zherdev, S.B. Odinkov, A.V. Smirnov.** Multicolor reflection holograms with multi-angle images, XI International Conference HOLOEXPO. – Proc. of conference, 2014, 2014, p.16.
10. **Kogelnik H.** Coupled wave theory for thick hologram grating. – The bell system technical journal, November 1969, v.48, № 9, p. 2909–2947.

are given based on color hologram stereograms obtained by the hologram modified scheme of Yu. N. Denisyuk wherein one-parallax and full-parallax colored hologram stereograms can be obtained. Such 3D-CSHs are created by methods of digital holography and computer synthesis of color volumetric images. Furthermore, 3D-CSHs form a single multicolor three-dimensional image of objects or two (or more) colored volumetric images with horizontal and vertical switching (flip-flop effect), both colored and imaging. In addition, 3D-CSHs form visual effects in the form of color microtext and colored hidden volumetric images. It is shown that the color microtext can be used as a security element, and the horizontal flip-flop effect is more pronounced than the vertical one.

The research was carried out and financed both by the instructions of JSC "Scientific and Production Association "Kripten" (Dubna, Moscow region) and within the framework of the agreement on granting the subsidy by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 14.577.21.0197.