

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-03-44-51

УДК 658.562:778

Поверхностно-рельефные голограммы. Современное состояние и перспективы

Александр Федорович Смык¹, Александр Викторович Шурыгин²✉¹, ²«Джеймс Ривер Бранч», Москва, Россия¹smykholography@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-7394-5940>²xander@al88sh.ru <https://orcid.org/0000-0002-3514-2709>

Аннотация

Предмет исследования. Поверхностно-рельефные голограммы и их применение для целей защиты информации. **Цель работы.** Поиск сочетаний разнородных средств в одной голограмме, затрудняющих возможности ее несанкционированного копирования. **Метод.** Анализ публикаций и собственного опыта авторов. **Основные результаты.** Проанализированы основные формы применения голограмм в массовом сегменте рынка. Приведены текущие и перспективные объемы производства. Представлены современные направления развития технологии записи и актуальные защитные элементы. **Практическая значимость.** Сделан вывод о важности преодоления специалистами по голографии инерции спроса и необходимости предложения заказчикам новых типов голограмм и подходов к их использованию.

Ключевые слова: голограмма, поверхностный рельеф, защитные признаки

Ссылка для цитирования: Смык А.Ф., Шурыгин А.В. Поверхностно-рельефные голограммы. Современное состояние и перспективы // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 3. С. 44–51. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-03-44-51>

Код OCIS: 090.5640

Surface relief holograms. State of the art and development prospects

ALEXANDER F. SMYK¹, ALEXANDER V. SHURYGIN²✉¹, ²James River Branch LLC, Moscow, Russia¹smykholography@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-7394-5940>²xander@al88sh.ru <https://orcid.org/0000-0002-3514-2709>

Abstract

Objective. Surface relief holograms and their application for information security purposes. **Goal of the work.** Search for combinations of dissimilar means in one hologram, which makes it difficult for unauthorized copying. **Method.** Analysis of publications and the authors' own experience. **Main results.** The main forms of holograms application in the mass market segment are analyzed. Current and future production volumes are given. Current trends in the development of recording technology and current security elements are shown. **Practical significance.** A conclusion is drawn about the importance of holography specialists overcoming the inertia of demand and the need to offer customers new types of holograms and approaches to their use.

Keywords: hologram, surface relief, security features

For citation: Smyk A.F., Shurygin A.V. Surface relief holograms. State of the art and development prospects [in Russian] // *Opticheskii Zhurnal*. 2024. V. 91. № 3. P. 44–51. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-03-44-51>

OCIS code: 090.5640

ВВЕДЕНИЕ

Поверхностно-рельефные голограммы (ПРГ) создали голографическую промышленность. Это случилось благодаря применению голограмм в качестве защитных и выпуска их большими тиражами. Объемы производства защитных ПРГ превзошли все остальные типы голограмм и их применения. Этому способствовал ряд факторов: простота массового изготовления, совместимость с полиграфическими технологиями, спрос на защитные признаки с простой идентификацией, не требующей специальных знаний и устройств, визуальная привлекательность.

Целью работы, результаты которой изложены в статье, является поиск сочетаний различных средств в одной голограмме, которые затрудняют возможности ее несанкционированного копирования.

Исторически первыми голограммами, примененными в качестве защитных, были ПРГ трехмерных объектов, записанные по схеме Бентона [1]. Ограничение вертикального параллакса в них позволило получить приемлемую дифракционную эффективность (порядка 30%) при освещении точечным источником белого света. Они получили название трехмерных (3D) голограмм. Записывались такие голограммы обычно с применением реального объекта, сделанного из твердого материала, на оптических столах. Размер изображения был равен размеру объекта, защитные элементы отсутствовали. Считалось, что само наличие яркого радужного голографического изображения на объекте достаточно для защиты пластиковой карты или ценной бумаги. Глубина объекта обычно выбиралась не более единиц миллиметров для уменьшения размытия изображения при восстановлении протяженными источниками.

Потребность в появлении надписей на голограмме привела вскоре к широкому использованию голограмм плоских объектов — обычно текстов и плоских символов. Такие голограммы стали называть двумерными (2D)

голограммами. Записывались они в модифицированной схеме Бентона [1] для прозрачных объектов или прямой интерференцией пучков через маски. Поскольку изображение локализовано в плоскости голограммы, требования к источнику освещения снизились, четкость изображения меньше зависела от углового размера восстанавливающего источника. Появилась возможность внесения в изображение небольших текстов или символов, не видимых невооруженным глазом. Утратился, однако, эффект объема, что плохо сказалось на привлекательности голограмм для потребителя.

Компромиссным вариантом стало применение 2D/3D голограмм, объект в которых представляет собой разнесенные по глубине плоские планы. То есть 2D объекты размещены в 3D пространстве по глубине. Эти голограммы надолго стали лидерами рынка, поскольку сочетают в себе четкое изображение переднего плана при сложном освещении, возможность внесения защитных элементов в виде микро-текстов и впечатление объема. Пусть даже углубленные планы и были видны более размытыми, впечатление объема они сохраняли и при неблагоприятной подсветке. А наиболее важные с точки зрения заказчика информационные элементы, например логотип, адрес и проч., были видны сравнительно четко, поскольку присутствовали в плоскости голограммы на переднем плане. Такие голограммы с добавлением различных визуальных эффектов, вроде переключения или динамики изображения, остаются наиболее распространенными и сейчас.

Стандартная технология массового производства ПРГ такова: после записи и проявления голограммы рельеф переносится на металлическую матрицу, а затем тиснением с нагревом — на металлизированную (обычно напылением алюминия) пластиковую пленку. Если голограмма должна оставаться прозрачной, вместо металла напыляют оксиды или другие материалы с высоким показателем преломления для сохранения яркости

голографического изображения. Происходит это на высокопроизводительном оборудовании с использованием довольно дешевых термопластичных пленок. Практическое применение осуществляется множеством способов.

ОСНОВНЫЕ ФОРМЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГОЛОГРАММ

Голографический рельеф может формироваться на различных материалах, а голограмма — по-разному наноситься на финальный продукт.

Наиболее распространенные формы применения ПРГ представлены ниже.

Самоклеящаяся разрушаемая этикетка

Эта форма очень удобна для небольших тиражей и ручной наклейки на продукт. Для предотвращения переклеивания этикетки она обычно выполняется разрушаемой. Часто этикетки нумеруют или наносят коды для автоматического считывания. Маркировка может выполняться различными способами, в том числе и лазерным разрушением алюминиевого слоя.

Фольга горячего (холодного) тиснения

Фольга горячего тиснения — обычный полиграфический продукт, которым выполняется позолотное тиснение на обложках книг, паспортов и др. При использовании ее в голографии на один из промежуточных слоев переносится голографический рельеф, несущий изображение. А дальше она применяется как обычная позолотная фольга на том же оборудовании и в тех же режимах.

Прозрачные ламинаты на идентификационных документах

Голографический рельеф покрыт напылением с высоким показателем преломления и термоклеем, активируемым в ламинаторе и спекающим ламинат и бумажный документ в единую пластиковую пластину.

Ламинаты на жесткой упаковке

Аналогичная технология применяется и при изготовлении картонной упаковки с той только разницей, что используется металлическое непрозрачное напыление по голографическому рельефу.

Рельефная пленка на упаковке

В том случае, если высота рельефа значительно больше типичных для радужных голограмм 0,1–0,2 мкм, а частота ниже 100 л/мм, дифракционные порядки сливаются с нулевым и впечатление объема формируется поведением блика от источников освещения. Это так называемая голограмма нулевого порядка, или «серая» голограмма. Упаковка выглядит рельефной с кажущейся глубиной в несколько миллиметров, тогда как реальная высота низкочастотного рельефа может не превышать долей микрометра [2]. Такая форма часто применяется в упаковке, причем низкочастотный рельеф обычно комбинируется с обычной радужной голограммой.

Нырьющая нить, отрывная лента

Нырьющая нить — защитная полиграфическая технология, в которой узкая лента из металлизированной пленки появляется то с одной, то с другой стороны бумажного листа. В проходящем свете видна непрерывная лента, а в отраженном — только ее часть, выходящая на видимую сторону листа. Нырьющая нить закладывается в продукт на этапе изготовления бумаги, поэтому основное ее применение — банкноты. Отрывная лента применяется в основном в сигаретных упаковках.

Рельеф, сформированный на месте

Технология получения отличается от обычной для тисненых голограмм. Рельеф в данном случае формируется интерференцией мощных лазерных пучков прямо на поверхности изделий. Применяется для защиты запчастей к автомобилям и авиационной технике [3].

Глиттер

Пленка с голограммой режется на небольшие куски — блестки, размером порядка 0,2–0,8 мм, которые используются для добавки в красители. Наиболее частое применение — защита крупных кузовных деталей автомобилей. Эта форма предназначена для так называемой «осведомленной идентификации», когда потребитель знает, какие защитные элементы и с помощью каких приборов он должен искать.

Внешняя коррекция ранее сформированного рельефа

Это специфическое, но распространенное применение рельефных голограмм, актуальное для идентификационных документов, изготавливаемых индивидуализацией поликарбонатных сборок. Таким образом изготавливают паспорта (в виде книжек с поликарбонатными страницами или в виде отдельных карточек). Заготовка подготавливается заранее, а затем проводится ее индивидуализация лазерным устройством с нанесением текстовых и графических изображений [4].

Как видно из этого перечня, технология применения голограмм отработана хорошо и разнообразно.

ОБЪЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА

По объему мировых продаж (около \$5.233 млрд. в 2023 г.) [5] доминируют защитные голограммы, но в последние годы декоративные применения для упаковки неуклонно растут (одновременно со средним размером голограммы). Часто голографическая упаковка несет и защитную функцию. Международная ассоциация производителей голограмм (ИНМА) оценивает объем продаж в \$188 млрд. к 2025 г. (вместе с самой упаковкой) [6]. Объемы рынка велики, стабильно растет спрос. Применение в образовании, культуре, здравоохранении, прикладных исследованиях в стоимостном выражении не может сравниться с защитой и упаковкой, но устойчиво развивается. Косвенно оно способствует благосклонному отношению конечного потребителя и к защитной голографии.

ЗАПРОСЫ РЫНКА НА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГОЛОГРАММ

Поверхностно-рельефная голография далеко не исчерпала своего технического и бизнес-потенциала. Однако для сохранения темпов развития и технологического отрыва от подельщиков необходимо пойти навстречу некоторым, достаточно четко ощущаемым голографистами запросам потребителя. К их числу можно отнести следующие.

Смягчение требований к условиям освещения

Немаловажным привлекательным качеством голограммы остается впечатление глубины объекта. Однако для обычных 3D голограмм

необходим одиночный точечный освещающий источник, иначе изображение размывается. Такие источники нечасто встречаются в современных помещениях, где преобладают множественные протяженные источники.

Повышение яркости и чистоты цветов

Тоже очень сильно зависит от условий освещения и ухудшается при множественных протяженных источниках. Повышение яркости и насыщенности цвета при меньшей угловой дисперсии также желательно для улучшения потребительских свойств голограмм.

Усиление роли защитных признаков так называемой неосведомленной идентификации

Действительно, среди множества разработанных к настоящему моменту защитных признаков наиболее востребованы и важны те, которые не требуют специальных знаний и приборов для идентификации. Привлекающие взгляд оптические эффекты хорошо запоминаются потребителем и потом легко опознаются в деталях. Такие эффекты пригодны для защиты недорогих объектов, где не требуется скрупулезное их изучение с микроскопом или специальным оборудованием.

И, наконец, сохранение невысокой цены и технологической совместимости с полиграфией и упаковкой.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНО-РЕЛЬЕФНЫХ ГОЛОГРАММ

В качестве ответов на запрос рынка наметились некоторые направления.

1. Правильный выбор параметров обычной голограммы с учетом условий ее освещения при восстановлении изображения.

2. Голограммы со сниженными требованиями к освещению (кристалл, трекограммы) в том числе с асимметричным профилем полосы в микроструктуре голограммы (лито и асимметричные трекограммы).

3. Плазмонные голограммы.

4. Точное комбинирование различных типов голограмм и оптических элементов на больших площадях.

Если подобрать параметры голограммы (тип, размер, несущую пространственную частоту микроструктуры) под конкретные условия

освещения, то на этапе восстановления можно получить приемлемое качество изображения. При дифракции монохроматической световой волны на строго синусоидальных решетках образуются три порядка дифракции — нулевой, первый и минус первый, равные по интенсивности при оптимальной глубине рельефа. Если профиль полосы отличен от синусоидального, порядков может быть больше. При освещении такой голограммы восстанавливается не одно, а несколько изображений объекта в разных порядках дифракции. Если пространственная частота решетки мала, то эти изображения могут накладываться друг на друга. Если освещающая волна не монохроматична, например, если это белый свет, наложение изображений становится еще более заметным, поскольку каждой длине волны соответствует свой угол дифракции. Увеличение углового размера освещающего голограмму источника также ведет к наложению и размытию изображений. Поскольку в большинстве практических случаев восстановление изображений защитных голограмм происходит в довольно неблагоприятных условиях — с протяженными и немонохроматическими освещающими источниками, было бы полезно определить виды голограмм и их параметры для наиболее комфортной и надежной идентификации.

В голограммах, где важен цвет изображения (или соотношение цветов в изображении), пространственная частота голографических полос должна была быть достаточно высокой для разделения изображений в дифракционных порядках, а профиль полос приближен к прямоугольному для увеличения дифракционной эффективности. Изображения получают при этом радужную окраску. Одновременно с этим часто стремятся увеличить угловую дисперсию, чтобы сохранить соотношение цветов в изображении в возможно большем диапазоне углов падения восстанавливающего пучка света.

Размер голограммы, несущая пространственная частота и ее изменение по площади должны быть увязаны с типичными условиями освещения при восстановлении.

Для приблизительной оценки размытия примем две достаточно произвольные модели освещающего источника и геометрии освещения им голограммы, типичные для защитных голограмм размером 25×25 мм со средней про-

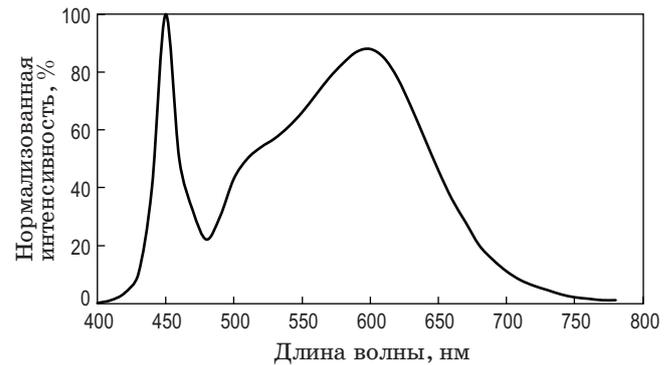


Рис. 1. Характерный спектр белого светодиода
Fig. 1. Representative spectrum of a white light emitting diode

странственной частотой 800 л/мм и глубиной изображения 1 мм.

Модель точечного источника — белый светодиод (цветовая температура 4000 К) с излучающей площадкой 2×2 мм на расстоянии 500 мм от голограммы. Спектр светодиода приведен на рис. 1 [7].

Одиночный протяженный источник — блок светодиодных ламп с рассеивателем размером 500×500 мм и той же эквивалентной цветовой температурой на расстоянии 3000 мм от голограммы.

Спектральное размытие в восстановленном изображении определим по формуле [8]

$$\Delta\sigma = \theta_r z_1 \frac{\Delta\lambda}{\lambda},$$

где $\theta_r = \arcsin(\lambda\nu)$, λ — длина волны излучения, ν — пространственная частота голографической решетки, $\Delta\lambda$ — ширина спектра освещающего источника, z_1 — глубина изображения (расстояние вдоль перпендикуляра к плоскости голограммы от мнимого изображения точки до плоскости голограммы).

Размытие восстановленного голограммой мнимого изображения точки за счет конечного размера освещающего монохроматического источника (см. рис. 2) определяется [8] как

$$\Delta S = \frac{z_1}{z_r} \Delta r,$$

где z_r — расстояние до освещающего источника, Δr — поперечный размер источника.

В принятых допущениях размытие изображения при освещении точечным источником за счет конечной ширины спектра составит 0,18 мм, а при освещении протяженным источником — 1,7 мм. Это означает, что при освещении точечным источником белого света еще можно говорить о какой-то глубине изображения, тогда как даже в случае одного протяженного источника подходят только 2D голограммы. Широкое распространение протяженных источников почти не оставляет простора для оптимизации параметров голограмм с изображением в дифракционных порядках, поэтому логично было бы попробовать снизить пространственную частоту и формировать впечатление объема другими методами.

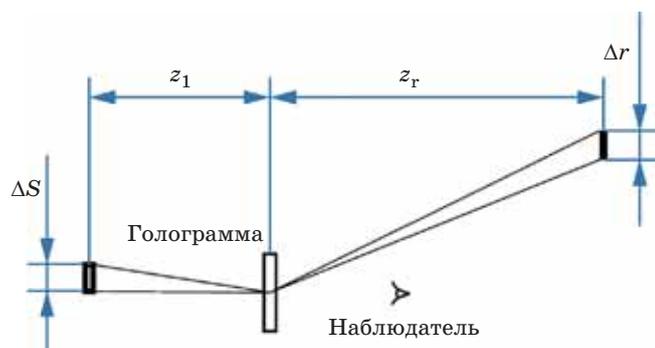


Рис. 2. Схема размытия изображения точки источником конечного размера

Fig. 2. The scheme of blurring the image of a point with a finite size light source

При снижении пространственной частоты до уровня, когда дифракционные порядки накладываются друг на друга и сливаются с нулевым порядком, формируется одно ахроматическое изображение. Впечатление объема при этом создается не за счет бинокулярного эффекта, а за счет динамики блика при наклонах голограммы [9]. Такие голограммы вполне комфортны для неосведомленной идентификации.

Применение асимметричного профиля полосы микроструктуры, помимо создания впечатления полнопараллаксного объема, дает еще и увеличение яркости изображения. Совпадение нулевого и других дифракционных порядков увеличивает яркость почти втрое. Однако существующая технология массового производства ПРГ обычно искажает необходимые для этого асимметричные профили довольно сильно, делая их более симметричными за счет тепловой релаксации при эмбосировании (перенесении рельефа с никелевой матрицы на пластиковую пленку на прокаточных машинах — эмбосерах). В паллиативном варианте низкочастотных голограмм (голограмм нулевого порядка) стали использоваться симметричные профили, ориентированные на формирование впечатления объема, но устойчивые к прокатке на обычных эмбосерах. Обычно их называют «кристалл», или «бронза». Яркость изображения ниже, но впечатление объема сохраняется. Более того, пространственная частота обычно выбирается

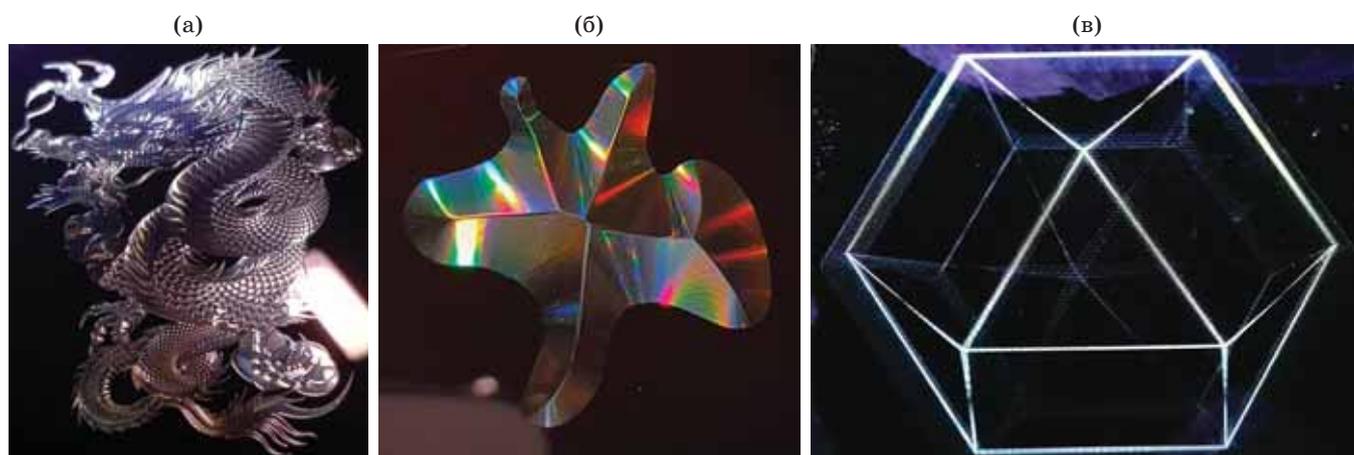


Рис. 3. Фотографии голограмм с асимметричным профилем рельефа (а), типа «кристалл» (б) и трекограммы (в)

Fig. 3. Photos of hologram (a) with an asymmetrical relief profile, (б) of a “crystal” type hologram, (в) of the trackogram

в них не слишком низкой, сохраняющей радужную окраску в неблагоприятном освещении (рис. 3)

Трекограмма представляет собой систему концентрических тороидальных канавок шириной в единицы микрометров и глубиной изображения в доли микрометра, формирующих при освещении точечным источником составной блик от поверхностей канавок [10]. Изображение в них формируется поточечно как блик на поверхности канавки, представляющей собой половину открытого тора. Каждой точке объекта соответствует тороидальный трек в форме окружности в плане, а воспринимаемая глубина точки определяется радиусом этой окружности. Концентрические окружности соответствуют линии из отдельных точек, уходящей вглубь и выступающей из плоскости голограммы. При асимметричном профиле трека формируется только одно изображение — за плоскостью голограммы или перед ней в зависимости от направления и кривизны трека по отношению к отражающей его стороне.

При увеличении пространственной частоты возможно получение так называемых плазмонных голограмм, значительно менее чувствительных к условиям освещения. Пространственная частота и глубина рельефа микроструктуры в плазмонных голограммах соответствуют запредельным решеткам для видимого диапазона спектра, и цвета формируются подобно цветам побежалости в тонких пленках. Цвета выглядят как пастельные, приглушенные, поскольку формируются вычитанием из спектра освещающего источника излучений длин волн вблизи соответствующих условию равенства синуса угла дифракции единице. Физический механизм разобран

подробно в работе [11]. Здесь заметим только, что плазмонные голограммы требуют точного выдерживания частоты и глубины рельефа, а также проводимости напыленного металлического слоя. Технология массового производства пока не совсем отработана, однако матрицы делают уже все ведущие голографисты.

Из описанного выше понятно, что сделать одну универсальную голограмму с глубоким изображением, хорошим цветом и нечувствительную к неблагоприятному освещению пока не представляется возможным. Поэтому удачным решением представляется комбинация различных типов голограмм в одном изделии. Скажем, это может быть упаковка, большую часть которой занимает голограмма по технологии «лито», т.е. низкочастотная, ахроматическая голограмма с высокой глубиной рельефа и в ней небольшого размера радужная голограмма с чистыми цветами и некоторой глубиной изображения. Эффект привлечения внимания, таким образом, действует в несколько этапов при неблагоприятном и точечном освещении. Реализация таких голограмм возможна с применением точной ультрафиолетовой рекомбинации, когда границы раздела между разными голограммами могут быть уменьшены до 20 мкм [12], общее изделие выполнено по единому замыслу с увязкой с полиграфическим дизайном.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, ПРГ далеко не исчерпали своих возможностей и остаются локомотивом голографии. Голографистам важно только преодолеть инерцию спроса и предлагать заказчикам новые типы голограмм и подходы к их использованию.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Benton S.A. Hologram reconstructions with extended incoherent sources // *JOSA*. 1969. № 59. P. 1545–1546.
2. Odinokov S.B., Smyk A.F., Shurygin A.V. A technique of asymmetrical profiles in surface-relief holograms recording // *OSA Technical Digest. Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2019* (Optica Publishing Group, 2019). Bordeaux, France, May 19–23, 2019. Paper Th3A.27. <https://doi.org/10.1364/DH.2019.Th3A.27>
3. Schmidt M., Roth S. Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik [auf Deutsch] // 18 Seminars LEF 2015. Bayerisches Laserzentrum Erlangen, Fürth. 03–04 März, 2015.

REFERENCES

1. Benton S.A. Hologram reconstructions with extended incoherent sources // *JOSA*. 1969. № 59. P. 1545–1546.
2. Odinokov S.B., Smyk A.F., Shurygin A.V. A technique of asymmetrical profiles in surface-relief holograms recording // *OSA Technical Digest. Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2019* (Optica Publishing Group, 2019). Bordeaux, France, May 19–23, 2019. Paper Th3A.27. <https://doi.org/10.1364/DH.2019.Th3A.27>
3. Schmidt M., Roth S. Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik [auf Deutsch] // 18 Seminars LEF 2015. Bayerisches Laserzentrum Erlangen, Fürth. 03–04 März, 2015.

4. Курятников А.Б., Федорова Е.М., Корнилов Г.В., Никируй Э.Я., Павлов И.В., Платонов С.Н., Ксенофонов В.А., Туркина Е.С., Смык А.Ф., Пономарев Ю.В. Способ получения комбинированного черно-белого и полноцветного персонализационного изображения на многослойной структуре // Патент РФ № RU2556328C1. Бюл. 2015. № 19.
5. Электронный ресурс URL: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/security-holograms-market> (Future Market Insights / Security Holograms Market By Product Type, Material, End Use & Region | Forecast 2023 to 2033)
6. Электронный ресурс URL: <https://ihma.org/growth-for-holography-in-2022-as-covid-and-other-threats-continue-to-impact/> (International Hologram Manufacturers Association / Growth for Holography in 2022 as Covid and Other Threats Continue to Impact)
7. Электронный ресурс URL: https://download.led.samsung.com/led/file/resource/2022/05/Data_Sheet_LM301H_CRI80_Rev.5.4.pdf (Samsung LEDs / datasheet LM301H 80 CRI rev.5.4)
8. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. Пер. с англ. под ред. Островского Ю.И. М.: Мир, 1973. 698 с.
9. Смык А.Ф., Шурыгин А.В. Асимметричные профили в поверхностно-рельефных голограммах // Мир техники кино. 2018. Т. 12. № 1. С. 23–30.
10. Одинокое С.Б., Смык А.Ф., Шурыгин А.В. Формирование динамических и бинокулярных объемных изображений в защитных голограммах с нулевым порядком дифракции // Автометрия. 2020. Т. 56. № 2. С. 55–61. <https://doi.org/10.15372/AUT20200205>
11. Guzatov D. V., Klimov V. V. Optical properties of a plasmonic nano-antenna: An analytical approach // New J. Phys. 2011. V. 13. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/13/5/053034>
12. Смык А.Ф., Шурыгин А.В. Особенности ультрафиолетовой рекомбинации голограмм // Тез. докл. XIX междунар. конф. по голографии и прикладным оптическим технологиям — HOLOEXPO-2022. СПб., Россия. 20–22 сентября 2022. С. 299–303.
4. Kuryatnikov A.B., Fedorova E.M., Kornilov G.V., Nikiruy E.Ya., Pavlov I.V., Platonov S.N., Ksenofontov V.A., Turkina E.S., Smyk A.F., Ponomarev Yu.V. The method to obtain a combined black-and-white and full-color personalized image with a multilayer structure. // RF Patent № RU2556328C1. Bull. 2015. № 19.
5. Electronic resource URL: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/security-holograms-market> (Future Market Insights / Security Holograms Market By Product Type, Material, End Use & Region | Forecast 2023 to 2033)
6. Electronic resource URL: <https://ihma.org/growth-for-holography-in-2022-as-covid-and-other-threats-continue-to-impact/> (International Hologram Manufacturers Association / Growth for Holography in 2022 as Covid and Other Threats Continue to Impact)
7. Electronic resource URL: https://download.led.samsung.com/led/file/resource/2022/05/Data_Sheet_LM301H_CRI80_Rev.5.4.pdf (Samsung LEDs / data-sheet LM301H 80 CRI rev.5.4)
8. Collier R.J., Burckhardt C.B., Lin L.H. Optical holography. Cambridge, Massachusetts: Academic Press, 1971. 624 p.
9. Smyk A.F., Shurygin A.V. Asymmetric profiles in surface-relief holograms [in Russian] // World of Technique of Cinema. 2018. V. 12. № 1. P. 23–30.
10. Odnokov S.B., Smyk A.F., Shurygin A.V. Formation of dynamic and binocular volumetric images in security holograms with a zero diffraction order // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2020. V. 56. № 2. P. 55–61. <https://doi.org/10.15372/AUT20200205>
11. Guzatov D.V., Klimov V.V. Optical properties of a plasmonic nano-antenna: An analytical approach // New J. Phys. 2011. V. 13. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/13/5/053034>
12. Smyk A.F., Shurygin A.V. Features of ultraviolet recombination of holograms [in Russian] // XIX Internat. Conf. Holography and Optical Technologies — HOLOEXPO-2022 (Abstracts of reports). St. Petersburg, Russia. September 20–22, 2022. P. 299–303.

АВТОРЫ

Александр Федорович Смык — кандидат технических наук, заместитель директора по науке ООО «Джеймс Ривер Бранч», Москва, 123458, Россия; Scopus ID: 6602118031; <https://orcid.org/0000-0002-7394-5940>; smykholography@gmail.com

Александр Викторович Шурыгин — инженер, ООО «Джеймс Ривер Бранч», Москва, 123458, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-3514-2709>; a.v.shurigin@yandex.ru

AUTHORS

Alexander F. Smyk — PhD (Engineering), Research and Development Deputy Director, James River Branch LLC, Moscow, 123458, Russia; Scopus ID: 6602118031; <https://orcid.org/0000-0002-7394-5940>; smykholography@gmail.com

Alexander V. Shurygin — Engineer, James River Branch LLC, Moscow, 123458, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-3514-2709>; a.v.shurigin@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 07.11.2023
Одобрена после рецензирования 25.12.2023
Принята к печати 28.01.2024

The article was submitted to the editorial office 07.11.2023
Approved after review 25.12.2023
Accepted for publication 28.01.2024