

В. И. Бобринев, Д. С. Лушников,
А. И. Николаев, С. Б. Одинокоев,
И. К. Цыганов

ПОЛУЧЕНИЕ И СЧИТЫВАНИЕ ГОЛОГРАММ СО СКРЫТЫМ ИЗОБРАЖЕНИЕМ

Рассмотрены схемы получения голограмм со скрытым изображением, используемые как средство контроля подлинности объекта, промаркированного такой голограммой. Предложены модификации схемы получения с использованием кодирующей маски в канале объектного луча, позволяющие снизить требования к точности установки голограммы при восстановлении изображения без снижения степени защищенности скрытого изображения. В качестве дополнительной меры защиты для систем автоматического распознавания подлинности голограммы предложено использовать заранее выбранные элементы скрытого изображения для размещения в них проверочного кода.

Радужные голограммы широко используются как средство маркировки различных товаров и документов (в том числе, финансовых), обеспечивающее одновременно защиту их от подделки. Первоначально предполагалось, что подделка радужной голограммы является маловероятной и не может производиться без высококвалифицированных специалистов и специального дорогостоящего оборудования. Однако развитие техники голографии привело к тому, что в настоящее время сотни небольших фирм вполне способны изготавливать практически любые голограммы. В связи с этим появилась необходимость защиты от подделки самих голограмм.

Оптические методы защиты голограмм от подделок основываются на том, что изображения, зарегистрированные на защищаемой голограмме, наблюдаются невооруженным глазом при естественном освещении. Если на носителе с такой голограммой зарегистрировать дополнительное изображение, которое можно считать только с применением специальной аппаратуры и которое неразличимо при естественном освещении защищаемой голограммы, то наличие такого дополнительного изображения может являться свидетельством подлинности защищаемой голограммы и, соответственно, промаркированного предмета. Полученное таким образом изображение принято называть скрытым изображением, а голограмму, содержащую такое изображение, — голограммой со скрытым изображением.

В одном из первых вариантов голограмм со скрытым изображением совместно с радужной голограммой, видимой невооруженным гла-

зом при освещении естественным светом, изготавливалась еще одна голограмма, изображение которой могло быть восстановлено только лазером [1]. С этой целью на дополнительную голограмму регистрировалось изображение на достаточно большом расстоянии от плоскости голограммы, так что при освещении некогерентным светом оно смазывалось из-за дисперсии голограммы и становилось практически невидимым. Однако такое скрытое изображение легко восстанавливается лазерным лучом и поэтому не может обеспечить достаточную защиту от подделки, так как оно может быть скопировано и затем зарегистрировано на новую голограмму.

В работе [2] описано устройство, с помощью которого дополнительная защитная голограмма получается в виде тонкой (несколько десятков микрон) полоски, для ее формирования используется цилиндрическая оптика. Вследствие малых размеров такая голограмма практически невидима, создаваемое ею изображение имеет очень малую яркость при естественном освещении, так как при малых размерах голограммы на нее падает очень мало света. Вместе с тем, для восстановления изображения в этом случае не обязательно иметь точно такие же цилиндрические линзы, как при изготовлении голограммы, — можно расширять голограмму, имея другой набор линз.

Были также предложены схемы получения защитных голограмм с искажением волнового фронта либо в канале опорного луча, либо в канале объектного луча с помощью матового стекла [3–7]. Считывание скрытого изображения с такой голограммы возможно только с применением оптической декодирующей маски, компенсирующей внесенные при регистрации искажения волнового фронта. Такие схемы обеспечивают высокую степень скрытости записанного изображения, однако при их применении требуется очень точное позиционирование голограммы при считывании (единицы микрон) для декодирования изображения. Кроме того, для восстановления неискаженного скрытого изображения требуется декодирующая маска, которая должна быть точной копией матового стекла, использовавшегося при получении голограммы.

Оптимальным было бы решение, сочетающее высокую степень защищенности скрытого изображения и наиболее простые требования к точности установки голограммы при считывании.

В работе [8] в качестве кодовой маски используется растр микролинз, установленный в канале объектного луча между регистрируемым изображением и голограммой. При считывании изображения голограмма освещается лазерным лучом с плоским волновым фронтом, восстановленная объектная волна проходит через декодирующую фазовую

маску (такой же, как и при записи, линзовый растр), за которой установлен диффузный экран, на нем в случае подлинности голограммы отображается скрытое изображение. Такое устройство допускает смещение голограммы относительно маски на расстояние

$$\delta = 0,808 \frac{r}{n-1} \operatorname{tg} \frac{d_e}{2f_0};$$

здесь r — радиус кривизны микролинз в растре, n — коэффициент преломления материала линзового растра, d_e — размер скрытого изображения, f_0 — фокусное расстояние фурье-объектива. Для случая практически реализуемых параметров элементов устройства величина допустимого сдвига близка к 0,7 мм. Таким образом, использование микролинзового растра позволяет снизить требования к точности установки голограммы при восстановлении изображения.

В настоящей работе рассматриваются некоторые схемы получения голограмм со скрытым изображением и считывания восстановленного изображения, которые могут быть применены как средство проверки подлинности изделия, промаркированного такой голограммой.

Варианты построения схемы получения голограмм со скрытым изображением. При получении голограмм со скрытым изображением в оптическую схему получения включают элементы, искажающие структуру получаемой голограммы так, чтобы изображение, регистрируемое на голограмме, не восстанавливалось без применения специальных декодирующих устройств. Это достигается путем введения в канал опорного или объектного луча специальной маски, искажающей волновой фронт [4–6]. При этом вносимые искажения не должны приводить к потере информации о регистрируемом изображении.

Если искажающая маска устанавливается в канале опорного луча, то она не должна вызывать появление “нулей” в распределении энергии опорного луча на голограмме, поскольку в этом случае могут быть утеряны некоторые составляющие пространственного спектра регистрируемого изображения.

При установке маски в канал объектного луча по той же причине допускается использование только фазовой маски. Кроме того, градиент функции фазовой модуляции на поверхности маски должен быть не слишком велик, так как на участках изменения фазы происходит отклонение проходящих световых лучей на угол, пропорциональный градиенту функции фазовой модуляции, в результате чего некоторые лучи от объекта могут не попасть в апертуру голограммы, что приведет к искажениям в зарегистрированном изображении. Одним из примеров искажений такого рода является появление спекл-структуры на изображении.

Следует отметить также, что требования к точности установки голограммы при считывании тем выше, чем быстрее изменяется вносимый фазовый сдвиг по поверхности маски.

Таким образом, схема получения голограммы и кодирующей маски существенно влияет на свойства голограмм со скрытым изображением.

Схема получения голограммы Френеля с кодовой маской в канале объектного луча. Схема получения защитной голограммы He–Ne-лазером представлена на рис. 1. Луч лазера 1 проходит сквозь затвор 2 и с помощью поворотного зеркала 3 направляется на светоделитель 6, в котором луч расщепляется на два канала: канал опорного луча и канал объектного луча.

Зеркало 5 в канале объектного луча направляет луч на коллиматор, состоящий из линз 10, 11 с совмещенными фокусами и микродиафрагмы 9'. С помощью коллиматора производится увеличение диаметра лазерного луча до размеров, необходимых для освещения входного транспаранта 13, а с помощью микродиафрагмы — устранение рассеянного света, приводящего к паразитной пространственной модуляции распределения интенсивности света по апертуре транспаранта.

Далее объектный луч попадает на матовое стекло 12 и транспарант с входным изображением 13. Рассеяние света матовым стеклом исключает

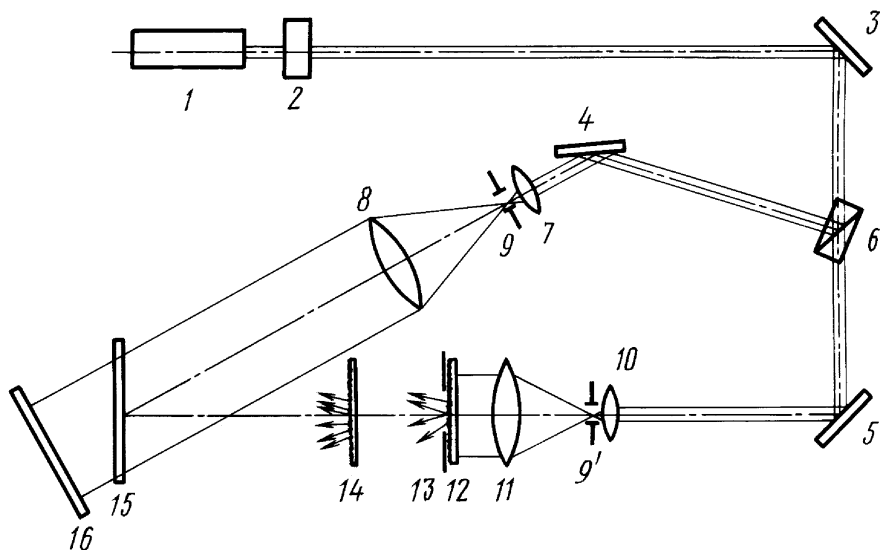


Рис. 1. Схема получения голограммы Френеля с кодирующей маской в канале опорного луча:

1 — лазер; 2 — затвор; 3–5 — зеркала; 6 — светоделитель; 7, 8 — телескоп для расширения опорного луча; 9, 9' — микродиафрагмы; 10, 11 — телескоп для расширения объектного луча; 12 — матовое стекло; 13 — транспарант; 14 — кодирующая фазовая маска; 15 — голограмма; 16 — зеркало

ет возможность создания теневого изображения транспаранта на кодовой маске, что уменьшило бы степень закодированности зарегистрированного скрытого изображения. Входное изображение представляет собой логотип для случая получения голограммы с последующим визуальным контролем подлинности или матрицу прозрачных и непрозрачных отверстий для случая автоматического контроля подлинности. Далее в канале объектного луча установлена кодовая маска 14, вносящая искажения в волновой фронт объектного луча, и фотопластинка 15, на которой получается защитная голограмма.

В канале опорного луча установлено поворотное зеркало 4, затем коллиматор 7–9, выполняющий функции, аналогичные тем, которые выполняет коллиматор в канале объектного луча. Во время юстировки схемы регистрации луч на выходе коллиматора отражается зеркалом 16, установленным за фотопластинкой, и на микродиафрагме контролируется диаметр отраженного луча — если он минимальный, это свидетельствует о том, что опорный луч, падающий на голограмму, имеет плоский волновой фронт. Во время получения голограммы зеркало удаляется. После экспонирования и фотохимической обработки (проявления, фиксирования и отбеливания) голограмма устанавливается на свое место, канал объектного луча перекрывается непрозрачным экраном и снова устанавливается зеркало за голограммой. Если получена качественная голограмма, то в плоскости транспаранта появляется неискаженное изображение.

Схема получения голограммы с освещением транспаранта объектной волной, сходящейся к поверхности маски. Второй вариант схемы получения голограммы показан на рис. 2 (представлена лишь та часть схемы, которая отличается от рассмотренной ранее). В этой схе-

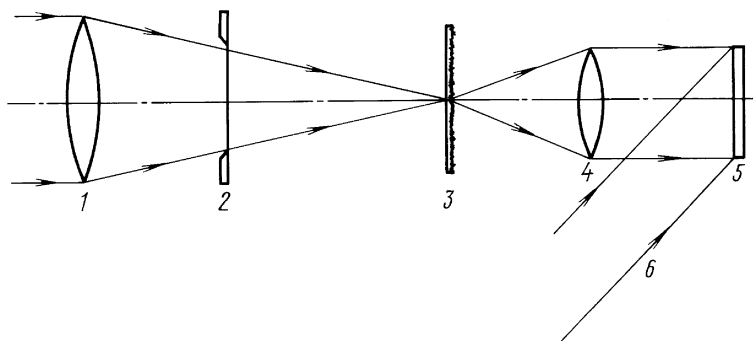


Рис. 2. Схема получения голограммы с освещением транспаранта объектной волной, сходящейся к поверхности маски:

1, 4 — линзы; 2 — транспарант; 3 — кодирующая фазовая маска; 5 — голограмма; 6 — опорный луч

ме транспарант 2 освещается сходящейся объектной волной, создаваемой линзой 1, которая фокусируется на плоскость маски 3. Рассеянная маской волна попадает на объектив 4, передняя фокальная плоскость которого совмещена с маской. Далее объектный луч попадает на получаемую защитную голограмму 5. Световая волна, идущая от одного пикселя маски, преобразуется в плоскую волну, угол наклона которой к оптической оси системы пропорционален расстоянию пикселя от оси. Поскольку практически это расстояние очень мало, то угол наклона также мал. В соответствии с этим объектный луч на голограмме создает картину с плавным изменением амплитуды и фазы, причем размеры образуемых на голограмме пятен тем больше, чем больше фокусное расстояние объектива и чем меньше размеры сфокусированного пятна на маске. Требуемая точность позиционирования голограммы при считывании должна быть сопоставима с размерами пятен объектного луча на голограмме.

Требования к точности позиционирования голограммы при считывании можно оценить также из следующих соображений. Каждый пиксель маски отображается на голограмме в виде плоской волны, угол наклона которой определяется положением пикселя на маске. При считывании с голограммы сопряженным опорным лучом любой участок голограммы будет восстанавливать эту волну, и после прохождения сквозь объектив она будет фокусироваться в той же точке маски, независимо от положения освещенного участка на голограмме. При смещении голограммы параллельно самой себе не должно происходить какого-либо искажения световой волны, возвращенной на голограмму. Из изложенного следует, что такая голограмма мало чувствительна к смещению ее перпендикулярно оптической оси системы. Это предположение справедливо, если опорная волна при получении голограммы и считывающая волна при воспроизведении изображения имеют плоский волновой фронт.

Схемы получения голограммы с использованием специальных элементов для освещения транспаранта. Способ формирования объектного луча, освещающего транспарант, существенно влияет на характеристики голограммы. При освещении транспаранта параллельным пучком света на кодирующей маске получается довольно четкое теневое изображение транспаранта, что существенно снижает степень закодированности голограммы. С другой стороны, если транспарант освещается сквозь матовое стекло, то теневое изображение отсутствует, но часть света рассеивается за пределы маски, что приводит к частичной потере информации (в первую очередь, к появлению спекл-структуры на зарегистрированном изображении). Слишком сильное рассеяние

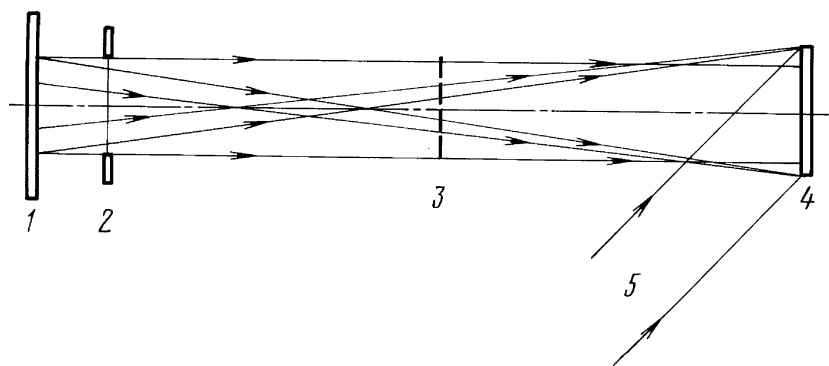


Рис. 3. Схема получения голограммы с маскирующим действительным изображением:

1 — осветительная голограмма с действительным маскирующим изображением;
 2 — транспарант; 3 — маскирующее изображение; 4 — получаемая голограмма; 5 — опорный луч

света влечет за собой значительную потерю энергии объектного луча и увеличение длительности экспозиции при получении голограммы.

Рассмотрим далее некоторые возможные решения этой проблемы.

1. Схема получения голограммы с маскирующим действительным изображением. В схеме, представленной на рис. 3, вообще не используется кодирующая маска. В этой схеме объектный луч, прежде чем попасть на транспарант 2, попадает на фазовую голограмму 1, на которой зарегистрировано действительное изображение 3, восстанавливающееся в промежутке между транспарантом и защитной голограммой 4. Это изображение должно быть достаточно броским, чтобы при наблюдении сквозь голограмму оно маскировало изображение транспаранта. Такая голограмма может быть получена без специальной кодирующей маски. Однако можно установить кодирующую маску в плоскости “паразитного” изображения, что позволит повысить степень защищенности голограммы. Такая модификация схемы будет описана ниже.

2. Схема получения голограммы с освещением транспаранта через матрицу микролинз. На рис. 4 приведена схема, применимая для случая регистрации транспаранта, представляющего собой двумерную матрицу ярких точек, которая может быть использована для автоматического считывания скрытого изображения.

В этой схеме перед транспарантом установлена линза 1 и двумерная матрица микролинз 2, каждая из которых используется для освещения одной точки транспаранта 3, установленного в задней фокальной плоскости матрицы микролинз. Матрица освещается слегка сходящимся объектным лучом, так что после транспаранта все прошедшие лучи налагаются друг на друга (см. рис. 4). Фокусные расстояния микролинз

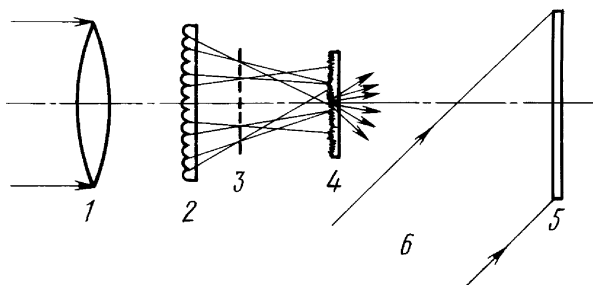


Рис. 4. Схема получения голограммы с освещением транспаранта через матрицу микролинз в канале объектного луча:

1 — линза; 2 — растр микролинз; 3 — транспарант; 4 — маска; 5 — голограмма; 6 — опорный луч

выбираются таким образом, чтобы размеры освещенного пятна в месте наложения лучей были равны размерам маски. После рассеяния маской 4 объектный луч регистрируется на голограмме 5.

3. Схема получения голограммы с использованием голограммы в канале объектного луча. Вторым вариантом схемы получения голограммы с концентрацией энергии объектного луча представлен на рис. 5. Здесь транспарант 2 освещается световой волной, дифрагировавшей на фазовой голограмме 1, на которой зарегистрировано изображение равномерно освещенного квадрата или круга. Осветительная голограмма устанавливается так, чтобы она формировала действительное изображение записанного на нее диффузно рассеивающего круга или квадрата в плоскости кодовой маски 3. При этом на маске отсутствует теневое изображение транспаранта, а размер освещенного участка маски равен размеру изображения круга или квадрата. Регистрация интерференционного поля производится в плоскости голограммы 4.

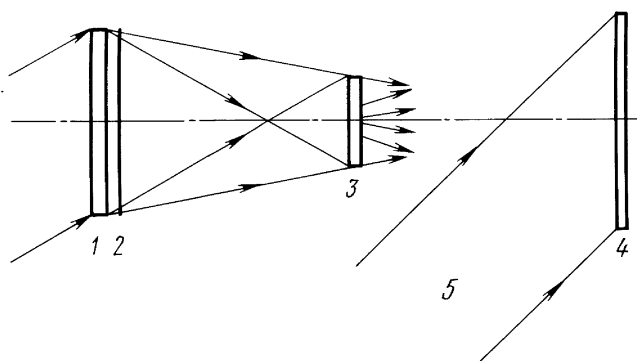


Рис. 5. Схема получения голограммы с осветительной голограммой в канале объектного луча:

1 — осветительная голограмма; 2 — транспарант; 3 — маска; 4 — получаемая голограмма; 5 — опорный луч

Оценка влияния фазовых искажений на изображение, считываемое с голограммы. Требуемую глубину фазовой модуляции волнового фронта при получении голограммы со скрытым изображением можно оценить следующим образом.

Если регистрируемый объект расположен в передней фокальной плоскости фурье-объектива, то каждая точка его преобразуется в плоскую волну. В качестве кодирующей маски для простоты можно использовать пластинку с синусоидальной модуляцией фазы проходящей волны $\varphi = \varphi_0 \sin Kx$, т.е. фазовую дифракционную решетку. После такой решетки плоская волна разлагается в систему плоских дифракционных волн, что приводит к искажению видимого сквозь голограмму изображения. Мощность дифракционной волны порядка n пропорциональна величине $(J_n(\varphi_0))^2$, где φ_0 — амплитуда модуляции фазы, а $(J_0(\varphi_0))^2$ — оставшая часть энергии объектного луча. В таблице приведена относительная мощность излучения для видимого сквозь маску изображения в зависимости от величины φ_0 .

φ_0 , рад	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
$(J_0(\varphi_0))^2$, отн. ед.	1	0,881	0,586	0,262	0,05	0,0023	0,07

При глубине модуляции фазы $\varphi_0 > 1,85$ рад (это соответствует величине $\sim \lambda/3$) в изображении остается менее 10 % энергии, а 90 % содержится в рассеянном свете. Можно считать, что такая степень рассеяния достаточна для кодирования изображения.

Фазовая модуляция фронта проходящей световой волны может быть осуществлена двумя способами: созданием неровностей на поверхности однородной оптической пластинки или локальным изменением показателя преломления материала пластинки, как это происходит при отбеливании фотопластинки засвеченной световой волной с пятнистой структурой (например, спекл-структурой, образующейся при рассеянии лазерного света матовым стеклом).

В обоих случаях модуляция связана с изменением оптической длины пути, который проходит световая волна при ее распространении сквозь пластинку. Из изложенного следует, что для кодирования достаточно иметь “глубину” неровностей не более одной длины волны. Далее будет показано, что этот вывод существен для формирования всей системы регистрации и восстановления скрытого изображения.

Рассмотрим обратную задачу: предположим, что в результате неточного декодирования световая волна, которая должна создать скрытое изображение, содержит остаточную фазовую модуляцию. Оценим яркость паразитных световых волн, искажающих восстановленное изображение, на примере восстановления плоской световой волны. Будем

предполагать, что после прохождения через фазовую декодирующую маску в восстановленной световой волне имеется остаточная фазовая модуляция с амплитудой φ_1 . Полагая, что φ_1 — достаточно малая величина, будем принимать во внимание рассеянные волны только первого порядка дифракции. При этом амплитуда волны нулевого порядка (создающей полезное изображение) пропорциональна $J_0(\varphi_1)$, а амплитуда волн первого порядка дифракции пропорциональна $J_1(\varphi_1)$.

Поскольку скрытое изображение восстанавливается когерентным светом, глубина модуляции изображения паразитным рассеянным светом равна $2J_1(\varphi_1)/J_0(\varphi_1)$. Полагая допустимой глубину модуляции 10 %, приходим к выводу, что должно выполняться неравенство $J_1(\varphi_1) < 0,05$, или $\varphi_1 < 0,1$ (что соответствует величине $0,03\lambda$).

Приближенно можно считать, что найденные значения φ_0 и φ_1 соответствуют среднеквадратичным значениям глубины фазовой модуляции для других типов кодирующих и декодирующих масок (например, масок со случайным распределением величины фазовой задержки), а также для случая, когда для записи голограммы используется схема регистрации голограмм Френеля.

Фазовая маска. Кодовая маска, используемая при получении защитной голограммы со скрытым изображением, должна таким образом преобразовать структуру защитной голограммы, чтобы невозможно было восстановить записанное на ней изображение без декодирующей маски.

Ранее было показано, что этого можно достичь, используя в качестве фазовой маски матовое стекло. Однако при восстановлении изображения на такой голограмме возникают две проблемы: во-первых, необходимо обеспечить точность установки голограммы при считывании порядка единиц микрон; во-вторых, для считывания необходимо использовать ту же маску, что и при регистрации, так как очень трудно изготовить точную копию такой маски. В настоящей работе рассмотрим способы решения этих проблем. Для снижения требований к точности установки голограммы при считывании изображения, а также для обеспечения возможности изготовления одинаковых кодовых масок в требуемом количестве предлагается в качестве кодовой маски использовать отбеленный фотоснимок спекл-структуры, образующейся при освещении матового стекла лучом лазера.

На рис. 6 приведена схема получения кодовой маски, представляющей собой фотоснимок спекл-структуры. Луч лазера 1 проходит через положительную линзу 2 и попадает затем на матовое стекло 3. Свет, рассеянный матовым стеклом, образует в пространстве спекл-структуру, которая регистрируется на фотопластинке 4, находящейся

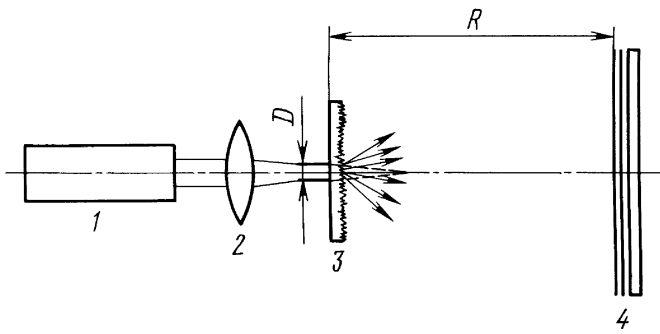


Рис. 6. Схема получения кодирующей фазовой маски:

1 — лазер; 2 — линза; 3 — матовое стекло; 4 — фотопластинка

на расстоянии R от матового стекла. Распределение интенсивности света на фотопластинке представляет собой случайную двумерную функцию с радиусом корреляции, равным размерам спеклов. После экспонирования фотопластинка проявляется и отбеливается. В результате оптическая толщина фотопластинки является промодулированной в соответствии с распределением ее освещенности при экспонировании, и она может быть использована как фазовая маска со случайным распределением вносимого сдвига фазы, причем радиус корреляции функции фазовой модуляции равен приблизительно среднему размеру спеклов. Амплитуда модуляции фазы с помощью отбеленной фотопластинки достигает величины порядка 2π и более, что вполне достаточно для кодирования изображения.

При этом размеры спеклов, регистрируемых на фотопластинке, определяются формулой

$$d \approx 2,5 \frac{\lambda}{D} R;$$

здесь λ — длина волны лазерного излучения, D — диаметр лазерного пятна на матовом стекле, R — расстояние от матового стекла до фотопластинки.

Изменяя расстояние от линзы до матового стекла в пределах от 0 до F (фокусного расстояния линзы), можно изменить диаметр D светового пятна на матовом стекле от диаметра луча лазера (2–4 мм) до величины порядка 10 мкм. При $R = 20$ см размеры спеклов, таким образом, могут быть изменены от ~ 10 мкм до ~ 3 см. Размеры спеклов определяются случайным распределением освещенности изображения, записываемого на фотопластинку, и соответствуют требуемой точности установки кодовой маски при восстановлении изображения. Поскольку глубина модуляции фазы такой маской не превышает нескольких длин волн, требуемая точность установки голограммы при считывании близка к размерам спеклов.

Для схемы, приведенной на рис. 6, можно изготовить необходимое количество копий кодовой маски. Для изготовления другой серии масок в случае необходимости достаточно сдвинуть матовое стекло на несколько миллиметров.

Достоинство данного типа оптической маски заключается в том, что, изменяя размеры спеклов на маске, можно регулировать требования к точности ее установки; кроме того, несложно изготовить серию идентичных масок для установки их в устройствах контроля, находящихся в разных местах.

Второй вариант маски — стеклянная пластинка с выдавленной на ней методом горячего прессования матрицей пирамидок с размерами порядка 1–2 мм. При достаточно малой высоте пирамидок вносимая ими глубина модуляции фазы проходящей световой волны может также соответствовать величине порядка нескольких длин волн, а требуемая точность установки голограммы, как и в предыдущем случае, близка к размерам пирамидки. В отличие от линзового раstra, пирамидки не создают изображения транспаранта, и поэтому такая маска обеспечивает более высокую степень скрытости изображения.

Позиционирование голограммы при считывании. Для считывания скрытого изображения необходимо обеспечить установку голограммы в устройство считывания с достаточно высокой точностью. При экспериментальных исследованиях для считывания обычно используется та же установка, в которой голограмма была получена.

При создании специального считывающего устройства необходимо обеспечить контроль правильности позиционирования голограммы.

В работе [9] описана защитная голограмма и устройство для считывания информации с нее. Особенностью описываемой системы является то, что защитную голограмму получают одновременно с дополнительной дифракционной решеткой (голограммой плоско-параллельной световой волны, распространяющейся под углом, отличным от угла распространения объектной волны, используемой для записи штрих-кода), которая применяется для позиционирования голограммы в устройстве считывания. С этой целью в устройстве считывания устанавливается дополнительный фотоприемник, на который попадает дифрагировавший на дополнительной решетке свет, так что сигнал на выходе фотоприемника достигает максимума, когда голограмма установлена в правильную позицию.

Точность позиционирования голограммы можно повысить, если вместо плоской дополнительной волны зарегистрировать на голограмму изображение светящейся точки. Схема получения голограммы с дополнительным объектным лучом для позиционирования приведена

на рис. 7. В этой схеме объектный луч, выходящий из лазера 1, проходящий затвор 2 и поворотное зеркало 3, расщепляется светоделителем 6 на два луча, один из которых используется для записи скрытого изображения (11–17 и см. рис. 1, 10–15), а второй — для получения на голограмме точечного объекта. Второй объектный луч через светоделитель 10 и поворотное зеркало 18 направляется на линзу 19, в задней фокальной плоскости которой установлена микродиафрагма 20, а затем расходящийся из фокуса линзы пучок попадает на голограмму 17. При установке проявленной голограммы в устройство считывания одновременно с восстановлением скрытого изображения восстанавливается изображение точки, которое смещается вместе с голограммой при ее перемещении. Голограмма позиционируется таким образом, чтобы восстановленное изображение точки оказалось в заранее рассчитанном месте, где находится отверстие микродиафрагмы, в результате чего на выходе фотодиода, находящегося за микродиафрагмой, появляется и достигает своего максимума фототок, что является свидетельством правильной установки защитной голограммы.

Если в устройстве считывания заменить микродиафрагму и фотоприемник матовым стеклом с нанесенным на него реперным знаком, то позиционирование голограммы может выполняться с визуальным контролем.

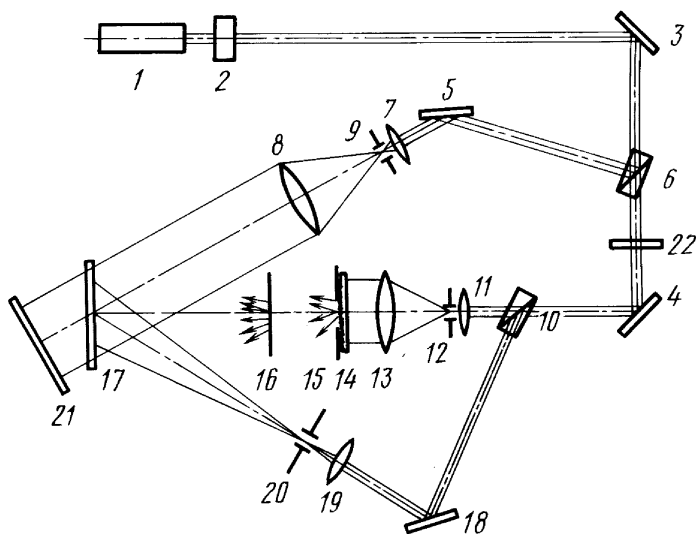


Рис. 7. Схема получения голограммы с дополнительным точечным объектом для позиционирования в системе считывания:

1 — лазер; 2 — затвор; 3–5, 18, 21 — зеркала; 6, 10 — светоделители; 7, 8 — телескоп для расширения опорного луча; 9, 12, 20 — микродиафрагмы; 11, 13 — телескоп для расширения объектного луча; 14 — матовое стекло; 15 — транспарант; 16 — кодирующая фазовая маска; 17 — голограмма; 19 — линза; 22 — непрозрачный экран

Возможность считывания голограммы со скрытым изображением с помощью лазера с длиной волны, отличающейся от длины волны лазера записи. Дополнительная проблема возникает в случае, когда получение голограммы и считывание с нее изображения производятся лазерами с различными длинами волн. Известно, что в обычных голограммах наблюдаются искажения изображения при восстановлении изображения излучением с длиной волны, отличающейся от той, которая была использована при получении голограмм. В случае голограмм, полученных с кодовой маской, эти искажения проявляются в еще большей степени, при этом фазовые искажения, вносимые кодирующей маской, могут значительно изменяться при изменении длины волны света. В первом приближении можно полагать, что показатель преломления материала фазовой маски не зависит от длины волны света. Полагая, что допустима остаточная ошибка $\delta\varphi = \lambda/10$ фазового распределения после декодирующей маски, при глубине фазовой модуляции, создаваемой маской, порядка длины волны допустимое различие длин волн при получении и при считывании голограммы не должно превышать 10 %.

В устройстве для проверки подлинности голограммы целесообразно использовать полупроводниковый лазер ввиду его малых габаритных размеров, низкой стоимости и высокой надежности. Наиболее распространенным типом таких лазеров являются лазеры с длиной волны 0,635 . . . 0,65 мкм. Соответственно, защитную голограмму со скрытым изображением необходимо получать при помощи лазера с длиной волны, близкой к указанным выше. Наиболее подходящим типом лазера в этом случае является He–Ne-лазер с длиной волны 0,63 мкм.

Наиболее распространенный тип голограмм, нуждающихся в проверке, — это радужные голограммы, получаемые на фоторезисте, который нечувствителен к красному свету, и поэтому регистрация на него производится не гелий-неоновым лазером, а с помощью He–Cd-лазера с длиной волны около 0,44 мкм. Вследствие значительного различия длин волн при получении и при воспроизведении голограммы искажения волнового фронта оказываются настолько большими, что восстановить скрытое изображение красным полупроводниковым лазером не удается.

Для решения этой проблемы предлагается получать защитную голограмму со скрытым изображением с помощью He–Ne-лазера, длина волны которого близка к длине волны полупроводниковых красных лазеров, на голографическую фотопластинку (например, типа ПФГ-01 или ПФГ-03), а затем контактным способом копировать ее на фоторезист с помощью He–Cd-лазера. Предпочтительнее получать первичную голограмму на фотопластинки ПФГ-03, которые имеют гораздо меньший уровень рассеяния света и, соответственно, создают меньше оптических шумов при копировании голограммы.

Полученная таким образом на фоторезисте голограмма сохраняет структуру голограммы, изготовленной с помощью He–Ne-лазера, поэтому при считывании ее полупроводниковым лазером удастся восстановить скрытое изображение. Далее производится копирование защитной голограммы светом He–Cd-лазера на пластинку, покрытую слоем фоторезиста, на которой предварительно была получена голограмма с видимым изображением. При копировании фотопластинка с полученной на ней защитной голограммой устанавливается эмульсионной стороной к фоторезисту. Таким образом, защитная голограмма регистрируется на голограмму с видимым изображением методом наложения. После получения обеих голограмм производится проявление фоторезиста. Затем изготавливается металлическая матрица и производится тиражирование голограмм.

Возможность считывания голограмм, скопированных описанным способом, была проверена экспериментально.

Устройство считывания скрытого изображения. Устройство автоматического контроля подлинности голограмм представлено на рис. 8. Коллимированный луч полупроводникового лазера 1 направляется на голограмму 2. Закодированное изображение, восстановленное с голограммы, проходит сквозь декодирующую маску 3 (это копия маски, использовавшейся при записи) и попадает на матричный фотоприемник 4. В результате корректировки декодирующей маской волнового фронта, восстановленного с голограммы, на входе матричного фотоприемника создается неискаженное изображение матрицы, зарегистрированное на защитной голограмме.

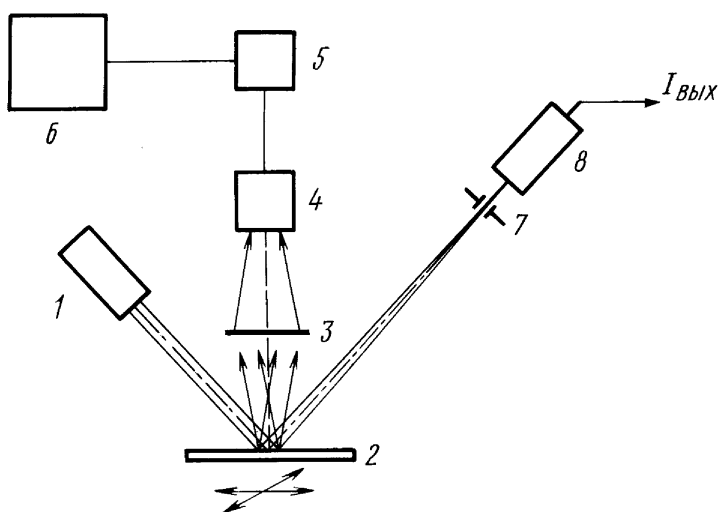


Рис. 8. Схема устройства считывания скрытого изображения:

1 — полупроводниковый лазер; 2 — голограмма; 3 — декодирующая фазовая маска; 4 — матричный фотоприемник; 5 — электронный блок; 6 — компьютер; 7 — микродиафрагма; 8 — фотоприемник системы позиционирования голограммы

Изображение, полученное на защитной голограмме, представляет собой матрицу круглых ячеек, расположенных в узлах равномерной квадратной сетки с количеством узлов $N \times N$, с четырьмя реперами, расположенными по углам матрицы. С целью повышения надежности проверки подлинности голограммы вводится дополнительная степень защиты — цифровое кодирование информации в скрытом изображении. С этой целью из всего массива ячеек информационной матрицы заранее выбираются номера ячеек, в которые записывается цифровой идентификационный код. Информация, зарегистрированная в остальных ячейках, не используется для идентификации голограммы.

Для точного позиционирования голограммы используется ветвь позиционирования, в которой восстановленное с голограммы некодированное изображение проходит через диафрагму 7 и попадает на приемник 8. По сигналу приемника судят о точности установки голограммы.

Считанное фотоприемной матрицей изображение через электронный блок 5 вводится в компьютер 6 для последующей цифровой обработки.

При обработке изображения учитывается возможность появления погрешностей, связанных с неточной ориентацией фотоприемной матрицы относительно изображения, а также с шумами в изображении, создаваемыми голограммой и приводящими к паразитной модуляции яркости считанного изображения.

Процесс обработки изображения в компьютере включает следующие этапы:

- определяется средняя яркость считанного изображения, для этого суммируются видеосигналы от всех элементов фотоприемной матрицы и результат ослабляется соответственно общему числу элементов;

- эмпирически задается пороговый уровень суммы видеосигналов от элементов в пределах области, равной по форме и по величине области, занимаемой одним репером;

- производится поиск в видеокадре областей, суммарная яркость которых превышает пороговую, и вычисляются координаты центров таких областей;

- из найденного множества “ярких” областей выбираются две пары объектов, расстояние между которыми в видеокадре максимальное; эти объекты являются реперами, координаты которых были найдены на предыдущем этапе;

- по координатам реперов вычисляются координаты узлов информационной матрицы, и в соответствии со считанным видеокадром определяется яркость изображения в каждом из этих узлов как сум-

ма видеосигналов от элементов фотоприемной матрицы, находящихся внутри круговой области, соответствующей данному информационному элементу; если найденная яркость выше пороговой, то узлу присваивается уровень «1», а если она ниже пороговой, — уровень «0».

Полученная в результате информативная матрица содержит код, в соответствии с которым извлекается эталонное изображение из базы данных изображений (каждому эталонному изображению базы данных соответствует своя кодовая комбинация в матрице).

Эталонное изображение извлекается из базы данных следующим образом. Из информативной матрицы производится выборка элементов с заранее заданными номерами, из которых формируется двоичное слово. Полученное двоичное слово сравнивается с хранящимся в компьютере эталонным словом с помощью алгебраической операции “исключающее *или*” (XOR). При совпадении слов выдается двоичный адрес, по которому из базы данных, хранящейся на CD-диске, извлекается эталонное изображение (например, логотип), которое отображается на экране монитора компьютера. На этом процедура обработки изображения заканчивается.

Описанные в настоящей работе способы изготовления защитных голограмм и устройства для их контроля могут быть использованы для повышения эффективности защиты голограмм от подделки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Patent USA № 5.499.116. Encoded hologram for producing a machine readable and a human readable image / J. E. Wreede et al. – Publ. 12.03.1996.
2. Патент РФ № 2110411. Голографическое устройство для воспроизведения кодирующих элементов / А.Д. Гальперн. – Оpubл. 10.05.1898.
3. Бобринев В. И., Гуланян Э. Х. Голограммы с протяженным опорным источником // Квантовая электроника. – 1971. – Вып. 4.
4. Song san Lai. Security holograms using an encoded reference wave // Opt. Eng. – 1996. – V. 35. – № 9. – P. 2470–2472.
5. Refregier P., Javidi B. Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding // Opt. Lett. – 1995. – V. 20. – № 7. – P. 767–769.
6. Javidi B., Sergeant A., Zhang G., Guibert L. Fault tolerance properties of a double phase encoding encryption technique // Opt. Eng. – 1997. – V. 36. – № 4. – P. 992–998.
7. Javidi B., Zhang G., Li J. Experimental demonstration of the random phase encoding technique for image encryption and security verification // Opt. Eng. – 1996. – V. 35. – № 9. – P. 2506–2512.
8. Патент РФ № 2103741. Устройство для контроля подлинности голограмм // Л.А. Бондарев, С.В. Куракин, А.В. Курилович, С.Б. Одинокоев, А.Ф. Смык. – Оpubл. 27.01.1998.
9. Patent USA № 5.623.347. Holograms for security markings / D.J. Pizzanelly. – Publ. 22.04.1997.

Статья поступила в редакцию 22.04.2003

Владимир Иванович Бобринев родился в 1936 г., окончил в 1958 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Теоретические основы оптоэлектроники” МИРЭА. Автор около 140 научных работ, в основном, в области голографии.

V.I. Bobrinev (b. 1936) graduated from the Moscow State University n.a. M.V. Lomonosov. Ph.D. (Eng.), ass. professor of “Theoretical Background of Optoelectronics” department of the Moscow Institute for Radio Electronics and Automatics. Author of about 140 publications, mainly, in the field of holography.



Дмитрий Сергеевич Лушников родился в 1978 г., окончил в 2002 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 5 научных работ в области оптоэлектроники.

D.S. Lushnikov (b. 1978) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2002. Post-graduate of “Laser and Optical and Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 5 publications in the field of optoelectronics.

Александр Игоревич Николаев родился в 1978 г., окончил в 1999 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Генеральный директор ООО “Голография-Сервис”.

A.I. Nikolaev (b. 1978) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1999. General director of the joint-stock company “Golografiya-Servis”.



Сергей Борисович Одинокоев родился в 1950 г., окончил в 1973 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор около 130 научных работ в области оптоэлектронной обработки информации и голографии.

S.B. Odinokov (b. 1950) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1973. Ph. D. (Eng.), ass. professor of “Laser and Optical and Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of about 130 publications in the field of optoelectronic data processing and holography.



Иван Константинович Цыганов родился в 1978 г., окончил в 2002 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 5 научных работ в области оптоэлектроники.

I.K. Tsyganov (b. 1978) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2002. Post-graduate of “Laser and Optical and Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 5 publications in the field of optoelectronics.