

УДК 681.785

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЦИФРОВЫХ ЗАЩИТНЫХ ГОЛОГРАММ ДЛЯ ЭКСПЕРТНОГО АНАЛИЗА И ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ ИХ КАЧЕСТВА

© В. П. Бессмельцев, В. В. Вилейко, М. В. Максимов

*Институт автоматизи и электрометрии СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: bessmelt@iae.nsk.su
vileykoy@iae.nsk.su*

Разработаны метод и устройство измерения основных параметров синтезированных защитных голограмм с использованием возможностей микроскопии микронного разрешения и дифрактометрии с мультиугловой системой освещения. При последовательном освещении под различными углами коллимированными монохроматическими источниками света поверхности голограммы в поле наблюдения специального цифрового микроскопа и обработке полученных изображений формируется информационная карта поверхности, которая содержит данные об основных параметрах «голопикселей», составляющих структуру защитной голограммы (шаге дифракционных решёток, их угловой ориентации, нормированной интенсивности отражённого света), а также совмещённое с указанной картой изображение поверхности голограммы в рассеянном свете. Перемещениями исследуемой голограммы в плоскости фокуса цифрового микроскопа на расстояние, равное полю наблюдения микроскопа, с последующей «сшивкой» полученных данных достигается построение информационной карты всей поверхности голограммы с микронным разрешением.

Ключевые слова: дифракционная решётка, голопиксель, цифровая голограмма, контроль подлинности.

DOI: 10.15372/AUT20200202

Введение. Широкое распространение для защиты изделий от несанкционированного копирования получили плоские синтезированные голограммы, состоящие из множества оптических микроструктур, часто называемых «голопикселями», размер которых выбирается меньшим, чем может различить невооружённый глаз наблюдателя (10–100 мкм), а площадь внутри контура каждого голопикселя заполнена дифракционной решёткой с типичным диапазоном значений периода $d = 0,5\text{--}1,5$ мкм, углом ориентации штрихов решётки δ относительно выбранного направления на поверхности голограммы в диапазоне 0–180°, как показано на рис. 1, а [1]. При записи защитной цифровой голограммы могут быть сформированы микроструктурные элементы практически любой формы, например плотные упаковки из голопикселей шестиугольной формы или фигур Эшера.

Для повышения степени защиты голограммы могут содержать микротексты с размерами букв 5–150 мкм, в том числе с заполнением дифракционными решётками, изображения с тонкими (5–10 мкм) линиями и другими художественными и защитными элементами [1, 2].

Для оперативного контроля качества и подлинности защитных голограмм чаще всего используются методы регистрации изображений, формируемых исследуемой голограммой в одном или нескольких порядках дифракции при освещении голограммы одним [3, 4] или несколькими источниками с разными угловыми направлениями осей освещающих пучков к её поверхности [5, 6]. При обработке полученных данных производится сравнение зарегистрированных дифракционных изображений — контролируемого образца голограммы с изображениями, полученными от эталонной голограммы при тех же условиях освещения и регистрации.

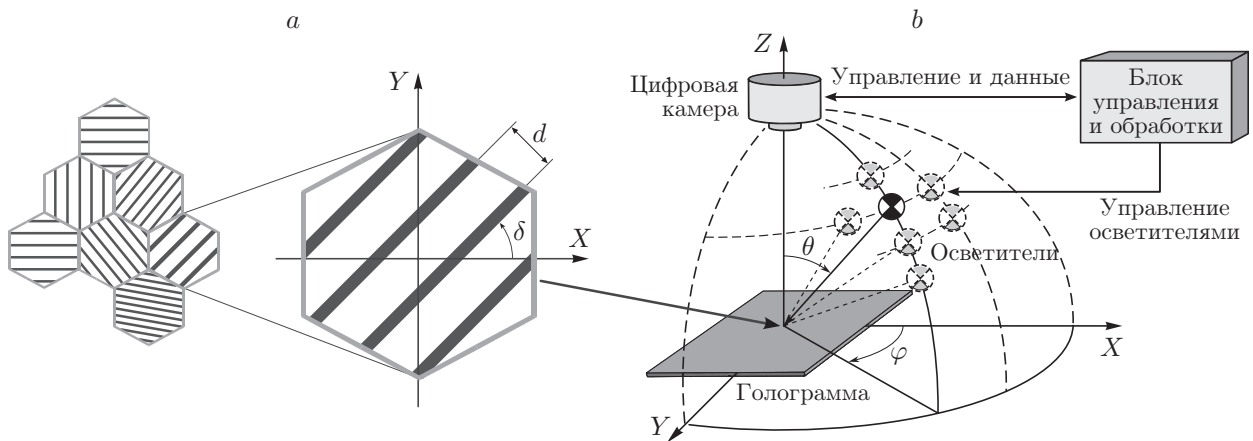


Рис. 1. Фрагменты поверхности плоской цифровой голограммы и структура устройства контроля голограмм: *a* — пример поверхности голограммы, содержащей голопиксели шестиугольной формы с заполнением дифракционной решёткой с периодом d и углом ориентации штрихов δ относительно выбранного направления оси X ; *b* — структура устройства проверки подлинности голограммы с несколькими источниками освещения, расположенными под разными азимутальными и зенитными углами

Типичная структура автоматизированного устройства контроля голограмм, использующего несколько боковых осветителей, приведена на рис. 1, *b*. Исследуемая голограмма последовательно освещается под разными азимутальными φ и зенитными θ углами. Синхронно с переключением угла освещения цифровая камера, установленная перпендикулярно к плоскости голограммы, регистрирует дифракционные изображения поверхности и направляет их в блок управления и обработки.

Из зарегистрированных изображений выбранной зоны или всей поверхности голограммы формируется упорядоченный стек оцифрованных изображений одинакового размера, где количество изображений соответствует количеству углов, под которыми производятся освещение и сравнение изображений, полученных для исследуемого и эталонного образцов голограммы на том же устройстве. Быстрое сравнения может быть осуществлено по вычисленным интегральным параметрам зарегистрированных изображений, например, по форме функции распределения освещённости соответствующей области поверхности голограммы [7, 8].

Недостатком данного метода является невозможность определения таких параметров составляющих голограмму структурных элементов (голопикселей), как их геометрические размеры, форма и расположение на поверхности голограммы, периоды и углы ориентации дифракционных решёток, заполняющих голопиксели. Это снижает возможности применения данного метода в задачах экспертного анализа и особенно в задачах контроля качества изготовления голограмм, так как нельзя осуществить сравнение исследуемого образца голограммы с её САД-моделью, иным описанием проекта голограммы или изображением высокого разрешения, полученным с помощью микроскопии.

Теоретически методы конфокальной и интерференционной микроскопии позволяют провести прямое измерение размера и формы голопикселя, периода, угла наклона и глубины микрорешёток, составляющих структуру защитной синтезированной голограммы. Основным препятствием на пути применения данных методов является относительно низкое быстродействие. Например, типичное время сканирования участка поверхности голограммы размером 100×100 мкм конфокальным микроскопом составляет 2–10 с, следовательно,

сканирование поверхности размером 10×10 мм занимает не менее 3 ч. при идеальной плоскости поверхности. Кроме того, оптическая микроскопия высокого разрешения даёт хорошие результаты на так называемых «мастер-оригиналах» голограмм [1], однако не так эффективна на голограммах массового тиража, покрытых защитной полимерной плёнкой, которая вносит искажения, значительно ухудшающие пространственное разрешение [9].

Целью данного исследования являлась разработка метода и аппаратно-программных средств контроля качества защитных голограмм и их экспертного анализа, совмещающих преимущества дифракционных и микроскопических методов, позволяющих проводить измерения в выбранной области или на всей поверхности исследуемой голограммы размером до $1\text{--}2$ дм² её основных характеристик: положения, размера и формы голопикселей и дополнительных защитных элементов с микронным разрешением, периода дифракционной решётки внутри голопикселя, угла ориентации решётки и нормированной интенсивности отражённого света. Быстродействие системы должно обеспечивать анализ и получение характеристик зоны голограммы размером 10×10 мм за 2–10 мин.

Описание метода. Основные характеристики плоской синтезированной голограммы можно определить, измерив параметры каждого голопикселя в координатах (x, y) , привязанных к поверхности голограммы: $S_i(x, y)$ — форма и положение контура i -го голопикселя, d_i — период микрорешётки внутри контура, δ_i — угол ориентации микрорешётки относительно выбранного направления на поверхности голограммы. Ещё одним важным параметром микрорешётки голопикселя является дифракционная эффективность, которая зависит от глубины и формы профиля микрорешётки. При создании системы контроля голограмм схема цифрового микроскопа была модифицирована так, чтобы обеспечить определение указанных параметров голопикселей, используя дифракционные изображения при последовательном мультиугловом освещении, не ухудшая при этом оптическое разрешение микроскопа.

На рис. 2 приведена схема хода лучей модифицированного оптического микроскопа с микрообъективом, скорректированным на бесконечность, тубусной линзой, переключаемыми источниками коллимированного монохроматического бокового освещения (осветитель 1, осветитель 2) и дополнительной диафрагмой, установленной в задней фокальной плоскости микрообъектива. Рисунок иллюстрирует формирование изображения плоской отражательной синтезированной голограммы, когда падающий и отражённый пучки, а также регистрируемый дифракционный порядок расположены в плоскости рисунка, т. е. азимутальный угол φ_{in} направления излучения осветителей 1 и 2 ортогонален направлению штрихов дифракционной решётки голопикселя. Более общий случай, когда это условие не соблюдается, будет рассмотрен далее. Учитывая, что оптическая ось микрообъектива микроскопа расположена по нормали к поверхности голограммы, свет, дифрагированный на микрорешётке с периодом d , будет зарегистрирован фотоматрицей микроскопа, если зенитный угол θ_{in} освещающего поверхность исследуемой голограммы источника близок к углу, определяемому из основной формулы для углового направления на максимумы интенсивности плоской дифракционной решётки:

$$\theta_{in} = \arcsin(m\lambda/d), \quad (1)$$

где m — целое число, означающее порядок дифракции, λ — длина волны осветителя.

На рис. 2 при включённом осветителе 1 (угол θ_{in1}) выполняется условие (1) и пучки I и I' , соответствующие регистрируемому дифракционному порядку, распространяются в направлении, перпендикулярном поверхности голограммы, проходят без ослабления через диафрагму и попадают на тубусную линзу, которая строит изображение голопикселя на фотоматрице камеры. За условие прохождения пучка, соответствующего дифракционному максимуму, через диафрагму без значительного ослабления можно принять требование, чтобы центр пучка в плоскости диафрагмы не выходил за границы её отверстия.

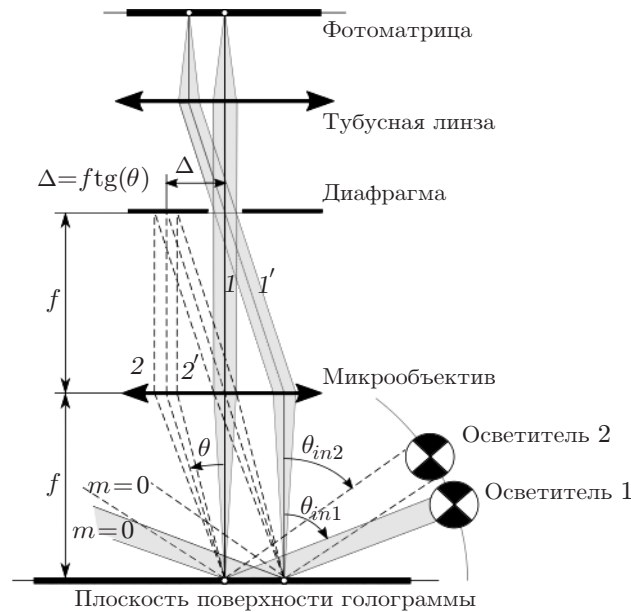


Рис. 2. Схема хода лучей в цифровом микроскопе с дополнительной диафрагмой и боковыми переключаемыми осветителями

Если условие (1) не выполняется (для угла θ_{in2} и пучков 2 и 2' на рис. 2), угол направления на дифракционный максимум регистрируемого порядка дифракции θ не равен нулю, тогда центр пучка регистрируемого дифракционного порядка в плоскости диафрагмы смещён относительно центра отверстия диафрагмы на расстояние $\Delta = f \operatorname{tg} \theta$, где f — фокусное расстояние объектива. При этом, если Δ больше радиуса отверстия диафрагмы r_a , пучок задерживается или существенно ослабляется диафрагмой.

Таким образом, зная точное угловое положение коллимированного осветителя $\varphi_{in}, \theta_{in}$, при котором интенсивность отражённого от структурного элемента голограммы света достигает максимального значения по сравнению с другими угловыми положениями источников излучения, можно определить угол ориентации штрихов микрорешётки данного элемента (голопикселя) и, используя формулу (1), период микрорешётки d . На рис. 2 видно, что точность определения максимума распределения интенсивности в регистрируемом дифракционном порядке зависит от размера отверстия диафрагмы. Уменьшение отверстия диафрагмы обеспечивает более точное выделение углового положения максимумов распределения интенсивности, но при этом ухудшает пространственное разрешение изображения формы голопикселей, пропорциональное NA (цифровой апертуре) микрообъектива и размеру отверстия диафрагмы. Рассмотрим условия прохождения через диафрагму пучков в регистрируемом порядке дифракции при произвольных угловых направлениях освещающих пучков как по зенитному, так и азимутальному углам. Для этого определим соотношения, связывающие в сферической системе координат угловые направления φ, θ на дифракционные максимумы и угловые направления $\varphi_{in}, \theta_{in}$ освещающего пучка, падающего на поверхность структуры с периодом d и углом ориентации штрихов структуры δ .

На рис. 3, а освещающий пучок проходит из точки R_0 в точку O , составляя углы $\alpha_{in}, \beta_{in}, \gamma_{in}$ с осями декартовой системы координат X, Y, Z соответственно. Луч, совпадающий с направлением на дифракционный максимум порядка m , проходит из точки O через точку R , составляя углы α, β, γ с осями декартовой системы координат X, Y, Z соответственно. Точки R_0, R являются точками пересечения указанных лучей со сферой единичного радиуса с центром в точке O . Проекциями точек R_0, R на плоскость X, Y

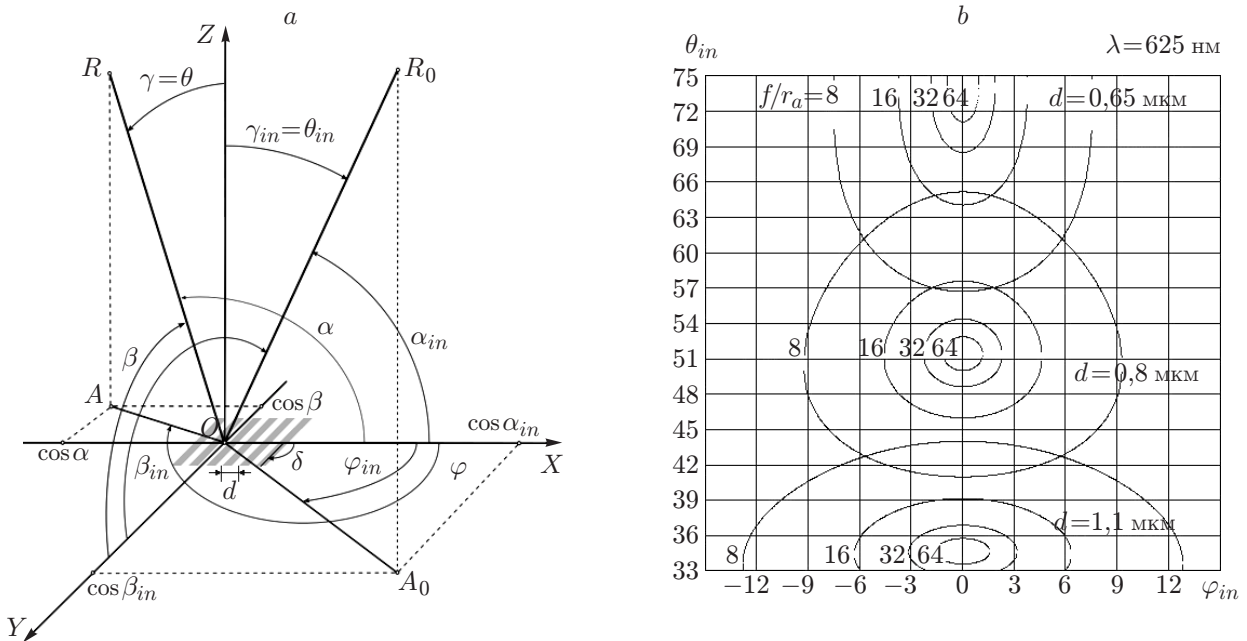


Рис. 3. Дифракция на решётке при произвольных угловых направлениях освещающих пучков: *a* — угловые положения освещающих пучков и направления на дифракционные максимумы; *b* — пример вычисления областей выполнения условия прохождения пучков, соответствующих дифракционным максимумам, через диафрагму при разных значениях параметров *d* и *f/r_a* в координатах угловых направлений освещающих пучков φ_{in} , θ_{in}

являются точки A_0 , A , для которых справедливы выражения:

$$|OA_0| = \frac{\cos \beta_{in}}{\sin \varphi_{in}} = \frac{\cos \alpha_{in}}{\cos \varphi_{in}} = |OR_0| \sin \varphi_{in}, \quad |OA| = \frac{\cos \beta}{\sin \varphi} = \frac{\cos \alpha}{\cos \varphi} = |OR| \sin \varphi.$$

Учитывая $|OR| = |OR_0| = 1$, $\gamma_{in} = \theta_{in}$, $\gamma = \theta$ и $\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1$, можно записать соотношения, связывающие угловые направления лучей, выходящих из точки O и проходящих через точки R_0 , R при записи в сферической системе координат и в системе направляющих косинусов:

$$\begin{cases} \cos \alpha_{in} = \sin \theta_{in} \cdot \cos \varphi_{in}, \\ \cos \beta_{in} = \sin \theta_{in} \cdot \sin \varphi_{in}, \\ \gamma_{in} = \theta_{in}; \end{cases} \quad \begin{cases} \tan \varphi = \cos \beta / \cos \alpha, \\ (\sin \theta)^2 = (\cos \alpha)^2 + (\cos \beta)^2, \theta = \gamma. \end{cases} \quad (2)$$

Расположим решётку в плоскости X, Y так, чтобы штрихи решётки были ориентированы параллельно оси Y , а $\delta = \pi/2$, тогда для отражательной решётки можно записать

$$\begin{cases} \cos \alpha_{in} + \cos \alpha = m\lambda/d, \\ \cos \beta = -\cos \beta_{in}, \\ (\cos \alpha)^2 + (\cos \beta)^2 + (\cos \gamma)^2 = 1 \end{cases} \quad (3)$$

и, используя (2) и (3), сформулировать соотношение между φ , θ и φ_{in} , θ_{in} :

$$\begin{cases} \varphi = \text{angle} \left(- \frac{\sin \theta_{in} \cdot \sin \varphi_{in}}{m\lambda/d - \sin \theta_{in} \cdot \cos \varphi_{in}} \right); \\ \theta = \frac{1}{2} \cos^{-1} \left[1 - 2 \left((\sin \theta_{in} \cdot \sin \varphi_{in})^2 + \left(\frac{m\lambda}{d} - \sin \theta_{in} \cdot \cos \varphi_{in} \right)^2 \right) \right], \end{cases} \quad (4)$$

где функция $\text{angle}(a/b)$ определена в диапазоне значений $[0, 2\pi]$ и задана как

$$\text{angle} \left(\frac{a}{b} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{a}{b} \right) + \begin{cases} 0, & a \geq 0, \\ \pi, & a < 0. \end{cases}$$

В случае, когда дифрагированный пучок регистрируется в направлении, перпендикулярном поверхности периодической структуры, как показано на рис. 2, условие прохождения пучка, соответствующего дифракционному максимуму, через диафрагму без значительного ослабления, можно записать следующим образом:

$$\tan \theta \leq r_a/f, \quad (5)$$

где r_a — радиус отверстия диафрагмы, расположенной в задней фокальной плоскости микрообъектива, f — фокусное расстояние микрообъектива. С использованием выражения для θ в (4) условие (5) может быть представлено относительно φ_{in} , θ_{in} как

$$\frac{(\sin \theta_{in} \cdot \sin \varphi_{in})^2 + (m\lambda/d - \sin \theta_{in} \cdot \cos \varphi_{in})^2}{1 - [(\sin \theta_{in} \cdot \sin \varphi_{in})^2 + (m\lambda/d - \sin \theta_{in} \cdot \cos \varphi_{in})^2]} \leq \left(\frac{r_a}{f} \right)^2. \quad (6)$$

Применяя неравенство (6), можно показать, что область допустимых значений φ_{in} определена как

$$|\sin \varphi_{in}| \leq \frac{d}{m\lambda} \sqrt{\frac{(r_a/f)^2}{1 + (r_a/f)^2}},$$

а неравенство (6) выполняется внутри областей, ограниченных кривой, заданной уравнением

$$\sin \theta_{in} - \frac{m\lambda}{d} \cos \varphi_{in} \pm \sqrt{\frac{(r_a/f)^2}{1 + (r_a/f)^2} - \left(\frac{m\lambda}{d} \sin \varphi_{in} \right)^2} = 0. \quad (7)$$

На рис. 3, *b* представлены результаты моделирования кривых, определяемых уравнением (7) и ограничивающих области выполнения условия (5) при реальных параметрах оптического тракта рассмотренной далее реализации устройства (микрообъектив 5X, NA = 0,14, фокусное расстояние 40 мм, дискреты угловых положений осветителей $\Delta\varphi_{in}$ и $\Delta\theta_{in}$, равные 3° по обеим координатам). Значение параметра $f/r_a = 8$ в данном случае соответствует отсутствию диафрагмы, роль диафрагмы выполняет выходной зрачок микрообъектива. Результаты расчёта представлены в координатах угловых направлений φ_{in} , θ_{in} , при этом узлы координатной сетки на рисунке соответствуют дискретным угловым положениям освещающих пучков, установленным в данной реализации.

По кривым в плоскости φ_{in} , θ_{in} (см. рис. 3, *b*) можно оценить область ошибок определения углов дифракции и, следовательно, параметров решётки d и δ в зависимости

от значения f/r_a при определении углов дифракции по критерию поиска максимума интенсивности, зарегистрированной фотоприёмником выбранного дифракционного порядка для различных значений углов освещения φ_{in} , θ_{in} . Например, при значении параметра $f/r_a = 16$ и длине волны осветителя 625 нм при дифракции на структуре с периодом штрихов $d = 0,8$ мкм ошибка измерения углов дифракции не превышает $\pm 3^\circ$.

При правильно выбранных параметрах оптической схемы цифрового микроскопа метод, использующий последовательное освещение под разными углами поверхности голограммы коллимированными квазимонохроматическими источниками, регистрацию фотоматрицей получаемых изображений и их последующую обработку, позволяет выделить информацию об основных характеристиках каждого голопикселя. Точность метода определяется количеством задаваемых углов освещения, шумовыми свойствами оптико-электронного приёмного тракта и применёнными алгоритмами обработки данных.

Реализация метода. Функциональная схема устройства измерения параметров голограмм представлена на рис. 4, а. Исследуемая голограмма 4 устанавливается на закреплённом на основании 5 моторизированном двухкоординатном (X, Y) столе 13, позволяющем перемещать голограмму в плоскости фокуса блока регистрации изображений 3. Этот блок содержит микрообъектив 8 и тубусную линзу 11, размещённые по схеме прямого микроскопа, регулируемую диафрагму 9, установленную в задней фокальной плоскости микрообъектива, скоростную цифровую фотокамеру 6, светоделитель 10 и осветитель микроскопа 15. Мультиугловой осветитель 1 содержит набор некогерентных коллимированных квазимонохроматических источников излучения 2, конструктивно расположенных на поверхности полусферы, помещённой над поверхностью исследуемой голограммы. В зависимости от требований к диапазону измеряемых периодов и к точности определения

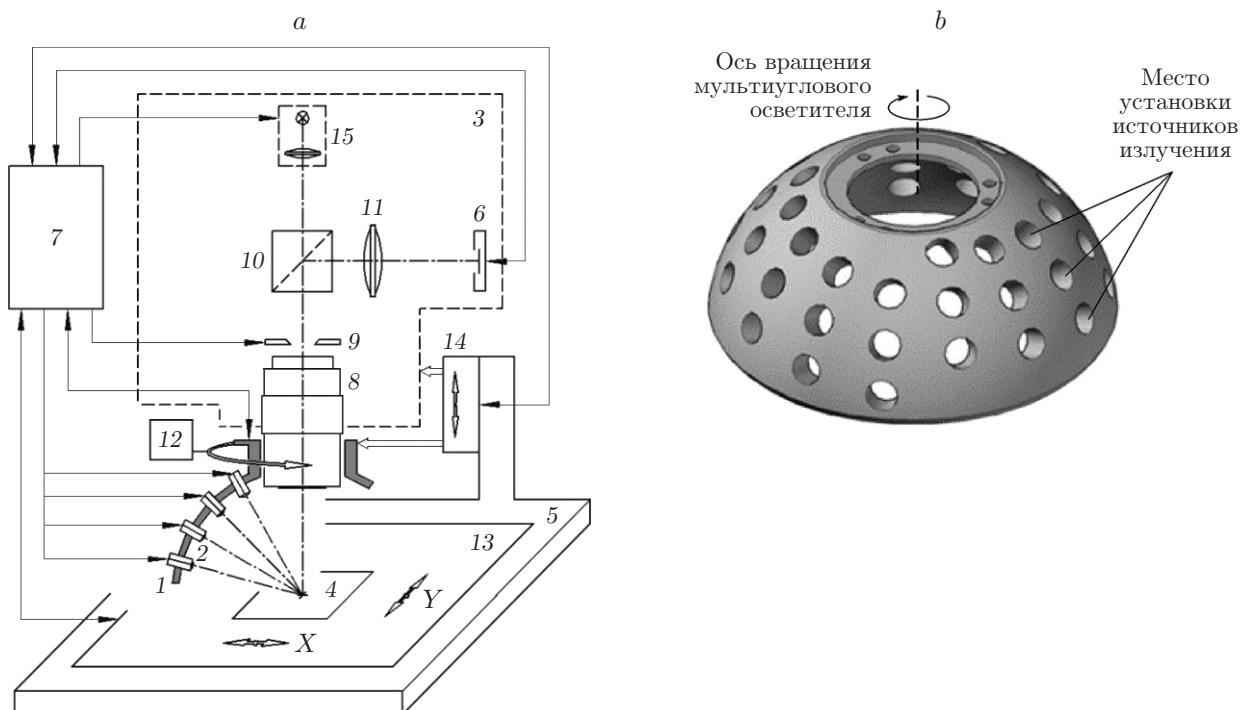


Рис. 4. Аппаратная реализация устройства: а — функциональная схема устройства; б — конструкция направляющего держателя источников излучения мультиуглового осветителя. В отверстия устанавливаются светодиодные коллимированные источники излучения. Узел вращения не показан

периодов и ориентации микрорешёток, а также к быстродействию устройства конкретная реализация мультиуглового осветителя может содержать разное количество источников излучения: как источники излучения одного типа с одной длиной волны, так и комбинацию источников излучения, работающих на разных длинах волн. Приведённые здесь характеристики устройства получены для конструкций мультиугловых осветителей с 72 источниками излучения с длинами волн 465 и 870 нм. Примерный вид конструкции держателя источников излучения мультиуглового осветителя показан на рис. 4, *b*. Она выполнена так, чтобы угловые направления источников излучения пересекались в точке, совпадающей с фокусом микрообъектива 8 блока регистрации изображений. Совмещение указанной точки с поверхностью исследуемой голограммы достигается с помощью моторизованного привода линейного перемещения 14, механически связанного с основанием 5, который одновременно перемещает мультиугловой осветитель и блок регистрации изображений в направлении, совпадающем с нормалью к поверхности исследуемой голограммы и оптической осью микрообъектива.

В связи с тем, что для обеспечения необходимой точности требуется применение большого количества отдельных осветителей, установка которых в устройстве с приемлемыми габаритами конструктивно затруднена, в узле мультиуглового осветителя использован привод 12, вращающий массив осветителей по азимутальному углу φ , а источники излучения расположены таким образом, чтобы при вращении осветителя они занимали промежуточные угловые положения как по θ , так и по φ между угловыми положениями соседних источников излучения.

Это позволяет получить дополнительные значения углов освещения объекта с требуемой дискретностью угла между соседними по азимутальному углу осветителями. При работе устройства управление и синхронизацию осуществляет блок управления и обработки данных 7, который обеспечивает управление приводами, источниками излучения мультиуглового осветителя и осветителя микроскопа, скоростной цифровой фотокамерой, а также захват, сохранение и обработку видеоданных, получаемых от скоростной фотокамеры. Осветитель 15 используется для получения изображения поверхности голограммы в рассеянном отражённом свете, для определения координат области интереса и фокусировки блока регистрации изображений на поверхности голограммы. Светоделитель 10 предназначен для отделения приёмного канала блока регистрации изображений от осветительного канала 15.

При работе системы в дифракционном режиме производится последовательное освещение поверхности исследуемой цифровой голограммы каждым из источников излучения мультиуглового осветителя, расположенным под известными углами (θ_i, φ_j) , и синхронная регистрация скоростной цифровой фотокамерой полутоновых изображений $G_{i,j}(x_{px}, y_{px})$. Затем производится поворот мультиуглового осветителя на угол $\Delta\varphi_{in}$ и цикл повторяется до тех пор, пока не будут задействованы все возможные значения угловых положений осветителей (θ_i, φ_j) при соответствующих дискретах установки углов освещения $\Delta\theta_{in}$, $\Delta\varphi_{in}$.

Из полученного стека отдельных последовательных изображений $G_{i,j}(x_{px}, y_{px})$ формируется характеристическое изображение того же размера: $G_{CH}(x_{px}, y_{px})$. Под характеристическим изображением понимается информационная карта поверхности голограммы, которая содержит несколько (по числу параметров) слоёв данных основных параметров голопикселей, составляющих структуру защитной голограммы, например: слой периода дифракционных решёток, слой угловой ориентации решёток, слой нормированной интенсивности отражённого света. Для каждого пикселя характеристического изображения с координатами (x_{px}, y_{px}) определяется пара углов расположения источников излучения $\varphi^m(x_{px}, y_{px})$, $\theta^m(x_{px}, y_{px})$, при которых интенсивность зарегистрированного сигнала

для этого пикселя в исходном стеке изображений была максимальна и равна I^m , и каждому пикселю ставятся в соответствие следующие параметры: нормированная интенсивность I^m , значения угла ориентации δ_1 и периода d_1 штрихов решётки, вычисляемых как

$$d_1 = \lambda / \sin \theta^m, \quad \delta_1 = \varphi^m + \pi/2, \quad (8)$$

где λ — длина волны осветителя.

При выключенном мультиугловом осветителе 1, включённом осветителе 15 и полностью открытой диафрагме 9 регистрируется изображение той же зоны голограммы в рассеянном свете, что даёт возможность зарегистрировать изображение с разрешением, определяемым максимальной апертурой используемого объектива, таким образом уточнить форму голопикселя и повысить качество отображения защитных элементов, которые нанесены на поверхность образца и не являются дифракционными (например, микротекстов). Совместная обработка полученного изображения и стека мультиугловых изображений позволяет получить характеристические изображения $G_{CH}(x_{px}, y_{px})$ с высоким пространственным разрешением.

Для получения характеристического изображения всей голограммы или выбранной области интереса служит двухкоординатный моторизованный стол. Голограмма последовательно перемещается в плоскости фокуса блока регистрации изображений на расстояние, равное или меньшее, чем размер поля зрения блока регистрации изображений, чтобы характеристические изображения зон $G_{CH}(x_{px}, y_{px})$ полностью покрыли указанную область. Последующая программная «сшивка» характеристических изображений зон образует полное характеристическое изображение всей исследуемой поверхности голограммы.

Обработка данных и экспериментальные результаты. При определении углов дифракции использовалось несколько методов обработки полученных стеков изображений для вычисления значений $\varphi^m(x_{px}, y_{px})$ и $\theta^m(x_{px}, y_{px})$.

Первый метод основан на непосредственном поиске максимума зарегистрированной интенсивности для данного пикселя в исходном стеке изображений. Каждому пикселю с координатами (x_{px}, y_{px}) в стеке зарегистрированных при разных углах освещения полутонных изображений $G_{i,j}(x_{px}, y_{px})$ ставится в соответствие таблица размером $i \times j$ зарегистрированных для данного пикселя значений интенсивности $I_{i,j}$. Для каждого пикселя характеристического изображения с координатами (x_{px}, y_{px}) вычисляются $i = k$, $j = t$, при которых зарегистрированное значение интенсивности $I_{k,t}(x_{px}, y_{px}) = I^m(x_{px}, y_{px})$ было максимальным, определяются соответствующие им значения углов освещения $\varphi^m(x_{px}, y_{px}) = \varphi_t$, $\theta^m(x_{px}, y_{px}) = \theta_k$. По соотношениям (8) находятся измеренные значения параметров периода d_1 и угла ориентации δ_1 штрихов решётки, назначаемых данному пикселю характеристического изображения. Возможны различные модификации этого метода, например, когда $\varphi^m(x_{px}, y_{px})$ и $\theta^m(x_{px}, y_{px})$ определяются с использованием взвешенного среднего арифметического значения по двум ближайшим соседним значениям, где после нахождения значений $i = k$, $j = t$, соответствующих максимальному значению интенсивности, $\varphi^m(x_{px}, y_{px})$ и $\theta^m(x_{px}, y_{px})$ вычисляются следующим образом:

$$\varphi^m := \frac{\sum_{j=t-1}^{t+1} \sum_{i=k-1}^{k+1} (I_{i,j} \varphi_j)}{\sum_{j=t-1}^{t+1} \sum_{i=k-1}^{k+1} (I_{i,j})}, \quad \theta^m := \frac{\sum_{j=t-1}^{t+1} \sum_{i=k-1}^{k+1} (I_{i,j} \theta_i)}{\sum_{j=t-1}^{t+1} \sum_{i=k-1}^{k+1} (I_{i,j})}.$$

Второй метод определения $\varphi^m(x_{px}, y_{px})$ и $\theta^m(x_{px}, y_{px})$ предложен для улучшения точности измерения параметров дифракционных элементов и вычислительно более сложный. Он основан на расчёте кросскорреляции таблицы значений интенсивности $I_{i,j}$ для пикселя с координатами (x_{px}, y_{px}) со специально подготовленной в процессе калибровки на

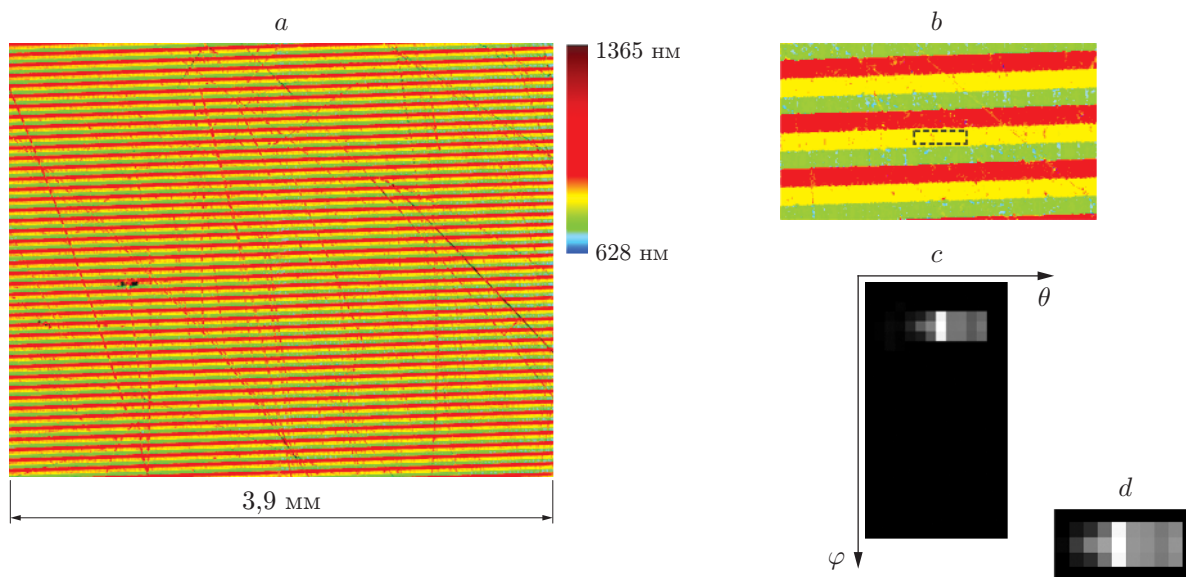


Рис. 5. Алгоритм получения φ - θ -масок усреднённого отклика системы: *a* — карта периода (цвет кодирует период решётки); *b* — увеличенное изображение участка карты периода (прямоугольник, обозначенный штрихами, указывает область, для которой вычисляется усреднённый φ - θ -отклик); *c* — полученный усреднённый φ - θ -отклик, большая яркость соответствует большей средней интенсивности при данных направлениях осветителей; *d* — фрагмент φ - θ -маски ($\theta = 30^\circ$, $\varphi = 30^\circ$) φ - θ -отклика

тестовом объекте маской I_m . В качестве тестового объекта использовалась голограмма, состоящая из чередующихся полос шириной 25 мкм трёх дифракционных решёток с одним и тем же углом ориентации штрихов и различными периодами: 689, 818 и 931 нм.

При сканировании тестового объекта с применением вышеописанного алгоритма поиска максимума строится слой характеристического изображения, показывающий карту распределения параметра периода голограммы (рис. 5, *a*). На полученном изображении выделяется область, содержащая близкие значения периода решётки (рис. 5, *b*), и затем определяется усреднённое значение интенсивности по данной области для каждой пары углов засветки φ_{in} , θ_{in} . Полученная зависимость между усреднённой интенсивностью и углами засветки, которую для краткости назовём « φ - θ -отклик», представлена в виде изображения и показана на рис. 5, *c*.

Для того чтобы снизить объём вычислений, на φ - θ -отклике выделяется характерная область в окрестности максимума по интенсивности размером $(2K+1) \times (2L+1)$ с центром в расположении средневзвешенного значения интенсивности (рис. 5, *d*), содержащая данные, отличные от нуля или заданного малого порога. Выделенную область φ - θ -отклика с отброшенными незначимыми данными назовём « φ - θ -маской» и обозначим $H_{u,v}$, где u, v принимают целые значения $(-K, \dots, K)$ и $(-L, \dots, L)$ соответственно; $(2K+1) \times (2L+1)$ — размер маски по координатам θ и φ . Использование не всего φ - θ -отклика, а лишь меньшей по размеру φ - θ -маски позволяет сократить объём вычислений пропорционально отношению площадей φ - θ -маски и φ - θ -отклика.

После определения φ - θ -маски для каждого пикселя характеристического изображения с координатами (x, y) рассчитываются значения взаимной нормализованной корреляции

Т а б л и ц а

Заданные периоды на тест-объекте, нм	Прямое измерение с помощью конфокального микроскопа LSM700 (Zeiss)	Алгоритм максимума	Корреляционный алгоритм
		(среднеквадратическое отклонение)	
689	680	699 (19,15)	695 (9,35)
818	807	853 (4,38)	793 (9,68)
931	923	1013 (19,73)	935 (2,46)

$R(i, j)$ соответствующего этому пикселю φ - θ -отклика $I_{i, j}$ и маски $H_{u, v}$ по формуле

$$R(i, j) = \frac{\sum_{u=-K}^K \sum_{v=-L}^L (I_{i, j} - \mu_{Im})(H_{i+u, j+v} - \mu_h)}{\sqrt{\sum_{u=-K}^K \sum_{v=-L}^L (I_{i, j} - \mu_{Im})^2} \sqrt{\sum_{u=-K}^K \sum_{v=-L}^L (H_{i+u, j+v} - \mu_h)^2}},$$

где μ_h — однократно вычисляемое усреднённое значение элементов маски $H_{u, v}$; μ_{Im} — усреднённое значение элементов $I_{i, j}$ в области их пересечения с текущим положением маски $H_{u, v}$, вычисляемое при каждом шаге изменения положения маски. Углы φ^m, θ^m для пикселя с координатами (x, y) определяются как углы, соответствующие значениям $i = k, j = t$, при которых достигается максимум функции $R(i, j)$.

Сравнение результатов определения периода штрихов решётки с применением указанных методов на вышеописанном тестовом объекте представлено в таблице.

Показано, что наилучшие результаты даёт метод кросскорреляции таблицы значений зарегистрированной интенсивности $I_{i, j}$ с подготовленной на тестовом объекте маской I_m , обеспечивающий меньшие ошибки измерения периода дифракционных структур, особенно вблизи границ диапазона значений измеряемых периодов.

Разработанное в составе системы программное обеспечение включает в себя интерфейс управления аппаратной частью и инструменты цифровой обработки полученных данных. Интерфейс управления позволяет устанавливать параметры конфигурации и работы системы, такие как фокусировка блока регистрации изображений, задание зоны сканирования на поверхности голограммы, выбор и управление источниками освещения, приводом вращения мультитуплового осветителя и быстродействующей фотокамерой, регулируемой диафрагмой, осветителем микроскопа.

Инструменты цифровой обработки данных предоставляют выбор алгоритмов обработки и визуализации получаемых данных, а также разнообразные средства работы с полученными характеристическими изображениями. Такое изображение голограммы содержит несколько слоёв в единой системе координат (x_{px}, y_{px}) , которые соответствуют числу отображаемых параметров, например периоду решёток $d(x_{px}, y_{px})$, углу ориентации решёток $\delta(x_{px}, y_{px})$, нормированной интенсивности $I^m(x_{px}, y_{px})$. Пример характеристического изображения образца голограммы приведён на рис. 6. Размер голограммы 25×25 мм, приведённая к объекту дискретность изображения $0,7$ мкм. Полное изображение получено посредством сшивки 252 характеристических изображений зон поверхности голограммы размером $1,79 \times 1,43$ мм и содержит 3 слоя, отображающих параметры $d(x_{px}, y_{px}), \delta(x_{px}, y_{px}), I^m(x_{px}, y_{px})$.

Средства обработки характеристических изображений позволяют выполнять операции сшивки изображений, фильтрации с разными типами фильтров, выделения областей, содержащих микрорешётки с параметрами, принадлежащими заданному диапазону значений, построения гистограмм частоты встречаемости значений выбранного параметра

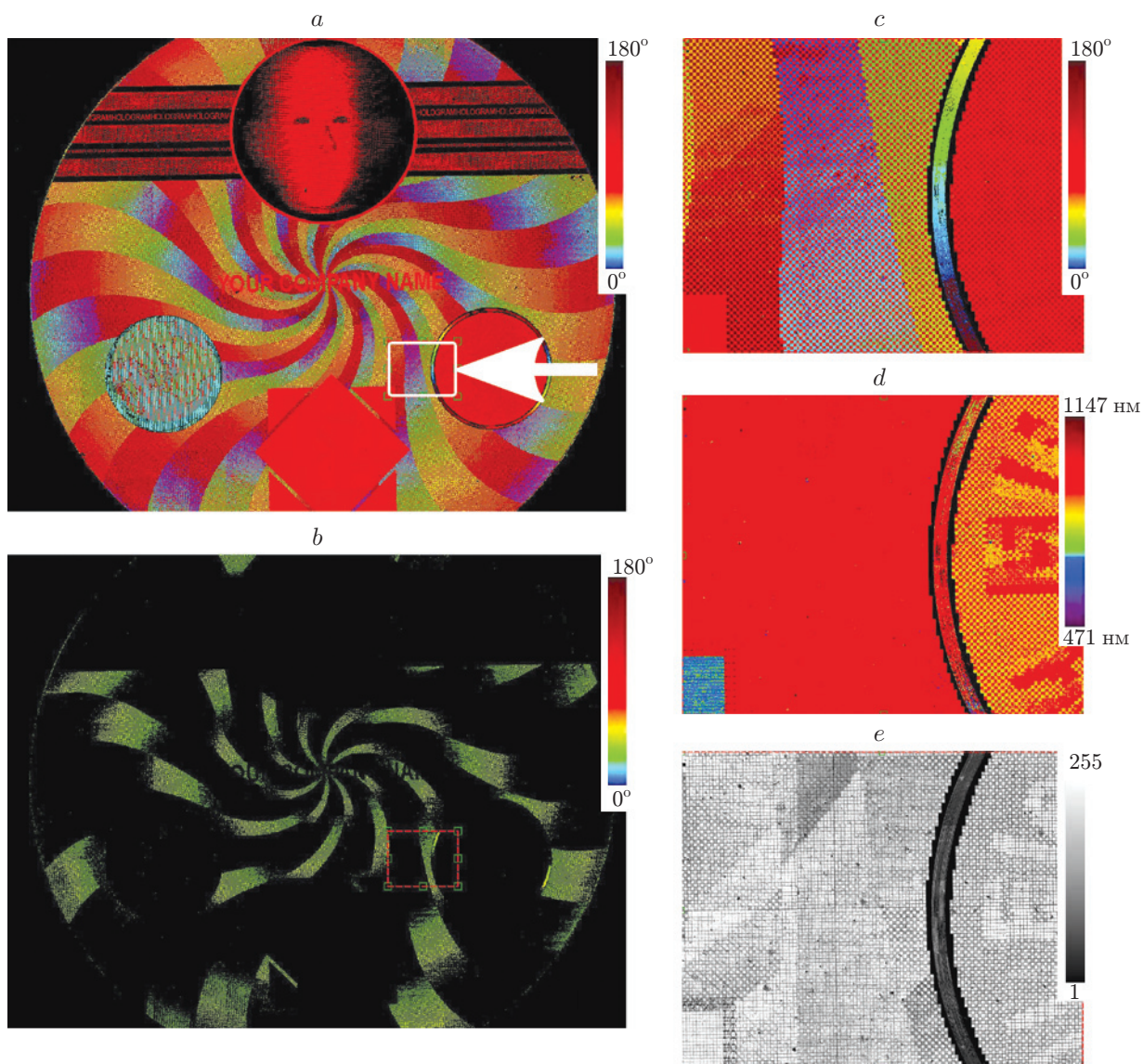


Рис. 6. Графическое представление характеристических изображений: *a* — слой характеристического изображения голограммы, обозначающий угол ориентации решёток, условные цвета соответствуют диапазону углов $0\text{--}180^\circ$; *b* — результат выделения областей, содержащих углы ориентации микрорешёток в диапазоне $25\text{--}45^\circ$; *c*, *d*, *e* — масштабированные изображения фрагмента, указанного на рис. 6, *a* стрелкой, в слоях характеристического изображения (угол ориентации решёток в диапазоне $0\text{--}180^\circ$) (*c*), период решёток в диапазоне $471\text{--}1147$ нм (*d*), нормированная интенсивность в диапазоне $0\text{--}255$ (*e*)

в выделенной зоне поверхности голограммы. В программном обеспечении реализована возможность ручного и полуавтоматического совмещения сформированных характеристических изображений с графическими данными, полученными другими методами, а также возможность сравнения характеристических изображений с графическими данными проекта голограммы. Примеры работы с характеристическими изображениями при их совмещении с изображениями, полученными методом конфокальной микроскопии, представлены в работе [10].

Основные технические характеристики системы:

- измеряемые параметры микроэлементов голограммы (голопикселей): шаг дифракционной решётки, угол ориентации дифракционной решётки, дифракционная эффективность;
- максимальный размер образца 120×100 мм;
- размер кадра фотокамеры, приведённый к поверхности образца, $1,79 \times 1,43$ мм;
- максимальное оптическое разрешение 2 мкм;
- дискретность изображения, приведённая к поверхности образца, 0,7 мкм;
- максимальная частота съёма кадров 506 кадров/с;
- диапазон перемещения по Z -координате 25 мм;
- диапазон определяемых периодов дифракционных элементов без алгоритмического расширения: при сканировании в видимом диапазоне 0,475–1,024 мкм, при сканировании в ИК-диапазоне 0,89–1,916 мкм;
- дискретность измерения периода дифракционных микрорешёток 10–55 нм;
- дискретность измерения угла ориентации дифракционных микрорешёток $0,25^\circ$;
- сканирование и обработка данных производится в реальном времени;
- скорость регистрации данных до $0,5 \text{ мм}^2/\text{с}$.

Заключение. Метрологические характеристики разработанной в Институте автоматизации и электрометрии СО РАН системы позволяют получить пространственное разрешение в микрометровом диапазоне при определении формы и расположения структурных элементов цифровой защитной голограммы, относительную точность определения периода микрорешёток голопикселей не хуже 5 % измеряемой величины и точность вычисления угла ориентации микрорешёток не хуже 1° . Универсальный формат данных и разработанные для системы программно-аппаратные средства обеспечивают обнаружение, обработку и наглядное представление отличий измеренных параметров голограмм от проекта или данных, полученных с помощью высокоразрешающих конфокальных микроскопов. Возможность изменения дискретности углов освещения и обработка данных в реальном времени позволяют определить параметры выбранной зоны голограммы размером 2×2 мм за 0,5 с в режиме предварительного просмотра и за 20 с в режиме точных измерений параметров качества и экспертного анализа.

В развитии данного метода предполагается улучшить разрешение прибора путём использования методов фурье-птихографии при обработке стека мультиугловых изображений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Одинокоев С. Б.** Методы и оптико-электронные приборы для автоматического контроля подлинности защитных голограмм. М.: Техносфера, 2013. 176 с.
2. **Гончарский А. В., Гончарский А. А.** Компьютерная оптика. Компьютерная голография. М.: Изд-во МГУ, 2004. 315 с.
3. **Белоусов Д. А., Полещук А. Г., Хомутов В. Н.** Устройство для регистрации дифракционной картины синтезированных голограмм в широком угловом диапазоне // Автометрия. 2018. 54, № 2. С. 35–42. DOI: 10.15372/AUT20180204.

4. **Van Renesse R. L.** Testing the universal hologram scanner // *Keesing Journ. Documents & Identity*. 2005. **12**. P. 7–10.
5. **Pat. 3054429 EP.** Photometric dovid comparison /R. Huber-Mörk, D. Soukup, S. Štolc. Publ. 10.08.2016.
6. **Soukup D., Štolc S., Huber-Mörk R.** Analysis of optically variable devices using a photometric light-field approach // *Proc. SPIE*. 2015. **9409**. 94090R.
7. **Štolc S., Soukup D., Huber-Mörk R.** Invariant characterization of DOVID security features using a photometric descriptor // *Proc. IEEE Intern. Conf. on Image Processing (ICIP)*. 27–30 Sept., 2015, Quebec City, Canada. P. 3422–3426.
8. **Kwon H.-J., Park T.-H.** Automated optical inspection for holograms with mixed patterns // *Intern. Journ. Adv. Manuf. Technol.* 2011. **54**, Iss. 1–4. P. 215–221.
9. **Бессмельцев В. П.** Контроль качества отражающих голограмм методами конфокальной микроскопии // Тез. докл. XI Междунар. конф. «Голография. Наука и практика». Сочи, 16–17 сентября 2014. С. 80–85.
10. **Бессмельцев В. П., Киприянов Я. А.** Разработка программных средств контроля качества защитных синтезированных голограмм по данным различных оптических систем измерения // Тез. докл. XV Междунар. конф. «Голография. Наука и практика». Нижний Новгород, 11–13 сентября 2018. С. 143–145.

Поступила в редакцию 22.12.2019

После доработки 28.01.2020

Принята к публикации 06.02.2020
