

19. **Высокоразрешающая система измерения основных параметров защитных голограмм для оперативного контроля качества и экспертного анализа**

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

Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук,
Новосибирск, Россия

Рассмотрено устройство и работа созданной в ИАиЭ СО РАН системы измерения основных параметров защитных голограмм. Система объединяет два метода измерений — микроскопический с микронным разрешением и дифракционный. При формировании данных измерения формируется характеристическое изображение с основными параметрами голопикселей синтезированной защитной голограммы: шаге дифракционных решеток, их угловой ориентацией, нормированной интенсивностью отраженного света, а также изображение голограммы в рассеянном свете.

Ключевые слова: Дифракционная решетка, Голопиксел, Цифровая голограмма.

Цитирование: **Бессмельцев, В. П.** Высокоразрешающая система измерения основных параметров защитных голограмм для оперативного контроля качества и экспертного анализа / В. П. Бессмельцев, В. В. Вилейко, М. В. Максимов // HOLOEXPO 2019 : XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — С. 102–108.

Введение

В большинстве случаев, при создании защитных голограмм с помощью дот-матрикс или лучевых технологий, информация кодируется и записывается в виде элементарных дифракционных матриц микрорешеток — так называемых голопикселей, положение, форма и размер которых, а также период и угол ориентации содержащихся в них микрорешеток может быть описан функцией:

$$F_{dm} [(x, y, d(x, y), S(x, y), \alpha(x, y))],$$

где x, y — координаты голопикселя, $d(x, y)$ — период микрорешетки, $S(x, y)$ — функция, описывающая размер и форму контура голопикселя, $\alpha(x, y)$ — локальный угол ориентации микрорешетки относительно выбранного направления на поверхности голограммы.

Известные оптические методы определения подлинности таких цифровых синтезированных защитных голограмм (СЗГ), (в зарубежной литературе цифровые синтезированные голограммы часто обозначаются термином DOVID, сокращенно от Diffractive Optically Variable Imaging Device) можно разделить на методы микроскопического исследования, в которых исследуются изображения структуры СЗГ с помощью микроскопов высокого и сверхвысокого разрешения, например конфокальных, и дифракционные методы, в которых регистрируются и исследуются дифракционные картины, полученные от СЗГ или её фрагментов при различных условиях освещения.

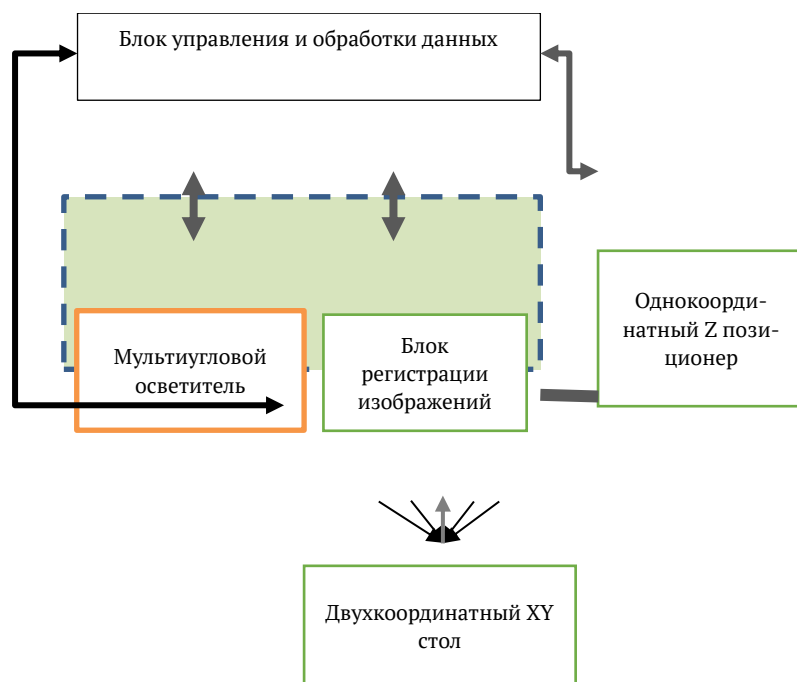


Рис. 1 Блок схема системы измерения основных параметров защитных голограмм

Недостатком микроскопического метода исследования при получении информации с предельным для микроскопии разрешением является низкое быстродействие метода [1, 2], при низком разрешении можно увидеть только форму и размер голопикселя, но не определить период микрорешетки и ее относительный угол наклона.

Методы анализа дифракционных картин освещаемых, как когерентными так и некогерентными источниками, в основном основаны на создании серии низкоразрешающих изображений зоны или всей поверхности голограммы при различных условиях освещения и последующем сравнении их с данными, полученными при тех же условиях освещения от оригинальной голограммы [3, 4]. Невозможность точного сравнения данных полученных на разных приборах, работающих по такому принципу (поскольку положение и спектр источников освещения для разных приборах могут существенно отличаться), а также невозможность сравнения измеренных данных с данными проектирования оригинальной голограммы, ограничивают применение таких приборов для определения как подлинности, так и качества изготовления голограммы.

Целью разработки являлось создание системы, измеряющей основные характеристики исследуемой голограммы — расположение, размер и форму голопикселей, период дифракционной решетки внутри голопикселя, угол ее ориентации и нормированную интенсивность отраженного света, с высокими разрешением, точностью и быстродействием, при этом имеющей возможность исследования либо малой выбранной зоны голограммы либо всей ее поверхности. Указанные измеренные данные можно сравнивать как с данными, полученными с помощью высокоразрешающих микроскопических способов исследований, так и с цифровым проектом голограммы [1].

Состав системы

Разработанная система фактически объединяет два метода: микроскопический с микронным разрешением и дифракционный, поскольку при формировании полных данных измерения параметров голограммы используются: цифровое изображение голограммы в рассеянном свете, полученное с помощью микроскопа, и основные параметры синтезированной защитной голограммы, полученные по дифракционным картинам при различных углах освещения.

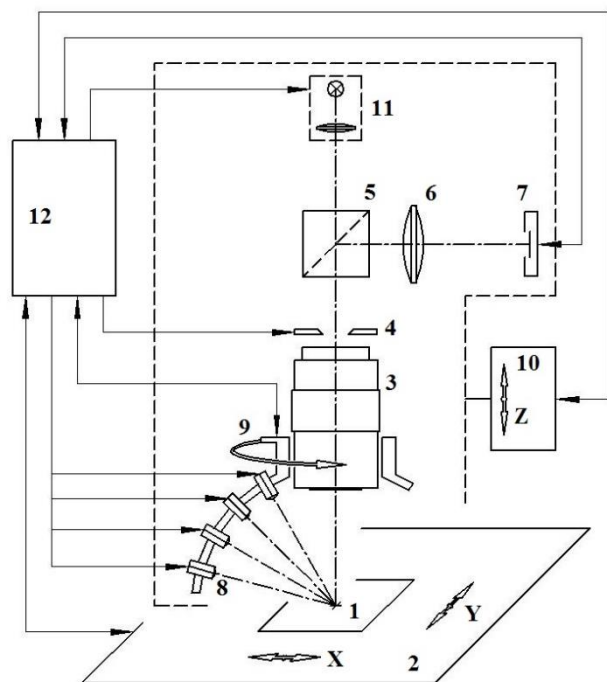
На рисунке 1 представлена блок схема системы

Система содержит: Мультиугловой осветитель, в котором в различных известных азимутальных и зенитных угловых положениях расположены некогерентные коллимированные источники излучения с известной длиной волны, Блок регистрации изображений, оптическая часть которого выполнена в виде цифрового микроскопа в режиме работы на отражение, с дополнительной регулируемой диафрагмой и скоростной видеокамерой в качестве регистрирующего устройства, моторизированный Двухкоординатный XY стол, Однокоординатную Z подвижку для перемещения микрообъектива блока регистрации изображений и мультиуглового осветителя по вертикали, Блок управления и обработки данных, который обеспечивает прием, сохранение и обработку данных от скоростной видеокамеры, управление осветителями и позиционирующими устройствами.

Оптико-механическая конструкция

Рассмотрим более подробно особенности конструкции системы. На рисунке 2а, представлена структурная схема оптикомеханических узлов поясняющая работу системы, на рисунке 2б показано конструктивное размещение в мультиугловом осветителе некогерентных коллимированных источников излучения.

Исследуемая голограмма 1 устанавливается на поверхности Двухкоординатного моторизированного XY стола 2, (рисунок 2а). Блок регистрации изображений, кроме микрообъектива 3, содержит регулируемую диафрагму 4, расположенную вблизи задней фокальной плоскости микрообъектива, светоделитель 5, тубусную линзу 6, скоростную видеокамеру 7. Некогерентные коллимированные источники излучения 8 Мультиуглового осветителя 9 конструктивно расположены на поверхности полусферы под известными углами, как в азимутальной так и зенитной плоскости (рисунок 2б). Полусфера установлена над поверхностью исследуемой голограммы и может вращаться вокруг оптической оси микрообъектива. Угловые направления источников излучения 8 пересекаются в точке, совпадающей с фокусом микрообъектива. При выполнении измерения характеристик голограммы производится совмещение указанной точки с поверхностью голограммы с помощью Однокоординатного позиционера 10, одновременно перемещающего в направлении, совпадающим с нормалью к поверхности исследуемой голограммы и оптической осью микрообъектива, мультиугловой осветитель и элементы блока регистрации изображений (перемещаемые компоненты системы выделены пунктиром).



а) структурная схема оптомеханических узлов



б) пример конструктивного размещения некогерентных коллимированных источников излучения

Рис. 2

Осветитель 11 применяется для работы в режиме микроскопа для освещения поверхности исследуемой голограммы под углом, совпадающим с нормалью к поверхности голограммы. Светоделитель позволяет совместить прием рассеянного и дифрагированного света от поверхности исследуемой голограммы видеокамерой при прямом освещении голограммы вертикальным осветителем 11. Блок управления и обработки данных 12, управляет включением источников излучения Мультиугольного осветителя, осветителя 11, перемещением голограммы по XU координатам в заданную позицию с помощью двухкоординатного стола, перемещением Блока регистрации изображений вместе с мультиугольным осветителем по Z координате и обрабатывает данные от матричного фотоприемника видеокамеры и датчиков, определяющих угловое положение источников излучения Мультиугольного осветителя и координатных перемещений подвижек 2 и 10.

Описание работы системы

При работе системы в дифракционном режиме производится последовательное освещение каждым источником излучения 8 (рисунок 2а) расположенными под зенитным углом θ_n и азимутальным φ_n (где n номер источника излучения) исследуемой цифровой голограммы, находящейся в поле зрения блока регистрации изображений. Сформированные в первом порядке дифракции изображения $G_n(x, y, \theta_n, \varphi_n)$ поверхности исследуемой голограммы освещаемой источником расположенным под углами $\theta_n \varphi_n$ регистрируются скоростной видеокамерой 7, если зенитный угол θ_n источника излучения 8 близок к $\arcsin \lambda/d$, где λ — длина волны источника излучения, d — период микрорешеток, попадающих в поле зрения блока регистрации

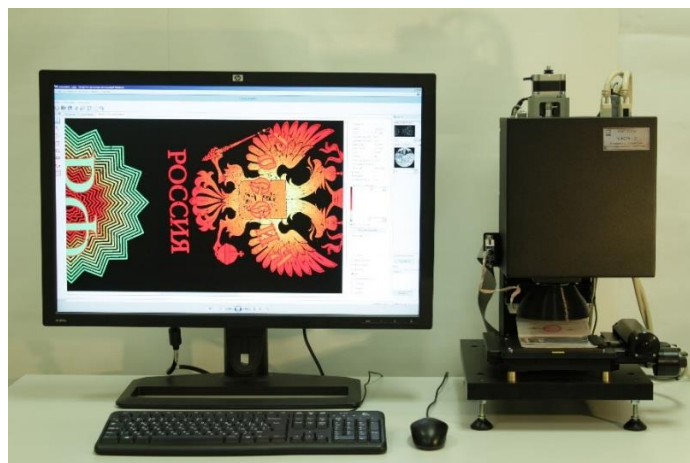


Рис. 3. Внешний вид системы измерения основных параметров защитных голограмм «Сфера 2» (блок управления и обработки данных не показан)

изображений, а азимутальный угол φ_n источника излучения ортогонален направлению штрихов дифракционных структур на поверхности голограммы. Свет, дифрагированный на поверхности голограммы при освещении её источниками, для которых указанные условия не соблюдаются, а также свет от других порядков дифракции, задерживается диафрагмой 4 и не попадает на матрицу видеокамеры,

Из полученного стека последовательных изображений $G_n(x, y, \theta_n, \varphi_n)$, формируется характеристическое изображения того же размера $G_{CH}(x, y)$, таким образом что для каждого пиксела характеристического изображения определяется пара углов расположения источников излучения $(\varphi_{max}, \theta_{max})$, при которых интенсивность зарегистрированного сигнала в данном пикселе максимальна, и каждому пикселу характеристического изображения назначаются следующие параметры: координаты пиксела (x, y) , угол ориентации α , период d , интенсивность I_{max} . Интенсивность I_{max} определяется как максимальная интенсивность для пиксела с данными координатами в исходном стеке изображений, период d однозначно определяется из зенитного угла источника излучения к поверхности исследуемой голограммы θ_{max} , длины волны источника излучения и выбранного для регистрации порядка дифракции:

$$d = \lambda / \sin(\theta_{max}).$$

Угол ориентации штрихов решетки относительно выбранного направления определяется как: $\alpha(x, y) = \varphi_{max}$. Так как при таком методе измерения точность измерения периода и угла ориентации элементарных решеток напрямую зависит от точности и дискретности задания угловых направлений источников излучения, с целью увеличения разрешения измерений в конструкцию введен привод вращения мультиуглового осветителя с малой дискретой поворота по азимутальному углу φ , а источники излучения в конструкции мультиуглового осветителя расположены таким образом, чтобы при вращении мультиуглового осветителя они занимали промежуточные между угловыми положениями соседних источников излучения как по θ , так и по φ . Пример такой конструкции приведен на рисунке 2б.

Таблица. Основные технические характеристики системы «Сфера 2»

Параметр	Значение
Измеряемые параметры микроэлементов голограммы (голопикселей)	Шаг дифракционной решетки, угол дифракционной решетки, дифракционная эффективность
Максимальный размер образца	120 × 100 мм
Поле зрения кадра	1,79 × 1,43 мм
Максимальное оптическое разрешение	2 мкм
Глубина фокуса оптическая	14 мкм
Дискретность изображения, приведенная к поверхности образца	0,7 мкм
Повторяемость при перемещении по XY	2 мкм
Максимальная частота съёма кадров	506 кадров/с
Диапазон перемещения по Z координате	25 мм
Диапазон определяемых периодов дифракционных элементов без алгоритмического расширения диапазона	
при сканировании в видимом диапазоне	0,475–1,024 мкм
при сканировании в ИК диапазоне	0,89–1,916 мкм
Дискрета измерения периода дифракционных микрорешеток	10–55 нм
Дискрета измерения угла ориентации дифракционных микрорешеток	0,25°
Сканирование и обработка данных производится в реальном времени	
Скорость регистрации данных	до 0,5 мм ² /сек
Размеры устройства (Д × Ш × В) без управляющей ПЭВМ	не более 500 × 300 × 1000 мм

Работа системы в режиме цифрового микроскопа (при выключенном Мультиугловом осветителе, включенном Осветителе 11 и полностью открытой диафрагме 4) позволяет получать изображение той же зоны голограммы в рассеянном свете, что дает возможность зарегистрировать изображение с разрешением, определяемым максимальной апертурой объектива. Совместная обработка полученного изображения и стека мульти угловых изображений позволяет получить характеристические изображения $G_{CH}(x, y)$ с высоким пространственным разрешением.

Для получения характеристического изображения всей голограммы или выбранной области интереса служит двухкоординатной моторизированный стол. В этом режиме голограмма в соответствии с заданным алгоритмом последовательно перемещается на расстояние, меньшее чем размер поля зрения блока регистрации изображений так, чтобы характеристические изображения зон $G_h(x, y)$ покрыли указанную область. Последующая программная «сшивка» характеристических изображений зон образует полное характеристическое изображение всей исследуемой поверхности СЗГ.

Заключение

Метрологические характеристики разработанной в ИАиЭ СО РАН системы обеспечивают достаточно высокое пространственное разрешение формы и расположения структурных элементов цифровой защитной голограммы и точность определения периода и угла ориентации микрорешёток голопикселей. Универсальный формат получаемых данных и разработанные для системы программно-аппаратные средства обеспечивают обнаружение, обработку и наглядное представление отличий измеренных голограмм от проекта или данных, полученных с помощью цифровых высокоразрешающих микроскопов.

Список источников

- [1] **Бессмельцев, В. П.** Разработка программных средств контроля качества защитных синтезированных голограмм по данным различных оптических систем измерения / В. П. Бессмельцев, Я. А. Киприянов // HOLOEXPO 2018: XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — С. 143–145.
- [2] **Бессмельцев, В. П.** Контроль качества отражающих голограмм методами конфокальной микроскопии / В. П. Бессмельцев // HOLOEXPO 2018: XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — С. 80–85.
- [3] **Одинокоев, С. Б.** Методы и оптикоэлектронные приборы для автоматического контроля подлинности защитных голограмм / С. Б. Одинокоев // Москва: Техносфера, 2013. — 176 с.
- [4] Testing the Universal Hologram Scanner, Published in the Keesing Journal of Documents & Identity. — 2005. — № 12. — P. 7–10 (authorized text version).