

УДК 535.421

УСТРОЙСТВО ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ДИФРАКЦИОННОЙ КАРТИНЫ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ГОЛОГРАММ В ШИРОКОМ УГЛОВОМ ДИАПАЗОНЕ*

Д. А. Белоусов, А. Г. Полещук, В. Н. Хомутов

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: d.a.belousov91@gmail.com*

Представлены результаты разработки и исследования устройства для регистрации и анализа дифракционной картины синтезированных голограмм. Показано, что устройство позволяет регистрировать дифракционную картину излучения, отражённого от поверхностного микрорельефа исследуемого элемента или прошедшего через него, в угловом диапазоне дифракции порядка $\pm 90^\circ$ и 360° по азимутальному углу. Описана возможность определения периодов, скважности и угловой ориентации дифракционных структур, а также дифракционной эффективности всех дифракционных порядков исследуемого элемента. Разработанное устройство предназначено для оперативного контроля глубины и формы микрорельефа синтезированных голограмм в процессе производства.

Ключевые слова: дифракционная оптика, синтезированные голограммы, компьютерная оптика, обработка изображений, измерительные системы.

DOI: 10.15372/AUT20180204

Введение. Синтезированные голограммы (СГ) широко применяются в современных промышленных и научных системах [1]. Основной функцией СГ является преобразование падающего волнового фронта в волновой фронт с заданными параметрами за счёт дифракции излучения на поверхностном микрорельефе элемента. Благодаря функциональным возможностям и малым габаритам СГ широко применяются в интерферометрических измерениях [2, 3], медицине [4], а также в различных приборах: кассовых аппаратах, принтерах и др. [5]. Современное развитие технологий требует от СГ не только формирования волнового фронта с необходимыми параметрами, но и соответствия жёстким критериям энергетической эффективности, на которые влияют любые отклонения микрорельефа от заданных параметров. В связи с этим контроль параметров изготовленного микрорельефа — важный этап в процессе создания таких элементов.

Методы контроля СГ условно разделены на прямые и косвенные. К прямым методам относятся атомно-силовые микроскопы и профилометры различного типа, основой которых является анализ непосредственно параметров микрорельефа исследуемого элемента: периода, глубины, формы и угловой ориентации структур. Однако контроль синтезированных голограмм известными прямыми методами не всегда представляется возможным. В связи с этим перспективным является развитие косвенных методов контроля параметров микрорельефа СГ.

Дифракционный метод контроля основан на анализе дифракционной картины (ДК), формируемой локальной областью СГ. При освещении исследуемой СГ лазерным пучком падающее на элемент излучение раскладывается на ряд дифракционных порядков (ДП), угловое распределение и интенсивности которых зависят от параметров микрорельефа элемента в локально освещённой области [6]. Таким образом, сканирование элемента и

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 17-19-01721).

анализ пространственного распределения ДП в каждой локальной области дают возможность оперативно определить параметры микрорельефа исследуемой СГ по всей площади [7, 8]. Сложность создания автоматических устройств такого типа заключается в том, что микрорельеф реальных СГ имеет сложную структуру, а период в различных областях элемента нередко отличается в 10 раз и более, при том что минимальный период может быть соизмерим с длиной волны света. В связи с этим необходимо проводить контроль параметров дифрагированного излучения в широком диапазоне углов дифракции, вплоть до $\pm 90^\circ$, и по азимутальному углу 360° .

Автоматические установки, работающие по вышеописанному принципу, можно разделить на два типа: использующие для регистрации параметров излучения сканирующий фотодетектор (или матрицу фотодетекторов) и статично закреплённую видеокамеру (или несколько видеокамер). Устройства первого типа имеют широкий динамический диапазон, но обладают низкой скоростью сканирования исследуемого элемента. В таких устройствах регистрация ДК чаще всего осуществляется лишь по одной линейной координате. Если необходимо производить контроль дифрагированного излучения в широком телесном угле дифракции, то время одного измерения в локально освещённой области элемента может достигать нескольких минут, что неприемлемо для производственного контроля. Устройства для регистрации параметров ДК, использующие сканирующий светочувствительный датчик, описаны в [9, 10].

Примеры установок (второго типа) для регистрации пространственного распределения ДП с помощью статично закреплённой видеокамеры приведены в [11, 12]. Преимуществом таких устройств является высокая скорость регистрации ДК. Одна из основных проблем при их создании — регистрация ДК в широком угловом диапазоне дифракции. Решить эту задачу можно, установив между исследуемым элементом и видеокамерой рассеивающий экран [12]. В работе [13] представлены результаты исследования рассеивающих экранов различной формы и конфигурации, по которым наиболее эффективными выделены системы со сферическим и параболическим рассеивающими экранами. Данные автоматические устройства обладают рядом достоинств, но в то же время не лишены недостатков. В частности, в устройстве со сферическим рассеивающим экраном для регистрации ДК по азимутальному углу 360° необходимо использовать несколько статично закреплённых видеокамер (не менее трёх), что усложняет конструкцию устройства, его юстировку и программное обеспечение, так как требуется производить сшивку полученных изображений. В свою очередь, при использовании параболического рассеивающего экрана достаточно одной видеокамеры, однако в этом случае с увеличением угла дифракции ухудшается разрешение системы.

Данная работа посвящена исследованию системы с оптоволоконным рассеивающим экраном (ОРЭ), выполненным на основе оптоволоконного фокона (или оптоволоконной шайбы). Предлагаемая концепция устройства, на наш взгляд, объединяет в себе преимущества систем со сферическим и параболическим рассеивающими экранами, но при этом исключает их недостатки.

Разрабатываемое устройство. Общий принцип дифракционного метода контроля можно кратко описать следующим образом. Излучение от когерентного источника, пройдя через дифракционную структуру СГ или отразившись от неё, раскладывается на ряд ДП в угловой спектр α_m , который может быть описан выражением

$$\sin(\alpha_m) = \frac{m\lambda}{S} + \sin(\theta), \quad (1)$$

где m — номер ДП; λ — длина волны источника излучения; S — период микрорельефа СГ в локальной области; θ — угол падения излучения на дифракционную структуру [14]. Как видно из выражения (1), при нормальном падении излучения на периодическую структуру

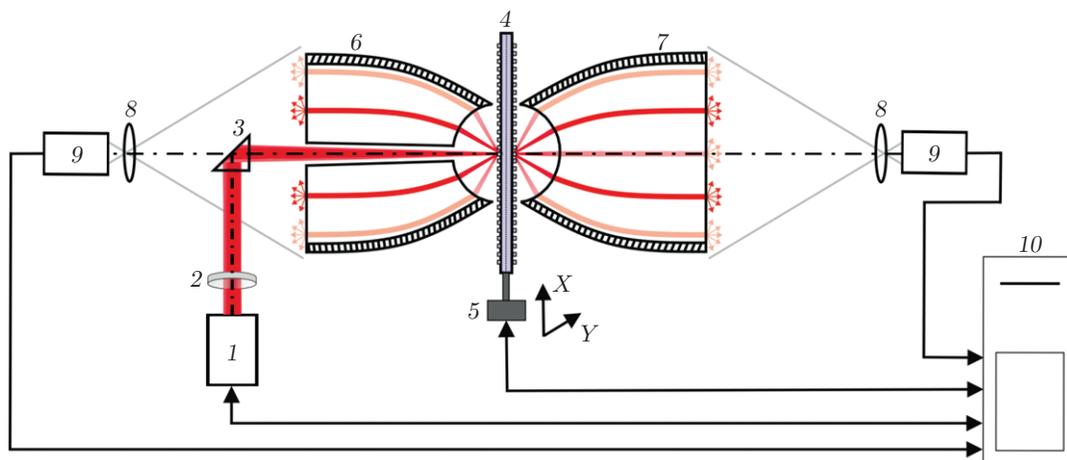


Рис. 1. Схема устройства для регистрации параметров дифрагированного излучения, прошедшего через периодическую структуру СГ или отражённого от неё

СГ угловой спектр является зеркальным относительно нуля для положительных и отрицательных ДП. Количество ДП зависит от периода исследуемой СГ и соответствует целой части от величины S/λ . Минимальный угол дифракции при этом соответствует нулевому ДП и равен 0° , а максимальный может достигать $\pm 90^\circ$.

Для регистрации дифрагированного излучения, прошедшего через поверхностный микрорельеф СГ или отражённого от него, в угловом диапазоне дифракции порядка $\pm 90^\circ$ и по азимутальному углу 360° была разработана схема устройства (рис. 1). Когерентное излучение от источника 1 фокусируется с помощью линзы 2 и поворотной призмы 3 на СГ 4 в пятно, размер которого определяет локально изучаемую область элемента. Контролируемый элемент расположен на XY -координатном столе 5, что позволяет осуществлять сканирование по всей его площади. С двух сторон исследуемой СГ располагаются ОРЭ 6 и 7, отличающиеся тем, что в экране 6 выполнено сквозное отверстие для прохода падающего излучения. Первый торец ОРЭ представляет собой сферический сегмент и расположен так, что сканирующий пучок когерентного излучения на поверхности СГ находится в центре радиуса его кривизны. Таким образом, дифрагированное на поверхностном микрорельефе излучение проецируется на первый торец ОРЭ 6 или 7 (в зависимости от того, какая СГ исследуется: отражающая или пропускающая падающее излучение) и все ДП имеют одинаковый размер на его поверхности. Затем ДК со второго торца ОРЭ регистрируется видеокамерой 9 с проекционным объективом 8. Контроль процесса измерения и анализ ДК осуществляется управляющим компьютером 10.

Второй торец ОРЭ может иметь как плоскую (рис. 2, а), так и выпуклую (рис. 2, б) форму, увеличивая таким образом светопередачу дифрагированного излучения на светочувствительную матрицу видеокамеры. Оптоволоконный рассеивающий экран располагается на расстоянии d от контролируемой СГ. Первый торец, выполненный в виде сферического сегмента, имеет высоту h_1 . Высота сферического сегмента h_1 , расстояние от контролируемой СГ до ОРЭ d и диаметр пропускающего окна $D_{\text{окна}}$ (для ОРЭ 6) определяются из условия попадания дифрагированного излучения на рабочую область ОРЭ, ограниченную отверстием для прохода падающего излучения и расстоянием от исследуемого образца до ОРЭ:

$$\begin{cases} D_{\text{окна}} = 2W(d + h_2)NA, \\ R \sin(\alpha_{\min}) \geq W(d + h_2)NA + URNA, \\ h_1 = R(1 - \cos(\alpha_{\max})), \end{cases} \quad (2)$$

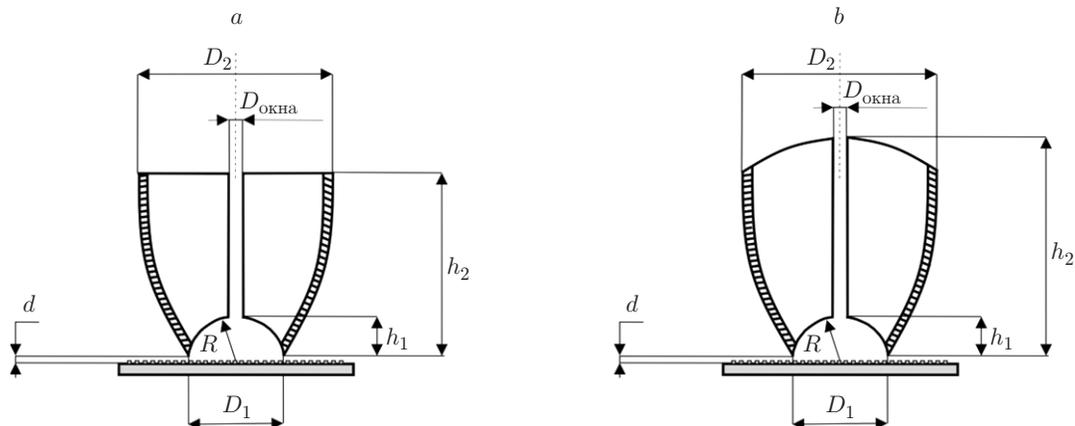


Рис. 2. Оптоволоконный рассеивающий экран: с плоским (а) и с выпуклым (б) вторыми торцами

где U и W — постоянные коэффициенты, значения которых лежат в диапазоне 1,1–1,5; NA — числовая апертура источника излучения с фокусирующей линзой; h_2 — высота ОРЭ; $R = d + h_1$ — радиус кривизны сферического сегмента, выполненного в первом торце ОРЭ; α_{\min} , α_{\max} — минимальный и максимальный регистрируемые углы дифракции.

При осуществлении контроля СГ, работающих на отражение падающего излучения, в связи с наличием в ОРЭ сквозного отверстия ограничен не только максимальный, но и минимальный регистрируемый угол дифракции. При контроле СГ, работающих на пропускание падающего излучения, такой проблемы не возникает и в выражении (2) при расчёте следует оставить только третье равенство, ограничивающее максимально регистрируемый угол дифракции. Как следует из (2), для регистрации ДП на углах дифракции, приближающихся к $\pm 90^\circ$, расстояние d нужно выбирать минимально возможным из условия исключения касания ОРЭ и исследуемой СГ (при осуществлении её перемещения на XU -координатном столе).

Соотношение площадей первого и второго торцов ОРЭ можно записать как

$$k = S_1/S_2 = 2(D_1^2/D_2^2), \quad (3)$$

где S_1 и S_2 — площади первого и второго торцов ОРЭ; D_1 и D_2 — диаметры первого и второго торцов ОРЭ. Если $k = 1$, то ДК с первого торца ОРЭ, имеющего сферическую форму, переносится на второй торец таким образом, что разрешение системы не зависит от угла дифракции. В противном случае возникают дисторсионные явления и при регистрации ДК со второго торца ОРЭ точность определения углового положения ДП будет зависеть от угла дифракции. Следует пояснить, что данное утверждение не относится к ОРЭ, выполненному таким образом, что масштаб ДК линейно увеличивается (или уменьшается) при переносе изображения с первого торца на второй.

Экспериментальные результаты. На рис. 1 приведена схема универсального устройства, которое позволяет регистрировать ДК излучения, прошедшего через микро-рельеф исследуемого элемента или отражённого от него. Для апробации предложенной концепции устройства в рамках данной работы была реализована схема регистрации дифрагированного излучения СГ, работающих на пропускание падающего излучения. Используемый в данной реализации ОРЭ представлял собой оптоволоконную шайбу (т. е. диаметр первого торца D_1 равен диаметру второго торца D_2 , который, в свою очередь, имеет плоскую форму, как показано на рис. 2, а).

В качестве источника излучения в разработанном устройстве был использован полупроводниковый термостабилизированный лазер с длиной волны 635 нм. Для того чтобы обеспечить корректную работу на устройстве, перед осуществлением контроля исследу-

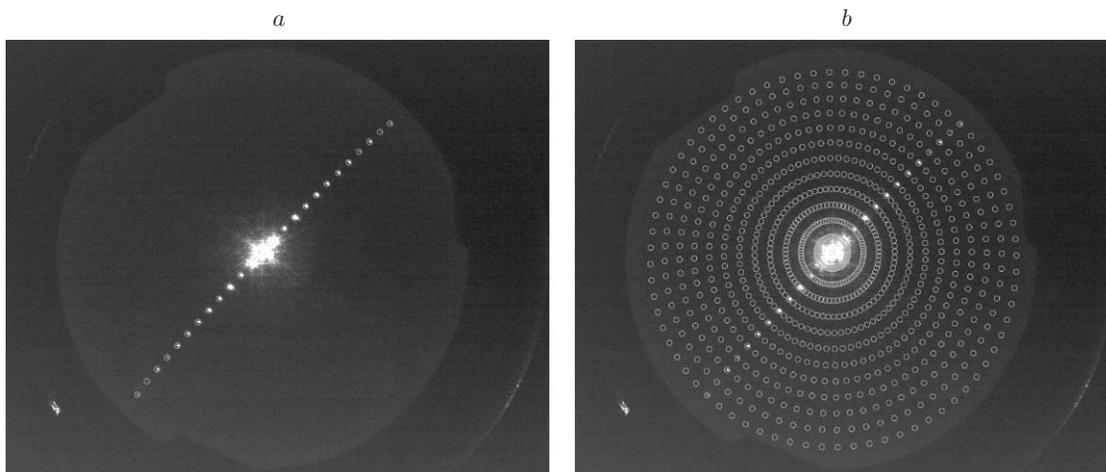


Рис. 3. Калибровка устройства: *a* — регистрация центров ДП эталонной линейной дифракционной решётки с периодом 8 мкм; *b* — полученная путём сканирования эталонных дифракционных структур калибровочная сетка

емого элемента необходимо произвести калибровку системы, которая представляет собой регистрацию ДК ряда эталонных линейных дифракционных решёток (рис. 3, *a*) с одинаковым периодом, но с разной угловой ориентацией, и сопоставление теоретически известных угловых параметров дифрагированного излучения с координатами центров зарегистрированных ДП. Сканирование калибровочных дифракционных структур с различной угловой ориентацией позволяет получить калибровочную сетку (рис. 3, *b*), с помощью которой можно сопоставить координаты на матрице видеокамеры с углами дифракции и с угловой ориентацией структур.

В целях повышения точности дальнейших измерений для каждого угла поворота может быть использовано несколько калибровочных дифракционных структур с различными периодами. Кроме того, калибровка системы может быть выполнена с помощью эталонной СГ (или нескольких СГ), дифракционная картина которой лежит в широком угловом диапазоне, достаточном для осуществления дальнейшего контроля исследуемых элементов.

Калибровка устройства перед началом работы представляла собой сканирование 36 линейных амплитудных дифракционных решёток с периодом 8 мкм. Угол ориентации каждой последующей эталонной дифракционной структуры отличался от предыдущей на 5° . Динамического диапазона современных промышленных видеокамер, как правило, недостаточно для регистрации ДК одним кадром. В связи с этим в процессе калибровки мы применяли шивку кадров, отснятых с различными значениями времени экспозиции: от 0,009 до 25 мс. Таким образом, процесс получения распределения интенсивности по ДП для каждой эталонной дифракционной структуры представлял собой шивку из 35 кадров, отснятых в указанном диапазоне значений времени экспозиции. Данное решение позволило расширить динамический диапазон используемой видеокамеры. На зарегистрированных видеокамерой изображениях определялись освещённые области локальных максимумов ДК, их центры и дифракционная эффективность (рис. 4).

Зная распределение интенсивностей ДП, можно рассчитать форму поверхностного микрорельефа исследуемого элемента [6, 15]. В частности, для амплитудной дифракционной решётки, зная интенсивности двух ДП (I_{m_k} и I_{m_n} , $m_{k,n} \neq 0$), можно рассчитать среднюю скважность T в локально измеряемом участке элемента. Для случая $m_k = 2m_n$ выражение для средней скважности имеет вид

$$T = \frac{\pi m_n}{\arccos(I_{m_k}/I_{m_n})^{1/2}}. \quad (4)$$

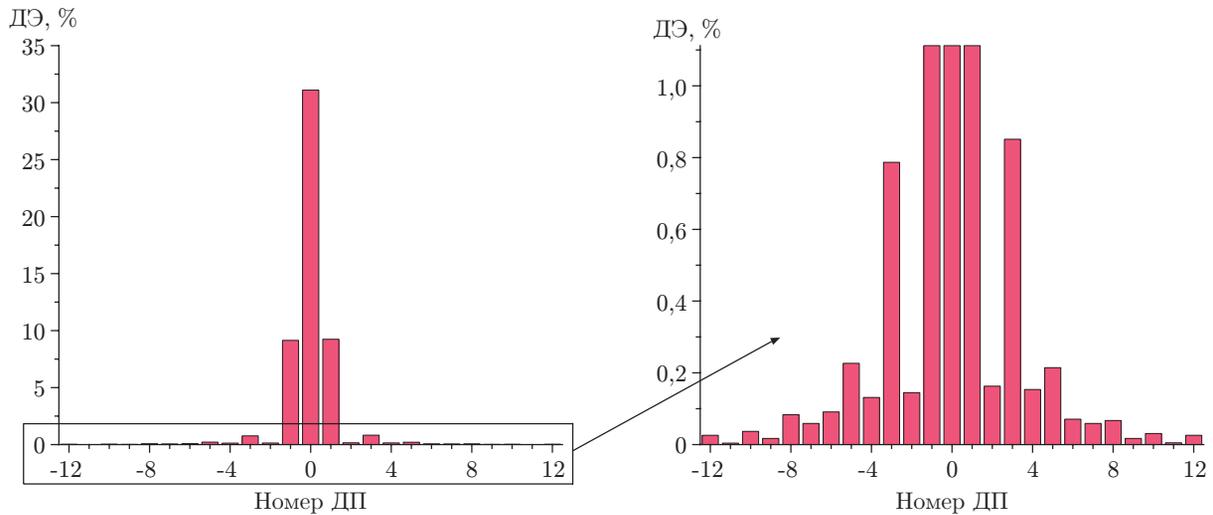


Рис. 4. Распределение дифракционной эффективности по ДП эталонной дифракционной решётки с периодом 8 мкм в масштабе 1 : 1 и фрагмент решётки в выделенной области в масштабе 30 : 1

Средняя скважность, рассчитанная по распределению дифракционной эффективности, для дифракционной решётки с периодом 8 мкм составила 1,85, что хорошо согласуется с данными, полученными на электронном микроскопе (1,86).

Максимальная погрешность определения центров ДП (точнее, дисперсия данной величины) при использованном нами алгоритме составляет не более 1 пикселя (по каждой из координат X и Y матрицы видекамеры). Эта величина может быть уменьшена за счёт выборки, обеспеченной множеством изображений с различными временами экспозиции, для каждого локального участка исследуемой СГ. Однако для определения погрешности, вызванной недостатком используемого алгоритма поиска центров ДП, возьмём самый худший случай, т. е. случай отклонения найденного центра ДП на 1 пиксель. На рис. 5, a приведены графики, показывающие разность между теоретическими и найденными углами дифракции при анализе ДК дифракционной решётки с периодом 8 мкм и потенциально

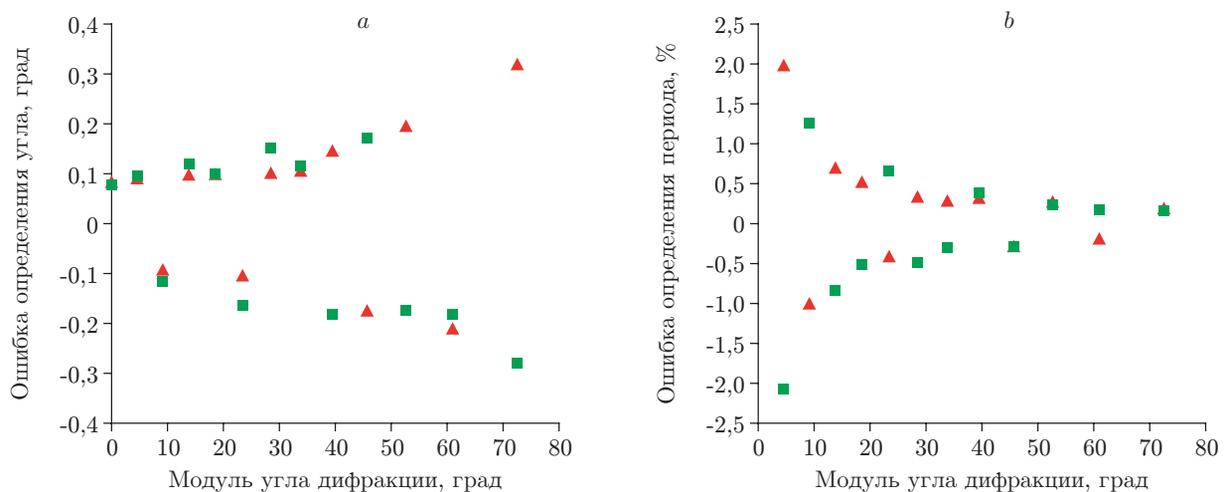


Рис. 5. Расчёт ошибки измерения на основе полученной калибровочной сетки: a — ошибка определения угла дифракции ДП, b — ошибка определения периода линейной дифракционной решётки (треугольники — положительный ДП, квадраты — отрицательный ДП)

| Номер ДП | Период тестовой дифракционной решётки, мкм | Ошибка определения периода, мкм | Угловая ориентация тестовой дифракционной решётки, град | Ошибка определения угла ориентации, град |
|----------|--|---------------------------------|---|--|
| 9 | 6,000 | 0,000 | 45,002 | 0,002 |
| 8 | 5,999 | -0,001 | 45,166 | 0,166 |
| 7 | 6,007 | 0,007 | 45,062 | 0,062 |
| 6 | 6,004 | 0,004 | 45,036 | 0,036 |
| 5 | 5,998 | -0,002 | 44,987 | -0,013 |
| 4 | 6,016 | 0,016 | 44,600 | -0,400 |
| 3 | 6,002 | 0,002 | 45,021 | 0,021 |
| 2 | 6,058 | 0,058 | 45,543 | 0,543 |
| 1 | 6,023 | 0,023 | 45,720 | 0,720 |
| -1 | 5,876 | -0,124 | 43,776 | -1,224 |
| -2 | 5,955 | -0,045 | 44,564 | -0,436 |
| -3 | 5,997 | -0,003 | 44,967 | -0,033 |
| -4 | 5,958 | -0,042 | 45,150 | 0,150 |
| -5 | 5,985 | -0,015 | 44,857 | -0,143 |
| -6 | 6,010 | 0,010 | 45,092 | 0,092 |
| -7 | 6,016 | 0,016 | 45,146 | 0,146 |
| -8 | 6,017 | 0,017 | 44,995 | -0,005 |
| -9 | 6,001 | 0,001 | 45,012 | 0,012 |

максимальном смещении центра каждого ДП на матрице видеокамеры. Погрешность определения периода, вызванная этим смещением, показана на рис. 5, *b*.

Ухудшение разрешения системы с ростом угла дифракции (см. рис. 5, *a*) вызвано тем, что используемая в качестве рассеивающего экрана оптоволоконная шайба имеет равные диаметры обоих торцов, что, в свою очередь, согласно выражению (3) приводит к дисторсии, регистрируемой видеокамерой ДК. Но несмотря на это точность определения периода с увеличением угла дифракции возрастает (см. рис. 5, *b*), что можно объяснить нелинейностью функции синуса (1), который с увеличением угла дифракции менее чувствителен к ошибке его определения.

После осуществления калибровки устройства было проведено исследование по определению параметров дифракционной структуры тестовой линейной дифракционной решётки с периодом 6 мкм и углом ориентации 45° . В таблице приведены экспериментальные результаты измерения периода и угловой ориентации дифракционной структуры тестового элемента для каждого ДП соответственно. Средний измеренный период по всем ДП составил 5,996 мкм, а угловая ориентация — $44,983^\circ$. Из полученных результатов следует, что точность определения периода и угловой ориентации дифракционной структуры, как и ожидалось, возрастает с увеличением угла дифракции.

Заключение. Предложен метод и экспериментально апробировано устройство, позволяющее регистрировать параметры дифрагированного излучения СГ в диапазоне углов дифракции порядка $\pm 90^\circ$ и 360° по азимутальному углу ориентации дифракционных структур. Разработанное устройство даёт возможность определять такие параметры СГ, как период, угловая ориентация дифракционных структур, скважность и дифракционная эффективность во всех ДП. Кроме того, для СГ с фазовым микрорельефом данные распределения дифракционной эффективности по ДП могут быть использованы для определения глубины и формы рельефа исследуемого элемента. Экспериментально показано, что контроль ДК в широком угловом диапазоне позволяет не только увеличить диапазон измеряемых периодов, но и повысить точность определения параметров дифракционной структуры исследуемого элемента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бобров С. Т., Грейсхух Г. И., Туркевич Ю. Г.** Оптика дифракционных элементов и систем. Л.: Машиностроение, 1986. 223 с.
2. **Насыров Р. К., Полецук А. Г.** Изготовление и сертификация дифракционного корректора для контроля формы поверхности главного зеркала диаметром 6 м Большого телескопа азимутального РАН // *Автометрия*. 2017. **53**, № 5. С. 116–123.
3. **Насыров Р. К., Полецук А. Г., Сокольский М. Н., Трегуб В. П.** Интерферометрический метод контроля качества сборки оптической системы с эксцентрично расположенной асферической линзой // *Автометрия*. 2017. **53**, № 5. С. 124–130.
4. **Ленкова Г. А.** Особенности оптических поверхностей мультифокальных дифракционно-рефракционных хрусталиков глаза // *Автометрия*. 2017. **53**, № 5. С. 17–29.
5. **Коронкевич В. П., Полецук А. Г., Седухин А. Г., Ленкова Г. А.** Лазерные интерферометрические и дифракционные системы // *Компьютерная оптика*. 2010. **34**, № 1. С. 4–23.
6. **Волков А. В., Головашкин Д. Л., Досколович Л. Л. и др.** Методы компьютерной оптики / Под ред. В. А. Сойфера. М.: Физматлит, 2003. 688 с.
7. **Волков А. В.** Контроль параметров микрорельефа ДОО с использованием тестовых дифракционных структур // *Вестн. СамГТУ. Сер. Физико-технические науки*. 2001. № 12. С. 179–185.
8. **Golub M. A.** Optical performance evaluation from microrelief profile scans of diffractive optical elements // Intern. Meeting "Diffractive Optics and Micro-Optics". Québec, Canada, June 18–22, 2000. Vol. 1. P. 110–112.
9. **Кириянов В. П., Никитин В. Г.** Измерение эффективности дифракционных оптических элементов методом сканирования // *Автометрия*. 2004. **40**, № 5. С. 82–93.
10. **Белоусов Д. А.** Прибор для измерения дифракционной эффективности в широком динамическом диапазоне // *Матер. Всерос. науч. конф. молодых учёных «Наука. Технологии. Инновации»*. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. Ч. 1. С. 15–19.
11. **Cai W., Zhou P., Zhao Ch., Burge J. H.** Diffractive optics calibrator: Measurement of etching variations for binary computer-generated-holograms // *Appl. Opt.* 2014. **53**, N 11. P. 2477–2486.
12. **Хомутов В. Н., Полецук А. Г., Черкашин В. В.** Измерение дифракционной эффективности ДОО по многим порядкам дифракции // *Компьютерная оптика*. 2011. **35**, № 2. С. 196–202.
13. **Белоусов Д. А., Полецук А. Г., Хомутов В. Н.** Контроль пространственного распределения оптического излучения, прошедшего и отражённого от дифракционной структуры // *Компьютерная оптика*. 2015. **39**, № 6. С. 678–686.
14. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
15. **Быстров Ю. А., Колгин Е. А., Котлецов Б. Н.** Технологический контроль размеров в микроэлектронном производстве. М.: Радио и связь, 1988. 168 с.

Поступила в редакцию 28 сентября 2017 г.