

УДК 535.421

DOI:10.17586/1023-5086-2018-85-07-27-32

## Методы анализа качества дифракционных решеток для датчиков линейного перемещения

© 2018 г. **М. В. Шишова**, АСПИРАНТ; **С. Б. Одинок**, ДОКТОР ТЕХН. НАУК;  
**Д. С. Лушников**; **А. Ю. Жердев**

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва

E-mail: maryshishova@hotmail.com

Поступила в редакцию 18.01.2018

Представлены основные методы анализа параметров дифракционных решеток. Проанализированы особенности применения дифракционных решеток в качестве измерительных шкал в системе датчика линейных перемещений. Предложены метод и критерий качества для контроля параметров реальных образцов измерительных шкал. Данный критерий обобщает все коэффициенты дифракционной эффективности, оказывающие влияние на формирование квадратурных сигналов в системе интерферометрического датчика линейных перемещений.

**Ключевые слова:** дифракционная решетка, дифракционная эффективность, измерительная шкала, интерферометрический датчик линейных перемещений.

**Коды OCIS:** 050.1950, 120.3940

### ВВЕДЕНИЕ

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) широко применяются в различных областях науки и техники [1]. Важным техническим решением в системах индикации линейных перемещений стало применение дифракционных решеток (ДР) в качестве измерительных шкал [2–5] для создания зависимости выходного сигнала от координаты перемещения.

Данная статья посвящена методу анализа дифракционной эффективности (ДЭ) пропускающих и отражательных ДР. Представленный метод можно охарактеризовать как итоговую стадию контроля измерительных шкал с критериальным выводом о возможности применения в системе датчика линейных перемещений.

Большинство современных методов контроля ДОЭ основано на использовании высокотехнологичных средств измерений геометрических характеристик профиля рельефа. Применяются методы оптической и электронной микроскопии, интерферометрия с фазовым сдвигом, а также прямые измерения формы и топологии микрорельефа с помощью профилометра (особенно на этапе первичного формообразования дифракционной структуры) или атомно-силового микроскопа.

Оптимальным способом интегральной оценки ДОЭ является измерение ДЭ как характеристики, задаваемой при расчете. Для контроля ДР реализован специализированный стенд со сканированием поверхности образца. Измерения ДЭ осуществляются на расчетной длине волны (в нашем случае  $\lambda = 650$  нм) при различных условиях освещения измерительных шкал соответственно их расположению в схеме датчика линейных перемещений.

Измерительную шкалу можно определить как фазовый микрорельеф на поверхности подложки. Поэтому будет целесообразно предварительно коснуться вопроса качества подложек исследуемых ДР. Кроме выполнения качественной дифракционной структуры, для обеспечения допусков в датчике необходимо использовать прецизионные подложки с требованиями параллельности не хуже 5 мкм и клиновидностью не более  $10''$ . Рабочие поверхности должны иметь первый класс чистоты и малые предельные отклонения формы. Контроль этих параметров столь же важен, как и контроль параметров дифракционной структуры, и необходим на этапе изготовления измерительных шкал. Он осуществляется традиционными методами – с помощью интерферометра или пробного стекла [6].

Высокие требования по однородности, бесшви́льности, двойному лучепреломлению, пузырьности (I или II категория) предъявляются к материалу подложек, особенно пропускающих. На достоверность полученных результатов измерений существенное влияние оказывает изменение линейных размеров вследствие изменения температуры, поэтому подложки измерительных шкал изготавливаются из материала с очень низким коэффициентом температурного расширения ( $0 \pm 0,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ). Образцы измерительных шкал, исследуемых при экспериментальной апробации метода, выполнены на подложках из церодура (Zerodur, SCHOTT).

### ОБЗОР МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК

В данном разделе приведено описание современных методов контроля рельефно-фазовых ДР. В последние годы разработаны различные подходы к определению характеристик разнообразных оптических элементов с микрорельефом на промежуточных и финальной стадиях их изготовления [7–10]. Интерферометр Физо с фазовым сдвигом, например ФТИ-100PS [8], позволяет контролировать форму плоского или сферического волновых фронтов с погрешностью порядка одной тысячной от длины волны ( $\lambda/1000$ ). Погрешность искажения дифракционных структур, а значит и собственные погрешности установки записи ДОЭ, можно проконтролировать, измеряя локальное значение фазового сдвига [10].

Измерения формы поверхностного рельефа позволяет осуществить оптический профилометр. Реконструкция поверхностного рельефа осуществляется методом фазовых шагов. В результате обработки интерферограмм восстанавливается двумерная карта высот профиля поверхности объекта. Разрешающая способность в вертикальном направлении достигает 6 нм. С помощью профилометрических данных по критерию аппроксимированной глубины [7] можно проводить оперативную оценку точности формы микрорельефа, в том числе многоуровневого.

Методы, представленные в работе [10], отличаются использованием рассеивающего экрана, расположенного между исследуемым ДОЭ и видеокамерой с проекционным объективом, что позволяет направить часть дифрагированного излучения в сторону светочувствительной матрицы. Также реализовано сканирование поверхности за счет перемещения.

Нельзя не отметить работу Б.Г. Турухано и др. [11], в которой в рамках получения голографических ДР неограниченной длины предложен метод синтеза апертуры интерференционного поля. Данный термин подразумевает фазированное соединение с высокой степенью точности участков интерференционного поля и последовательную их

запись на светочувствительный носитель. Для этого с помощью адаптивного двулучевого интерферометра проводится контроль равномерности фазового распределения интерференционного поля с точностью до  $\lambda/100$ . Для реализации этого метода необходимо использование эталонной голографической ДР и жестко связанных с ней фотоприемниками (ФП), между сигналами с которых проводится измерение разности фаз.

Работа оптического элемента оценивается не только по соответствию заданному преобразованию световой волны, но и по соответствию жестким критериям его энергетической эффективности и малому светорассеянию. Точное измерение ДЭ особенно необходимо при создании ДР, принцип работы которых основан на управлении интенсивностью дифрагированного оптического излучения, как в нашем случае. Причем измерительная система для анализа габаритных ДР часто основывается на последовательном сканировании исследуемого элемента лазерным пучком.

### ТРЕБОВАНИЯ К ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ ШКАЛАМ В ДАТЧИКЕ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

В данном разделе представлено описание прохождения излучения в схеме датчика линейных перемещений [12], необходимое для понимания основы исследования. Принцип измерения перемещения основан на внесении фазового сдвига в интерференционные сигналы, регистрируемые ФП. Модуляция фазы обеспечивается смещением двух ДР (измерительных шкал) относительно друг друга и соответствующим внесением сдвига фазовой составляющей фронта пучка, дифрагировавшего в +1 и –1 максимумы на кодирующей шкале.

На рис. 1 проиллюстрирован процесс формирования интерференционной картины в плоскости ФП. Установим следующую терминологию: кодирующая шкала — отражательная ДР, которая перемещается и «кодирует» информацию об изменении положения, анализирующая шкала — пропускающая ДР, расположенная в считывающей

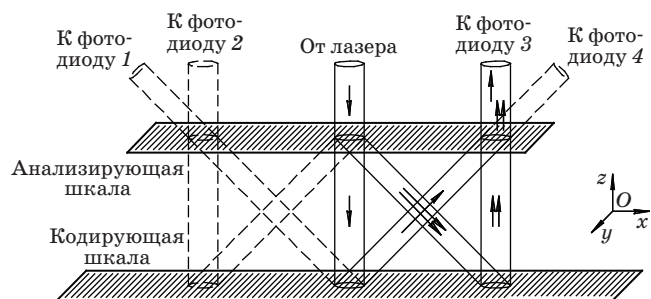


Рис. 1. Схема датчика линейных перемещений. Боковые фотодиоды — 1 и 4, осевые фотодиоды — 2 и 3.

головке датчика. Излучение полупроводникового лазерного модуля с  $\lambda = 650$  нм коллимируется, затем делится по амплитуде на анализирующей шкале частотой 1000 лин/мм и преобразуется на кодирующей шкале такой же частоты, далее перенаправляется в приемники излучения, в плоскости каждого из которых визуализируется интерференция. Подробное описание процесса модуляции и создания квадратурного сигнала на основе этой схемы представлено в работе [13].

В рамках свето-энергетического расчета рассмотрим амплитуду интенсивности излучения, приходящего на один боковой и один осевой фотодиоды. Этого будет достаточно для полного описания в силу симметрии схемы. На рис. 1 осевые фотодиоды обозначены цифрами 2 или 3, а боковые цифрами 1 и 4. Амплитуды интенсивности излучения, принимаемого боковым фотодиодом, определяются по формулам

$$I_1^a = I_{\text{las}}(1 - \rho_{\text{Fr}})\tau_{\text{sub}}\eta_{+1}^{\text{sub}}(\theta = 0^\circ)\eta_{-1}(\theta = \alpha) \times \eta_0^{\text{gr}}(\theta = 0^\circ)\tau_{\text{sub}}S_{\text{sens}} / (\cos(\alpha)\pi d_{\text{las}}^2), \quad (1)$$

$$I_1^b = I_{\text{las}}(1 - \rho_{\text{Fr}})\tau_{\text{sub}}\eta_0^{\text{sub}}(\theta = 0^\circ)\eta_{+1}(\theta = \alpha) \times \eta_{-1}^{\text{gr}}(\theta = 0^\circ)\tau_{\text{sub}}S_{\text{sens}} / (\cos(\alpha)\pi d_{\text{las}}^2). \quad (2)$$

Амплитуды интенсивности излучения, принимаемого осевым фотодиодом, определяются по формулам

$$I_2^a = I_{\text{las}}(1 - \rho_{\text{Fr}})\tau_{\text{sub}}\eta_{+1}^{\text{sub}}(\theta = 0^\circ)\eta_{-1}(\theta = \alpha) \times \eta_{+1}^{\text{gr}}(\theta = 0^\circ)\tau_{\text{sub}}S_{\text{sens}} / \pi d_{\text{las}}^2, \quad (3)$$

$$I_2^b = I_{\text{las}}(1 - \rho_{\text{Fr}})\tau_{\text{sub}}\eta_0^{\text{sub}}(\theta = 0^\circ)\eta_{+1}(\theta = 0^\circ) \times \eta_0^{\text{gr}}(\theta = \alpha)\tau_{\text{sub}}S_{\text{sens}} / \pi d_{\text{las}}^2, \quad (4)$$

где  $I_{\text{las}}$  — интенсивность источника излучения,  $\rho_{\text{Fr}}$  — коэффициент отражения Френеля от обратной стороны анализирующей шкалы,  $\tau_{\text{sub}}$  — коэффициент пропускания подложки анализирующей шкалы;  $\eta_0^{\text{sub}}(\theta = 0^\circ)$ ,  $\eta_{+1}^{\text{sub}}(\theta = 0^\circ)$ ,  $\eta_{-1}^{\text{sub}}(\theta = 0^\circ)$  — ДЭ анализирующей шкалы в 0-м, +1-м и -1-м порядках при нормальном падении излучения со стороны подложки;  $\eta_0^{\text{gr}}(\theta = 0^\circ)$ ,  $\eta_{+1}^{\text{gr}}(\theta = 0^\circ)$ ,  $\eta_{-1}^{\text{gr}}(\theta = 0^\circ)$  — ДЭ анализирующей шкалы в 0-м, +1-м и -1-м порядках при нормальном освещении со стороны ДР;  $\eta_0^{\text{gr}}(\theta = \alpha)$ ,  $\eta_{+1}^{\text{gr}}(\theta = \alpha)$  — ДЭ в 0-м и +1-м порядках анализирующей шкалы при наклонном падении под углом  $\alpha$  излучения со стороны ДР;  $\eta_{+1}(\theta = 0^\circ)$ ,  $\eta_{-1}(\theta = \alpha)$  — ДЭ кодирующей шкалы в +1-м и -1-м отражательных порядках при нормальном падении излучения;  $S_{\text{sens}}$  — площадь приемника излучения,  $d_{\text{las}}$  — диаметр лазерного пучка. Индексами  $a$  и  $b$  обозначены интерферирующие пучки, индекс  $\text{gr}$  (*grating*) соответствует па-

дению излучения со стороны ДР,  $\text{sub}$  (*substrate*) — со стороны подложки.

Амплитуды интенсивностей в интерферирующих пучках  $a$  и  $b$  должны быть равны для максимизации контраста интерференционных полос ( $V = 1$ )

$$V = 2I_a I_b / (I_a^2 + I_b^2). \quad (5)$$

Приравнявая данные амплитуды интенсивностей излучения, принимаемого каждым из фотодиодов, и преобразовав выражение (5), получаем условия равенства коэффициентов ДЭ (6) и (7) кодирующей и анализирующей шкал соответственно, выполнение которых приводит к максимизации итогового контраста интерференционных картин

$$\eta_{\pm 1}(\theta = 0^\circ) = \eta_{-1}(\theta), \quad (6)$$

$$\begin{cases} \eta_{\pm 1}^{\text{sub}}(\theta = 0^\circ) = \eta_0^{\text{sub}}(\theta = 0^\circ), \\ \eta_{\pm 1}^{\text{gr}}(\theta = 0^\circ) = \eta_0^{\text{gr}}(\theta = 0^\circ), \\ \eta_{\pm 1}^{\text{gr}}(\theta = 0^\circ) = \eta_{+1}^{\text{gr}}(\theta = \alpha), \\ \eta_{+1}^{\text{gr}}(\theta = \alpha) = \eta_0^{\text{gr}}(\theta = \alpha). \end{cases} \quad (7)$$

Таким образом, кроме обеспечения фазовой модуляции при перемещении, ДР выполняют функцию делителей по амплитуде в оптической системе датчика и отвечают за формирование интерференционных сигналов.

## КРИТЕРИЙ КАЧЕСТВА

Применение ДР в датчике линейных перемещений предполагает равномерное распределение интенсивности света в дифракционные максимумы при каждой дифракции в оптической системе, чего на практике добиться крайне сложно. Для измерительных шкал очень важно обеспечение максимально возможной ДЭ в используемых направлениях дифракции.

Выведенные условия максимизации контраста интерференционной картины справедливы при допущении, что интенсивности излучения, распределенного в нерабочие порядки дифракции, много меньше интенсивности излучения в нулевом и главных максимумах, и, следовательно, ими можно пренебречь. При угле дифракции в первых порядках  $\alpha = 40,5^\circ$  (соответствует периоду решетки 1 мкм и длине волны 650 нм) формулы (6) и (7) имеют вид

1)  $\eta_{\pm 1}^{\text{gr}}(\theta = 0^\circ) = \eta_{+1}^{\text{gr}}(\theta = 40,5^\circ)$  — в случае анализирующей шкалы коэффициенты ДЭ должны быть равны в  $\pm 1$ -х проходящих порядках дифракции при ортогональном падении излучения и в +1-м проходящем порядке при падении под углом  $40,5^\circ$  со стороны ДР,

2)  $\eta_{\pm 1}^{\text{sub}}(\theta = 0^\circ) = \eta_0^{\text{sub}}(\theta = 40,5^\circ)$ ,  $\eta_{\pm 1}^{\text{gr}}(\theta = 0^\circ) = \eta_0^{\text{gr}}(\theta = 0^\circ)$  — в случае анализирующей шкалы коэффициенты ДЭ должны быть равны в  $\pm 1$ -х и 0-м проходящих порядках дифракции при ортогональном падении излучения как со стороны подложки, так и со стороны ДР,

3)  $\eta_0^{\text{gr}}(\theta = 40,5^\circ) = \eta_{+1}^{\text{gr}}(\theta = 40,5^\circ)$  — в случае анализирующей шкалы коэффициенты ДЭ должны быть равны в  $+1$ -м и 0-м проходящем порядках дифракции при наклонном падении излучения со стороны ДР,

4)  $\eta_{\pm 1}(\theta = 0^\circ) = \eta_{-1}(\theta = 40,5^\circ)$  — в случае кодирующей шкалы ДЭ должны быть равны в  $\pm 1$ -х отражательных порядках при ортогональном падении и ДЭ в  $-1$ -м порядке при падении под углом  $40,5^\circ$ .

Анализ этих соотношений является трудоемкой задачей. Поэтому необходим критерий качества, однозначно характеризующий отклонение всех коэффициентов ДЭ от перечисленных условий. При их соблюдении энергия излучения равномерно распределяется в 0-й,  $-1$ -й и  $+1$ -й порядки дифракции в каждом из случаев.

Для оценки отклонения значений ДЭ от возможного максимума и их рассогласования сформулирован обобщенный показатель качества  $K$ , принимающий значения от 0 до 1. Причем  $K = 1$  соответствует идеальному случаю — точному соблюдению условий максимального контраста интерференционной картины.

Показатель качества по ДЭ анализирующих шкал соответствует

$$K_T = \left( 1 - \sum_{i=1}^N |\eta_{Ti} - \eta_{\text{perf}}| / (2N\eta_{\text{perf}}) \right) \sum_{i=1}^N \eta_{Ti} / (\eta_{\text{perf}}N), \quad (8)$$

где  $\eta_{\text{perf}} = 33\%$ ,  $\eta_{Ti}$  принимает значения описанных коэффициентов ДЭ в случае анализирующей шкалы  $\eta_0^{\text{gr}}(\theta = 0^\circ)$ ,  $\eta_{\pm 1}^{\text{gr}}(\theta = 0^\circ)$ ,  $\eta_0^{\text{gr}}(\theta = 40,5^\circ)$ ,  $\eta_{\pm 1}^{\text{gr}}(\theta = 40,5^\circ)$ ,  $\eta_{\pm 1}^{\text{sub}}(\theta = 0^\circ)$ ,  $\eta_0^{\text{sub}}(\theta = 0^\circ)$ ,  $N$  — количество данных коэффициентов.

Аналогичный показатель качества кодирующих шкал

$$K_R = \left( 1 - \sum_{i=1}^N |\eta_{Ri} - \eta_{\text{perf}}| / (2N\eta_{\text{perf}}) \right) \sum_{i=1}^N \eta_{Ri} / (\eta_{\text{perf}}N), \quad (9)$$

где  $\eta_{\text{perf}} = 33\%$ ,  $\eta_{Ri}$  принимает значения описанных коэффициентов ДЭ в случае кодирующей шкалы  $\eta_{\pm 1}(\theta = 40,5^\circ)$ ,  $\eta_{\pm 1}(\theta = 0^\circ)$ ,  $N$  — количество данных коэффициентов.

Полученный критерий позволяет не прибегать к анализу всех соотношений между коэффициентами ДЭ, приводящих к максимизации контраста, а качественно оценить эффективность образца по значению одного коэффициента. Тем не менее, нельзя избежать необходимости измерения всех входящих в критерий характеристик.

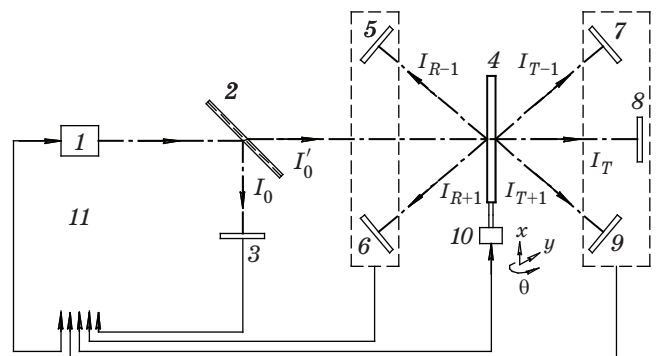
С помощью специализированного программного обеспечения в среде Matlab, проводящего решение задачи дифракции на периодических структурах, было реализовано моделирование распределения интенсивностей в дифракционные максимумы в зависимости от высоты профиля рельефа. По распределениям ДЭ были получены зависимости показателя качества в формулах (8) и (9) от допустимой высоты профиля рельефа решеток с периодом 1 мкм (как в оптической системе датчика линейных перемещений). Анализ данных, полученных путем описанного компьютерного моделирования, показал оптимальность ограничения показателя качества значением 0,6. Дифракционные решетки, показатель качества которых превышает данный уровень, обеспечивают достаточный контраст интерференционной картины и имеют технологически реализуемые параметры профиля рельефа.

Таким образом, можно сформулировать критерий качества по ДЭ: измерительные шкалы обладают удовлетворительными характеристиками ДЭ и применимы в схеме датчика линейных перемещений при значении обобщенного показателя качества  $K \geq 0,6$ .

## ПРЕДЛОЖЕННЫЙ МЕТОД

Для оперативного контроля обозначенных энергетических характеристик предложен метод, предусматривающий сканирование в рабочем поле образца, а также контроль мощности лазерного излучения.

На рис. 2 представлена разработанная функциональная схема стенда для контроля параметров ДЭ. С помощью фотоприемных устройств (ФПУ) 5–9 регистрируется распределение интенсивности света при дифракции на образце 4 в 0-м, а также



**Рис. 2.** Функциональная схема стенда для контроля ДЭ измерительных шкал. 1 — лазерный модуль, 2 — полупрозрачная пластина, 3 — ФПУ для контроля интенсивности источника излучения, 4 — исследуемая ДР, 5–9 — ФПУ для контроля распределения интенсивности в дифракционных порядках, 10 — блок устройств перемещения, 11 — управляющий компьютер.



+1-м и -1-м дифракционных порядках. Сканирование поверхности образца осуществляется с помощью блока перемещения 10, обеспечивающего линейные перемещения по вертикали и горизонтали, а также поворот для контроля ДЭ образцов при наклонном падении излучения. В зависимости от требований к результирующей оптической характеристике измерения проводятся с шагом соответственно выбранному числу зон на поверхности ДР 4. В качестве источника излучения 1 используется лазерный диодный модуль с излучением длиной волны 650 нм. В этом случае для ДР с частотой 1000 лин/мм угол падения  $\theta$  равен  $40,5^\circ$ . Для обработки полученных данных управления блоком перемещения и лазерным модулем применяется компьютер 11. В оптическую схему введена светоделительная пластина 2 и ФПУ 3 для обеспечения контроля флуктуации мощности источника излучения. Перед началом серии измерений необходимо оценить коэффициент деления  $k = I'_0/I_0$ , поместив ФПУ по ходу прошедшего через светоделитель пучка света и определив, таким образом, его интенсивность  $I'_0$ .

Коэффициенты ДЭ в каждой точке рабочего поля вычисляются как приведенное отношение интенсивности дифрагировавшего пучка  $I_{\text{dif}}$  к интенсивности исходного  $I_0$ :  $\eta = I_{\text{dif}}/(k I_0)$ .

Результатом измерений является карта значений ДЭ по зонам рабочего поля образца. По этим значениям вычисляется показатель качества измерительных шкал по формулам (8) и (9), что позволяет определить, пригодны ли контролируемые ДР для систем датчика линейных перемещений. Число зон измерения определяется конкретным образцом ДР. Если шаг зон много больше превышает размер лазерного пучка, сканирования не происходит, и измерения проводятся в локальных точках.

В каждой зоне образца контролю подлежат коэффициенты ДЭ, необходимые для вычисления показателя качества в соответствии с формулами (8) и (9):  $\eta_0^{\text{gr}}(\theta = 0^\circ)$ ,  $\eta_{\pm 1}^{\text{gr}}(\theta = 0^\circ)$ ,  $\eta_0^{\text{gr}}(\theta = 40,5^\circ)$ ,  $\eta_{\pm 1}^{\text{gr}}(\theta = 40,5^\circ)$ ,  $\eta_0^{\text{sub}}(\theta = 0^\circ)$ ,  $\eta_0^{\text{sub}}(\theta = 0^\circ)$  анализирующей шкалы;  $\eta_{\pm 1}(\theta = 0^\circ)$ ,  $\eta_{-1}(\theta = 40,5^\circ)$ ,  $\eta_{+1}(\theta = -40,5^\circ)$  кодирующей шкалы.

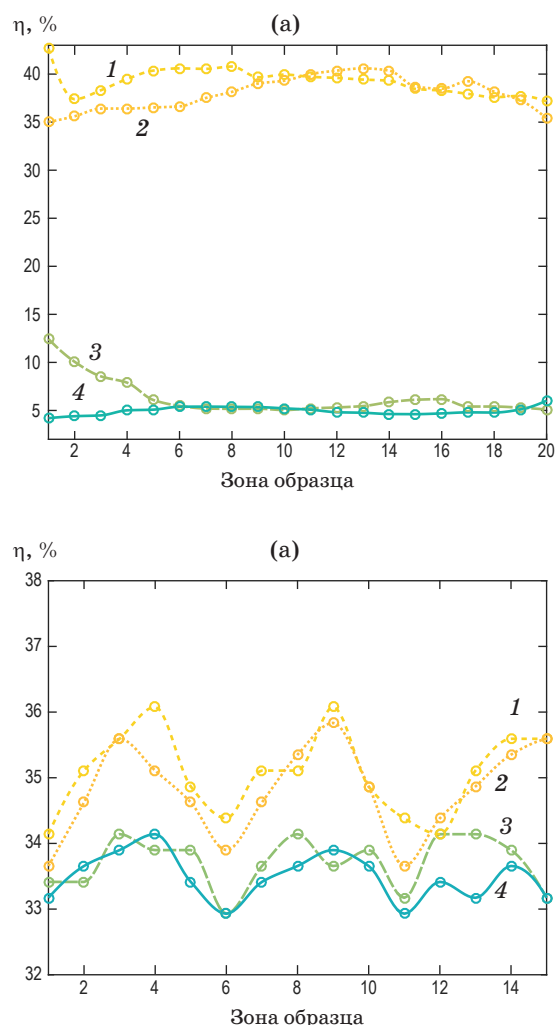
## РЕЗУЛЬТАТЫ АПРОБАЦИИ МЕТОДА

Апробация метода проводилась на тестовых образцах измерительных шкал. Конфигурация и точность изготовления дифракционных структур оказывает определяющее влияние на точность датчика, поэтому необходимо отметить, что перед контролем оптических характеристик проводился доступный контроль периода ДР с помощью оптического микроскопа.

В измерительном стенде в качестве ФПУ использованы тепловые фотоприемные головки 3A-FS

двухканального измерителя мощности *Laserstar* фирмы «*Ophir*». В качестве источника излучения применялся лазерный полупроводниковый модуль с излучением длиной волны 650 нм. В качестве устройства линейного перемещения использовался позиционер *Standa 8MT175-100* с контроллером 8SMC4-USB. Контроллер позиционера подключается к компьютеру с установленным соответствующим программным обеспечением для управления системой линейного позиционирования. Текущий контроль мощности лазерного излучения осуществляется путем отведения части лазерного излучения на ФПУ, установленный в положении 3 (рис. 2).

На рис. 3 представлены графики распределения контролируемых ДЭ двух образцов кодирующей



**Рис. 3.** Результаты измерений ДЭ образцов кодирующих шкал с показателем качества  $K = 0,503$  (а) и  $K = 0,920$  (б). 1 — ДЭ  $\eta_{-1}(\theta = 0^\circ)$  в -1-м порядке при нормальном освещении, 2 — ДЭ  $\eta_{+1}(\theta = 0^\circ)$  в +1-м порядке при нормальном освещении, 3 — ДЭ  $\eta_{-1}(\theta = 40,5^\circ)$  в -1-м порядке при освещении под углом  $\alpha = 40,5^\circ$ , 4 — ДЭ  $\eta_{+1}(\theta = -40,5^\circ)$  в +1-м порядке при освещении под углом  $\alpha = -40,5^\circ$ .

щих шкал в зависимости от зоны. Измерения проводились при сканировании вдоль направления  $x$ , поэтому карта измерений приведена в одномерном варианте. В случае, когда контролируемая ДР имеет широкую рабочую зону, измерения рекомендуется проводить по координате  $y$  также в нескольких зонах.

На рис. 3а приведены результаты измерения отражательной ДР, не удовлетворяющей разработанному критерию  $K = 0,503 (< 0,6)$ . Конфигурация данного образца обеспечивает высокие значения ДЭ при нормальном освещении образца, но не достаточные при наклонном освещении.

На рис. 3б продемонстрированы результаты измерения ДЭ отражательной ДР, подходящей для применения в системе датчика линейных перемещений и удовлетворяющей разработанному критерию  $K = 0,920 (> 0,6)$ . Конфигурация данного образца обеспечивает высокие значения ДЭ как при нормальном освещении образца, так и при наклонном.

Достаточность разработанного критерия была подтверждена экспертно путем установления проконтролированных шкал в экспериментальный образец датчика линейных перемещений.

## ВЫВОДЫ

Для контроля энергетических характеристик измерительных шкал представлена функциональная схема измерительного стенда с возможностью текущего контроля мощности излучения и сканированием поверхности образца. Для комплексной оценки коэффициентов ДЭ и их отклонения от возможного максимума сформулирован обобщенный показатель качества  $K$ , определяющий применимость измерительных шкал в системе датчика линейных перемещений. Измерительные шкалы обладают удовлетворительными характеристиками ДЭ и применимы в схеме датчика линейных перемещений при значении обобщенного показателя качества, превышающем уровень 0,6.

Проведена апробация метода контроля качества ДР. Подтверждена адекватность разработанного критерия. На основе описанного метода и сформулированного критерия проводился отбор ДР для создания экспериментального образца датчика линейных перемещений.

Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения проектной части государственного задания (проект № 3.2236.2017/4.6).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Одинокоев С.Б., Сагателян Г.Р., Ковалёв М.С. Расчет, конструирование и изготовление дифракционных и голограммных оптических элементов: учебное пособие. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 121 с.
2. Teimel A. Technology and applications of grating interferometers in high-precision measurement // Precision Eng. 1992. V. 14. № 4. P. 147–154.
3. Комоцкий В.А., Корольков В.И., Соколов Ю.М. Исследование датчика линейных перемещений на основе двухфазовых дифракционных решеток // Автометрия. 2006. Т. 42. № 6. С. 105–112.
4. Jourlin Y., Jay J., Parriaux O. Compact diffractive interferometric displacement sensor in reflection // Precision Eng. 2002. V. 26. № 1. P. 1–6.
5. Щеулин А.С., Агневакс А.Е., Купчиков А.К., Верховский Е.Б., Рысин А.И. Применение объемной голографической решетки в кристалле  $\text{CaF}_2$  для измерения линейного перемещения с нанометровой точностью // Опт. спектр. 2014. Т. 17. № 6. С. 1005–1011.
6. Афанасьев В.А. Оптические измерения. М.: Высшая школа, 1981. 229 с.
7. Полещук А.Г., Корольков В.П., Насыров Р.К., Хомутов В.Н., Конченко А.С. Методы контроля оптических элементов с микрорельефом // II международ. конф. и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии»: Сб. тр. / Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 2016. С. 8–14.
8. Полещук А.Г., Корольков В.П., Насыров Р.К., Хомутов В.Н., Конченко А.С. Методы оперативного контроля характеристик дифракционных и конформальных оптических элементов // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40. № 6. С. 818–828.
9. Полещук А.Г., Хомутов В.Н., Маточкин А.Е., Насыров Р.К., Черкашин В.В. Лазерные интерферометры для контроля формы оптических поверхностей // Фотоника. 2016. № 4. С. 38–51.
10. Белоусов Д.А., Полещук А.Г., Хомутов В.Н. Контроль пространственного распределения оптического излучения, рассеянного дифракционной структурой // Компьютерная оптика. 2015. Т. 39. № 5. С. 678–686.
11. Турухано Б.Г., Турухано Н., Вилков Е.А. Синтез апертуры интерференционного поля // Компьютерная оптика. 2011. Т. 35. № 2. С. 145–150.
12. Коротаев В.В., Прокофьев А.В., Тимофеев А.Н. Оптико-электронные преобразователи линейных и угловых перемещений. Часть 1. Оптико-электронные преобразователи линейных перемещений. СПб.: НИУ ИТМО, 2012. 114 с.
13. Shishova M.V., Odinokov S.B., Lushnikov D.S., Zherdev A.Y., Gurylev O.A. Mathematical modeling of signal transfer process into linear displacement encoder optical system // Procedia Eng. 2017. V. 201. P. 623–629.