



ЗАПИСЬ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК С ПОМОЩЬЮ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРА

RECORDING HOLOGRAPHIC DIFFRACTION GRIDS USING A PULSE LASER

Б.Г.Турухано¹, заведующий ЛГИИС, Заслуженный изобретатель РФ, Н.Турухано¹, вед. науч. сотр., Заслуженный изобретатель РФ, И.А.Турухано², кинооператор / turukhano_bg@npi.nrcki.ru

B.G.Turukhano¹, Head of LGIIS, Honored Inventor of RF, N.Turukhano¹, Leading Researcher, Honored Inventor of RF, I.A.Turukhano², Cameraman

DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.5.312.319

Получено: 26.05.2021 г.

В данной работе рассматривается устройство для записи голографических дифракционных решеток (ГДР) в импульсном лазере, которое позволяет повысить их точность и дифракционную эффективность для чего в интерферометре для записи решеток дополнительно введен второй источник когерентного излучения – импульсный лазер, расположенный на его входе и оптически связанный с ним. Это устраняет необходимость слежения за коррекциями во время засветки в силу малости величины длительности времени засветки. С этой целью в оптоэлектронную схему введен блок синхронизации, выход которого связан со вторым источником когерентного излучения импульсного действия, а вход – с источником переменного напряжения оптоэлектронной схемы.

This paper deals with a device for holographic diffraction gratings (HDG) recording using a pulse laser, which makes it possible to increase the accuracy of grating and its diffraction efficiency. For this purpose use was made of the interferometer for recording gratings and an optically connected second source of coherent radiation located at the input. Such configuration eliminates the need to track corrections during illumination due to a short exposure period. A synchronization unit was introduced into the optoelectronic circuit which output was connected to the second source of pulsed coherent radiation, and the input – to the AC voltage source of the optoelectronic circuit.

ВВЕДЕНИЕ

Голографические дифракционные решетки (ГДР) используются в различных измерительных системах – датчиках линейных и угловых перемещений, длиномерах, многокоординатных измерительных машинах – и позволяют получать гораздо более высокую точность и разрешение, нежели при использовании систем на базе традиционной оптики.

Это связано с тем, что в настоящее время к измерительным системам предъявляются все более высокие требования. Показатели металлообрабатывающего оборудования не полностью отвечают растущим запросам, в связи с чем необходимо повышение точности изготовления деталей машин. Технический уровень и качество

продукции в станкостроении во многом зависит от смежных отраслей, поставляющих комплектующие изделия, в том числе и оптические измерительные устройства.

В статье рассматриваются вопросы повышения метрологической точности измерительных систем за счет их оснащения высокоточными датчиками на базе ГДР.

НАСТРОЙКА ИНТЕРФЕРОМЕТРА ДЛЯ ЗАПИСИ ГДР

При записи голографической решетки с помощью интерферометра вначале настраивают интерферометр с помощью непрерывного лазера, а затем осуществляют ее запись с помощью импульсного лазера.

¹ ЛГИИС – Лаборатория голографических информационных и измерительных систем, НИЦ "Курчатовский Институт" – ПИЯФ, г. Гатчина / LHIMS, Laboratory of Holographic Information and Measurement Systems, NRC "Kurchatov Institute" – PYAF, Gatchina.

² Санкт-Петербургский университет кино и телевидения "КИТ" / St. Petersburg State University of Film and Television.

Угол между плечами интерферометра выбирается в зависимости от необходимой частоты ГДР. Для определения фазовых сдвигов используется фазовая модуляция световых пучков [1]. Величина разности фаз в интерференционном поле (ИП) $\Delta\phi_1k$ и $\Delta\phi_2k$ определяется фотоприемниками, расположенными на прямой, параллельной направлению сдвига (ζ) волнового фронта. Падающая на решетку квазиплоская волна одного из плеч интерферометра изменяет фазу ИП таким образом, что его фазовое распределение является точным отображением фазового распределения фаз падающей волны. Это фазовое распределение превращается и в распределение амплитуд в интерференционном поле. Таким образом, на выходе интерферометра формируется квазипростая волна S с комплексной амплитудой:

$$S(x, y) = S_0(x, y) \exp[i f(x, y)], \quad (1)$$

где $S_0(x, y)$ – амплитудное, а $f(x, y)$ – фазовое распределение волны.

Устройство для записи ГДР в импульсном лазере показано на рис.2. Луч $S(1)$ сохраняет свою



Рис.1. Распределение равномерности интерференционных полос в выходной апертуре интерферометра при $\Delta x = 100$ мм
Fig.1. Distribution of the interference bands uniformity in the output aperture of the interferometer at $\Delta x = 100$ mm

когерентность и интерферирует со вторым падающим лучом, создавая интерференционную картину.

Данный интерферометр формирует на выходе ИП комплексную амплитуду:

INTRODUCTION

Holographic diffraction grids (HDC) are used in different measuring systems, such as linear and angular displacement sensors, length meters and multi-coordinate measuring systems, and make it possible to obtain higher accuracy and resolution compared with the systems based on traditional optics.

Nowadays, the ever increasing requirements are applied to the modern measuring systems. Moreover, the characteristics of metalworking equipment do not fully respond to the growing demands, so, it is imperative to improve quality of the machine parts manufacture. The state of the art and product quality in machine-tool industry depends much on the related branches that produce component parts, including optical and measuring devices. In this paper, we consider problems

of metrological accuracy of the measuring systems equipped with high precision HDC-based sensors.

ADJUSTMENT OF AN INTERFEROMETER FOR THE HDG RECORDING

While recording using an interferometer it should first be adjusted with a continuous laser and, after this, recording is carried out with a pulse laser.

An angle between the interferometer arms is chosen depending on the necessary HDF frequency. Phase modulation of light beams is used to detect phase shifts [1]. The phase difference value in the interference field (IF) $\Delta\phi_1k$ and $\Delta\phi_2k$ are determined by photodetectors placed along the line parallel to wave front shift (ζ). When a quasilinear wave of an interferometer arm falls upon a grid,

it changes the IF phase in such a way that its phase distribution is the precise copy of the falling wave phase distribution. This phase distribution also transforms in the amplitude distribution in the interference field too. So, a quasilinear wave S of a complex amplitude is formed in the interferometer output:

$$S(x, y) = S_0(x, y) \exp[i f(x, y)], \quad (1)$$

here $S_0(x, y)$ – amplitude distribution, $f(x, y)$ – phase distribution of a wave.

The device for HD recording using a pulse laser is shown in Fig.1. The laser ray $S(1)$ preserves its coherence and interference with the second ray, thereby forming the interference pattern.

This interferometer forms the complex amplitude in an IF output:



$$S_{x \text{ Вых}}(x, y) = a S(x, y) + b S(x + \zeta, y). \quad (2)$$

Интенсивность ИП определяется выражением:

$$\begin{aligned} I(x, y, t) &= |\exp i [f(x, y) + \arg a(t)] + \\ &+ \exp i [f(x + \zeta, y) + \arg b(t)]|^2 = \\ &= 2\{1 + \cos [f(x + \zeta, y) - f(x, y) + c(t)]\}, \end{aligned} \quad (3)$$

где x, y – координаты в выходной плоскости подложки, ζ – величина сдвига вдоль оси ОХ, а a и b (2) – комплексные функции, определяемые реальной оптикой, используемой в интерферометре. Для случая динамического режима работы интерферометра a и b являются функциями времени.

Интенсивность ИП определяется выражением:

$$\begin{aligned} I(x, y, t) &= |\exp i [f(x, y) + \arg a(t)] + \\ &+ \exp i [f(x + \zeta, y) + \arg b(t)]|^2 = \\ &= 2\{1 + \cos [f(x + \zeta, y) - f(x, y) + c(t)]\}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $c(t) = \arg b(t) - \arg a(t)$.

Если функция $c(t)$ в (3) меняется по линейному закону, то в каждой точке ИП интенсивность изменяется по гармоническому закону с частотой $\nu = \omega/2\pi$.

Разность фаз между сигналами в двух точках ИП (x_0, y_0) и (x, y) можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \Delta\phi_x(x, y; x_0, y_0) &= [f(x + \zeta, y) - f(x, y)] - \\ &- [f(x_0 + \zeta, y_0) - f(x_0, y_0)]. \end{aligned} \quad (5)$$

Из (5) видно, что функция $\Delta\phi_x(x, y; x_0, y_0)$ инвариантна к преобразованию функции $f(x, y)$ вида:

$$f(x, y) = f(x_0, y_0) + c(x) + g(y) + d, \quad (6)$$

где c и d – произвольные постоянные, а $g(y)$ – произвольная функция.

Рекуррентное выражение (4) можно привести к соотношению для значений функции $f(x, y)$ в ряде точек, расположенных с периодом ζ , вдоль оси ОХ:

$$\begin{aligned} f(x_0 + n\zeta, y) &= \sum_{k=0}^{n-1} \Delta\phi_x(x_0 + k\zeta, y; x_0, y_0) + \\ &+ [f(x_0 + \zeta, y_0) - f(x_0, y_0)] / \zeta n\zeta + f(x_0, y), \end{aligned} \quad (7)$$

где $n = 1, 2, \dots, N_x$, $N_x = \frac{D_x}{\zeta}$, D_x – апертура поля вдоль оси ОХ.

Определим функцию $f(x_0, y)$ (5). Для этого осуществим сдвиг волнового фронта вдоль оси ОУ, то есть перпендикулярно направлению первоначального сдвига. По аналогии с вышеизложенным значения функции $f(x_0, y)$ в ряде точек с периодом μ можно записать в виде:

$$\begin{aligned} f(x_0, y_0 + m\mu) &= \sum_{l=0}^{m-1} \{ \Delta\phi_y(x_0, y_0 + \mu; x_0, y_0) + \\ &+ [f(x_0, y_0 + \mu) - f(x_0, y_0)] / \mu \} m\mu + f(x_0, y_0), \end{aligned} \quad (8)$$

где $m = 1, 2, \dots, N_y$, $N_y = D_y/\mu$, D_y – апертура поля вдоль оси ОУ.

$$S_{x \text{ Вых}}(x, y) = a S(x, y) + b S(x + \zeta, y). \quad (2)$$

IF intensity is defined by the formula:

$$\begin{aligned} I(x, y, t) &= |\exp i [f(x, y) + \arg a(t)] + \\ &+ \exp i [f(x + \zeta, y) + \arg b(t)]|^2 = \\ &= 2\{1 + \cos [f(x + \zeta, y) - \\ &= f(x, y) + c(t)]\}, \end{aligned} \quad (3)$$

here x, y – coordinates in outer substrate plane, ζ – shift along OX axis, a and b (2) – complex functions dependent on real optics used in the interferometer. In the dynamic mode of the interferometer operation a and b are time functions.

IF intensity is described by the formula:

$$\begin{aligned} I(x, y, t) &= |\exp i [f(x, y) + \\ &+ \arg a(t)] + \exp i [f(x + \zeta, y) + \\ &+ \arg b(t)]|^2 = 2\{1 + \\ &+ \cos [f(x + \zeta, y) - f(x, y) + c(t)]\}, \end{aligned} \quad (4)$$

here $c(t) = \arg b(t) - \arg a(t)$.

If the function $c(t)$ in (3) changes according to the linear law, the intensity changes according to the harmonic law at each point of IF with a frequency of $\nu = \omega/2\pi$.

The phase difference between the signals in two points of IF (x_0, y_0) and (x, y) can be written as:

$$\begin{aligned} \Delta\phi_x(x, y; x_0, y_0) &= \\ &= [f(x + \zeta, y) - f(x, y)] - \\ &- [f(x_0 + \zeta, y_0) - f(x_0, y_0)]. \end{aligned} \quad (5)$$

It is clear from (5), that the function $\Delta\phi_x(x, y; x_0, y_0)$ is invariant to transformation of the function $f(x, y)$ described as:

$$f(x, y) = f(x_0, y_0) + c(x) + g(y) + d, \quad (6)$$

here c and d – arbitrary constants, $g(y)$ – arbitrary function.

The recurrent expression (4) can be reduced to the relation for the values of f function (x, y) in

Из уравнений (7) и (8) можно записать общее выражение для значений функции $f(x, y)$ на сетке точек с периодами ζ и μ :

$$f(x_0 + n\zeta, y_0 + m\mu) = \sum_{k=0}^{n-1} \Delta\phi_x(x_0 + k\zeta; x_0, y_0) + \sum_{l=0}^{m-1} \Delta\phi_y(x_0, y_0 + \mu; x_0, y_0) + C_1 n\zeta + C_2 m\mu + d, \quad (9)$$

где $C_1 = [f(x_0 + \zeta, y_0) - f(x_0, y_0)] / \zeta$, $C_2 = [f(x_0 + y_0 + \mu) - f(x_0, y_0)] / \mu$, $d = f(x_0, y_0)$, а $\Delta\phi_x$ и $\Delta\phi_y$ (7) несут информацию о кривизне волнового фронта и измеряются непосредственно в процессе эксперимента. Постоянные C_1 , C_2 и d можно определить только из граничных условий, которые будут задавать опорную плоскость сравнения. При этом наиболее правильным представляется использование граничных условий, при которых имеет место совпадение начальных и конечных полос исследуемого ИП.

Распределение интенсивности ИП можно записать в виде:

$$I(x, y, t) = 2 \{ \cos[f(x + \zeta, y) - f(x, y) + \Omega(x, y, t)] \}, \quad (10)$$

где $\Omega(x, y, t) = \arg a(x, y, t) - \arg b(x, y, t)$, $\Omega(x, y, t) = \Omega(x, y) + c(t)$, $\Omega(x, y)$ - член, описывающий фазовые искажения, вносимые интерферометром.

ОШИБКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИП

При определении фазового распределения ИП возникают систематические и случайные ошибки. Первые обусловлены выбором самого метода, вторые возникают в процессе эксперимента.

Фазовая ошибка $\Delta\Omega$ предложенного метода связана с ошибками, обусловленными абберациями используемой оптической системы [2-3]:

$$\Delta\Omega_x = \Delta\Omega(x) / dx \text{ и } \zeta = h \sin 2\alpha / \sqrt{h^2 - \sin^2 \alpha} \quad (11)$$

$$\Delta\Omega\alpha(x) = \frac{d\Omega(x)}{dx} \{ [2\cos^2\alpha(n^2 - \sin^2\alpha) + 1 / 2(\sin^2 2\alpha)] / (n^2 - \sin^2\alpha)^{3/2} \} h dx, \alpha, \quad (12)$$

где h и n - толщина и показатель преломления соответственно. Если качество оптики таково, что $\Delta\Omega(x)/dx \leq 1 \lambda/\text{см}$, то при $dx \leq 0,1 \text{ мм}$ и $\Delta\alpha \leq 5^\circ$ то $|\Delta\Omega(x)|_{\text{max}} < \lambda/100$.

Можно также оценить величину дисперсии Δn , (9) характеризующую неравномерность распределения полос ИП:

$$\Delta n = \frac{d}{2\pi} [(N - n) / N \sum_{k=0}^{n-1} (\Delta\phi_{2k} - \Delta\phi_{1k}) - \frac{n}{N} \sum_{k=0}^{n-1} (\Delta\phi_{2k} - \Delta\phi_{1k})], \quad (13)$$

Так как величины $\Delta\phi_{1k}$ и $\Delta\phi_{2k}$ (10) измеряются и входят одинаково в оба плеча, то они имеют одинаковую дисперсию σ_n и с учетом среднеквадратической ошибки и по результатам 10 измерений ($m=10$) значений разности фаз $\Delta\phi_i$ между одними и теми же точками мы окончательно получим:

$$\sigma_n \frac{d}{2\pi} = \sqrt{\frac{2n(N-n)}{N}} S. \quad (14)$$

a number of points located with the period ζ along X axis:

$$f(x_0 + n\zeta, y) = \sum_{k=0}^{n-1} \Delta\phi_x(x_0 + k\zeta, y; x_0, y_0) + [f(x_0 + \zeta, y_0) - f(x_0, y_0)] / \zeta n\zeta + f(x_0, y), \quad (7)$$

here $n = 1, 2, \dots, N_x$, $N_x = \frac{D_x}{\zeta}$, D_x - field aperture along OX axis.

Let's make a definition of function $f(x_0, y)$ (5). In order to do this, we make a shift of the wave front along OY axis, perpendicular to the initial shift direction. Similar to the above, the function $f(x_0, y)$ values in a series of

points with a period μ , it is possible to write down:

$$f(x_0, y_0 + m\mu) = \sum_{l=0}^{m-1} \{ \Delta\phi_y(x_0, y_0 + \mu; x_0, y_0) + [f(x_0, y_0 + \mu) - f(x_0, y_0)] / \mu \} m\mu + f(x_0, y_0), \quad (8)$$

here $m = 1, 2, \dots, N_y$, $N_y = D_y / \mu$, D_y - field aperture along the OY axis.

Using the expressions (7) and (8), it is possible to write down the general expression for the values of $f(x, y)$ function in the point net with the periods ζ and μ :

$$f(x_0 + n\zeta, y_0 + m\mu) = \sum_{k=0}^{n-1} \Delta\phi_x(x_0 + k\zeta; x_0, y_0) + \sum_{l=0}^{m-1} \Delta\phi_y(x_0, y_0 + \mu; x_0, y_0) + C_1 n\zeta + C_2 m\mu + d, \quad (9)$$

where $C_1 = [f(x_0 + \zeta, y_0) - f(x_0, y_0)] / \zeta$, $C_2 = [f(x_0 + y_0 + \mu) - f(x_0, y_0)] / \mu$, $d = f(x_0, y_0)$, and $\Delta\phi_x$ and $\Delta\phi_y$ (7) include information about the wave front curvature and are measured during the experiment. The constants C_1 , C_2 and d can be determined only from boundary conditions which form the support plane of comparison. In doing so, it seems the most correct to use such boundary conditions where there is a coincidence

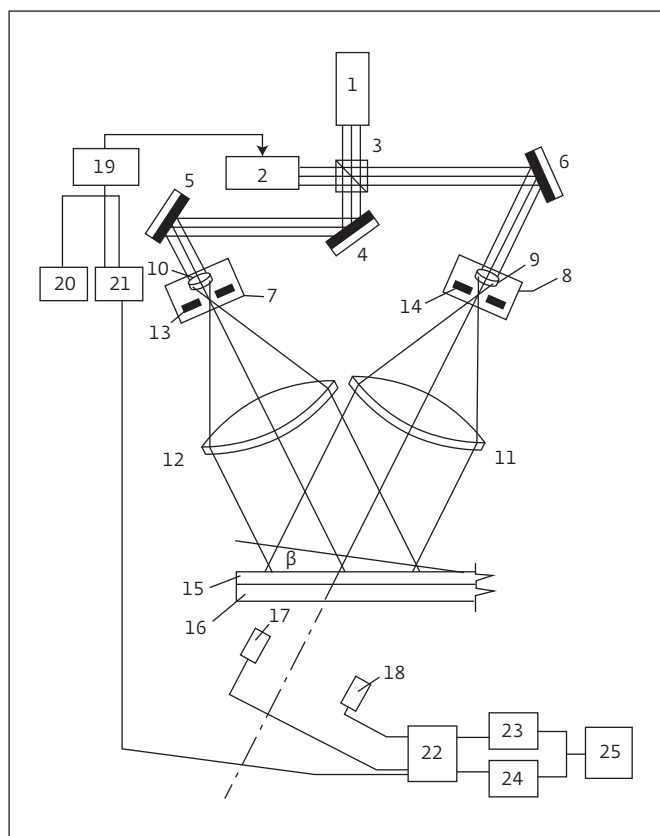


Рис.2. Оптоэлектронная схема для записи ГДР. 1, 2 – лазеры непрерывный и импульсный; 3 – делитель пучка; 4, 5, 6 – зеркала; 7, 8 – поворотные столы; 9, 10, 11, 12 – линзы; 13, 14 – диафрагмы; 15 – подложка со светочувствительным слоем; 16 – решетка; 17 – блок синхронизации; 18, 19 – фотоприемники; 20 – источник постоянного напряжения; 21 – генератор переменного напряжения; 22 – блок коммутации и управления; 23, 24 – селективные усилители; 25 – фазометр

Fig.2. Optoelectronic circuit for recording HDG. 1, 2 – continuous and pulsed lasers; 3 – beam divider; 4, 5, 6 – mirrors; 7, 8 – turntables; 9, 10, 11, 12 – lenses; 13, 14 – diaphragms; 15 – substrate with a light-sensitive layer; 16 – grid; 17 – synchronization unit; 18, 19 – photodetectors; 20 – DC voltage source; 21 – DC generator; 22 – control unit; 23, 24 – selective amplifiers; 25 – phase meter

Так как в нашем случае $S \leq 2\pi/300$, $N = 6$, $\sigma_{N/2} \leq 5,10^{-3} \mu\text{m}$, то суммарная ошибка (11) не превышает величину $3,10^{-2} \mu\text{m}$.

Для оценки качества интерференционного поля введем функцию

$$Q = \{\Delta n\}_{\max} - \{\Delta n\}_{\min}, \quad (15)$$

служащую интегральной характеристикой aberrаций телескопических систем (ТС)

и характеризующую максимальное отклонение функции распределения полос ИП от идеально равномерного распределения (рис.1).

ЗАПИСЬ ГДР С ПОМОЩЬЮ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРА

Выбранные значения коррекций в дальнейшем поддерживаются теми же с помощью постоянного напряжения блока 20 до самой засветки первого участка ГДР. После этого запускают от блока управления и коммутации импульсный источник когерентного излучения 2 синхроимпульсом от блока 19 для засветки регистрирующего слоя. Длительность светового импульса источника когерентного излучения порядка 10^{-8} с, что намного меньше, чем длительность засветки, осуществляемой в непрерывном лазере.

Синхроимпульс для запуска импульсного источника когерентного излучения можно сформировать в блоке синхронизации 19 (рис.2), который конструируется по известным принципам. Блок синхронизации содержит дифференцирующую цепь для образования отрицательного импульса по спаду пилообразного импульса. Формирователь положительного запускающего импульса на триггере "Шмидта" содержит схему регулирующей задержки на одном вибраторе, включающую регулятор задержки на переменном сопротивлении, а также содержит дифференцирующую цепочку заднего фронта сигнала от схемы задержки и схему формирования импульса запуска. Поэтому за столь короткое время на картине интерференционного поля, копируемого на синтезируемую решетку, не сказываются никакие внешние и внутренние факторы типа вибраций и деформации механических узлов, и поэтому вводимые до начала засветки коррекции сохраняют с высокой точностью свое значение и во время самой засветки. Синхроимпульс от генератора переменного напряжения 21 служит "опорным" импульсом для определения положения муаровой полосы в пространстве. Необходимые значения $\Delta\phi$ можно получить с помощью блока коммутации и управления 22, который управляет фотодетектором, сигналы с которого через селективные усилители 23 и 24 подаются на фазометр 25. После этого запускают от блока управления импульсный источник когерентного излучения для засветки решетки. Благодаря короткому времени засветки величины коррекции $\Delta\phi$ сохраняют свою величину.

После засветки можно осуществить перемещение каретки и записать второй участок ГДР. В результате непараллельного перемещения

штрихи записанного первого участка изменили свое положение относительно линий интерференционного поля, которые будут копироваться на втором участке. С этой целью вводятся соответствующие коррекции. После ввода коррекций производится засветка второго участка решетки путем очередного запуска импульсного источника когерентного излучения без слежения за коррекциями во время засветки. Цикл повторяется до синтеза решетки необходимой длины.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Аберрации реальных линзовых систем, применяемых в интерферометре, связаны с неточностью их обработки, вызывают несимметричные искажения волновых фронтов и не могут быть устранены правильным их расположением вдоль пучков.
2. Зейделевские аберрации: кома, дисторсия, астигматизм и кривизна поля зависят от ориентации блока [4] в интерферометре.
3. Сферические аберрации для идентичных телескопических систем на величину Q не влияют в силу их одинаковости в двух плечах.
4. Аберрации реальных ТС, связанные с их обработкой, не могут быть устранены.

Использование предложенного метода позволило получить равномерное распределение интерференционных полос ИП не хуже $\lambda/100$ и записать голографические решетки, используемые в голографических системах линейных перемещений [5], обладающие высокой точностью и разрешением вплоть до 1 нм.

Предложенное устройство позволяет повысить точность синтезируемой решетки и ее дифракционную эффективность за счет:

- отсутствия необходимости слежения за коррекциями во время засветки в силу малости величины длительности времени засветки;
- отсутствия "мертвого времени", связанного с выключением модуляции перед засветкой и необходимого для принятия зеркалом стационарного положения, за которое коррекции не поддаются контролю и восстановлению;
- отсутствия процесса включения и выключения модуляции со всеми отрицательными последствиями, исходящими из него;
- впервые также были созданы линейные автоматизированные системы особо высокой точности: линейные датчики до 1 м с точностью $\pm 0,3$ мкм, а также длиномеры голографические (ДГ) с длинами: 30, 100, 200, с точностями 0,1/0,2/0,3 мкм, с разрешением до 10 нм и выше и со скоростью измерения до 500 мм/с.

Выводы

Предложенный метод пригоден для исследования степени периодичности распределения интерференционных полос голографического 2-лучевого интерферометра.

В результате проведенных исследований, как видно из выше приведенного графика (рис.1) равномерного распределения полос, можно определить фазовое распределение интерференционных полос и отъюстировать интерферометр таким образом, что

of the initial and finite bands of the studied IF.

The IF intensity distribution can be formulated as follows:

$$I(x, y, t) = 2 \{ \cos [f(x + \zeta, y) - f(x, y) + \Omega(x, y, t)] \}, \quad (10)$$

here $\Omega(x, y, t) = \arg a(x, y, t) - \arg b(x, y, t)$, $\Omega(x, y, t) = \Omega(x, y) + c(t)$, $\Omega(x, y)$ - the member describing phase distortions that appeared due to the interferometer.

ERRORS IN DETECTION OF THE IF PHASE DISTRIBUTION

The systematic and random errors occur while detecting the

IF phase distribution. The first ones connected with choosing the method, and the second ones occurring during the experiment.

The phase error $\Delta\Omega$ of the proposed method is associated with the errors caused by aberrations of the optical system used [2-3]:

$$\Delta\Omega_x = \Delta\Omega(x) / dx \text{ и } \zeta = h \sin 2\alpha / \sqrt{h^2 - \sin^2 \alpha} \quad (11)$$

$$\Delta\Omega(x) = \frac{d\Omega(x)}{dx} \{ [2\cos^2 \alpha (n^2 - \sin^2 \alpha) + 1/2(\sin^2 2\alpha)] / (n^2 - \sin^2 \alpha)^{3/2} \} h dx, \alpha, \quad (12)$$

here h and n - thickness and refraction indices, accordingly. If the optics quality is such that $\Delta\Omega(x)/dx \leq 1\lambda/\text{cm}$, and $dx \leq 0,1\text{mm}$, and $\Delta\alpha \leq 5^\circ$, we have $|\Delta\Omega(x)|_{\max} < \lambda/100$.

It is also possible to estimate the magnitude of dispersion Δn , (9) characterizing the non-uniformity of the IF bands distribution:

$$\Delta n = \frac{d}{2\pi} [(N - n) / N \sum_{k=0}^{n-1} (\Delta\phi_{2k} - \Delta\phi_{1k}) - \frac{n}{N} \sum_{k=0}^{n-1} (\Delta\phi_{2k} - \Delta\phi_{1k})], \quad (13)$$

Since the values $\Delta\phi_{1k}$ and $\Delta\phi_{2k}$ (10) are measured and included



равномерность их распределения будет не хуже 2 нм на участке в 100 мм.

Поэтому можно сделать вывод, что основные погрешности связаны с неточностью обработки оптических элементов интерферометра.

В случае малых аберраций оптических элементов значение нормированной интенсивности в центре апертуры волнового пучка практически не зависит от природы аберраций и отличается от идеального случая на величину, пропорциональную среднеквадратичной деформации волнового фронта.

Повышенная метрологическая точность ГДР позволит создавать высокоточные датчики на их базе и поднять уровень современных измерительных систем.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Турухано Б.Г., Турухано Н. Голографическая система для измерения линейных перемеще-

ний и фазовых сдвигов. Материалы III Всесоюзной школы по голографии Л. ЛИЯФ, 1972. С. 213–233.

2. Rosenhauer K., Rosenbruch K.J. The measurement of the optical transfer functions of lenses. Rep. Progr. Phys. 1967. V. 30. PP. 1–25.
3. Schmahl G. and Rudolph D. Progress in Optics. (Amsterdam-London, North-Holl, Publ. Comp. 1976. V. 14. P. 197.
4. Crane R. Appl. Optics. 1969. V. 8. P. 521.
5. Турухано Б.Г., Турухано Н. Датчик линейных перемещений. Патент РФ, № 2 197 713. 2003. Пр. 07.08.2000.

Декларация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

in the same way in both arms, they have the same dispersion σ_n and, taking into account the standard error and according to the results of 10 measurements ($m=10$) the values of the phase difference $\Delta\phi_1$ between the same points, we finally obtain:

$$\sigma_n \frac{d}{2\pi} = \sqrt{\frac{2n(N-n)}{N}} S \quad (14)$$

As in our case $S \leq 2\pi/300$, $N=6$, $\sigma_{N/2} \leq 5 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}$, the total error (11) does not exceed $3 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}$.

To assess the interference field quality, we introduce a function:

$$Q = \{\Delta n\}_{\max} - \{\Delta n\}_{\min}, \quad (15)$$

that is the integral characteristics of the aberration of telescopic systems (TS) and characterizes the maximum deviation of the IF band distribution function from the perfectly uniform distribution (Fig.1).

HDG RECORDING USING A PULSE LASER

The selected correction values are further supported by the constants using a direct voltage unit 20 to the

illumination of the first section of the HDG. After that, the pulse source of coherent radiation 2 is triggered from the control and switching unit by a synchropulse from block 19 for the illumination of the recording layer. The duration of the light pulse source of coherent radiation is about 10^{-8} s, which is much smaller than the duration of the illumination carried out in a continuous laser.

The synchropulse to launch a pulse source of coherent radiation can be formed in the synchronization unit 19 (Fig.1), which is constructed according to the well-known principles. The synchronization unit contains a differentiating circuit for the formation of a negative pulse for the decay of the saw-shaped pulse. A positive trigger generator based on a Schmitt trigger contains an adjusting delay circuit per a vibrator, which includes a delay controller based on a variable resistor, and also contains a differentiating circuit of the rear front of the signal from the delay circuit and the launch moment forming scheme. Therefore, no external and internal factors like vibration and deformation

of mechanical nodes may not impact, for such a short time, the image of the interference field copied onto the synthesized grid, and that is why they are administered before illumination of the correction, and retain their value with high accuracy during the illumination itself. The synchropulse from the variable voltage generator 21 serves as a "reference" pulse to determine a position of the moiré band in space. The required values of $\Delta\phi$ can be obtained using the switching and control unit 22, which commutes the desired photodetector which signals are fed to the phazometer 25 via selective amplifiers 23 and 24. Afterwards, the pulse source of coherent radiation is triggered to illuminate the lattice. Due to a short exposure time of the correction value, $\Delta\phi$ retains its value.

After illumination, it is possible to move the carriage and record the second section of the HDG. As a result of non-parallel strokes movement of the recorded first section, they changed their position relative to the lines of the interference field, which will be copied in the second area. For this purpose, appropriate corrections are

introduced. After entering the corrections, an illumination of the second grid section is performed by the next start of the pulse source of coherent radiation without tracking corrections during the illumination. The cycle is repeated until the grid of necessary length is synthesized.

EXPERIMENTAL RESULTS

1. Aberrations of the real lens systems used in the interferometer are associated with inaccuracy of their processing, cause asymmetric distortion of wave fronts and cannot be eliminated by their correct location along the beams.
2. The Zeidel aberrations: coma, distortion, astigmatism and curvature of the field depend on the orientation of the TS [4] in the interferometer.
3. Spherical aberrations, for the identical telescopic systems do not affect the Q value because of their similarity in both arms.
4. Aberrations of the real TS related to their processing may not be eliminated.

Application of the proposed method made it possible to obtain a uniform distribution of the interference bands (IB) no worse than $\lambda/100$ and record the holographic grids used in the holographic systems of

linear movements [5] with high accuracy and resolution up to 1 nm.

The proposed device allows of increasing accuracy of the synthesized grid and its diffraction efficiency due to:

- the lack of need for adjustment of corrections during the illumination due to the smallness of the value of the illumination time;
- the lack of "dead time" associated with turning off the modulation before illumination, which is necessary for the mirror to adopt a stationary position, during which the corrections may not be controlled and restored;
- the lack of the process of turning on and off the modulation with all ensuing negative consequences;
- for the first time the linear automated systems of a particularly high accuracy were also created: linear sensors up to 1 meter with an accuracy of $\pm 0.3 \mu\text{m}$, as well as holographic length (HL) with lengths: 30, 100, 200, accuracy 0.1 / 0.2 / 0.3 μm , with a resolution of up to 10 Nm and above and at a measurement speed up to 500 mm/s.

CONCLUSIONS

The proposed method is suitable for studying a degree of periodicity of

the interference bands of the holographic 2-radiation interferometer.

As a result of the studies, as can be seen from the above graph (Fig.2) of the uniform distribution of the bands, it is possible to determine the phase distribution of the interference bands and adjust the interferometer in such a way that the uniformity of the band distribution will not be worse than 2 nm on a plot of 100 mm.

Therefore, it can be concluded that the main errors are associated with inaccuracy of processing the optical elements of the interferometer.

In the case of small aberrations of optical elements, the value of normalized intensity in the center of the wave beam aperture is practically independent of the aberration nature, and differs from the ideal case by the magnitude, proportional to the range of the wave front.

Increased metrological accuracy of the HDC will allow to develop high-precision sensors on their base and bring the modern measuring systems to a higher level. ■

Declaration of Competing Interest. The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



1090 руб.

АНАЛИТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

коллективная монография

под ред. Карнова Ю.А., Барановской В.Б., Житенко Л.П.

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019. – 400 с. ISBN 978-5-94836-554-1

Благородные (драгоценные) металлы относятся к важнейшим видам современных материалов. Они являются валютными ценностями, широко применяются в ювелирном деле, в электронной, химической, машиностроительной промышленности, в медицине и многих других областях человеческой деятельности. Функциональные свойства этих материалов неразрывно связаны с их химическим составом, который устанавливается с помощью аналитического контроля. В настоящей монографии рассмотрены современные методы анализа (атомно-спектральные, рентгеноспектральные, физико-химические и другие), методы пробирного концентрирования, методики аналитического контроля конкретных объектов, стандарты на методы анализа и проблемы развития аналитической химии благородных металлов. Эта информация представляет интерес для работников аналитических лабораторий, научно-исследовательских организаций и многочисленных потребителей материалов и изделий, содержащих благородные металлы.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

125319, Москва, а/я 91; тел.: +7 495 234-0110; факс: +7 495 956-3346; e-mail: knigi@technosphere.ru; sales@technosphere.ru



ТЕХНОСФЕРА
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

100% ГАРАНТИЯ
ПОЛУЧЕНИЯ ВСЕХ НОМЕРОВ



Стоимость 2200 р. за номер
Периодичность: 10 номеров в год
www.electronics.ru



Стоимость 1430 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.photonics.ru



Стоимость 1430 р. за номер
Периодичность: 6 номеров в год
www.j-analytics.ru

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

www.technosphere.ru



Стоимость 1056 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.lastmile.ru



Стоимость 1287 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.nanoindustry.ru



Стоимость 1716 р. за номер
Периодичность: 4 номера в год
www.stankoinstrument.ru