



Получено: 17.11.2021 г. | Принято: 29.11.2021 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.1.46.56>

Научная статья

ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПОДВИЖНОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ В ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОМ ПОЛЕ

Б.Г.Турухано¹, заведующий ЛГИИС, Заслуженный изобретатель РФ, ORCID: 0000-0002-6441-4259

Н.Турухано¹, вед. науч. сотр., Заслуженный изобретатель РФ, ORCID: 0000-0001-6983-5725

И.А.Турухано², кинооператор, ORCID: 0000-0002-8615-0522 / turukhano_bg@pnpi.nrcki.ru

Аннотация. Чем выше требуется точность определения длины или угла поворота объекта или величины его перемещения, с помощью линейных и угловых датчиков, тем выше требования к их точности и разрешению. Линейные и угловые голографические датчики (ЛГД и УГД) на базе голографических дифракционных решеток (ГДР) по своим характеристикам, в настоящее время, достигли нанодиапазона точностей.

Ключевые слова: линейные и угловые голографические датчики, дифракционные решетки, интерференционное поле

Для цитирования: Б.Г.Турухано, Н.Турухано, И.А.Турухано. Измерение перемещения с помощью подвижной голографической дифракционной решетки в интерференционном поле. НАНОИНДУСТРИЯ. 2022. Т. 15. № 1. С. 46–56. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.1.46.56>

Received: 17.11.2021 | Accepted: 29.11.2021 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.1.46.56>

Original paper

MEASUREMENT OF DISPLACEMENT USING A MOBILE HOLOGRAPHIC DIFFRACTION GRATING IN AN INTERFERENCE FIELD

B.G.Turukhano¹, Head of LCIIS, Honored Inventor of RF, ORCID: 0000-0002-6441-4259

N.Turukhano¹, Leading Researcher, Honored Inventor of RF, ORCID: 0000-0001-6983-5725

I.A.Turukhano², Cameraman, ORCID: 0000-0002-8615-0522 / turukhano_bg@pnpi.nrcki.ru

Abstract. The higher the accuracy required to determine the length or angle of rotation of an object or the magnitude of its movement, using linear and angular sensors, the higher the requirements for their accuracy and resolution. Linear and angular holographic encoders (LHE and AHE) based on holographic diffraction gratings (HGD), according to their characteristics, have now reached the nanoscale accuracy range.

Keywords: linear and angular holographic detectors, diffraction gratings, interference field

For citation: B.G.Turukhano, N.Turukhano, I.A.Turukhano. Measurement of displacement using a mobile holographic diffraction grating in an interference field. NANOINDUSTRY. 2022. V. 15, no. 1. PP. 46–56. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.1.46.56>

¹ ФГБУ "Петербургский институт ядерной физики им. Б.П.Константина" Национального исследовательского центра "Курчатовский институт", Ленинградская обл., г. Гатчина, Россия / Petersburg Nuclear Physics Institute named by B.P.Konstantinov of NRC "Kurchatov Institute"

² Санкт-Петербургский Университет Кино и Телевидения "КИТ" / Saint Petersburg State University of Film and Television



ВВЕДЕНИЕ

ЛГД и УГД основаны на комбинации ГДР с интерференционным полем и могут быть использованы для определения величины перемещения в нанодиапазоне. Авторами данной статьи разработана и реализована технология синтеза линейной наноГДР с точностью $\pm 0,4$ мкм/м и длиной более одного метра и радиальной ГДР с точностью $\pm 0,2$ угл.с, а также создан ряд линейных и угловых голографических измерительных систем на базе этих датчиков.

Фазовое распределение исследуемого линейного интерференционного поля (ИП) вдоль оси ОХ можно представить в следующем виде:

$$\Phi(x) = 2kx + \Delta f(x), \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda \sin\theta/2 = \pi/d_0$ – волновое число; $d_0 = \lambda \sin\theta/2$ – период линий интерференционного поля, образованного двумя плоскими волнами S_1^0 и S_2^0 .

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В данной работе мы будем исследовать возможность определения величины перемещения с помощью линейной измерительной голографической дифракционной решетки ($P_{изм}$), действующей совместно с интерференционным полем. При их взаимодействии образуются интерференционные муаровые и обтюрационные полосы (МП и ОП) в зависимости от угла между штрихами ИП и измерительной голографической дифракционной решеткой ($P_{изм}$), а также от равенства или отличия их периодов.

Покажем, что поставленную задачу определения величины перемещения и размера изделия или объекта можно решить с помощью упорядоченно перемещающейся $P_{изм}$ в ИП. Суть метода заключается в том, что информация о фазовом распределении ИП снимается в системе точек, жестко связанных с перемещающейся решеткой [1]. При этом изменение разности фаз между любыми точками будет однозначно определяться только фазовым распределением штрихов $P_{изм}$. Разность фаз, вносимая самим интерферометром, будет постоянной величиной, аддитивно входящей в каждый акт измерения.

Находим фазовое распределение интерференционных полос в картине взаимодействия интерференционного поля с голографической дифракционной решеткой. Рассмотрим взаимодействия интерференционного поля ИП с голографической дифракционной решеткой

INTRODUCTION

LHE and AHE are based on combination of the HDG with interference field and can be used for determination of nanoscale displacement magnitude. The authors have developed and realized technology of synthesis of linear nano HDG with accuracy ± 0.4 $\mu\text{m}/\text{m}$ and length over one meter and radial HDG with accuracy ± 0.2 angular second, as well as developed a number of linear and angular holographic measuring systems based on these sensors.

The phase distribution of the investigated linear interference field (IF) along the OX axis can be represented as follows:

$$\Phi(x) = 2kx + \Delta f(x), \quad (1)$$

here $k = 2\pi/\lambda \sin\theta/2 = \pi/d_0$ is the wave number, $d_0 = \lambda \sin\theta/2$ is the line period of the interference field formed by the two plane waves S_1^0 and S_2^0 .

DESCRIPTION OF THE EXPERIMENT

In this work we investigate a possibility of determining the magnitude of displacement by means of a linear holographic diffraction grating ($P_{изм}$) acting together with an interference field. During their interaction the interference moiré and obturation bands (MD and OB) are formed depending on the angle between the bars of the IF and the measuring holographic diffraction grating ($P_{изм}$), as well as on the equality or difference of their periods.

Let us show that the set problem of determining the magnitude of displacement and size of a product or object can be solved by means of an orderly moving $P_{изм}$ in the IF. The essence of the method consists in the fact that the information about phase distribution of IF is taken in the system of points rigidly connected with the moving lattice [1]. In this case, the phase difference between any points will be uniquely determined by the phase distribution of $P_{изм}$ dashes only. The phase difference introduced by the interferometer itself will be a constant, additively included in each act of measurement.

It is required to find the phase distribution of the interference fringes in the pattern of interaction of the interference field with a holographic diffraction grating. Let us consider interactions of the interference field of a IF with a holographic diffraction grating $P_{изм}$. The method of phase distribution along the measured axis consists in determination of the phase distribution along the chosen moving direction including determination of all boundary conditions which allow complete



$P_{изм}$. Метод определения фазового распределения вдоль измеряемой оси сводится к тому, что определяется фазовое распределение вдоль выбранного направления перемещения, в том числе определяются все граничные условия, позволяющие осуществить полное согласование по фазе значений фазовых распределений при перемещении.

Для начала мы записываем саму $P_{изм}$ с помощью двух квазиплоских волн [2-3]. Две квазиплоские монохроматические волны с комплексными амплитудами:

$$S_1^G(x_1, y_1) = \exp i [k_{1G} r_1 + \Psi_1^G(x_1, y_1)], \quad (2)$$

$$S_2^G(x_1, y_1) = \exp i [k_{2G} r_1 + \Psi_2^G(x_1, y_1)] \quad (3)$$

формируют ИП в плоскости X_1OY_1 , в которой записывается $P_{изм}$ с амплитудным пропусканием:

$$T(x_1, y_1) \propto \cos[k_G r_1 + \Psi^G(x_1, y_1)], \quad (4)$$

где $k_G = k_{1G} - k_{2G}$ – волновой вектор решетки, а функция, характеризующая фазовое распределение штрихов $P_{изм}$:

$$\Psi^G(x, y) = \Psi_1^G(x_1, y_1) - \Psi_2^G(x_1, y_1). \quad (5)$$

Период решетки в этом случае:

$$d_G = \pi/K_G = \lambda/2\sin\theta_1/2, \quad (6)$$

где θ_1 – угол между волновыми векторами k_{1G} и k_{2G} , а $K_G = |K_G|$ – волновое число решетки.

Поместим решетку в плоскость XOY в системе координат XYZ , которая повернута относительно системы координат XYZ соответственно на углы ν , γ , ϕ и осветим ее двумя квазиплоскими монохроматическими волнами с комплексными амплитудами:

$$\begin{aligned} S_1(x, y) &= \exp i [k_1 r + \Psi_1(x, y)], \\ S_2(x, y) &= \exp i [k_2 r + \Psi_2(x, y)], \end{aligned} \quad (7)$$

где $k_1 = k_{1G}$, $k_2 = k_{2G}$.

Волны $S_1(x, y)$ и $S_2(x, y)$ формируют в плоскости XOY исследуемые ИП с фазовым распределением:

$$\Psi(x, y) = \Psi_2(x, y) - \Psi_1(x, y). \quad (8)$$

Введем параметр δ , характеризующий согласование периода ИП относительно периода $P_{изм}$ так, чтобы волновое число поля

phase matching of the phase distribution values at displacement.

Let us represent $P_{изм}$ itself using two quasi-planar waves [2-3]. Two quasiplanar monochromatic waves with complex amplitudes are:

$$S_1^G(x_1, y_1) = \exp i [k_{1G} r_1 + \Psi_1^G(x_1, y_1)], \quad (2)$$

$$S_2^G(x_1, y_1) = \exp i [k_{2G} r_1 + \Psi_2^G(x_1, y_1)] \quad (3)$$

and they form IF in the X_1OY_1 plane where $P_{изм}$ with the amplitude transmission:

$$T(x_1, y_1) \propto \cos[k_G r_1 + \Psi^G(x_1, y_1)], \quad (4)$$

here $k_G = k_{1G} - k_{2G}$ is the wave vector of the grating, and the function that characterises the phase distribution of the bars is $P_{изм}$:

$$\Psi^G(x, y) = \Psi_1^G(x_1, y_1) - \Psi_2^G(x_1, y_1) \quad (5)$$

In this case the grating period is:

$$d_G = \pi/K_G = \lambda/2\sin\theta_1/2, \quad (6)$$

where θ_1 is the angle between wave vectors k_{1G} and k_{2G} , and $K_G = |K_G|$ means the grating wave number.

Let us place the grating in the XOY plane in the XYZ coordinate system, which is rotated with respect to the XYZ coordinate system by angles ν , γ , ϕ respectively, and illuminate it with two quasi-plane monochromatic waves with complex amplitudes:

$$\begin{aligned} S_1(x, y) &= \exp i [k_1 r + \Psi_1(x, y)], \\ S_2(x, y) &= \exp i [k_2 r + \Psi_2(x, y)], \end{aligned} \quad (7)$$

where $k_1 = k_{1G}$, $k_2 = k_{2G}$.

Waves $S_1(x, y)$ and $S_2(x, y)$ form the investigated IFs with a phase distribution in the XOY plane:

$$\Psi(x, y) = \Psi_2(x, y) - \Psi_1(x, y) \quad (8)$$

Let us introduce a parameter δ characterising the mismatch of the IF period with respect to the $P_{изм}$ period, so that the wave number of the field is:

$$k = |k_2 - k_1| = k_G (1 - \delta); |\delta| \ll 1, \quad (9)$$

where δ is the mismatch between the IF period and the grating period.

Interaction of the IF with the grating in the XOY plane results in a pattern of interference fringes



$$k = |k_2 - k_1| = k_G (1 - \delta); |\delta| \ll 1, \quad (9)$$

где δ – рассогласование по периоду ИП и периода решетки.

В результате взаимодействия ИП с решеткой в плоскости XOY образуется картина интерференционных полос (ИП). Совместное решение уравнений (4) и (6) с учетом формул перехода из одной системы в другую ($r_1 \gg r$) приводит к следующему выражению для распределения интенсивности ИПП:

$$I(x,y) = \{1 + \cos\{kG / \cos\gamma [(x\cos\phi + y\sin\phi) - (1 - \delta)x\cos\gamma]\} + \Psi^G(x_1,y_1) - \Psi(x,y)\}. \quad (10)$$

Поскольку $I(x, y)$ мало изменяется при изменении в широких пределах угла ν , члены, содержащие ν в выражение (9), опущены.

Из (9) можно записать фазовое распределение ИПП $\Phi(x, y)$ в виде:

$$\Phi(x,y) = k_G / \cos\gamma [(x\cos\phi + y\sin\phi) - (1 - \delta)x\cos\gamma] + [\Psi^G(x_1,y_1) - \Psi(x,y)]. \quad (11)$$

Таким образом, получено выражение, позволяющее описать картину ИПП в наиболее общем случае – при взаимодействии произвольным образом ориентированной неидеальной ГДР с рассогласованным по периоду ИП. Следует отметить, что, поскольку параметр рассогласования выбирался достаточно малым (случай, наиболее часто реализуемый на практике), то выражение (10) справедливо не только в плоскости XOY, но и на достаточно больших расстояниях по направлению распространения каждой из интерферирующих волн.

Перейдем к анализу фазового распределения ИПП. Перепишем (10) в виде

$$\Phi(x,y) = \Phi^P(x,y) + [\Psi^G(x_1,y_1) - \Psi(x,y)], \quad (12)$$

где

$$\Phi(x,y)^P = k_G / \cos\gamma [(x\cos\phi + y\sin\phi) - (1 - \delta)x\cos\gamma]. \quad (13)$$

Не трудно видеть, что $\Phi(x,y)^P$ описывает взаимодействие идеальной ГДР с идеальным ИП, сформированным двумя плоскими волнами, а второй член уравнения (12), заключенный в квадратные скобки, описывает отклонения фазовых распределений ИП и ГДР от идеальных.

Остановимся на анализе $\Phi(x,y)^P$. Уравнение, описывающее конфигурацию и расположение МП в случае ИП и ГДР, имеет вид:

(1f). The joint solution of equations (4) and (6), taking into account the transition formulas from one system to another ($r_1 \gg r$), leads to the following expression for the IfF intensity distribution:

$$I(x,y) = \{1 + \cos\{k_G / \cos\gamma [(x\cos\phi + y\sin\phi) - (1 - \delta)x\cos\gamma]\} + \Psi^G(x_1,y_1) - \Psi(x,y)\}, \quad (10)$$

Since $I(x,y)$ changes little if the angle ν changes over a wide range, the terms containing ν in (9) are omitted.

From (9), we can write the IfF phase distribution $\Phi(x,y)$ as

$$\Phi(x,y) = k_G / \cos\gamma [(x\cos\phi + y\sin\phi) - (1 - \delta)x\cos\gamma] + [\Psi^G(x_1,y_1) - \Psi(x,y)]. \quad (11)$$

Thus, we obtained an expression that allows us to describe the IfF pattern in the most general case, the interaction of an arbitrarily oriented nonideal HDG with a period-mismatched IF. It should be noted that since the mismatch parameter was chosen to be sufficiently small (the case most often realized in practice), expression (10) is valid not only in the XOY plane but also at sufficiently large distances in the direction of propagation of each of the interfering waves.

Let us now proceed to analyse the phase distribution of the IfF and rewrite (10) as

$$\Phi(x,y) = \Phi^P(x,y) + [\Psi^G(x_1,y_1) - \Psi(x,y)], \quad (12)$$

where

$$\Phi(x,y)^P = k_G / \cos\gamma [(x\cos\phi + y\sin\phi) - (1 - \delta)x\cos\gamma]. \quad (13)$$

It is easy to see that $\Phi(x,y)^P$ describes the interaction of an ideal HDG with an ideal IF formed by two plane waves, while the second term of equation (12), enclosed in square brackets, describes the deviations of the phase distributions of the IF and HDG from the ideal ones.

Let us focus on the analysis of $\Phi(x,y)^P$. The equation describing the configuration and location of MBs in the case of IFs and HDGs has the form:

$$k_G / \cos\gamma [(x\cos\phi + y\sin\phi) - (1 - \delta)x\cos\gamma] = 2\pi n, \quad (14)$$

where n is an integer. It is easy to see that equation (13) describes a series of equidistant lines with a period:



$$k_G / \cos \gamma [(x \cos \phi + y \sin \phi) - (1 - \delta) x \cos \gamma] = 2 \pi n, \quad (14)$$

где n – целое число. Нетрудно убедиться, что уравнение (13) описывает ряд равнодistantных линий с периодом:

$$d_M = d_G \cos \gamma / [(\cos \phi - \cos \gamma + \delta \cos \gamma)^2 + \sin^2 \phi]^{0.5}. \quad (15)$$

$$\tan \alpha = -1 / \cos \gamma \cos \phi [\cos \gamma (1 - \delta) + \cos \phi]. \quad (16)$$

Наиболее интересным на практике является случай, когда $\phi \ll 1$; $\delta \ll 1$; $\gamma \ll 1$. При этом, пренебрегая величинами второго порядка малости, имеем:

$$d_M = d_G / [\phi^2 + \delta^2]^{0.5} \quad (17)$$

$$\alpha \approx \operatorname{arctg}(\phi/2 + (\gamma^2/2 - \delta))/\phi. \quad (18)$$

Из (17) видно, что угол γ входит в (17) как величина второго порядка малости, по сравнению с ϕ и δ , кроме того, при $\delta = \gamma^2/2$ величина α зависит только от одной переменной $\alpha = \alpha(\phi)$. Таким образом, подбирая параметр рассогласования δ , можно компенсировать угол наклона ГДР. Поэтому, в дальнейшем, мы будем рассматривать только две переменные: угол ϕ – наклона штрихов ГДР относительно полос ИП и параметр δ – рассогласование по периоду.

Согласно выражению (11) для $\Phi(x, y)$ при $\delta \ll 1$ и $\phi \ll 1$, $\Psi^G(x_1, y_1) \approx \Psi(x, y)$ и, исключая из рассмотрения γ , можно записать:

$$\Phi(x, y) = \Phi^P(x, y) + [\Psi^G(x_1, y_1) - \Psi(x, y)], \quad (19)$$

где

$$\Phi(x, y)^P \approx k_G [(x \cos \phi + y \sin \phi) - (1 - \delta)x].$$

Выражение (18) достаточно точно описывает фазовое распределение МП во всех практических важных случаях.

Таким образом, мы определили фазовое распределение МП (18) от взаимодействия ИП и $P_{\text{изм}}$, расположенной в апертуре ИП.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Эта картина будет лежать в основе действия голографического датчика линейных перемещений ЛГД на базе перемещения $P_{\text{изм}}$ в ИП интерферометра или в ИП, образованного за такой же решеткой, освещенной когерентным источником излучения.

Клишированный свет, генерируемый источником излучения, жестко связанным

$$d_M = d_G \cos \gamma / [(\cos \phi - \cos \gamma + \delta \cos \gamma)^2 + \sin^2 \phi]^{0.5} \quad (15)$$

$$\tan \alpha = -1 / \cos \gamma \cos \phi [\cos \gamma (1 - \delta) + \cos \phi] \quad (16)$$

The most interesting in practice is the case of $\phi \ll 1$; $\delta \ll 1$; $\gamma \ll 1$. In this case, neglecting the values of the second order of smallness we have:

$$d_M = d_G / [\phi^2 + \delta^2]^{0.5} \quad (17)$$

$$\alpha \approx \operatorname{arctg}(\phi/2 + (\gamma^2/2 - \delta))/\phi \quad (18)$$

Formula (17) shows that the angle γ enters (17) as a value of the second order of smallness as compared to ϕ and δ ; moreover, when $\delta = \gamma^2/2$, the value of α depends on only one variable $\alpha = \alpha(\phi)$. Thus, by selecting the mismatch parameter δ we can compensate for the HDG slope angle. Therefore, from now on, we will consider only two variables: the angle ϕ of the slope of the HDG bars with respect to the fringes of the IF and the mismatch parameter δ with respect to the period.

According to expression (11) for $\Phi(x, y)$ at $\delta \ll 1$ and $\phi \ll 1$, $\Psi^G(x_1, y_1) \approx \Psi(x, y)$ and, excluding from consideration γ , we can write:

$$\Phi(x, y) = \Phi^P(x, y) + [\Psi^G(x_1, y_1) - \Psi(x, y)], \quad (19)$$

where

$$\Phi(x, y)^P \approx k_G [(x \cos \phi + y \sin \phi) - (1 - \delta)x].$$

Expression (18) describes the MB phase distribution quite accurately, in all practical cases.

Thus, we have determined the phase distribution of MF (18) from the interaction between the IF and $P_{\text{изм}}$ located in the IF aperture.

RESULTS AND DISCUSSION

This picture will form the basis for operation of a holographic LHE linear displacement sensor depending on the displacement of $P_{\text{изм}}$ in an interferometer IF or in an IF formed behind the same grating illuminated by a coherent emission source.

The clipped light generated by the radiation source rigidly connected to the sensor carriage after reflection from the mirror, falls on the measuring and display gratings (the order of the gratings can be any, depending on the design of the movable linear displacement detector, MLDD). Photodetectors are installed in the MB field behind the gratings.

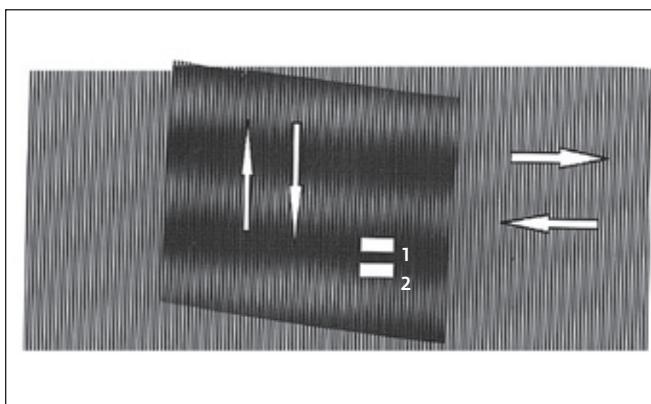


Рис.1. Фотография муаровых полос (МП). Вертикальные стрелки показывают направления смещения муаровых полос при движении одной из решеток в направлении перемещения (горизонтальные стрелки)

Fig.1. Photo of moiré bands (MB). The vertical arrows show the directions of displacement of the more bands when one of the grids moves in the direction of movement (horizontal arrows)

с кареткой датчика, после отражения от зеркала падает на измерительную и индикаторную решетки (порядок расположения решеток может быть любой в зависимости от конструкции датчика линейных перемещений, ДЛП). В поле МП, образующихся за решетками, устанавливаются фотоприемники.

В начале настраиваем штрихи решеток параллельно друг относительно друга с помощью оправы, содержащей средства для поворота штрихов $P_{\text{инд}}$ относительно штрихов $P_{\text{изм}}$ и получения муарового сопряжения МП, которые в первом приближении перпендикулярны направлению штрихов решеток. Желательно получать МП как можно шире (рис.1).

Устройство настраивается далее с целью получения соответствующего нониусного сопряжения. Для этого можно изменить расходимость источника излучения (рис.2).

На рис.2. дана оптическая схема получения нониусных полос. В направлении ОХ расположена $P_{\text{изм}}$, записанная в двулучевом интерферометре с углом $\theta/2$ между своими плечами. Дифракционная решетка освещается двумя лучами S_1 и S_2 под равными углами $(\theta/2 + \delta)$.

Нониусные полосы (рис.3) подобны муаровым, но они параллельны штрихам решеток.

При определении линейного размера объекта $P_{\text{инд}}$ смещается относительно измерительной или $P_{\text{изм}}$ смещается относительно индикаторной (что равносильно).

Несмотря на то, что устройство содержит узлы, необходимые для первоначальной

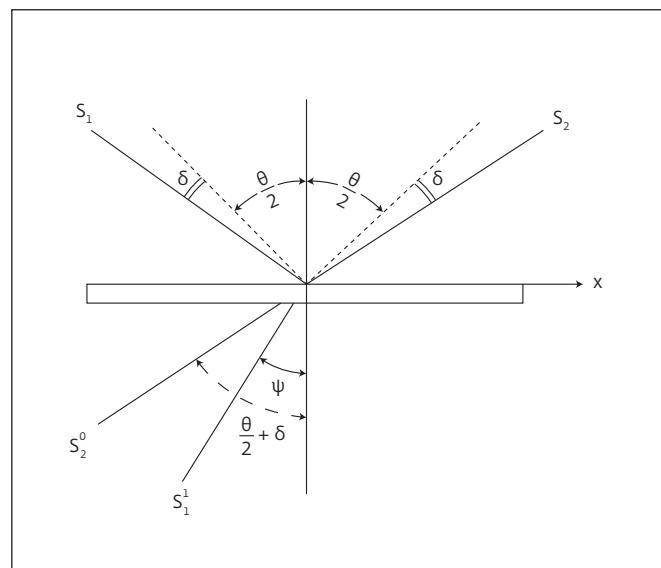


Рис.2. Оптическая схема получения нониусных полос

Fig.2. Optical diagram for obtaining nonius bands

At the beginning we adjust the grating fringes parallel to each other by means of a frame containing means for turning the $P_{\text{инд}}$ fringes relative to the $P_{\text{изм}}$ fringes and obtaining moiré conjugation of MB, which are perpendicular to the direction of the grinding fringes in the first approximation. It is desirable to obtain MBs as wide as possible (Fig.1).

The device is further tuned to produce an appropriate nonius conjugation. This can be done by changing divergence of the light source (Fig.2).

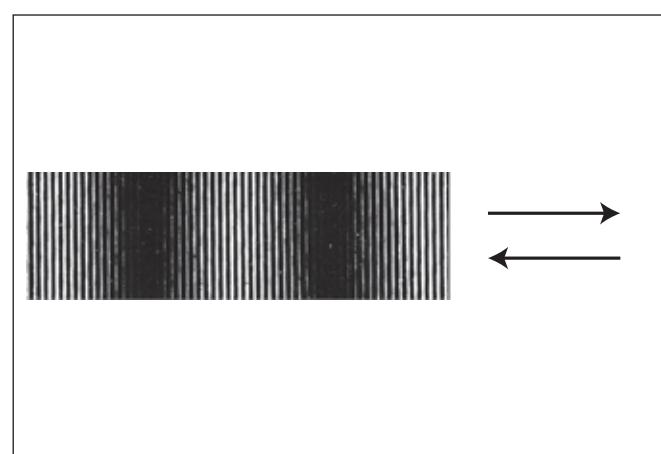


Рис.3. Фотография нониусных полос. Стрелками показаны направления смещения нониусных полос при движении одной из решеток в этом же направлении

Fig.3. Photo of nonius bands. The arrows show the directions of displacement of the nonius bands when one of the gratings moves in the same direction

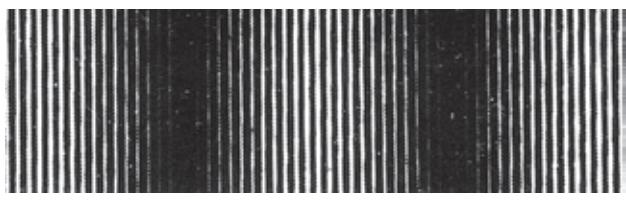


Рис.4 Фотография $P_{изм}$ с собственной стеклянной направляющей

Fig.4. Photo of a $P_{изм}$ with its own glass guide

настройки взаимного расположения штрихов двух решеток – $P_{изм}$ и $P_{инд}$ – это устройство не позволяет устранить ошибки, связанные с погрешностями измерений, внесенными перемещением, одной из решеток относительно зафиксированной другой, по неточным направляющим самого датчика линейных перемещений или внешнего устройства, к которому прикрепляется его подвижная решетка.

При перемещении по неточным направляющим установленный первоначально период муаровых полос не сохраняется, так как оправа с фиксированной в ней индикаторной решеткой будет повторять неровность направляющей, что обязательно приведет к изменению угла ее штрихов относительно штрихов $P_{изм}$ и, соответственно, к переменному периоду МП, а это, в свою очередь, – к погрешности при считывании перемещения.

В связи с этим в ЛГД используются не муаровые полосы, а noniusные или обтюрационные (рис.3). Кроме этого, можно создать такое устройство, которое позволит существенно уменьшить погрешность, вносимую направляющей, обладающей нелинейностью в направлении перемещения.

С целью устранения изменения периода МП при перемещении можно использовать в качестве направляющей, по которой перемещается, к примеру, $P_{инд}$, стеклянную направляющую самого устройства ЛГД. Для этого стеклянную направляющую жестко присоединяют к торцу измерительной линейки (рис.4) [4]. Таким образом, в этом устройстве в качестве направляющей, по которой перемещается считающая головка, используется стеклянная направляющая самого устройства ЛГД, жестко присоединенная к торцу измерительной линейки. Причем длина этой направляющей не меньше линейного размера объекта,

Fig.2 gives an optical diagram for obtaining nonius fringes. In the OX direction is the $P_{изм}$ recorded in a two-beam interferometer with an angle $\theta/2$ between its arms. The diffraction grating is illuminated by two beams S1 and S2 at equal angles ($\theta/2 + \delta$).

Nonius fringes (Fig.3) are similar to moiré fringes, but they are parallel to the grinding fringes.

When determining the linear dimension of an object, $P_{инд}$ is displaced relative to the measurement dimension or $P_{инд}$ is displaced relative to the indicator dimension (which is equivalent).

Although it contains the nods required for the initial setting of the relative positions of the two gratings, $P_{изм}$ and $P_{инд}$, it cannot eliminate the measurement errors introduced by the movement of one of the gratings relative to the other fixed grating by inaccurate guides of the linear encoder itself or the external device to which its moving grating is fastened.

When moving along inaccurate guides, the originally set period of moiré fringes is not retained, as the frame with the indicator grating fixed in it will repeat roughness of the guide, which will necessarily lead to a change in the angle of its bars relative to the $P_{изм}$ fringes and, consequently, to a variable MB period, which in turn leads to an error in the readout of the movement.

In this regard, HDGs use nonius or obturator fringes rather than moiré strips (Fig.3). In addition, it is possible to design a device which will substantially reduce the error introduced by the guide which has non-linearity in the direction of travel.

In order to eliminate variation of the MB period during movement, the glass guide of the HDG itself can be used, for example, as a guide along which the $P_{инд}$ moves. For this purpose, the glass guide is rigidly connected to the end of the measuring tape (Fig.4) [4]. The glass guide of the HDG itself, rigidly connected to the face of the



Рис.5. Считывающая головка ЛДП, установленная на $P_{изм}$ с автономной стеклянной направляющей

Fig.5. The LDP reader head mounted on a $P_{изм}$ with an autonomous glass guide



который мы измеряем. При смещении считывающей головки по стеклянной направляющей опорные подшипники перемещаются по базовой поверхности стеклянной направляющей, а подпружиненный подшипник, соответственно, по ее обратной поверхности (рис.5). Длина этой направляющей не меньше линейного размера объекта или измеряемой величины перемещения.

Если базовая поверхность стеклянной направляющей качественная, то подвижная решетка будет перемещаться точно вдоль выбранной (конструктивно) оси измерительной дифракционной решетки и перпендикулярно ее штрихам. Это означает, что ИП, которые образуются за решетками, сохраняют свой период и наклон и не будут влиять на точность измерений, которая будет зависеть только от качества измерительной решетки и качества изготовления самого датчика. Таким образом, имеем возможность полностью реализовать точностные характеристики ЛГД (рис. 6).

Отечественная промышленность серийно изготавливает специальное стекло (Борское стекло на расплаве олова), имеющее требуемые точностные характеристики для стеклянной направляющей и тем самым для получения НАНО характеристики ЛГД. Это позволит осуществить достаточно дешевый и эффективный серийный выпуск отечественных высокоточных и высокоразрешающих ЛГД выше 0,1 мкм/м.

Принцип работы ЛГД для измерения перемещений заключается в следующем. При перемещении считывающей головки во время определения линейных размеров объекта индикаторная решетка смещается относительно дифракционной измерительной решетки 2, расположенной на подложке измерительной линейки. Пучок излучения, генерируемый источником излучения, жестко связанного со считывающей головкой, коллимируется коллиматором и проходит через индикаторную и измерительную дифракционные решетки. В поле интерференционных полос, образующихся за решетками, устанавливается матрица фотоприемников, которая преобразует распределение интенсивности интерференционных полос в электрические сигналы. При смещении считывающей головки одновременно с объектом во время определения его линейного размера индикаторная решетка смещается относительно измерительной решетки и на выходах фотоприемников матрицы формируются переменные электрические сигналы, сдвинутые по фазе на 90°. Эти сигналы поступают затем в блок

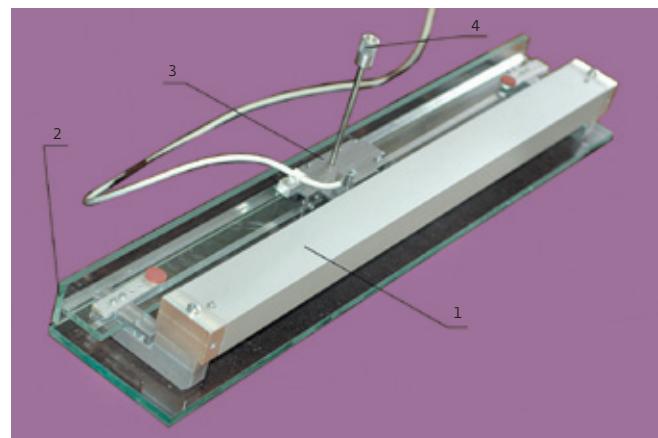


Рис.6. Внешний вид ГЛД
Fig.6. General view of LHE

measuring tape, is used in this device as a guide, along which the reading head moves. This guide must be at least as long as the linear dimension of the object being measured. As the reader head moves along the glass guide, the support bearings move along the base surface of the glass guide and the spring-loaded bearing, respectively, along its reverse surface (Fig.5). The length of this guide is not less than the linear dimension of the object or the measured displacement value.

If the base surface of the glass guide is of good quality, the movable grating will move exactly along the chosen (constructively) axis of the measuring diffraction grating and perpendicular to its bars. This means that the IBs formed behind the gratings retain their period and slope and will not affect the accuracy of measurements, which will only depend on the quality of the measuring array and the quality of the manufacture of the sensor itself. Thus, we have an opportunity to fully realize the accuracy characteristics of the HDG (Fig.6).

Domestic industry serially produces special glass (Borsky glass on tin melt) that has the required precision characteristics for the glass guide and thus for obtaining nanocharacteristics of HDGs. This will make it possible to carry out sufficiently cheap and efficient serial production of domestic high-precision and high-resolution HDGs above 0.1 $\mu\text{m}/\text{m}$.

The working principle of the HDG for displacement measurement is as follows. When the reader head is moved, whilst measuring the linear dimensions of an object, the indicator grating is shifted with respect to the diffraction measuring grating 2 located on the substrate of the measuring tape ruler. The light beam generated by the light source rigidly coupled to the reader head is collimated by



Таблица 1. Предел допускаемых значений погрешности при температуре 20°C

Table 1. Permissible error limit at 20 °C

Класс точности Accuracy class	Предел допускаемого значения погрешности линейных перемещений ΔЛГД, мкм Permissible error limit for linear displacement, ΔLHE , μm	Допускаемое отклонение температуры от нормального значения, 20°C Permissible temperature deviation from the normal value
1	(0,5+1,2 L)	±0,2
2	(1,0+2,5L)	±0,2
3	(2,0+4,5L)	±0,5
4	(5,0+8,0 L)	±1,0
5	(10,0+15,0 L)	±2,0 и далее and more

электронники, где с помощью компаратора формируются счетные импульсы, по которым определяется линейный размер объекта. Причем опорные подшипники, жестко связанные с индикаторной решеткой 6, перемещающиеся по базовой поверхности подложки измерительной линейки, и подпружиненный подшипник этой же группы, перемещающийся по обратной поверхности этой подложки, позволяют сохранять постоянный зазор между решетками $P_{изм}$ и $P_{инд}$, обеспечивая тем самым работоспособность датчика на всем протяжении измерения линейного размера объекта независимо от качества направляющего устройства, к которому закреплена подвижная часть ЛГД. Поэтому данное устройство не может быть использовано при измерении перемещений с высоким, а тем более наноразрешением.

На выходе фотоприемника формируются переменные электрические сигналы, сдвинутые по фазе на 90°. Эти сигналы поступают затем в блок электроники, где с помощью компаратора формируются счетные импульсы, по которым определяются линейный размер объекта или величина перемещения. Снабжение данного устройства средствами для поворота штрихов друг относительно друга с целью получения нужного периода МП или средств для изменения сходимости пучков позволяет повысить точность измерений,

Таблица 2. Основные технические характеристики ЛГД

Table 2. Main LHE technical characteristics

Измеряемая длина, мм Measured length, mm	1000 и более and more
Шаг шкалы, мкм Scale increment, μm	1
Погрешность	±
Дискретность, мкм Discontinuity, μm	0,01
Скорость, мм/с Velocity, mm/s	500
Питание ЛГД от сети переменного тока LCD power supply, AC	220V ±
Потребляемая мощность Consumption	Не более 15В
Источник света Light source	Лазерный диод Laser diode
Соединение с интерфейсным дисплейным блоком Connection to the display unit interface	1.5 м кабель * Cable, m
Выходная мощность лазерного излучения Output power of laser radiation	2 мВ мВ
Полный средний срок службы Full average lifetime	Не менее 10 лет At least 10 years

the collimator and passes through the indicator and measurement gratings. A matrix of photodetectors is installed in the field of interference fringes behind the grating, which converts the intensity distribution of the interference fringes into electrical signals. When the reader head is shifted simultaneously with the object during determination of its linear dimension, the indicator grating is shifted relative to the measuring grating and variable electrical signals shifted by 90° in phase are generated at the outputs of the matrix photodetectors. These signals are then fed to the electronics unit, where a comparator is used to generate counting pulses that determine the linear size of the object. The bearing rigidly connected to the indicator grating 6, moving on the base surface of the measuring ruler substrate and the spring-loaded



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



Белоус А.И., Солодуха В.А.

ОСНОВЫ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ. СТАНДАРТЫ, КОНЦЕПЦИИ, МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. — 482 с.,
ISBN 978-5-94836-612-8

Цена 1600 руб.

Эта книга фактически представляет собой научно-практическую энциклопедию по современной кибербезопасности.

Здесь анализируются предпосылки, история, методы и особенности киберпреступности, кибертерроризма, киберразведки и киберконтрразведки, этапы развития кибероружия, теория и практика его применения, технологическая платформа кибероружия (вирусы, программные и аппаратные трояны), методы защиты (антивирусные программы, проактивная антивирусная защита, кибериммунные операционные системы). Впервые в мировой научно-технической литературе приведены результаты системного авторского анализа всех известных уязвимостей в современных системах киберзащиты — в программном обеспечении, криптографических алгоритмах, криптографическом оборудовании, в микросхемах, мобильных телефонах, в бортовом электронном оборудовании автомобилей, самолетов и даже дронов. Здесь также представлены основные концепции, национальные стандарты и методы обеспечения кибербезопасности критических инфраструктур США, Англии, Нидерландов, Канады, а также основные международные стандарты. Фактически в объеме одной книги содержатся материалы трех разных книг, ориентированных как на начинающих пользователей и специалистов среднего уровня, так и специалистов по кибербезопасности высокой компетенции, которые тоже найдут здесь для себя много полезной информации.

Как заказать наши книги?

По почте: 125319, Москва, а/я 91
По факсу: (495) 956-33-46
E-mail: knigi@technosphera.ru
sales@technosphera.ru

ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ
www.technosphera.ru



в том числе за счет уменьшения погрешности, обусловленной лучшей фиксацией элементов устройства, приводящей к меньшим разбросам параметров устройства и к увеличению их контраста, а также к уменьшению искажения формы ИП, в поле которых устанавливается фотоприемник.

Основные технические характеристики ЛГД даны в табл.2.

Диапазон преобразования линейных перемещений от $10^{-2} \div 10^{-3}$ мкм до 1 м и более. Предел допускаемого значения погрешности при нормальном значении температуры 20 °C и при отклонении ее в зависимости от класса точности преобразователей не должен превышать значений, указанных в табл.1. В значения предельных погрешностей, указанных в табл.1, входят все разновидности систематических погрешностей, свойственные преобразователям конкретного типа, и их случайные составляющие, а L – длина линейного перемещения, м.

Привязанность узла связи к внешнему устройству осуществляется в каждом отдельном случае в зависимости от конструктивных особенностей внешнего устройства, но таким образом, чтобы при этом этот узел имел возможности прямой связи со считывающей головкой ЛГД.

ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Патент РФ 2032142 1992 г. Турухано Б.Г., Турухано Н., Якутович В.Н. Измерительная микрометрическая головка "ТУБОР".
2. Patent UK 2 195 784. Filed 07.10.1986. Apparatus for synthesis of elongated holographic diffraction gratings. Turukhano B.G., Gorelik V.P., Turukhano N., Gordeev S.V.
3. USA Patent 4715670, Filed 14.07.1986. Turukhano B.G. Apparatus for copy holographic diffraction gratings.
4. Патент РФ № 2 197 713, 27.01.2003, пр. 07.08.2000. Турухано Б.Г., Турухано Н. Датчик линейных перемещений.

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

bearing of the same group moving on the reverse surface of the substrate allow to keep a constant gap between the gratings $P_{изм}$ and $P_{инд}$, thus ensuring the probe operability during the whole range of object linear dimension measurement regardless of the quality of the guide device to which the moving part of the HDG is fixed. Therefore this device cannot be used for high resolution displacement measurement, let alone nanoscale resolution.

The output of the photodetector generates alternating electrical signals phase-shifted by 90°. These signals are then fed into the electronics unit, where a comparator generates counting pulses which determine the linear size of the object or the amount of movement. Equipping this device with means for turning the bars against each other in order to obtain the required MB period or means for changing the convergence of the beams allows of increasing the measurement accuracy, including reducing the error due to better fixation of device elements, resulting in less variation of device parameters and an increase in their contrast, as well as reducing the distortion of the form of IF, in whose field the photodetector is installed.

The main technical characteristics of HDG are given in Table 2. The range of linear motion transformations vary from $10^{-2} \div 10^{-3}$ μm to 1 m and more. The limit of acceptable error value at normal temperature value of 20 °C and its deviation depending on the accuracy class of the transducers must not exceed the values given in Table 1. The values of limiting errors indicated in Table 1 include all kinds of systematic errors, inherent to transducers of a particular type, and their random components, and L is the length of linear movement, metres.

The binding of the communication node to the external device is done on a case-by-case basis depending on the design features of the external device, but in such a way that this node has direct communication capabilities with the LHE reading head.

PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is also grateful for their consent to publish papers on the journal's website and SELibrary eLIBRARY.RU.

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:



Бобков С.Г., Басаев А.С.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА АППАРАТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ

Рецензент: Стенин Владимир Яковлевич – д-р техн. наук, проф. (Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»)

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. – 264 с.
ISBN 978-5-94836-610-4

Цена 975 руб.

Важнейшей характеристикой микропроцессорных систем является производительность. Производительность микропроцессора линейно зависит от трех характеристик – его частоты, средней частоты на выполнение инструкций и количества инструкций в выделенной области программы. В свою очередь, эти характеристики определяются технологией изготовления, архитектурой микропроцессора, системой команд и технологией компиляции. В представленной книге рассмотрены проблемы улучшения этих характеристик, а также методы и методики проектирования высокопроизводительных вычислительных систем.

Рассмотрены архитектуры микропроцессоров и коммуникационных систем, ориентированных на создание высокопроизводительных вычислительных комплексов вплоть до супер-ЭВМ. Приводится маршрут и методики проектирования микросхем.

Книга предназначена для студентов старших курсов кафедр электроники и автоматики университетов, аспирантов и специалистов указанной области.

Бобков С.Г. (Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»)

Басаев А.С. (Научно-производственный комплекс «Технологический центр»)

Как заказать наши книги?

По почте: 125319, Москва, а/я 91

По факсу: (495) 956-33-46

E-mail: knigi@technosphera.ru

sales@technosphera.ru

ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ
www.technosphera.ru