



ПОРТАТИВНЫЙ НАНОГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ПЛОСКОМЕР

PORTABLE NANO-HOLOGRAPHIC PLANMETER

Б.Г.Турухано*, заведующий ЛГИИС, Заслуженный изобретатель РФ, Н.Турухано*, вед. науч. сотр., Заслуженный изобретатель РФ, сотр., С.Н.Ханов*, вед. инженер-конструктор, Ю.М.Лавров*, науч. сотр. В.В.Добырн*, с.н.с., О.Г.Ермоленко*, вед. инженер-технолог, Л.А.Константинов*, вед. инженер, Е.А.Вилков*, инженер-программист, И.В.Ладатко*, инженер-программист
 B.G.Turukhano*, Head of LGIIS, Honored Inventor of RF, N.Turukhano*, Leading Researcher, Honored Inventor of RF, Yu.M.Lavrov* Researcher, S.N.Khanov*, Leading Design Engineer, V.V.Dobyrn*, Senior Researcher, O.G.Ermolenko*, Leading Engineer Technologist, L.A.Konstantinov*, Leading Engineer, E.F.Vilkov*, Software Engineer, I.V.Ladatko*, Software Engineer

DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.3-4.212.222

Получено: 26.05.2021 г.

Портативный наноголографический плоскомер (ПНГПл) относится к измерительной технике, точнее к области измерения и контроля качества оптических поверхностей, их отклонения от заданной формы поверхности, определения шероховатости поверхности, в том числе сверх гладких поверхностей, например плоских зеркал, полированных подложек и т.п. ПНГПл приводит к увеличению точности измерения, снятию ограничений по величине измеряемой поверхности, ускорению процесса измерений и к увеличению рабочего температурного диапазона. Основным измерительным элементом ПНГПл, обеспечивающим его высокие характеристики, является голографический длиномер ДГ.

Portable NANO holographic plane meter (PNHP_M) refers to measuring technology, more precisely to the field of measuring and controlling the quality of optical surfaces, their deviation from a given surface shape, determining surface roughness, including super smooth surfaces, such as flat mirrors, polished substrates, etc. PNHP_M leads to an increase in the measurement accuracy, removal of restrictions on the size of the measured surface, acceleration of the measurement process and with an increase in the operating temperature range. The main measuring element of PNHP_M, which ensures its high characteristics, is the holographic length meter

ВВЕДЕНИЕ

ПНГПл – это голографическая измерительная система. Он предназначен для прецизионных измерений в реальном масштабе времени, обработки и сохранения результатов измерения при работе, как в автономном режиме, так и с автоматизированными системами измерения в составе измерительно-вычислительного комплекса. Эта система характеризуется высокой надежностью. Информация о величине отклонения от плоскостности отображается

в цифровом виде таблиц и графиков. ПНГПл может быть использован в машиностроении, оптико-механической промышленности, самолетостроении, во всех высокотехнологических отраслях промышленности, для калибровки промышленных измерительных стандартов, а также в науке и технике.

Конструктивное выполнение устройства ПНГПл позволяет определить с высокой наноточностью отклонение от плоскостности поверхности, снять ограничение по величине измеряемой

* 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



поверхности и осуществить ускоренный процесс измерений при увеличении рабочего температурного диапазона. В процессе измерения отсутствует субъективный человеческий фактор.

Для контроля плоскостности горизонтально расположенных поверхностей применяют поверочные линейки (к примеру, линейка оптическая ОЛ-800 [1], плиты, плоские стеклянные пластины, интерферометр, имеющий точность до 0,5 мкм).

Известно устройство для определения отклонения от плоскостности поверхностей, включающее автоколлиматор [2] в качестве измерительного элемента и зеркало, расположенное на измеряемой поверхности с возможностью перемещения по ней.

Недостаток данного метода связан с большим размером и весом автоколлиматора (9 кг) из-за чего его устанавливают, как правило, не на измеряемую поверхность для того чтобы не вносить искажения в эту поверхность, поэтому секундная шкала автоколлиматора и зеркало, установленное на измеряемой поверхности, находятся в разных системах координат (неподвижной и подвижной) и развязаны между собой, поэтому передача информации осуществляется с определенной погрешностью

из-за изменения во времени и в пространстве их взаимных расположений.

ИЗМЕРЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Лазерные интерференционные измерения в диапазонах длин 200 нм, 20 м и 1 км осуществляют с помощью гелий-неоновых лазеров, обеспечивающих высокую монохроматичность, малую расходимость лучей и большую интенсивность излучения. В лазерной интерферометрии разрешающая способность в метровом диапазоне может быть до 0,1 мкм/м и пропорционально перемещению изделия. Погрешность лазерных измерительных интерферометров ЛИ составляет не более длины волны света (0,6 мкм). ЛИ обычно строятся по двухлучевой системе Майкельсона, включающей лазер, светоделительное зеркало и два отражателя, один из которых неподвижен, а другой – жестко связан с изделием. Отразившись от эталонного и объектного зеркал, пучки света соединяются и интерферируют. На выходе прибора с помощью фотометрического счетчика подсчитывается число полос интерференции.

Недостаток ЛИ – относительно высокая чувствительность к внешним механическим

INTRODUCTION

Portable nanoholographic planimeter is a holographic measuring system. It is designed for precision measurements in real time, processing and maintaining measurement results when working, both in autonomous mode and with automated measurement systems as a measuring and computing complex; this system is characterized by high reliability. Information on the magnitude of the deviation from flatness is displayed in digital tables and graphs. The PNHPm can be used in mechanical engineering, optical-mechanical industry, aircraft construction, in all high-tech industries, for calibration of industrial measuring

standards, as well as in science and technology.

The design of the PNHPm device makes it possible to determine with a high nano accuracy deviation from flatness of the surface, remove the limit on the size of the measured surface and perform an accelerated measurement process with an increase in the operating temperature range. In the process of measurement there is no subjective human factor.

To control flatness of horizontally located surfaces, calibration rules are used (for example, the OL-800 optic line [1], plates, flat glass plates, an interferometer, which has accuracy to 0.5 μm).

A device is known to determine the deviation from flatness of the

surfaces, which includes an automatic collimator [2] as a measuring element and a mirror located on the measured surface with the possibility of moving along it.

The main disadvantage of this method is associated with a large size and weight of the autocollimator (9 kg) which needs to install it, as a rule, not on the surface to be measured so as to avoid distortions, due to which it is established, as a rule, not on the measured surface in order not to make distortion in this surface therefore the second-scale autocollimator scale and the mirror are installed on the measured surface. They are in the different coordinate systems (fixed and mobile) and do not depend on

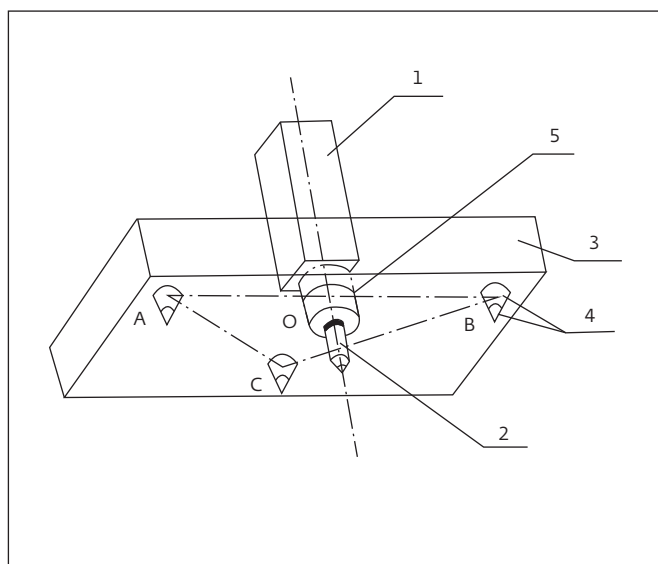


Рис.1. Голографический плоскомер
Fig.1. Holographic planimeter

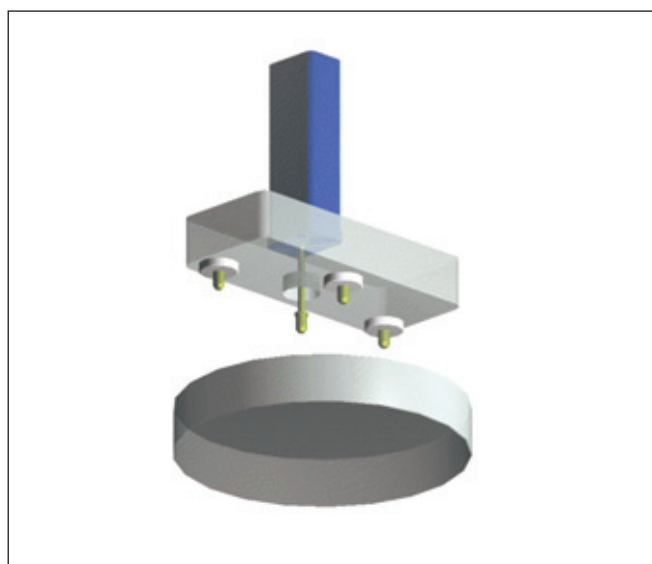


Рис.2. Фотография голографического плоскомера
Fig.2. Image of a holographic planimeter

и температурным воздействиям, что ограничивает их применение. Автоколлимационный метод используется для контроля отклонений от прямолинейности и плоскостности поверхностей большой протяженностью (до 40÷50 м).

Недостатками способа являются недостаточная точность измерений, связанная с субъективной погрешностью при визуальном определении центра коллимированного луча и совмещении его с перекрестьем визирующей марки, а также с погрешностью, которая может быть

вызвана сейсмическими колебаниями или вибрацией от технологического оборудования и строительной техники. Устройство пригодно лишь при небольших изменениях отклонения от плоскостности и только для оптических поверхностей. Измерения отклонения от плоскостности осуществляется вручную оператором. Устройство может определять не плоскостность небольших поверхностей.

ПНГПл позволяет повысить точность измерения отклонений поверхности от плоскостности,

each other, therefore the transfer of information is carried out with a certain error due to changes in time and in space of their mutual locations.

MEASUREMENTS AND RESULTS

Laser interference measurements in the length ranges of 200 mm, 20 m and 1 km are carried out using helium-neon lasers providing high monochromatics, low rays and greater radiation intensity. In laser interferometry, the resolution in the meter range can be up to 0.1 μm / m and in proportion to the movement of the product.

The error of the laser measuring measurement interferometers is no longer than the wavelength of the light (0.6 μm). Laser measurements are usually built according to the two-beam Michelson system, including a laser, a lightweight mirror and two reflectors, one of which is fixed, and the other is rigidly associated with the product. Reflected from the reference and object mirrors, light bundles are connected and interfered. At the output of the device, the number of interference bands is calculated using a photometric meter.

The disadvantage lacks of laser measurements is due to a relatively high sensitivity to external mechanical and temperature effects, which limits their application. The auto-collimation method is used to control deviations from straightness and flatness of surfaces with a large length (up to 40 ÷ 50 m).

The disadvantages of this method are due to insufficient accuracy of measurements associated with a subjective error in visual determination of the center of the collimated beam and combining it with

снять ограничений по величине измеряемой поверхности и автоматизировать процесса измерения, чем существенно упрощается данный процесс.

Устройство ПНГПл представлено на рис.1. Оно содержит измерительный узел 1, включающий щуп 2, платформу со сквозным отверстием 3, в котором установлен измерительный узел. Щуп имеет возможность касания с измеряемой поверхностью и перемещения в плоскости, перпендикулярной измеряемой поверхности и вдоль направления измерения, а платформа снабжена тремя опорами А, В и С для установки устройства на измеряемой поверхности. В качестве измерительного узла используется датчик линейных перемещений (длиномер голографический – ДГ), включающий источник света, освещающий две дифракционные решетки, одна из которых измерительная, жестко связанная со щупом, а другая вспомогательная, и фотоприемники. Опоры А, В, С выполнены из материалов с низким коэффициентом температурного расширения и обеспечивающие трехточечную установку платформы на поверхность. Они расположены в вершинах треугольника таким образом, что один из катетов треугольника параллелен одной из сторон платформы. Кроме этого, к устройству прилагается пробное стекло, необходимое для его калибровки (рис.2).

ДГ-1 представляет собой прецизионное измерительное устройство с цифровым выходом

информации и с измерительным элементом в виде линейной голографической дифракционной решетки. В ДГ используется сопряжение двух дифракционных решеток 3 и 4 (рис.3), из которых одна – измерительная с длиной, не меньше чем ожидаемое отклонение от плоскостности измеряемой поверхности, и жестко связана со щупом 2 (рис.1 и 2), а другая – небольшая, вспомогательная.

Применение растровых сопряжений двух голографических дифракционных решеток, образующих комбинационные муаровые полосы, для цифрового измерения перемещений методом последовательного счета основывается на следующем явлении. Если одна решетка движется в собственной плоскости перпендикулярно своим штрихам, а другая неподвижна по отношению к наблюдателю, то муаровые полосы также перемещаются, причем число полос, которые пройдут через любую точку растрового поля, равно числу штрихов движущейся решетки, которые прошли эту же самую точку. Если одна из решеток жестко закреплена к щупу 2 (рис.1 и 2) длинмера, который должен измерить отклонение от плоскости поверхности, а другая неподвижна относительно него, то, считая число полос, проходящих любую фиксированную точку, можно определить линейное перемещение подвижного щупа, выраженное через число периодов штрихов дифракционной решетки. В данном случае, как видно

the crossing of the brand, as well as the error, which can be caused by seismic fluctuations or vibration from technological equipment and construction equipment. The device is suitable only for measuring small changes in deviation from flatness and only for optical surfaces. Measurements of deviations from flatness are carried out manually by the operator. The device can define non-flatness of small surfaces.

The PNHPm allows to increase the accuracy of measurement of surface deviations from flatness, remove restrictions on the

size of the measured surface and automate the measurement process, which substantially simplifies measurements.

The PNHPm device is represented in Fig.1. It contains a measuring unit 1, comprising a probe 2, a cross-cutting hole platform 3, in which the measuring unit is installed. The probe has the possibility of touching the measured surface and moving in the plane perpendicular to the measured surface and along the measurement direction, and the platform is equipped with three supports A, B and C to install the device

on the measured surface. As a measuring unit, a linear displacement sensor (holographic length meter, HLM) is used as a source of light, illuminating two diffraction gratings, one of which is measurable, rigidly related to the dipstick, and the other auxiliary, and photodetectors. Supports A, B, C are made of materials with a low temperature expansion coefficient and provide for a three-point platform installation to the surface. They are located in the vertices of the triangle in such a way that one of the sides of the triangle is parallel to one of the

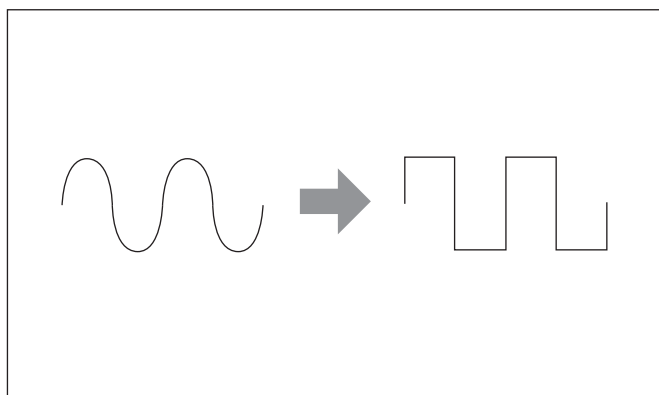


Рис.3. Преобразование синусоидальных сигналов 1Vss в TTL-импульсы

Fig.3. Converting 1Vss signals to TTL pulses

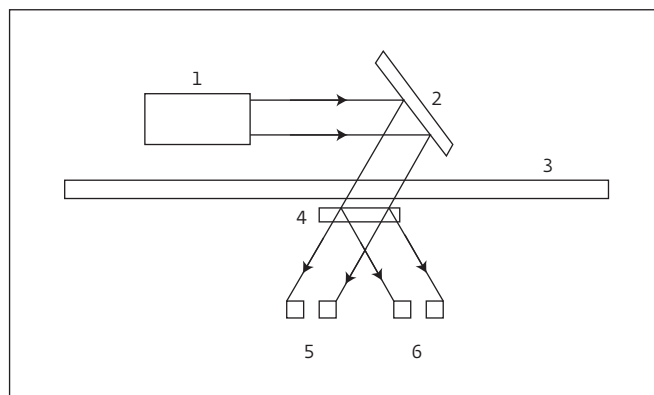


Рис.4. Оптическая схема голографического дилномера
Fig.4. Optical scheme of a holographic length meter

из таблиц, этот период равен 1 мкм. Кроме этого для того чтобы обеспечить реверсивный счет, растровое муаровое звено должно выдавать два сигнала, сдвинутых по пространственной фазе на $\pi/2$, то есть находящихся в квадратуре. Синусоидальные квадратурные сигналы могут быть преобразованы в прямоугольные сигналы (рис.3). В результате измеряемое перемещение представляется последовательностью однородных импульсов, причем каждый импульс соответствует перемещению решетки на один шаг. Число импульсов подсчитывается электронным реверсивным счетчиком при их освещении световым потоком от светового источника 1, содержащегося

в измерительном узле, на выходе решеток появляются интерференционные комбинационные муаровые полосы, возникающие в результате интерференции пучков различных порядков дифракции этих решеток. Вначале на измерительную решетку 3 накладывается вспомогательная решетка 4 (рис.4), затем короткая решетка рассогласовывается по углу с измерительной решеткой (вертикальные стрелки (рис.5) до получения широких муаровых полос. Период муаровых полос в вертикальном направлении принимаем за 360° . Если установить один фотоприемник 1 и начать двигать измерительную решетку 3 вправо-влево (горизонтальные стрелки) муаровые полосы начнут

sides of the platform. In addition, the device comes complete with a test glass is attached to the device, which is necessary for its calibration (Fig.2).

HLM 1 is a precision measuring device with digital output of information and it has the measuring element in the form of a linear holographic diffraction lattice. The HLM uses the interface of two diffraction gratings 3 and 4 (Fig.3), of which one - measuring with a length, not less than the expected deviation from the flatness of the measured surface, and is rigidly connected to the probe 2 (Fig.1

and Fig.2), and the other auxiliary one is a small.

The use of raster conjugates of two holographic diffraction lattices forming combinational moire bands, for digital measurement of displacements by the method of a sequential account is based on the next phenomenon. If one lattice moves in its own plane perpendicular to its strokes, and the other is fixed in relation to the observer, then the moire stripes are also moved, and the number of bands that pass through any point of the raster field is equal to the number of strokes

of the moving lattice, which have passed the same point. If one of the lattice are rigidly fixed to Fig.2 (Fig.1 and Fig.2) of the length, which must measure the deviation from the plane of the surface, and the other is still relative to it, then, counting the number of bands passing any fixed point, you can define a linear movement of mobile moving the probe, expressed in the number of periods of the diffraction lattice strokes. In this case, as can be seen from the tables, this period is 1 μm . In addition, in order to ensure a reversing count, the

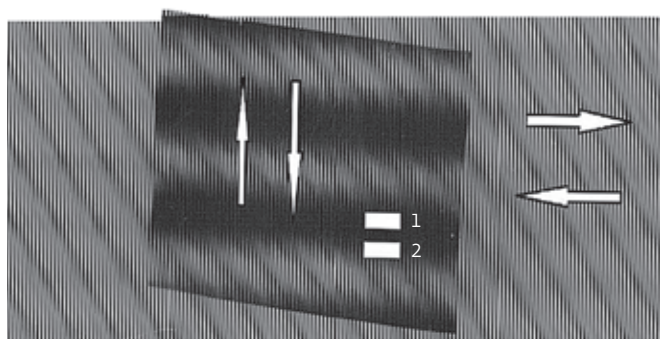


Рис.5. Интерференционные муаровые полосы от взаимодействия двух голографических решеток

Fig.5. Interference moiré bands as a result of interaction of two holographic gratings

смещаться вверх и вниз и фотоприемники начнут их считать.

Для определения направления смещения измерительной решетки устанавливается второй фотоприемник, генерируя синусоидальные сигналы 2 в поле муаровых полос со сдвигом по полосам на 90° относительно первого фотоприемника (как установлены белые квадраты 5 и 6, имитирующие фотоприемники 1 и 2 (Рис.4).

Теперь, если смещать измерительную решетку, два фотоприемника начнут генерировать две синусоиды, смещенные на 90° , то есть синус и косинус. При смещении в одну сторону смещение будет на $+90^\circ$, а в другую на -90° . Если фотоприемники 5 и 6 соединить попарно,



Рис.6. ДГ-30 с блоком индикации

Fig.6. HLM-30 with a display unit

со сдвигом в 180° (что позволяет компенсировать постоянную составляющую сигнала), то на выходе фотоприемников образуются два сигнала \sin и \cos , сдвинутые на 90° .

При получении информации о перемещении датчика во время считывания происходит преобразование сигналов \sin и \cos в сигналы TTL (меандры) (см. рис.6), если это требует ЧПУ. Шаг и форма муаровых полос зависит от параметров решеток и от их взаимного расположения. В основном они представляют собой семейство прямых линий. Перемещение одной из решеток,

raster moiré link must produce two signals shifted in the spatial phase by $\pi / 2$. Sinusoidal quadrature signals can be converted to rectangular signals (Fig.3). As a result, the measured movement is represented by a sequence of homogeneous pulses, and each pulse corresponds to the movement of the grille one step. The number of pulses is calculated by an electron reverse counter when they are illuminated by a light flux from the light source 1 contained in the measuring unit, interference combinational moiré bands appear at the

lattice outlet, resulting from the interference of the beams of various orders of diffraction of these gratings. Initially, an auxiliary lattice 4 is superimposed on the measuring lattice 3 (Fig.4), then the short lattice will be dispelled over the corner with the measuring lattice (vertical arrows (Fig.5) before receiving wide moiré strips. The period of moiré bands in the vertical direction are taken in 360° . Set one photodetector 1 and start moving the measuring lattice 3 to the right - left (horizontal arrows), moiré bands will start shifting up and down

and photodetectors will begin to read them.

To determine the displacement direction of the measuring lattice, a second photodetector is established to generate sinusoidal signals 2 in the field of moiré bands with a shift by bands 90° relative to the first photodetector (as white squares 5 and 6 are installed, imitating photodetectors 1 and 2 (Fig.4).

Now, if you shift the measuring lattice, two photodetectors will begin to generate two sinusoids, shifted by 90° , that is, sinus and cosine. When offset in one direction, the offset



Характеристики ДГ-70 Characteristics of HLM-70	Величина измерения Measuring value	Единица Unit of measurement
Точность Accuracy	$\pm 0,2$	μm
Дискретность Resolution	1	nm
Измеряемая длина, L Measuring length	0–70	mm
Период штрихов Stroke period	1	μm

Рис. 7. ДГ-70 с блоком индикации

Fig. 7. HLM-70 with a display unit

жестко связанной со щупом 2, относительно второй приводит к синхронному движению муаровых полос и в случае реверса – к синхронному реверсу. Можно оценить связь между перемещением измерительной дифракционной решетки по измеряемой поверхности и перемещением муаровой полосы, то есть определить коэффициент оптической редукиции. В ДГ используется одно фундаментальное свойство муаровых полос, полученных в результате растровых спряжений двух решеток, а именно, что малому перемещению подвижной измерительной решетки соответствует существенное перемещение муаровых

полос. Таким образом, имеет место масштабное (увеличенное) преобразование малых перемещений измерительной решетки в существенно большие, пропорциональные перемещения муаровых полос. Именно это обстоятельство позволяет установить в поле муаровых полос фотоприемники, обладающие существенно большими размерами, чем произведенное перемещение измерительной решетки. Фотоприемники устанавливаются в апертуре индикаторной решетки, чем и определяется ее размер. Перемещения муаровых полос преобразуются фотоприемниками в электрические сигналы, которые обрабатываются

will be at $+90^\circ$, and in another direction -90° . If the photodetectors 5 and 6 are connected in pairs, with a shift of 180° (which allows you to compensate for the constant component of the signal), then two sin and cos signals shifted at 90° are formed at the output of the photodetectors.

When receiving information about the sensor movement during reading, the sin and cos signals are converted to TTL signals (meander) if it requires CNC. The step and shape of the moire bands depends on the parameters of the lattices and on their

mutual location. Basically, they are a family of straight lines. The movement of one of the grids rigidly related to the dipstream 2, relative to the second leads to the synchronous movement of the moire bands and in the case of the reverse to the synchronous reverse. It is possible to estimate the relationship between the movement of the measuring diffraction lattice along the measured surface and the movement of the moir band, i.e. determine the coefficient of optical reduction. In HLM, one fundamental property of the moire bands

obtained as a result of raster hinge of two lattices is used, namely, it is a significant movement of a moving measuring lattice. Thus, there is a large-scale (enlarged) transformation of small movements of the measuring lattice into substantially large, proportional movements of the moire bands. It is this circumstance that allows you to install photodetectors in the field of moire bands, which have significantly large sizes than the movement of the measuring lattice. Photodetectors are installed in the aperture of the indicator lattice than

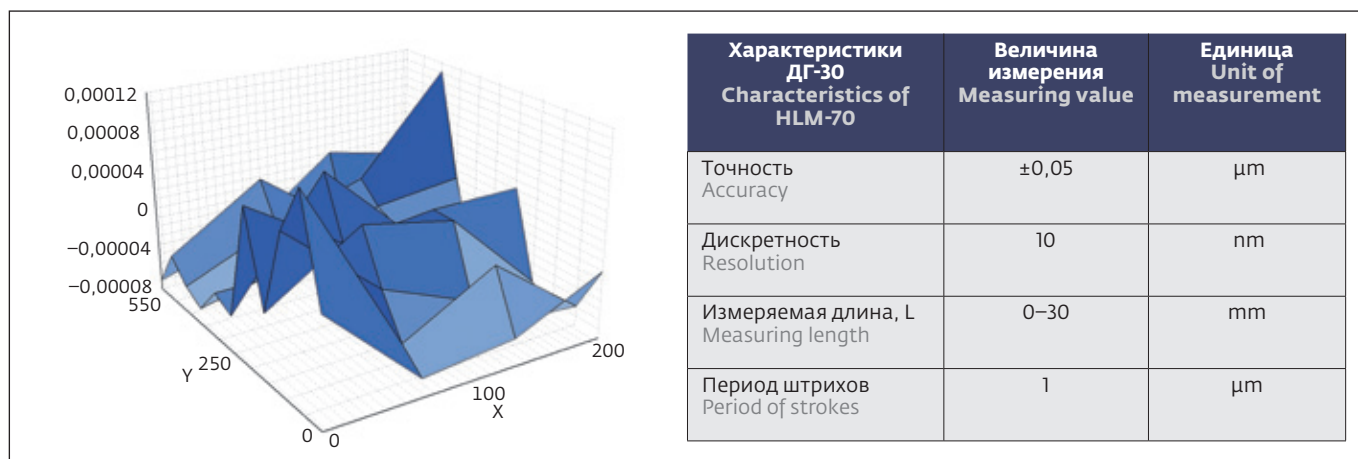


Рис.8. Отклонения от плоскостности измеряемой поверхности

Fig.8. Deviations from the planeness of the measured surface

в электронном логическом блоке управления ДГ или в РС через интерфейс RS-232 с целью получения цифровой информации об измеряемом перемещении. С целью устранения температурной зависимости платформа 3 (рис.1) изготовлена из кварца, щуп 2 и опоры 4 из инвара, а наконечники опор 4 – из сапфира. Кроме этого, длиномер ДГ-30 имеет возможность калибровки в большом интервале температур (порядка $\pm 10^\circ\text{C}$), что позволяет устройству работать при разных температурных режимах окружающей среды без потери точности. Точность устройства при использовании длиномера ДГ-30 достигает разрешения 0,01 мкм

(рис.7), а в случае ДГ-70 (предел измерения 70 мм) (рис.8) достигает разрешение 1 нм.

Принцип работы устройства заключается в следующем. Вначале производится калибровка устройства с помощью эталонной пластины 6 (рис.2). При этом платформа 3 посредством опор с наконечниками 4 и измерительный узел 1 со щупом 2 устанавливаются на поверхности эталонной пластины 6. Блок управления устанавливается в положение "калибровка" и зануливаются показания ДГ, в результате чего в блоке управления автоматически определяется коэффициент калибровки k_{cal} и в дальнейшем

and the size is determined. Movements of the moire bands are converted by photodetectors to electrical signals that are processed in the electronic logic control unit for HLM or in PC via the RS-232 interface in order to obtain digital information about the measured movement. In order to eliminate the temperature dependence, the Platform 3 (Fig.1) is made of quartz, probe 2 and supports 4 of the invar, and the tips of supports 4 of the sapphire. In addition, the HLM-30 string has the ability to calibrate in a large temperature range (about

$\pm 10^\circ\text{C}$), which allows the device to operate at different temperature modes without loss of accuracy. The accuracy of the device when using the HLM-30 length, it reaches a resolution of 0.01 μm (Fig.6), and in the case of HLM-70 (measurement limit of 70 mm) (Fig.7) reaches 1 nm resolution.

The principle of operation of the device is as follows. Initially, the device is calibrated using the reference plate 6 (Fig.2). In this case, platform 3 is installed, on support tips 4 and measuring unit 1 with probe 2 are mounted on the

surface of the reference plate 6. The control unit is set to the "Calibration" position and the HLM is set to zero; as a result the k_{cal} calibration coefficient is automatically accounted by the control unit. The instrument readings during all stages of measurements will automatically take this value into account. Moreover, $k_{\text{cal}} > 0$, if the surface of the reference plate is convex, and $k_{\text{cal}} < 0$, if its surface is concave. Next, after calibration, the platform 3 and HLM-1 with the probe 2 is transferred to the measured surface and switch to the measurement of



показания прибора во время всех актов измерений автоматически будут учитывать эту величину. Причем $k_{cal} > 0$, если поверхность эталонной пластины выпуклая, и $k_{cal} < 0$, если ее поверхность вогнутая. Далее, после калибровки, платформу 3 и ДГ 1 со щупом 2 переносят на измеряемую поверхность и переходят к измерению отклонения от плоскостности поверхности. Блок управления устанавливается в положение "измерение" и зануливаются показания ДГ. После чего можно начинать измерение поверхности. Измерение отклонения от плоскостности поверхности основано на принципе измерения отклонения от плоскостности поверхности при измерениях в различных направлениях этой поверхности (к примеру, X и Y). Для этого связывают ортогональную систему координат с измеряемой поверхностью XOY и определяют начало координат. Катет треугольника АВ должен находиться на измерительной линии, параллельной направлению OX или соответственно OY, а ДГ 1 должен быть расположен в середине этого катета посредством фиксации в отверстии 2. В этом случае ошибки Аббэ будут минимальны. Перемещают боковую грань платформы, параллельной катету АВ, вдоль выбранного направления перемещения OX или OY, через равные выбранные интервалы, связанные с конкретной задачей. В данном конкретном случае, был выбран интервал, равный половине катета АВ. В качестве направляющих, вдоль которых нужно перемещать платформу 3, можно использовать линейку или лазерный луч и т.д.

После каждого перемещения каретку останавливают и снимают цифровые значения с электронного блока ДГ. В памяти компьютера фиксируются цифровые значения высот h_{ix} датчика в данном направлении OX. Те же самые действия осуществляются для всех других линий, параллельных оси OX, покрывающих всю измеряемую поверхность через необходимые интервалы. В памяти компьютера фиксируются также цифровые значения высот h_{iy} датчика в направлении OY и для всех других линий, параллельных оси OY.

Программа по измеренным величинам строит отклонение от плоскостности поверхности в пределах XOY по трем координатам X, Y, Z.

Причем конструкция устройства такова, что нет никаких ограничений по количеству точек измерений, тем самым по величине измеряемой поверхности. Устройство ДГ-30/100/200 было удостоено свидетельства об утверждении типа средств измерений [3] от 2 октября 2018 года.

На рис.7 и 8 показан ДГ-30 и ДГ-70. На рис.9 видно коридор изменения отклонения от плоскостности поверхности в пределах от $-0,08$ до $+1,2$ мкм, определяемого с разрешением $0,01$ мкм, а на рис.9 дано развернутое сечение отклонения от неплоскостности поверхности в направлении измерения вдоль оси OX. Такое же сечение можно получить вдоль оси OY. Интервалы, через которые осуществлялись измерения, равнялись половине длины катета АВ, то есть расстоянию от одной из опор, расположенной на катете, до щупа ДГ.

the deviation from surface flatness. The control unit is set to the "Measurement" position and the testimony of HLM is set. After that, the surface measurement can be started. The measurement of the deviation from the surface flatness is based on the principle of measurement of the deviation from the surface flatness during measurements in various directions of this surface (for example, x and y). To do this, associate an orthogonal coordinate system with the measured XOY surface and determine the origin of coordinates. The wheel triangle can

be on the measuring line, parallel to the direction OX or respectively, OY, and HLM-1 should be located in the middle of this category by fixing in hole 2. In this case, the ABBE errors will be minimal. Move the side line of the platform parallel to the sides along the selected direction of movement OX or OY, through equal selected intervals associated with a specific task. In this particular case, the interval was chosen equal to half the sides AB. As guides along which you need to move platform 3, you can use a ruler or a laser beam, etc.

After each movement, the carriage stops and the digital values from the electronic HLM unit are read-out. In the memory of the computer, the digital values of the h_{ix} height of the sensor are recorded in this direction OX. The same actions are carried out for all other lines parallel to the OX axis, covering the entire measured surface through the necessary intervals. In the memory of the computer, the digital values of the h_{iy} sensor heights are recorded in the OY direction and for all other lines parallel to the OY axis.

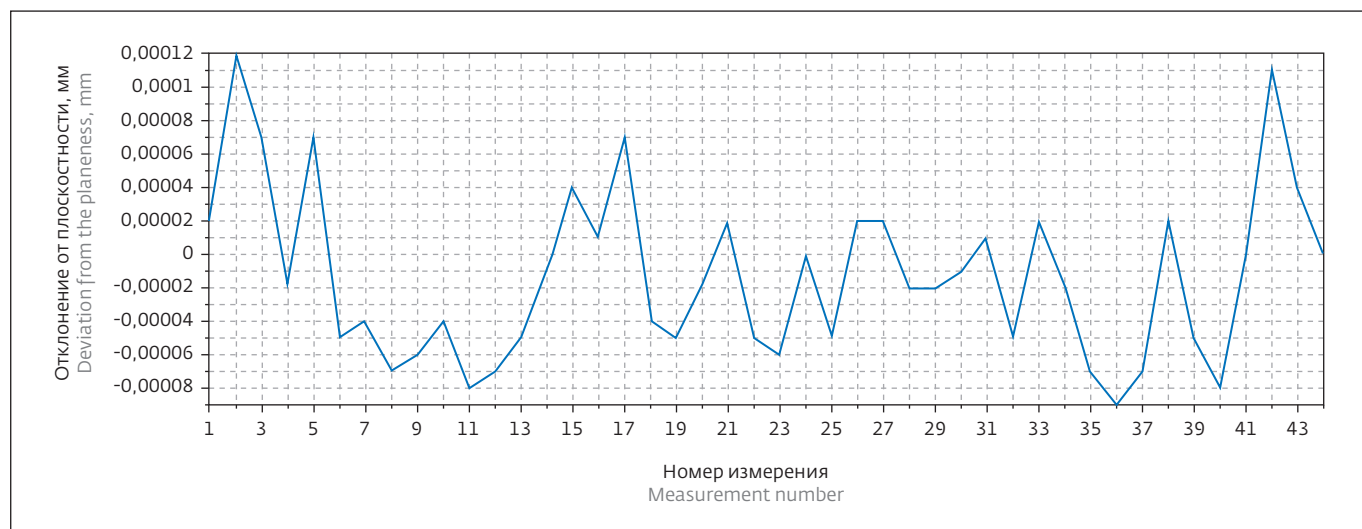


Рис.9. Отклонение от плоскостности, измеряемой поверхности, сканированной в одном из ее сечений

Fig.9. Deviation from the planeness of the measured surface, scanned in one of cross sections

В настоящее время в России выпускаются ДГ – длиномеры голографические с измеряемой длиной до 200 мм [4] и с точностью измерения по вертикали от $\pm 0,05$ до $\pm 0,2$ мкм и разрешением 10 и 1 нм.

Измерительный узел не меняет свое положение относительно точек опор платформы. Причем его установка в середине базы АВ, то есть симметрично относительно опор, позволяет сохранять одинаковую точность в каждом акте измерения.

На рис.9 дана картина распределения отклонения от плоскостности измеряемой поверхности, а на рис.9 отклонение от плоскостности, сканированной в одном из сечений этой поверхности.

ВЫВОДЫ

Преимущества данного ПНПЛГ:

- увеличение точности измерения. Точность измерительной решетки дана формулой точности ВНИИМ им. Д.И.Менделеева: $(0,02 + 0,4L/1000)$ мкм, где L – длина измерения в мм,

The program for measured values builds a deviation from surface flatness within XOY in three coordinates X, Y, Z.

Moreover, the design of the device is that there are no restrictions on the number of measurement points, thereby large-scale the measured surface. The HLM-30/100/200 device was awarded a certificate of approval of the type of measuring instruments in 2018 [3].

Fig.7 and Fig.8 show HLM-30 and HLM-70. In Fig.8, a range of changes to the deviation from the surface flatness ranging from -0.08 to $+1.2$ μm ,

determined with a resolution of 0.01 μm , and in Fig.9 there is a detailed cross section of deviation from non-flatness of the surface in the measurement direction along axis OX. The same section can be obtained along the OY axis. The intervals through which measurements were carried out were equal to half the length of the AB category, i.e. distance from one of the supports located on the sides, to the HLM probe.

Currently, HLM measuring length up to 200 mm [4] and with a measurement accuracy of vertical from ± 0.05 to ± 0.2

μm and a resolution of 10 nm to 1 nm.

The measuring node does not change its position relative to the platform support points. Moreover, its installation in the middle of the base AB, i.e. symmetrically relative to the supports, allows you to maintain the same accuracy in each measurement.

In Fig.8, a pattern of the deviation distribution from the flatness of the measured surface is given, and in Fig.9 the deviation from the flatness scanned in one of the cross section of this surface.



- ускорение процесса измерений,
- увеличение предела измеряемых отклонений от плоскостности,
- уменьшение габаритов платформы и измерительного узла, содержание небольшого числа оптико-механических узлов,
- фиксация измерительного узла в отверстии платформы относительно точек опоры,
- платформы 3 и опоры с наконечниками 4 с малой зависимостью от температуры,
- снятие ограничений по величине измеряемой поверхности, как со стороны малых, так и со стороны больших значений (т.е. расширение диапазона измеряемой поверхности,
- измеряемое отклонение поверхности от плоскостности поверхности $h=\pm 15$ мм, что связано с характеристиками измерительного дальномера ДГ-30;
- возможность автоматизация процесса измерения,
- устройство весит не более 300 г,
- увеличение рабочего температурного диапазона,
- время проведения одного цикла измерений минимально, так как запоминание и обработка данных осуществляется автоматически блоком управления или на компьютере,
- допускает измерение не только горизонтальных поверхностей,
- уменьшение веса измерительного.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Линейка оптическая ОЛ-800, Технические условия ТУЗ-3.655-77. Издательство: 140061, г. Лыткарино, Моск. обл., ПО "Рубин", 1990.
2. Автоколлиматоры унифицированные АК-0,2У, АК-0,5У, АК-1У // ГОСТ 11899-77.
3. Сертификат об утверждении типа измерений PATTERN APPROVAL CERTIFICATE OF MEASURING INSTRUMENTS RU. С.27.001. А. № 71376. 01.10.2018 г.
4. Турухано Б.Г., Турухано Н. Измерительная микрометрическая головка "Тубор". Патент РФ, № 2 032 142. 1995. Пр. 19.03.92.
5. Optical ruler OL-800, Technical specifications TUZ-3.655-77. Publisher: 140061. Lytkarino. Moscow region. PO "Rubin", 1990.
6. Autocollimators unified АК-0.2 U, АК-0.5 U, АК-1U. GOST 11899-77.
7. PATTERN APPROVAL CERTIFICATE OF MEASURING INSTRUMENTS RU. С. 27.001. А. No. 71376. 01.10.2018 г.
8. Turukhano B.G., Turukhano N. Measuring metric head "Tubor", RF Patent, No. 2 032 142. 1995. Pr. 19.03.92.

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

CONCLUSIONS

The advantages of this PNHPm:

- increase of the measurement accuracy. The accuracy of the measuring lattice is given by the formula: $(0.02 + 0.4L / 1000) \mu\text{m}$, where L is the length of the measurement in mm,
- acceleration of the measurement process,
- increase of the limit of measured deviations from flatness,
- reduction of the dimensions of the platform and the measuring node, the content of a small number of optical-mechanical nodes,

- fixation of the measuring node in the platform hole relative to the poverty points,
- platforms 3 and supports with tips 4 with low temperature dependence,
- removal of restrictions on the size of the measured surface, both from small and from large values (i.e., expanding the range of the measured surface,
- the measured deviation of the surface from the surface flatness $H = \pm 15$ mm, which is associated with the characteristics of the measuring length of HLM-30,
- ability to automate the measurement process,

- device weighs no more than 300 g,
- increase of the working temperature range,
- time of one measurement cycle is minimal, because memorization and data processing is automatically controlled by the control unit or on the computer,
- possibility to measure not only horizontal surfaces,
- reduction of the weight of the measuring unit. ■

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.



В МГТУ ИМ. Н.Э.БАУМАНА РАЗРАБОТАН САМОУПРАВЛЯЕМЫЙ МЕТОД РАСКАЛЫВАНИЯ КРЕМНИЕВОЙ ПЛАСТИНЫ ДЛЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ BOSCH-ПРОЦЕССА

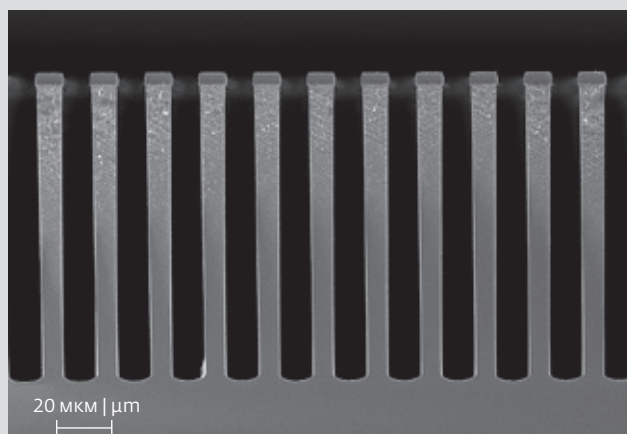
Команда НОЦ "Функциональные микро/наносистемы" предложила самоуправляемый и хорошо контролируемый метод скалывания кремниевой пластины для описания поперечного сечения процесса глубокого травления кремния.

Разработанный метод сводит к минимуму влияние на результирующий профиль глубокого травления.

Группа ученых НОЦ ФМН на базе МГТУ им. Н.Э.Баумана и ФГУП "ВНИИА им. Н.Л.Духова", МГУ им. М.В.Ломоносова, ИРЭ РАН и ИТПЭ РАН разработала технологию электронно-лучевого испарения тонкопленочных покрытий и элементов газовых сенсоров с контролируемыми при помощи эллипсометрических спектров и спектров пропускания оптическими параметрами пленок палладия, платины и триоксида вольфрама.

Передовые микросистемы, широко используемые в интегрированных оптоэлектронных устройствах, компонентах поглощения энергии и микрофлюидных лабораториях-на-чипе, требуют применения кремниевых микроструктур высокого качества с точно контролируемым профилем. Такие структуры изготавливаются с помощью Bosch-процесса, который является ключевым этапом изготовления МЭМС-устройств. Для измерения параметров Bosch-процесса необходимо осуществлять раскалывание образца на две части, что является непросто процессом из-за неуправляемости скола. Метод получения скола влияет на эффективность раскалывания и на качество контроля полученных структур. Стандартная техника скалывания алмазным скрайбером не всегда справляется с технологическими задачами.

Команда НОЦ "Функциональные микро/наносистемы" предложила самоуправляемый и хорошо контролируемый метод скалывания для описания геометрических характеристик поперечного сечения канала, который сводит к минимуму влияние вспомогательных структур на результирующий профиль глубокого травления. Инженеры центра провели экспериментальное сравнение двух методов скалывания на основе различных вспомогательных микроструктур: 1) вытравленные поперечные вспомогательные линии различной



Профиль поперечного сечения каналов после Bosch-процесса

ширины (от 5 до 100 мкм) и положения; 2) вытравленные прерывистые вспомогательные линии.

Учеными и инженерами было проанализировано влияние вспомогательных линий на характер травления для каналов шириной от 2 до 50 мкм с аспектным отношением более 10 для массива структур и для одиночных линий. Экспериментально продемонстрировано, что неправильный выбор параметров вспомогательной линии приводит к появлению дефектов "нароста" кремния на пересечениях целевых микроструктур, что существенно влияет на измерения профиля поперечного сечения. Таким образом, наилучшим способом создания управляемого бездефектного скола является прерывистая линия с концентратором напряжения вблизи канала.

Результаты исследований представлены в публикации *Self-Controlled Cleaving Method for Silicon DRIE Process Cross-Section Characterization* журнала *Micromachines*.

НОЦ ФМН – совместный технологический центр МГТУ им. Н.Э.Баумана и ФГУП "ВНИИА им. Н.Л.Духова" ГК "Росатом", обеспечивающий реализацию передовых практических исследований в области элементной базы на новых физических принципах, квантовых технологий, нанопотоники и оптики, биоаналитических платформ типа "лаборатория на чипе", МЭМС/МОЭМС и тонкопленочных технологий. Исследования в центре выполняются с использованием комплексов оборудования ведущих мировых производителей, объединенных в единый технологический кластер.

МГТУ им. Н.Э.Баумана – один из крупнейших государственных технических университетов и научных центров России и Европы. Обучение в МГТУ им. Н.Э.Баумана ведется на 19 факультетах дневного отделения. Открыты два филиала МГТУ в Калуге и Мытищах, а также техникум. Основными структурными подразделениями университета являются научно-учебные комплексы, имеющие в своем составе факультет и научно-исследовательский институт.

ФГУП "ВНИИА им. Н.Л.Духова" – созданное в 1954 году, одна из ведущих научно-исследовательских организаций Государственной корпорации по атомной энергии "Росатом".