



Получено: 24.10.2022 г. | Принято: 30.10.2022 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.7-8.450.457>

Научная статья

## ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ НАНОДЛИНОМЕР

Б.Г.Турухано<sup>1</sup>, заведующий ЛГИИС, Заслуженный изобретатель РФ, ORCID: 0000-0002-6441-4259 /

[turukhano\\_bg@pnpi.nrcki.ru](mailto:turukhano_bg@pnpi.nrcki.ru)

И.А.Турухано<sup>2</sup>, кинооператор, ORCID: 0000-0002-8615-0522

Ю.М.Лавров<sup>1</sup>, науч. сотр., ORCID: 0000-0001-8890-9929

О.Г.Ермоленко<sup>1</sup>, вед. инженер-технолог, ORCID: 0000-0002-0460-0746

С.Н.Ханов<sup>1</sup>, вед. инженер-электронщик, ORCID: 0000-0001-5237-1725

**Аннотация.** В этой статье авторы освещают современное состояние измерительной техники, в частности при измерении линейных размеров объектов вертикальными нанодлинномерами голографическими (НДГ) на базе голографических дифракционных решеток.

**Ключевые слова:** голографическая дифракционная решетка, нанодлинномер голографический

**Для цитирования:** Б.Г. Турухано, И.А. Турухано, Ю.М. Лавров, О.Г. Ермоленко, С.Н. Ханов. Голографический нанодлинномер. НАНОИНДУСТРИЯ. 2022. Т. 15, № 7–8. С. 450–457. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.7-8.450.457>

Received: 24.10.2022 | Accepted: 30.10.2022 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.7-8.450.457>

Original paper

## NANOLENGTH HOLOGRAPHIC ENCODER

B.G.Turukhano<sup>1</sup>, заведующий ЛГИИС, Заслуженный изобретатель РФ, ORCID: 0000-0002-6441-4259 /

[turukhano\\_bg@pnpi.nrcki.ru](mailto:turukhano_bg@pnpi.nrcki.ru)

I.A.Turukhano<sup>2</sup>, кинооператор, ORCID: 0000-0002-8615-0522

Yu.M.Lavrov<sup>1</sup>, науч. сотр., ORCID: 0000-0001-8890-9929

O.G.Ermolenko<sup>1</sup>, вед. инженер-технолог, ORCID: 0000-0002-0460-0746

S.N.Khanov<sup>1</sup>, вед. инженер-электронщик, ORCID: 0000-0001-5237-1725

**Abstract.** In this paper, the authors highlight the current state of measurement technology, in particular, when measuring the linear dimensions of objects with vertical nanolength holographic encoders (NHE) based on holographic diffraction gratings.

**Keywords:** holographic diffraction grating, vertical nanolength holographic encoder

**For citation:** B.G. Turukhano, I.A. Turukhano, Yu.M. Lavrov, O.G. Ermolenko, S.N. Khanov. Nanolength holographic encoder. NANOINDUSTRY. 2022. V. 15, no. 7–8. PP. 450–457. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.7-8.450.457>

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

<sup>2</sup> Государственный институт кино и телевидения, Санкт-Петербург, Россия / State Institute for Cinema and Television, St Petersburg, Russia



## ВВЕДЕНИЕ

Известно устройство оптикатор [1], предназначенное для измерения линейных размеров деталей, которое содержит основной измерительный стержень, один конец которого через наконечник контактирует с одной стороной измеряемой детали, а другой кинематически связан со скрученной пружиной.

Принцип действия известного устройства основан на использовании упругих свойств скрученной пружинной ленты. Оптикаторы имеют цену деления 0,1; 0,2 и 0,5 мкм при диапазонах измерений длины от 24 до 100 мкм. Данным устройством в силу конструктивных особенностей скрученной ленты и ее свойств невозможно измерить большие линейные размеры порядка миллиметр и более, кроме этого, с его помощью невозможно обеспечить измерение с наноточностью.

Известно также устройство микрометрическая головка "ТУБОР" [2], представляющая собой длиномер голографический. Устройство содержит жестко связанную с измерительным стержнем измерительную голографическую решетку со штрихами на подложке, расположенную в пазу измерительного цилиндрического стержня параллельно плоскости среза. С корпусом жестко связана считывающая головка, состоящая из индикаторной решетки со штрихами на подложке, осветителя, линзы и фотоприемников.

Штрихи измерительной решетки расположены на базовой поверхности подложки перпендикулярно ее продольной оси, штрихи индикаторной решетки расположены на базовой поверхности ее подложки параллельно штрихам измерительной решетки и в пределах их апертуры.

Подшипники длиномера разнесены по длине измерительного стержня и предназначены для параллельного перемещения стержня с измерительной решеткой относительно индикаторной решетки с постоянным зазором между базовыми поверхностями решеток.

## ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ДЛИНОМЕРА

Длиномер работает следующим образом: пучок излучения, генерируемый осветителем, коллимируется и падает на дифракционные решетки. В поле интерференционных полос, образующихся за решетками, в установленной матрице фотоприемников преобразуется распределение интенсивности интерференционных полос в электрические сигналы. При смещении измерительного стержня с наконечником во время определения линейного размера объекта соответственно смещается жестко связанная со стержнем измерительная решетка относительно индикаторной

## INTRODUCTION

The prior art knows the optical gauge [1] designed for measuring linear dimensions of the parts which contains the main measuring rod which one tip contacts a side of the part to be measured while the other tip is kinematically linked to a twisted spring.

The operating principle of this device is based on elastic properties of the twisted spring tape. The optical gauges have a graduation mark of 0.1; 0.2 and 0.5  $\mu\text{m}$ , with a measuring range of 24 to 100  $\mu\text{m}$ . Due to the design and properties of the twisted tape it is not possible to measure large linear dimensions of the order of a millimetre or more with this device, nor it is possible to measure with nano accuracy.

Also known is the "TUBOR" micrometer head device [2] which is a holographic length encoder. The device contains a measuring holographic grating provided with line marks on a substrate which is rigidly connected to the measuring rod located in a groove of the measuring cylindrical rod parallel to the plane of the cut. A readout head consisting of an indicator grating with line marks on a substrate, an illuminator, a lens and photodetectors is rigidly connected to the housing.

The line marks of the measuring grating are arranged on the base surface of the substrate perpendicular to its longitudinal axis, the line marks of the indicator grating are arranged on the base surface of its substrate parallel to the line marks of the measuring grating and within their aperture.

The length encoder bearings are spaced along the length of the measuring bar and are designed to move the rod with the measuring grating parallel to the indicator grating with constant clearance between the grating base surfaces.

## OPERATING PRINCIPLE OF THE LENGTH ENCODER

The length encoder functions as follows: the beam of radiation generated by the illuminator is collimated and falls onto diffraction gratings. The field of interference fringes generated behind the gratings converts the intensity distribution of the interference fringes into electrical signals in the installed matrix of photodetectors. When the measuring rod with the tip is shifted during measuring of the linear size of the object, the measuring grating, which is rigidly connected to the rod, moves relative to the indicator grating, and variable electrical signals, shifted by 90° in phase, are generated at the outputs of the photodetectors matrix. Then, these signals are fed into the electronic unit where a comparator is used to generate counting pulses that determine the linear size of the object.

The bearings ensure parallel movement of the measuring grating relative to the indicator grating

Таблица 1. Характеристики микрометрических головок "ТУБОР" с измеряемыми длинами  $L = 30/100/200$  мм

Table 1. Specifications of micrometric heads "TUBOR" with measurement lengths  $L = 30/100/200$  mm

Характеристики   Characteristics	Величина Value
Точность, мкм Accuracy, $\mu\text{m}$	$\pm(0,1/0,2/0,4)$
Дискретность (Разрешение), мкм (нм) Increment (Resolution), $\mu\text{m}$ (nm)	0,01 (10)
Период решеток, мкм Grating period, $\mu\text{m}$	1
Частота решеток, лин/нм Grating frequency, line/nm	1 000
Измеряемая длина, мм Measured length, mm	30/100/200

решетки, и на выходах фотоприемников матрицы формируются переменные электрические сигналы, сдвинутые по фазе на  $90^\circ$ . Эти сигналы поступают затем в блок электроники, где с помощью компаратора формируются счетные импульсы, по которым определяется линейный размер объекта.

Подшипники обеспечивают параллельное перемещение измерительной решетки относительно индикаторной решетки с постоянным зазором между ними, что необходимо для сохранения постоянства периода интерференционных полос на протяжении всего процесса измерения линейного размера объекта, благодаря чему обеспечивается точность измерений.

На рис.1 показана микрометрическая головка "ТУБОР" с измеряемой длиной  $L = 30$  мм, а в табл.1 представлены характеристики модельного ряда микрометрических головок "ТУБОР" с измеряемыми длинами  $L = 30/100/200$  мм. Эти длинмеры были исследованы в ГОССТАНДАРТ России и в Федеральном агентстве России, где были утверждены как "типы средств измерений".

При этом служащий в качестве направляющей плоский металлический продольный срез измерительного стержня выполнен при помощи механической обработки, которая характеризуется наличием шероховатости и невысокой плоскостностью. Микровибрации, возникающие при перемещении стержня с измерительной решеткой по неточным направляющим, приводят к нарушениям параллельности перемещения

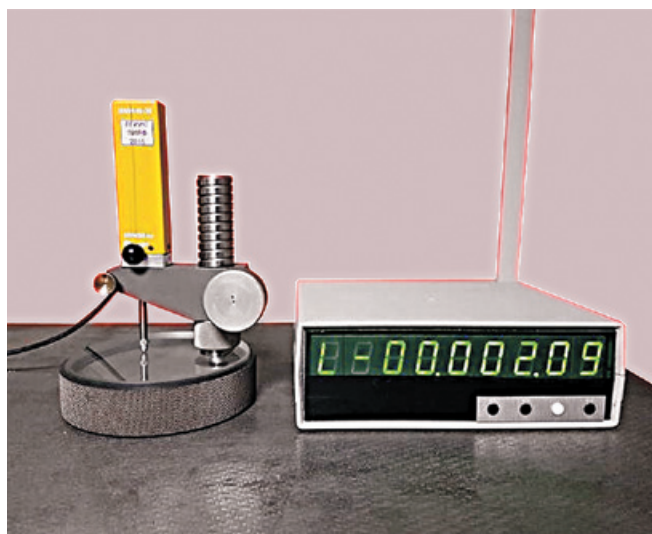


Рис.1. Микрометрическая головка "ТУБОР" с измеряемой длиной  $L = 30$  мм

Fig.1. Micrometer head "TUBOR" with measured length  $L = 30$  mm

with constant gap between them, which is necessary to maintain constancy of the interference fringe period throughout the whole process of measuring linear size of the object, due to the accuracy of measurements is ensured.

Fig.1 shows the micrometer head "TUBOR" with the measurement length  $L = 30$  mm, and Table 1 shows characteristics of a model range of micrometer heads "TUBOR" with the measurement lengths  $L = 30/100/200$  mm. Such length encoders have been examined in GOSSTANDART of Russia and in the Federal Agency of Russia where they have been approved as "types of measuring instruments".

The flat metal longitudinal section of the measuring rod serving as a guide is machined and is characterized roughness and low flatness. Microvibrations arising from the movement of the rod with the measuring grating along inaccurate guides lead to violations of the parallel movement of the grating substrate base surfaces and, accordingly, to undesirable changes in the angle between the line marks of their grating. A change in the angle between the line marks of the diffraction gratings results in a change in the period of the interference fringes and the phase shift of  $90^\circ$  between them, which reduces the accuracy of determining the linear size of the object, the accuracy decreasing with increasing length measured. Hence, using this device to measure linear dimensions of objects allows of getting measurements with a resolution of no more than  $0.01 \mu\text{m}$ , but for lengths over 200 mm and especially for lengths close to 500 mm and more, the accuracy

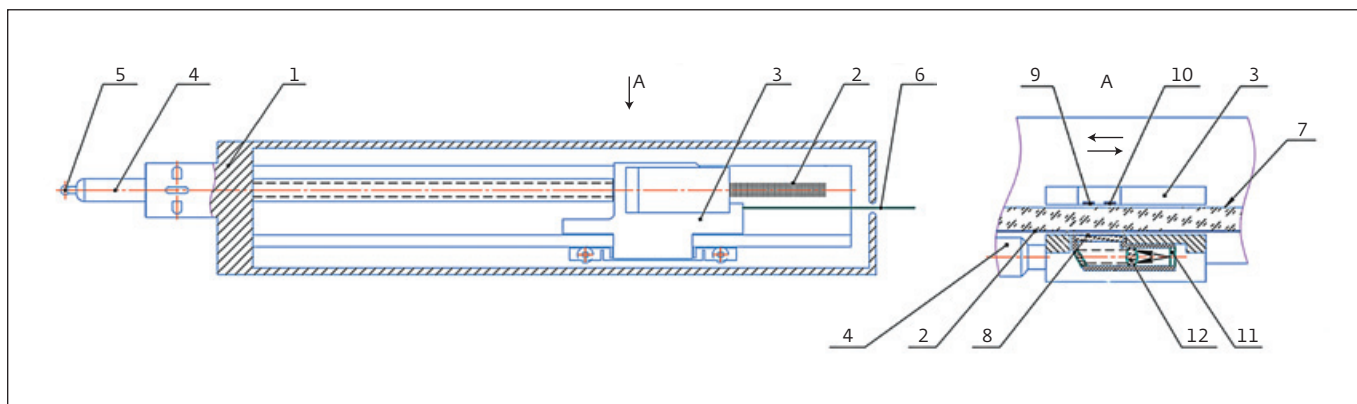


Рис.2. Устройство вертикального нанодлиномера голографического (НДГ): А: плоскость сечения считывающей головки. 1 – корпус, 2 – измерительная дифракционная решетка, 3 – считывающая головка, 4 – измерительный стержень, 5 – наконечник, 6 – привод перемещения, 7 – обратная поверхность стеклянной подложки измерительной решетки, 8 – индикаторная дифракционная решетка, 9 и 10 – фотоприемники, 11 – источник излучения, 12 – коллиматор

Fig.2. Device of a vertical holographic nanolength encoder (NHE): A: sectional plane of the readout head. 1 – housing, 2 – measuring diffraction grating, 3 – readout head, 4 – measuring rod, 5 – probe tip, 6 – movement drive, 7 – back surface of the glass substrate of the measuring grating, 8 – indicator diffraction grating, 9 and 10 – photodetectors, 11 – radiation source, 12 – collimator

базовых поверхностей подложек решеток, и соответственно к нежелательному изменению угла между штрихами их решеток. Изменение угла между штрихами дифракционных решеток приводит к изменению периода интерференционных полос и фазовому сдвигу в  $90^\circ$  между ними, что снижает точность при определении линейного размера объекта, причем точность падает с увеличением измеряемой длины. Вследствие этого использование данного устройства при измерении линейных размеров объектов позволяет получить результаты измерений с разрешением не выше  $0,01$  мкм, однако, при длинах более  $200$  мм, и особенно при длинах, близких к  $500$  мм и более, точность результатов снижается и не позволяет измерять с высокой точностью, и тем более с наноточностью, большие линейные размеры, что ограничивает область применения устройства.

Поэтому для расширения диапазона измерения линейных размеров объекта до  $500$  мм и более с сохранением наноточности измерений во всем измеряемом диапазоне, что расширяет область применения устройства, был разработан и изготовлен вертикальный нанодлиномер голографический (НДГ), представленный на рис.2.

Нанодлиномер голографический содержит корпус 1, жестко связанный с измерительной решеткой 2 со штрихами на стеклянной подложке [3÷7], и считывающую головку 3 (рис.2а и рис.2б), состоящую из индикаторной решетки 8 со штрихами на своей подложке. Считывающая головка 3 жестко соединена с торцом измерительного стержня 4 с наконечником 5 и приводом перемещения 6, который

of the results decreases and does not allow of measuring large linear dimensions with high accuracy and even less with nano accuracy, which limits the scope of the device.

Therefore, in order to extend the measurement range of the linear dimensions of an object to  $500$  mm length or more while maintaining nano accuracy throughout the entire measuring range, which extends the scope of the device, the vertical nanolength holographic encoder (NHE), shown in Fig.2, has been designed and manufactured.

The holographic nanolength encoder contains housing 1 rigidly connected to measuring diffraction grating 2 with lines on a glass substrate [3÷7], and readout head 3 (Fig.2a and Fig.2b) consisting of indicator diffraction grating 8 with line marks on its substrate. Readout head 3 is rigidly connected to the end of measuring rod 4 with tip 5 and movement drive 6, which is made in the form of a flexible thread. In addition, the NHE includes a self-contained glass guide with a base and back surface with high precision flatness of the base surface, which is rigidly connected to the end of the measuring grating substrate. The glass substrate of measuring grating 2 also contains base and reverse 7 surfaces (Fig.2b), which are also characterized by high flatness. Readout head 3 contains indicator grating 8. In order to maintain a constant gap between the measuring and indicator gratings, the NHE is provided with two bearing assemblies designed to move the rod with the measuring grating in parallel to the indicator grating.



выполнен в виде гибкой нити. Кроме этого, НДГ дополнительно содержит автономную стеклянную направляющую с базовой и обратной поверхностями с высокоточной плоскостностью базовой поверхности, которая жестко присоединена к торцу подложки измерительной решетки. Стеклянная подложка измерительной решетки 2 также содержит базовую и обратную 7 поверхности (рис.2b), обладающие также высокой плоскостностью. Считывающая головка 3 содержит индикаторную решетку 8. С целью сохранения постоянного зазора между измерительной и индикаторной решетками в НДГ установлены два узла опор с подшипниками, которые предназначены для параллельного перемещения стержня с измерительной решеткой относительно индикаторной решетки.

Подшипники одного узла опор обеспечивают перемещение считывающей головки 3 вдоль измерительной решетки 2, а подшипники другого узла опор обеспечивают перемещение считывающей головки 3 вдоль автономной стеклянной направляющей и все подшипники присоединены к считывающей головке. Частота штрихов двух голографических решеток (измерительной и индикаторной) в данном примере выполнения устройства равна 1000 лин/мм.

Матрица фотоприемников 9 и 10 электрически соединена с электронным блоком управления [8].

Устройство работает следующим образом: в процессе измерения нить 6, связанную со считывающей головкой 3 и с измерительным стержнем 4, перемещают в направлении установленной под наконечником измеряемой эталонной меры. При перемещении считывающей головки 3 с измерительным стержнем 4 и наконечником 5 индикаторная решетка 8 смещается относительно измерительной решетки 2. Пучок излучения, генерируемый источником излучения 11 и жестко связанный со считывающей головкой 3, коллимируется коллиматором 12 и проходит через дифракционные решетки 8 и 2. В поле интерференционных полос, образующихся за решетками 8 и 2, распределение интенсивности интерференционных полос преобразуется матрицей фотоприемников 9 и 10 в электрические сигналы, сдвинутые по фазе на 90°. Эти сигналы затем передаются по электронной связи от матрицы фотоприемников в электронный блок управления, где с помощью компаратора формируются счетные импульсы, по которым определяется линейный размер объекта. Вместе с тем, при перемещении подшипников по стеклянным подложкам измерительной решетки 2 и жестко с ней связанной стеклянной автономной направляющей, обладающей высокой плоскостностью базовых поверхностей, исключаются микровибрации и смещения, которые вызывает движение по шероховатым и неровным поверхностям.

The bearings of one of the support assembly provide for movement of readout head 3 along measuring grating 2, and the bearings of the other support assembly allow of movement of readout head 3 along the self-contained glass guide, and all bearings are connected to the readout head. The stroke density of two holographic gratings (measuring and display) in this example embodiment is 1,000 lines/mm.

Photodetectors matrixes 9 and 10 are electrically connected to the electronic control unit [8].

The device operates as follows: during the measurement process, thread 6 connected to reading head 3 and measuring rod 4 is moved in the direction of the reference gauge placed under the tip. As reading head 3 with measuring rod 4 and tip 5 moves, indicator grid 8 is shifted relative to measuring grating 2. The radiation beam generated by radiation source 11 and rigidly connected to readout head 3 is collimated by collimator 12 and passes through diffraction gratings 8 and 2. In the field of interference fringes generated behind gratings 8 and 2, the intensity distribution of the interference fringes is converted by photodetector matrixes 9 and 10 into electrical signals phase-shifted by 90 degrees. These signals are then electronically transmitted from the matrix of photodetectors to the electronic control unit where counting pulses are generated using a comparator to determine the linear size of the object. At the same time, when the bearings move on the glass substrates of measuring grating 2 and the glass autonomous guide rigidly connected to it, which has high flatness of the base surfaces, the microvibrations and displacements that are caused by movement on rough and uneven surfaces are eliminated.

During measurement, movement of readout head 3 with indicator grating 8, which is smaller than the substrate with measuring grating 2, subjects the entire system to fewer stresses and constraints, such as the condition of keeping the movement line in parallel to the measurement axis and reducing vibrations, while measuring grating 2 can be any size and is rigidly fixed in housing 1 (Fig.2a).

The structural design of the device, in particular mutual positioning of diffraction gratings 2 and 8 with their supports and measuring rod 4 in housing 1, made it possible to reduce the distance between the diffraction gratings, which reduces the Abbe errors and, in turn, makes it possible to improve the measurement accuracy. Also, the use of guides to move reading head 3 over the substrates of the measuring grating and a self-contained guide ensures that nanolength encoders with measuring gratings of large dimensions, up to a metre or more, can be manufactured with minimized Abbe



Во время измерений перемещение считывающей головки 3 с индикаторной решеткой 8, обладающей меньшими размерами, нежели подложка с измерительной решеткой 2, подвергает всю систему меньшим нагрузкам и ограничениям, таким как условие сохранения линии перемещения параллельно оси измерения и уменьшение вибраций, при этом измерительная решетка 2 может быть любых размеров, и она жестко зафиксирована в корпусе 1 (рис.2а).

Конструктивное выполнение устройства, в частности взаимное расположение в корпусе 1 дифракционных решеток 2 и 8 с узлами опор и измерительного стержня 4, позволило уменьшить расстояние между дифракционными решетками, что снижает ошибки Аббе, и в свою очередь позволяет повысить точность измерений. Также использование направляющих для перемещения считывающей головки 3 по подложкам измерительной решетки и автономной направляющей обеспечивает возможность производить нанодлиномеры с измерительными решетками больших размеров, вплоть до метра и более, с минимизированием ошибок Аббе. В НДГ используется стекло, изготовленное методом "флоат-процесса", обладающее высокими характеристиками плоскостности, которые сохраняются при больших длинах и при этом не требуется механическая обработка, как в случае с голографическими длиномерами (рис.1).

Таким образом, для того чтобы достигнуть при измерениях высокой точности, особенно в нанобласти, и сохранить эту точность на весь интервал перемещения считывающей головки, необходимо, чтобы штрихи двух решеток 2 и 8 сохраняли свой наклон друг относительно друга, что позволит сохранить постоянство разности фаз электрических сигналов.

В процессе измерения с помощью НДГ обеспечивается строгая равномерность и прямолинейность перемещения, соблюдается заданный угол между штрихами дифракционных решеток 2 и 8, что обеспечивает сохранение периода и наклона интерференционных полос, образуемых за решетками, и приводит к повышению точности измерений до наноточности, что экспериментально подтверждено при проведении ряда измерений эталонных мер на 100, 200 и 500 мм (табл.2).

Высокая точность нанодлиномера голографического связана не только с точностью механической части самого нанодлиномера, но и с точностью изготовления самих линейных голографических дифракционных решеток (ЛГДР).

## ВЫВОДЫ

Авторам на специальных устройствах для синтеза ЛГДР удалось записать и тиражировать

Таблица 2. Характеристики голографических длиномеров НДГ-100, НДГ-200, НДГ-500

Table 2. Specifications of holographic length encoders NHE-100, NHE-200, NHE-500

Тип НДГ NHE type	НДГ-100 (Рис.3) NHE-100 (Fig.3)	НДГ -200 NHE-200	НДГ -500 NHE-500
Измеряемая длина, мм Measured length, mm	0 – 100	0 - 200	0 - 500
Шаг шкалы, мкм Scale pitch, $\mu\text{m}$	1	1	1
Погрешность, мкм Error, $\mu\text{m}$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,4$
Дискретность, мкм (Разрешение) Increment, $\mu\text{m}$ (Resolution)	0,001	0,001	0,001

errors. The NHE uses 'float-processed' glass, which has high flatness characteristics that are retained at long lengths without the need for machining, as with the holographic length encoders (Fig.1).

Thus, in order to achieve high measurement accuracy, particularly in the nano range, and to maintain this accuracy over the entire range of motion of the readout head, the lines of two gratings 2 and 8 should maintain their inclination relative to each other, thus maintaining a constant difference in the electrical signal phases.

During NHE measurements, strict uniformity and straightness of movement is ensured, the specified angle between the lines of diffraction gratings 2 and 8 is maintained thus preserving the period and slope of the interference fringes formed behind the gratings and resulting in the improved accuracy up to nanoscale, as experimentally verified by a series of measurements of reference gauges at 100 mm, 200 mm and 500 mm (Table 2).

The high accuracy of the holographic nanolength encoder depends not only on the mechanical accuracy of the nanolength encoder itself but also on precision of the linear holographic diffraction gratings (LHDGs) themselves.

## CONCLUSIONS

The authors have managed to record and replicate high-frequency holographic diffraction gratings of up to and over one metre in length and 1,000 lines/mm, unparallel in length and accuracy, on special devices for LHDG synthesis [3-7].

высокочастотные голографические дифракционные решетки с длиной до и более одного метра и с частотой 1000 лин/мм, не имеющих аналогов в мире, по длине и точности [3-7].

Эти решетки были исследованы и сертифицированы во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева. Авторами была изготовлена рекордная отечественная высокочастотная ЛДГР с длиной 1200 мм и с частотой 1000 лин/мм (рис.4). На базе этой ЛДГР можно создать НДГ-1200 с диапазоном измерения линейных размеров объекта до 1200 мм и с достижением наноточности этих измерений во всем измеряемом диапазоне, что расширяет область применения данного устройства.

На рис.5.1, рис.5.2, рис.5.3 представлены НДГ с возможностью измерения объектов с размерами  $L = 100$  мм;  $L = 200$  мм и  $L = 500$  мм, а в табл.2 и табл.3 приведены их характеристики. Представленные нанодлиномеры голографические могут быть использованы для нанометрических исследований и измерений, для поверки высокоточных концевых мер длины, в системах для сортировки точных деталей по размеру, в микро- и нанолитографии и в других случаях, где необходима наноточность при измерениях. Их применение актуально также в машиностроении, оптико-механической, аэрокосмической и других отраслях при измерениях линейных размеров объектов в нанобласти.

### 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.

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

### ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Оптикатор, предназначенный для измерения линейных размеров. Л.С. Баранов, С.Б. Тарасов, Я.М. Цейтлин. Патент SU № 274372, МПК G01B 9/04.
2. Измерительная микрометрическая головка "ТУБОР", Б.Г. Турухано, Н. Турухано, В.Н. Якутович. Патент RU 2032142 С1, 1992.
3. Устройство для фазированного соединения голографических дифракционных решеток. В.П. Горелик, С.Н. Николаев, Б.Г. Турухано, Н. Турухано. Патент РФ № 673018, пр. 06.06.1977.
4. Устройство для синтеза длинных голографических дифракционных решеток. Б.Г. Туру-

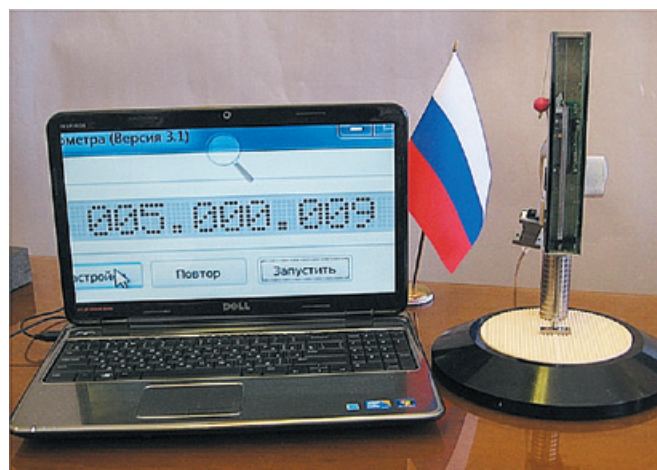


Рис.3. Нанодлиномер голографический НДГ-100,  $L = 100$  мм  
Fig.3. Nanolength holographic encoder NHE-100,  $L = 100$  mm



Рис.4. Голографическая дифракционная решетка с длиной  $L = 1200$  мм и общим количеством штрихов – 1 200 000  
Fig.4. Holographic diffraction grating with length  $L = 1200$  mm and total number of lines of 1 200 000

These gratings were studied and certified at the D.I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology (VNIIM). The authors have produced a domestic record high-frequency LHDC with length of 1,200 mm and density of 1,000 lines/mm (Fig.4). On the basis of such LHDC it is possible to develop NHE-1200 with a measurement range of the linear object dimensions up to 1,200 mm and to achieve nanoscale accuracy of these measurements in the whole measured range, which extends the field of application of this device.

Fig.5.1, Fig.5.2 and Fig.5.3 show the NHEs having a possibility to measure objects with dimensions  $L = 100$  mm;  $L = 200$  mm and  $L = 500$  mm, and Table 2 and Table 3 show their characteristics. The presented holographic nanolength encoders can be used for nanometric research and measurements, for verification of high-precision end-length gauges, in systems



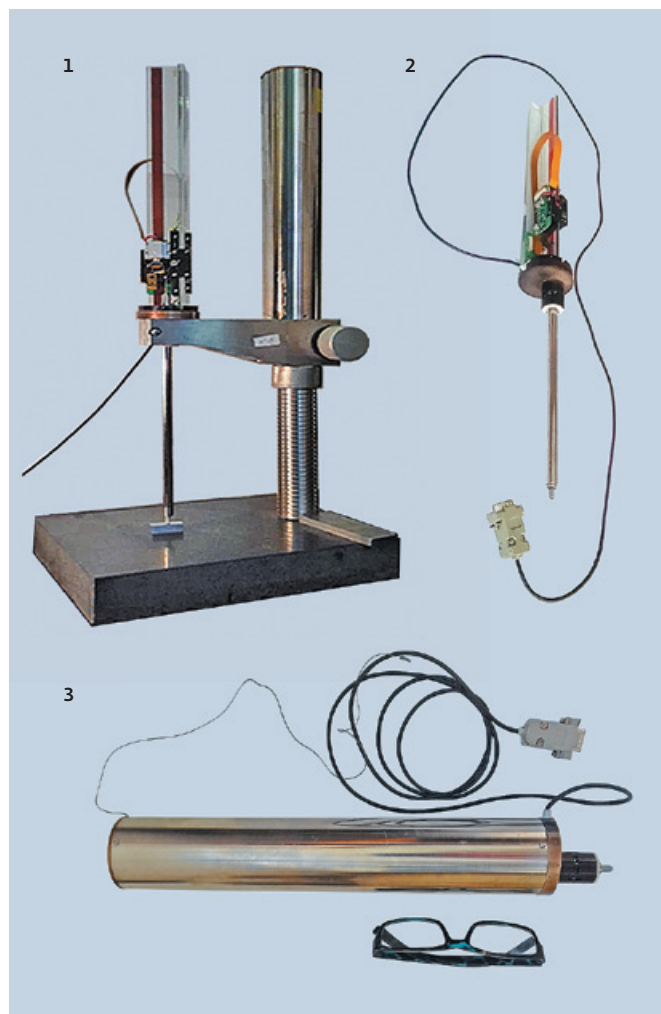


Рис.5. 1 – ультрапрецизионный вертикальный нанодлиномер голографический НДГ-200, L = 200 мм, 2 – НДГ-200 без корпуса, 3 – НДГ-200 в корпусе

Fig.5. 1 – ultrahigh-precision vertical nanolength holographic encoder NHE-200, L = 200 mm, 2 – NHE-200 w/o case, 3 – NHE-200 in case

хано, В.П. Горелик, Н. Турухано, С.В. Гордеев Патент РФ № 1 052 095, пр. 05.07.1982.

5. Apparatus for assessing the linearity of a diffraction grating under certification. B.G. Turukhano, V.P. Gorelik, N. Turukhano, S.N. Kovalenko Patent Germany DD267892, Filed 05.06.1985.
6. Устройство для синтеза длинных голографических дифракционных решеток. Н. Турухано. А.С. СССР № 1 3264032, пр. 10.01.1986 г.
7. Запись голографических дифракционных решеток с помощью импульсного лазера. Б.Г. Турухано, Н. Турухано, И.А. Турухано // НАНОИНДУСТРИЯ. 2021. Т. 14, № 5.
8. Датчик линейных перемещений. Б.Г. Турухано, Н. Турухано. Патент РФ № 2534378, 2014.

Таблица 3. Характеристики ультрапрецизионных голографических нанодлиномеров НДГ-100 и НДГ-200

Table 3. Specifications of ultrahigh-precision holographic nanolength encoders NHE-100 and NHE-200

Характеристики НДГ-100 Characteristics of NHE-100	Величина Value
Точность, мкм Accuracy, $\mu\text{m}$	$\pm 0,06$
Дискретность (Разрешение), мкм (нм) Increment, (Resolution), $\mu\text{m}$ (nm)	0,001 (1)
Период штрихов, мкм Period of line marks, $\mu\text{m}$	1
Частота решетки, лин/мм Grating density, lines/mm	1000
Измеряемая длина, мм Measured length, mm	От 0 до 100
Характеристики НДГ-200 Characteristics of NHE-200	Величина Value
Точность, мкм Accuracy, $\mu\text{m}$	$\pm 0,1$
Дискретность (Разрешение), мкм (нм) Increment, (Resolution), $\mu\text{m}$ (nm)	0,001 (1)
Период штрихов, мкм Period of line marks, $\mu\text{m}$	1
Частота решетки, лин/мм Grating density, lines/mm	1000
Измеряемая длина, мм Measured length, mm	0–200

for sorting precise parts by size, in micro- and nanolithography and in other cases where nanoprecision of measurements is necessary. Their use is also relevant in mechanical engineering, opto-mechanical, aerospace and other industries for measuring linear dimensions of objects in the nanoscale.

#### 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 SEL eLibrary 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.