



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

G01B 11/303 (2025.01); G01B 11/306 (2025.01); G01N 2021/9511 (2025.01); G01N 2021/9583 (2025.01)

(21)(22) Заявка: 2024137283, 11.12.2024

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
11.12.2024

Дата регистрации:  
11.08.2025

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 11.12.2024

(45) Опубликовано: 11.08.2025 Бюл. № 23

Адрес для переписки:

105005, Москва, вн.тер.г. Муниципальный  
округ Басманный, ул. 2-я Бауманская, 5, стр.  
1, ФГБОУ ВО МГТУ, Амелина Ксения  
Евгеньевна

(72) Автор(ы):

Денисов Дмитрий Геннадьевич (RU),  
Барышников Николай Васильевич (RU),  
Карасик Валерий Ефимович (RU),  
Сазонкин Станислав Григорьевич (RU),  
Мапошин Денис Андреевич (RU),  
Животовский Илья Вадимович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Московский государственный  
технический университет имени Н.Э.  
Баумана (национальный исследовательский  
университет)" (МГТУ им. Н.Э. Баумана) (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: RU 2823018 C1, 17.07.2024. RU  
2180429 C2, 10.03.2002. RU 2634372 C1,  
26.10.2017. RU 157299 U1, 27.11.2015. EP 168772  
A3, 04.01.1989.

(54) Система для определения параметров ангстремного уровня шероховатости и поверхностных неоднородностей контролируемой оптической поверхности

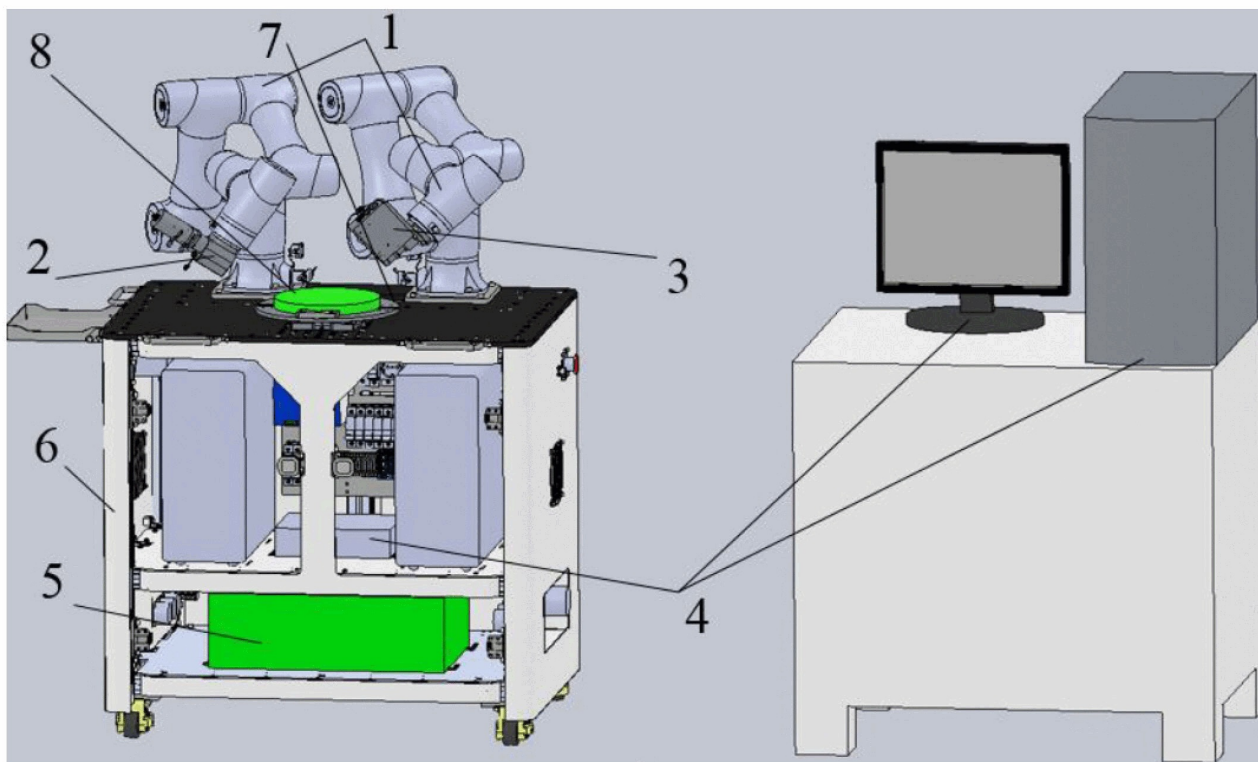
(57) Реферат:

Изобретение относится к области оптического приборостроения, точнее к оптико-электронным системам определения качества оптических поверхностей, характеризующееся соотношением их высотных параметров шероховатости и поверхностных неоднородностей с длиной волны оптического контроля. Система содержит оптически связанные блок источников лазерного излучения, оптическую систему формирования узконаправленного пучка лазерного излучения подсвета на контролируемую поверхность и фотодетектор на основе фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) для ответного излучения, рассеянного на контролируемой поверхности, выход фотодетектора связан со входом блока управления и обработки зарегистрированной индикатрисы рассеяния излучения подсвета. При

этом оптическая система установлена в одноосной направляющей с возможностью изменения угла падения узконаправленного пучка излучения подсвета на контрольную точку контролируемой поверхности, а фотодетектор установлен в двухосной направляющей с возможностью регистрации рассеянного излучения в заданном диапазоне углов рассеяния. Также система содержит два трехосных робота-манипулятора с возможностью пространственных перемещений точности позиционирования их торцов концов порядка 0,1 мм, при этом на рабочем торце конца первого из них расположена вышеуказанная оптическая система формирования узконаправленного пучка излучения, на рабочем торце конца второго робота-манипулятора расположен

вышеуказанный фотодетектор ответного излучения с возможностью регистрации индикатрисы рассеяния в углах дифракции, приближенных к 90°. При этом устройство выполнено с возможностью работы в диапазонах углов дифракции от 5 градусов до 85 градусов в области высоких пространственных частот свыше  $100 \text{ мм}^{-1}$  и предварительной высокоточной калибровки посредством использования эталонной оптической поверхности, имеющей минимальное остаточное светорассеяние в условиях минимального внешнего освещения, для высокоточного измерения шумовой

инструментальной погрешности измерений системы. Технический результат заключается в повышении точности и прямого определения методом дифференциального рассеяния СКО ангстремного уровня шероховатости оптической поверхности с учётом возможности предварительной калибровки, рационального конструктивного исполнения устройства для расширенного диапазона габаритных размеров контролируемых оптических деталей, в т.ч. и крупногабаритных, при одновременном сокращении габаритов устройства контроля. 3 з.п. ф-лы, 9 ил.



Фиг. 1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC

*G01B 11/303* (2025.01); *G01B 11/306* (2025.01); *G01N 2021/9511* (2025.01); *G01N 2021/9583* (2025.01)(21)(22) Application: **2024137283**, **11.12.2024**(24) Effective date for property rights:  
**11.12.2024**Registration date:  
**11.08.2025**

Priority:

(22) Date of filing: **11.12.2024**(45) Date of publication: **11.08.2025** Bull. № 23

Mail address:

**105005, Moskva, vn.ter.g. Munitsipalnyj okrug  
Basmannyj, ul. 2-ya Baumanskaya, 5, str. 1,  
FGBOU VO MGTU, Amelina Kseniya Evgenevna**

(72) Inventor(s):

**Denisov Dmitrii Gennadevich (RU),  
Baryshnikov Nikolai Vasilevich (RU),  
Karasik Valerii Efimovich (RU),  
Sazonkin Stanislav Grigorevich (RU),  
Mashoshin Denis Andreevich (RU),  
Zhivotovskii Ilia Vadimovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federalnoe gosudarstvennoe biudzhethnoe  
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego  
obrazovaniia "Moskovskii gosudarstvennyi  
tekhnicheskii universitet imeni N.E. Baumana  
(natsionalnyi issledovatel'skii universitet)"  
(MGTU im. N.E. Baumana) (RU)**

(54) **SYSTEM FOR DETERMINING PARAMETERS OF ANGSTROM LEVEL OF ROUGHNESS AND SURFACE INHOMOGENEITIES OF CONTROLLED OPTICAL SURFACE**

(57) Abstract:

FIELD: optics.

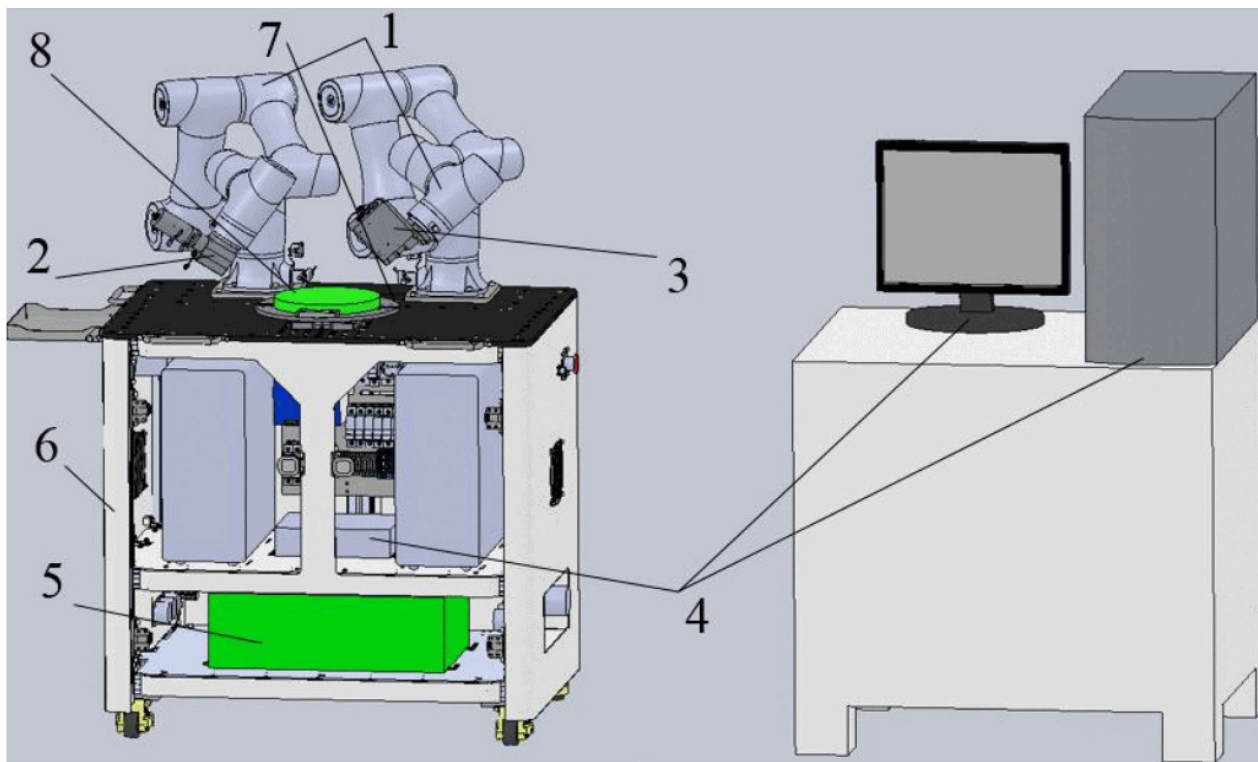
SUBSTANCE: invention relates to optical instrument-making, more specifically to optoelectronic systems for determining the quality of optical surfaces, characterized by the ratio of their height parameters of roughness and surface inhomogeneities with the wavelength of optical inspection. System comprises optically connected unit of laser radiation sources, optical system for forming a focused laser radiation beam for illumination on the controlled surface and a photodetector based on a photomultiplier for the response radiation scattered on the inspected surface, the output of the photodetector is connected to the input of the control and processing unit of the recorded scattering indicatrix of illumination radiation. Optical system is mounted in a single-axis guide with possibility of changing the angle of incidence of a narrow-directed illumination radiation beam on the reference point of the inspected surface, and the photodetector is mounted in a two-axis guide with possibility of detecting scattered radiation in the given range of scattering angles. System also contains two three-axis robot-

manipulators with possibility of spatial movements of their ends positioning accuracy of about 0.1 mm, wherein on the working end face of the end of the first robot arm there is said optical system for forming a focused radiation beam, on the working end face of the end of the second robot-manipulator there is said photodetector of response radiation with possibility of recording the scattering indicatrix at diffraction angles close to 90°. Device is configured to operate in the range of diffraction angles from 5 degrees to 85 degrees in the region of high spatial frequencies above 100 mm<sup>-1</sup> and preliminary high-precision calibration by using a reference optical surface having a minimum residual light scattering under conditions of minimum external illumination, for high-precision measurement of the noise instrumental measurement error of the system.

EFFECT: high accuracy and direct determination by differential scattering method of MSD of the angstrom level of roughness of the optical surface, taking into account the possibility of pre-calibration, rational design of the device for a wide range of overall

dimensions of controlled optical components, including  
and large-sized, while reducing the dimensions of the

control device.  
4 cl, 9 dwg



Фиг. 1

RU 2844921 C1

RU 2844921 C1

## Область техники

Предлагаемое изобретение относится к области оптического приборостроения, точнее к оптико-электронным системам определения качества оптических поверхностей, характеризующееся соотношением их высотных параметров шероховатости и

поверхностных неоднородностей с длиной волны оптического контроля.

Количественной оценкой видов поверхностных неоднородностей и параметров шероховатости оптических поверхностей является среднеквадратическое отклонение, находящееся в диапазоне от 1 нм до десятых долей нм (до ангстремного уровня).

Пространственно-частотный диапазон поверхностных неоднородностей для таких уровней шероховатостей лежит в области высоких пространственных частот - от 100 мм<sup>-1</sup> и более. Возможность практического определения поверхностных неоднородностей и параметров шероховатости оптических поверхностей в заданной области пространственных частот может быть реализуема при учёте инструментальной погрешности самого устройства, влияющей на динамический диапазон работы устройства и как следствие на погрешность определения среднеквадратического отклонения поверхностных неоднородностей и параметров шероховатости оптических поверхностей.

## Уровень техники

Задача определения уровня шероховатостей оптических поверхностей ангстремного уровня является важной задачей обеспечения технологического процесса изготовления оптических деталей и их дальнейшей эксплуатации, а также проведения научных исследований в области оплотехники.

Известно устройство-аналог - аппаратура ALBATROSS-TT ((Sven Schröder\*, Alexander von Finck and Angela Duparré Standardization of light scattering measurements DOI 10.1515/aot-2015-0041 Received September 4, 2015; accepted October 3, 2015; previously published online November 5, 2015 Adv. Opt. Techn. 2015; 4(5-6): 361-375). Устройство содержит оптически связанные блок источников излучения (внутри корпуса), оптическую систему, формирующую узконаправленный пучок излучения, контролируемый образец и фотодетектор, выход которого связан со входом блока управления и обработки, причем оптическая формирующая система установлена в одноосной направляющей с возможностью изменения угла падения на контролируемый образец, а фотодетектор установлен в двуосной направляющей с возможностью регистрации рассеянного на контролируемой детали излучения в широких углах рассеяния. Данное устройство реализует так называемый метод дифференциального рассеяния для измерения шероховатостей оптических поверхностей ангстремного уровня. Для реализации метода дифференциального рассеяния с помощью устройства контролирующую оптическую поверхность подсвечивают узким пучком излучения на длине волны  $\lambda$  под углом падения  $\theta_n$ , регистрируют индикатрису рассеянного излучения  $ARS(\theta_d, \theta_n)$  (ср<sup>-1</sup>) (Angle Resolved Scattering от англ. - рассеяние с разрешением по углу (или угловое разрешение рассеянного излучения)). Особенностью метода является то, что величины углов рассеяния  $\theta_d$ , в которых регистрируется индикатриса, должны достигать максимальных значений - вплоть до 90 град. Именно корректное измерение значения индикатрисы рассеянного излучения на этих максимальных углах и обеспечивает необходимые исходные данные для расчета среднеквадратического отклонения (СКО) шероховатостей оптической поверхности ангстремного уровня в области высоких пространственных частот, согласно

$$v_1 - v_2 = \left( \frac{|\sin \Theta_n - \sin \Theta_d|}{\lambda} \right) \quad (1)$$

В свою очередь возможность детектирования индикатрисы рассеянного излучения на максимальных углах может быть реализована при учёте инструментальной погрешности устройства контроля, в первую очередь определяемой наличием переотражённого сигнала от элементов его конструкции или «фоновой подставки» в регистрируемой индикатрисе, что в свою очередь сужает динамический диапазон, а значит и область регистрации высоких пространственных частот поверхностных неоднородностей ангстремного уровня. Далее, в блоке обработки вычисляют функцию спектральной плотности рассеянного излучения PSD(v) (Power Spectral Density (англ.) - спектральная плотность мощности или спектральная плотность корреляционной функции (СПКФ)) по выражению:

$$PSD(v) = ARS(\theta_d, \theta_n) / (c * F), \quad (2)$$

где:  $\theta_n$  - угол падения излучения на контролируемую поверхность, град.;  $\theta_d$  - угол рассеяния, град.; c - коэффициент пропорциональности, определяемый конструктивными особенностями схемы, б/р; F - оптический фактор, зависящий от длины волны, углов падающего и рассеянного излучений, диэлектрической проницаемости среды и состояния поляризации падающего и рассеянного излучений, б/р, вычисляют эффективное значение среднеквадратического отклонения шероховатостей оптической поверхности  $\sigma_{eff}^2$  в заданных пределах пространственной частоты поверхностных неоднородностей от  $v_1$  до  $v_2$  по выражению:

$$\sigma_{eff}^2 = 2\pi \int_{v_1}^{v_2} PSD(v) dv \quad (3)$$

Этот вариант конструктивного исполнения ближайшего аналога обеспечивает реализацию метода дифференциального рассеяния при контроле оптических поверхностей с шероховатостью ангстремного уровня. Сама конструкция реализуется в компактном виде, удобном для работы.

Однако очевидны и недостатки устройства аналога. Во-первых, диапазон возможных размеров контролируемого тест-объекта достаточно ограничен. Это либо незначительные размеры (до 100 мм), либо установка проектируется для конкретного малогабаритного изделия, ориентированного строго в вертикальном положении. Во-вторых, ориентации контролируемой детали и конструктивное решение, связанное с расположением каналов подсвета и фоторегистрации, не даёт возможности проводить оперативный контроль на этапах изготовления оптической поверхности детали - формообразования методами глубокой полировки. Последний аргумент в особенности важен с точки зрения сохранения базирования системы координат создаваемого высокоточного изделия относительно инструмента обработки и прибора контроля.

Известно устройство, выбранное в качестве ближайшего аналога описанное в [Angle-resolved scattering: an effective method for characterizing thin-film coatings Sven Schröder, \* Tobias Herffurth, 1,1 Holger Blaschke, 2 and Angela Duparré 1 1 Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering, Albert-Einstein-Straße 7, 07745 Jena, Germany 2 Laser Zentrum Hannover e.V., Hollerithallee 8, 30419 Hannover, Germany \*Corresponding author: sven.schroeder@iof.fraunhofer.de Received 29 July 2010; revised 20 October 2010; accepted 22 October



2010; posted 26 October 2010 (Doc. ID 132477); published 2 December 2010]. Устройство содержит блок источников излучения, оптически связанный с оптической системой, формирующей узкий пучок падающего на контролируруемую деталь излучения, контролируемую деталь (плоскую или сферическую, диаметром до 670 мм),  
 5 расположенную на системе позиционирования, которую можно перемещать и поворачивать для регулировки положения пятна подсвета на образце, а также угла падения, фотодетектор, на основе фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), установленный в кардановом подвесе с возможностью сканирования всей сферы вокруг контролируемой детали, выход которого электрически сопряжен с блоком управления и обработки  
 10 зарегистрированной индикатрисы рассеяния излучения подсвета.

К недостаткам этого устройства относятся следующие.

Во-первых, контролируемая в процессе производства деталь предварительно должна быть снята с технологической оснастки и установлена в устройство для проведения измерений, а после проведения измерений - опять установлена в технологическую  
 15 оснастку для дальнейшей обработки. В целом ряде случаев это осуществить невозможно. Прежде всего это касается крупногабаритных деталей. Развитие современной высокоточной лазерной техники, астрономических систем наблюдения привело к появлению именно крупногабаритных оптических деталей, размеры которых значительны - до метра и более. В этой ситуации контроль осуществляется косвенным  
 20 путем - контролируется так называемый «свидетель» - небольшая по габаритам деталь, которая обрабатывается одновременно с основной (контролируемой) оптической деталью. Однако современные технологии требуют прямого контроля обрабатываемой поверхности.

Во-вторых, для обеспечения контроля среднеквадратического отклонения  
 25 шероховатостей контролируемой поверхности в области высоких пространственных частот, как отмечалось выше, необходимо обеспечить регистрацию индикатрисы рассеяния в максимальных углах  $\theta_d$ , приближенных к  $90^\circ$ . Но для обеспечения этого требования кардановый подвес с установленным фотодетектором рассматриваемого  
 30 устройства ближайшего аналога должен иметь габаритные размеры большие, чем контролируемая деталь, что создает дополнительные проблемы при проведении контроля крупногабаритных деталей. Максимальные линейный размер карданового подвеса устройства контроля должен превышать размер светового диаметра контролируемой крупногабаритной оптической детали.

В-третьих, при проведении предварительных калибровочных измерений необходимо  
 35 провести регистрацию так называемой инструментальной погрешности прибора в тех условиях его эксплуатации и на том установленном в кардановом подвесе канале фоторегистрации, которые будут использоваться для текущих измерений. Однако столь габаритная конструкция карданового подвеса на основе конструкционного материала при формировании лазерного излучения каналом подсвета будет формировать лазерное  
 40 излучение, которое в свою очередь будет многократно и случайным образом в каждом измерении переотражаться от элементов крепления карданового подвеса. Эта особенность в значительной степени будет сказываться на измерение реперного или «нулевого» уровня отсчёта рассеянного излучения, влияя на динамический диапазон  
 45 работа прибора, а значит и на регистрируемую индикатрису рассеянного лазерного излучения -  $ARS(\theta_d, \theta_n)$  и на спектральную плотность корреляционной функции -  $PSD(\nu)$ , некорректно распределенную в области исследуемых высоких пространственных частот (согласно формуле (2)). Тогда последний аргумент будет приводить к некорректному определению или определению со значительной погрешностью

эффективного значения среднеквадратического отклонения (СКО) шероховатостей оптической поверхности  $\sigma_{\text{eff}}^2$  в заданных пределах пространственной частоты поверхностных неоднородностей от  $\nu_1$  до  $\nu_2$  (согласно формуле (3)).

Таким образом, существующие в настоящее время устройства определения СКО ангстремного уровня шероховатости оптической поверхности методом дифференциального рассеяния не обеспечивают прямой контроль в процессе производства крупногабаритных оптических деталей и имеют значительные собственные габариты.

#### Раскрытие изобретения

Задачей и техническим результатом изобретения является обеспечение возможности повышения точности и прямого определения методом дифференциального рассеяния СКО ангстремного уровня шероховатости оптической поверхности с учётом возможности предварительной калибровки, рационального конструктивного исполнения устройства для расширенного диапазона габаритных размеров контролируемых оптических деталей, в т.ч. и крупногабаритных, при одновременном сокращении габаритов устройства контроля.

Для решения задачи и достижения технического результата в ближайшем аналоге, содержащем оптически связанные блок источников излучения, оптическую систему, формирующую узконаправленный пучок излучения, и фотодетектор, выход которого связан со входом блока управления и обработки, оптическая система установлена в одноосной направляющей с возможностью изменения угла падения на контролируемую оптическую деталь, а фотодетектор установлен в двуосной направляющей с возможностью регистрации рассеянного на контролируемой оптической детали излучения в широком диапазоне углов рассеяния. Оптическая система формирует сходящийся на расстоянии  $L$  узконаправленный пучок излучения подсвета.

Конструктивное исполнение устройства системы определения параметров шероховатости и поверхностных неоднородностей оптической поверхности ангстремного уровня выполнено в виде разнесённых приёмного и передающего каналов на двух трехосных роботах-манипуляторах. Такая система обеспечивает простоту проведения калибровки, позволяет учитывать инструментальную погрешность устройства при одновременном сокращении габаритов устройства контроля.

Устройство системы определения параметров ангстремного уровня шероховатости и поверхностных неоднородностей контролируемой оптической поверхности содержит оптически связанные блок источников лазерного излучения, оптическую систему формирования узконаправленного пучка лазерного излучения подсвета на контролируемую поверхность и фотодетектор на основе фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) для ответного излучения, рассеянного на контролируемой поверхности, выход фотодетектора связан со входом блока управления и обработки зарегистрированной индикатрисы рассеяния излучения подсвета. Оптическая система установлена в одноосной направляющей с возможностью изменения угла падения узконаправленного пучка излучения подсвета на контрольную точку контролируемой поверхности, а фотодетектор установлен в двухосной направляющей с возможностью регистрации рассеянного излучения в заданном диапазоне углов рассеяния.

При этом устройство имеет возможность измерений параметров ангстремного уровня за счет наличия двух трехосных роботов-манипуляторов с возможностью пространственных перемещений точности позиционирования их торцев концов порядка 0,1 мм (на рабочем торце конца первого из них расположена вышеуказанная оптическая



система формирования узконаправленного пучка излучения, на рабочем торце конца второго робота-манипулятора расположен вышеуказанный фотодетектор ответного излучения с возможностью регистрации индикатрисы рассеяния в углах дифракции, приближенных к  $90^\circ$ ), и за счет диапазона углов дифракции от 5 градусов до 85 градусов

в области высоких пространственных частот свыше  $100 \text{ мм}^{-1}$  и предварительной высокоточной калибровки посредством использования эталонной оптической поверхности, имеющей минимальное остаточное светорассеяние в условиях минимального внешнего освещения, для высокоточного измерения шумовой инструментальной погрешности измерений системы и ее вычитания из результатов высокоточных измерений, проводимых далее с контролируемыми поверхностями.

Устройство может контролировать деталь небольших размеров до 200-300 мм, установленную непосредственно на рабочий стол устройства без обязательного съема детали с технологической оснастки.

Устройство может контролировать горизонтально расположенную крупногабаритную деталь до 1000 мм и более, установленную без обязательного съема детали с технологической оснастки на отдельный стол с площадью, соответствующей размерам детали.

И устройство может контролировать вертикально расположенную крупногабаритную деталь до 1000 мм и более без обязательного съема детали с технологической оснастки и с дополнительным ножничным подъемником роботов-манипуляторов для возможности их подвода к любым контрольным точкам контролируемой оптической поверхности крупногабаритной детали.

Перечень фигур

Фиг. 1 - техническая реализация заявляемого устройства;

Фиг. 2 - схема демонстрации физического принципа рассеяния падающего узконаправленного пучка от контролируемой оптической детали;

Фиг. 3 - графики результатов математического моделирования индикатрисы рассеянного лазерного излучения на основе разработанного модифицированного метода дифференциального рассеяния с учётом калибровки устройства без контролируемой оптической детали;

Фиг. 4 - график аппроксимации к индикатрисе от углов дифракции траектории движения конца второго робота-манипулятора приёмного канала устройства относительно конца первого робота-манипулятора канала подсвета в виде набора отрезков, являющихся сторонами равнобедренных треугольников для пояснения анализа погрешности позиционирования первого робота-манипулятора канала подсвета с целью оценки погрешности СКО параметра ангстремного уровня шероховатости в области высоких пространственных частот после калибровки устройства;

Фиг. 5 - график изменения характера поведения индикатрисы рассеяния от углов дифракции (рассеяния) с учётом введённой типовой линейной погрешности -  $\Delta = 0,1 \text{ мм}$ ;

Фиг. 6 - график изменения характера поведения функции СПКФ от пространственных частот с учётом введённой типовой линейной погрешности -  $\Delta = 0,1 \text{ мм}$ ;

Фиг. 7 - исполнение заявляемого устройства системы с контролируемой оптической деталью небольших размеров, до 200-300 мм, которая установлена непосредственно на рабочий стол устройства;

Фиг. 8 - исполнение заявляемого устройства системы с горизонтально расположенной крупногабаритной контролируемой деталью до 1000 мм и более - на отдельном столе

соответствующей большой площади;

Фиг. 9 - исполнение заявляемого устройства системы с вертикально расположенной крупногабаритной контролируемой деталью до 1000 мм и более - с дополнительным ножничным подъемником роботов-манипуляторов для возможности их подвода к

любым контрольным точкам крупногабаритной оптической детали.

Осуществление изобретения

Предлагаемое изобретение осуществляют следующим образом.

На фиг. 1 приведен вариант технической реализации заявляемого устройства системы:

1 - два робота-манипулятора, установленные на верхней плите рамы-платформы, со своими блоками питания и управления, установленными внутри рамы-платформы 6; 2 - оптическая система формирования лазерного излучения подсвета; 3 - фотодетектор ответного рассеянного излучения; 4 - блок управления и обработки; 5 - блок источников излучения; 6 - рама-платформа; 7 - установочный столик. 8 - деталь с контролируемой оптической поверхностью. Контролируемая оптическая деталь 8 установлена на рабочем установочном столике 7 рамы-платформы 6.

На фиг. 2 - приведена схема демонстрации физического принципа рассеяния падающего узконаправленного пучка ( $k_0$ ) от контролируемой оптической детали 8.

При этом  $k$  - зеркальная компонента рассеянного лазерного излучения в полусферу вокруг поверхности контролируемой оптической детали 8. На раме-платформе 6 установлены два робота-манипулятора 1 со своими блоками питания и управления. На рабочем торце (конце) первого робота-манипулятора установлена оптическая система формирования излучения 2, на рабочем торце (конце) второго - фотодетектор 3. Выход фотодетектора 3 электрически соединен со входом блока управления и обработки 4.

Использование робота-манипулятора для проведения оптических измерений известно. Так, например, известна высокочувствительная установка для измерения оптических шероховатостей и дефектов оптических поверхностей Horos (<https://www.iof.fraunhofer.de/en/competences/coating-and-surface-functionalization/surface-and-thin-film-characterization/scattered-light-measurement-analysis/horos-compact-optical-roughness-sensor.html>). В этом устройстве используется одиночный робот-манипулятор, с помощью которого единый конструктивный приемо-передающий блок позволяет подсветить контролируемую поверхность, зарегистрировать индикатрису рассеянного излучения и измерить коэффициент рассеяния контролируемой поверхности. Однако индикатриса рассеянного излучения регистрируется в узком диапазоне углов - не более 7 град, что недостаточно для контроля шероховатостей ангстремного уровня оптических поверхностей. Как сказано выше, для этих измерений необходимые углы рассеяния  $\theta_d$ , в которых регистрируется индикатриса, должны достигать максимальных значений - вплоть до 90 град. Поэтому данное устройство не предназначено для контроля шероховатостей ангстремного уровня оптических поверхностей. А для решения поставленной в заявке задачи предлагаемая совокупность двух роботов-манипуляторов используется впервые.

Как можно видеть на фиг. 2, оптическая формирующая система 2 формирует узконаправленный пучок излучения, сходящийся на дистанции  $L = l_1 + l_2$  от ее выходного зрачка до фотодетектора 3. Узкий пучок излучения, сформированный оптической формирующей системой 2, направляется на контролируемую деталь, расположенную на расстоянии  $l_1$  от ее выходного зрачка. Фотодетектор 3 установлен на конце последнего звена второго робота-манипулятора по ходу распространения излучения и на расстоянии  $l_2 = L - l_1$  от контролируемой детали 8.

Также устройство системы имеет возможность регистрации линейно поляризованного состояния излучения, формируемого каналом подсвета, причём при оперативном повороте конца последнего звена первого робота вокруг собственной оси на  $90^\circ$  формируется излучение, характеризующееся одной из возможных компонент (Р или S) - плоской линейно поляризованной волны. При регистрации этой компоненты волны электромагнитного излучения от рассеивающей контролируемой детали последнее звено второго робота-манипулятора разворачивается относительно последнего звена первого робота на угол, соответствующий максимальному контрасту излучения по состоянию поляризации, эквивалентному соответствующему состоянию одной из возможных компонент (Р или S) - плоской линейно поляризованной волны, что позволяет так же повысить точность определения СКО поверхностных неоднородностей и параметров шероховатости ангстремного уровня в области высоких пространственных частот.

Устройство системы работает следующим образом.

На первой стадии работы системы оператор проводит ее предварительную калибровку при использовании эталонной оптической детали, имеющей минимальное остаточное светорассеяние. Для этого регистрируется индикатриса излучения  $ARS(\theta_d, \theta_n)$ , рассеянного от элементов конструкции системы в окрестности зеркальной компоненты отражённого от эталонной оптической детали лазерного излучения. Эта индикатриса регистрируется в заданном диапазоне углов сканирования относительно нормали к эталону в условиях минимального внешнего освещения. Такая регистрация определяет шумовую инструментальную погрешность системы. Эта шумовая инструментальная погрешность регистрируется программным обеспечением системы в виде массива данных. Далее, она вычитается из результатов измерения, проводимых с контролируемой деталью.

На фиг. 3 представлены графики результатов математического моделирования индикатрисы рассеянного лазерного излучения на основе разработанного модифицированного метода дифференциального рассеяния с учётом калибровки устройства при использовании эталонной оптической детали, где позициями обозначены: 9 - график шума инструментальной индикатрисы в системе до проведения калибровки; 10 - угол дифракции  $80^\circ$  регистрации измеренной индикатрисы рассеянного лазерного излучения до проведения калибровки; 11 - график шума инструментальной индикатрисы в системе после проведения калибровки; 12 - угол дифракции  $90^\circ$  регистрации измеренной индикатрисы рассеянного лазерного излучения после проведения калибровки; 13 - графическое значение увеличения динамического диапазона измерений по углам рассеяния и эквивалентным высоким пространственным частотам. Это графическое значение, благодаря предварительной калибровке, соответствует более чем двум порядкам (100 раз) расширения динамического диапазона измерений по уровню регистрируемой мощности рассеянного лазерного излучения. Это значение учитывается при последующем контроле СКО высот параметров шероховатости в области высоких пространственных частот функции спектральной плотности и дополнительно значительно уменьшает погрешность реальных измерений.

После проведения предварительных калибровочных работ с эталонной оптической деталью и установки в устройство системы контролируемой оптической поверхности оператор включает источник лазерного излучения с необходимой рабочей длиной волны  $\lambda$ . Излучение источника проходит волоконный кабель (на фигурах не показан) и попадает на вход оптической формирующей системы 2 (прим.: выход волоконного кабеля жестко механически позиционирован относительно оптической формирующей

системы, поэтому никаких дополнительных юстировок перед проведением контроля не требуется). На выходе оптической формирующей системы 2 формируется узконаправленный сходящийся пучок излучения с длиной волны  $\lambda$ .

Управляя перемещением торца конца первого робота-манипулятора 1, оператор направляет пучок излучения подсвета под заданным углом падения  $\theta_n$ , с линейным состоянием поляризации (на Р или S - компоненте), на заданные координаты на поверхности контролируемой детали, обеспечивая ее положение на расстоянии  $l_1$  от выходного зрачка формирующей оптической системы 2. Управляя перемещением торца конца второго робота-манипулятора 1, оператор устанавливает входное окно фотодетектора 3 по ходу зеркально отраженного излучения на расстоянии  $l_2 = L - l_1$  от контролируемой детали 8.

На этом калибровка и подготовка системы к работе завершена.

Далее оператор проводит прямой контроль СКО шероховатости оптической поверхности контролируемой оптической детали 8 методом дифференциального рассеяния при регистрации рассеянного лазерного излучения с линейным состоянием поляризации (на Р или S - компоненте). Для этого, управляя вторым роботом-манипулятором 1, оператор обеспечивает сканирование фотодетектора 3 по сфере контроля радиусом  $R = l_2$  под различными углами рассеяния  $\theta_d$ , регистрируя индикатрису рассеянного излучения  $ARS(\theta_d, \theta_n)$  в блоке управления и обработки 4. После этого в блоке управления и обработки 4 вычисляют последовательно функцию спектральной плотности рассеянного излучения  $PSD(v)$  и значение СКО шероховатостей контролируемой оптической поверхности  $\sigma_{eff}^2$  в соответствии с формулами (1) и (2) для рассеянного лазерного излучения с линейным состоянием поляризации (на Р или S - компоненте).

Для определения погрешности позиционирования манипулятора канала фотодетектора 3 после предварительной калибровки измерений устройства системы рассмотрим траекторию движения фотодетектора 3 на торце конца второго робота-манипулятора 1 относительно канала излучения подсвета 2 на торце конца первого робота-манипулятора 1 и зеркальной компоненты дифрагированного лазерного излучения. Представим её в виде набора отрезков, являющихся сторонами равнобедренных треугольников, как это показано на фиг. 4. Представим пройденный путь второго робота-манипулятора 1 с фотодетектором 3 суперпозицией заранее известных (или рассчитанных согласно теореме косинусов), отрезков. Дадим приращение отрезкам на величину погрешности позиционирования канала подсвета, увеличив (или уменьшив) рассматриваемые отрезки  $a + \Delta$  (см. фиг. 4). Моделируемая погрешность линейного перемещения геометрически связана с угловым положением второго робота-манипулятора 1 при регистрации в заданном угловом положении индикатрисы рассеяния лазерного излучения. В результате исходного движения второго робота-манипулятора 1 фотодетектор 3 будет регистрировать индикатрису рассеяния лазерного излучения вплоть до углов дифракции, ограниченных значениями 80-85 градусов, что нереализуемо в установке Ногос, а последующий алгоритм её обработки будет рассчитывать спектральную плотность мощности ( $PSD$  или СПКФ - спектральной плотности корреляционной функции), согласно формулы (2) в зависимости от регистрируемых пространственных частот по формуле (1), характеризующих в данном случае шероховатость ангстремного уровня профиля оптической поверхности в области высоких пространственных частот.

Вводимая для анализа погрешности позиционирования второго робота-манипулятора

канала фоторегистрации 3 индикатрисы рассеянного лазерного излучения погрешность в виде отрезков траектории её движения позволит проанализировать расхождения как в количественной, так и в качественной мерах регистрируемой индикатрисы. Изменение регистрируемого сигнала приведёт к изменению характера поведения функции спектральной плотности мощности, что в свою очередь приведёт к увеличению погрешности определения СКО высотного параметра шероховатости.

Согласно представленной методике оценки погрешности определения СКО высотного параметра шероховатости, запишем уравнение индикатрисы рассеяния лазерного излучения для заданных углов дифракции -  $\theta_{дифф.}$ , от 5 градусов до 85 градусов с шагом дискретизации, согласно фиг. 4, равным  $5^{\circ}43''$ . В этом случае аналитический вид индикатрисы будет описан выражением

$$A_i := \frac{1.18 \times 10^{-4} \cdot \left( \left| -1.5345 \times 10^{13} \cdot \sin(\theta_i) + 1.2199 \times 10^7 \right| \right)^2 \cdot \cos(\theta_i)^2}{\left( \left| 2.12 \cdot \sqrt{-1.0966 \times 10^{14} \cdot \sin(\theta_i)^2 + 1.0966 \times 10^{14}} + 1.5139 \times 10^7 \right| \right)^2 \cdot \left[ \frac{\left( \left| -1.0472 \times 10^7 \cdot \sin(\theta_i) + 1.8184 \times 10^6 \right| \right)^2}{2.5 \times 10^{11}} + 1 \right]^{\frac{3}{2}}}, \quad (4)$$

где  $\theta_i = \theta_{дифф.}$  - начальные значения углов дифракции.

Согласно фиг. 4 Отрезки b равнобедренных треугольников ОАВ, соответствующие  $l_1 = l_2 = 150$  мм на фиг. 2, при этом согласно теореме косинусов для рассматриваемой геометрии линейные перемещения концов роботов-манипуляторов  $a = 15$  мм для выше обозначенных углов дифракции.

Дадим некоторое приращение (эквивалентное погрешности положения второго робота-манипулятора 1 канала регистрации) -  $\Delta$  к линейному перемещению  $a = 15$  мм, определив новое положение приёмного канала. Полученные новые значения траекторий перемещения -  $a + \Delta$  робота-манипулятора пересчитаем в её новое угловое положение, определяемое дискретными значениями углов -  $\theta_{д.} + \Delta\theta_{д.1}$ . Новые значения углов (с учётом угловой погрешности второго робота-манипулятора) в расширенном динамическом диапазоне с учётом калибровки

$$A1_i := \frac{1.18 \times 10^{-4} \cdot \left( \left| -1.5345 \times 10^{13} \cdot \sin(\theta_{2i}) + 1.2199 \times 10^7 \right| \right)^2 \cdot \cos(\theta_{2i})^2}{\left( \left| 2.12 \cdot \sqrt{-1.0966 \times 10^{14} \cdot \sin(\theta_{2i})^2 + 1.0966 \times 10^{14}} + 1.5139 \times 10^7 \right| \right)^2 \cdot \left[ \frac{\left( \left| -1.0472 \times 10^7 \cdot \sin(\theta_{2i}) + 1.8184 \times 10^6 \right| \right)^2}{2.5 \times 10^{11}} + 1 \right]^{\frac{3}{2}}}, \quad (5)$$

где  $\theta_{2i} = \theta_{д.} + \Delta\theta_{д.1} = a \cos \left[ \frac{b^2 + b^2 - (a + \Delta_N)^2}{2 \cdot b^2} \right]$  - значения углов дифракции с

учётом введённой линейной погрешности позиционирования второго робота-манипулятора канала фоторегистрации.

Проанализируем полученное выражение для индикатрисы рассеяния лазерного излучения (фиг. 5) для определённой линейной погрешности, сравним его с исходным выражением и промоделируем результирующие функции спектральной плотности мощности с целью оценки СКО погрешности высоты шероховатости в области высоких

пространственных частот.

Для линейной погрешности  $\Delta = 0,1$  мм индикатрисы рассеяния лазерного излучения и функции СПКФ (спектральной плотности корреляционной функции) с распределением пространственных частот и рассчитанными значениями СКО высот шероховатостей, представленные на фиг. 5, 6, соответственно. Как можно видеть из фиг. 5, 6, введённая линейная погрешность приводит к незначительному изменению исходных функциональных распределений индикатрисы и функции СПКФ соответственно относительно результирующих распределений (об этом свидетельствуют на фиг. 5, 6 практически полные попарные совпадения графиков исходных распределений без введённой линейной погрешности и распределений с погрешностью  $\Delta = 0,1$  мм).

В результате математической обработки одномерной СПКФ для заданной линейной погрешности можно показать, что массивы моделируемых значений пространственных частот и соответствующие этим пространственным частотам моделируемые значения СКО высоты шероховатости для исходного и результирующего (с учётом погрешности  $\Delta = 0,1$  мм) распределений функции СПКФ составляют, следующие величины.

#### Исходное распределение

 $\nu_{2i} =$ 

0
$1.664 \cdot 10^{-7}$
$3.311 \cdot 10^{-7}$
$4.925 \cdot 10^{-7}$
$6.49 \cdot 10^{-7}$
$7.99 \cdot 10^{-7}$
$9.411 \cdot 10^{-7}$
$1.074 \cdot 10^{-6}$
$1.196 \cdot 10^{-6}$
$1.306 \cdot 10^{-6}$
$1.402 \cdot 10^{-6}$
$1.485 \cdot 10^{-6}$
$1.553 \cdot 10^{-6}$
$1.606 \cdot 10^{-6}$
$1.642 \cdot 10^{-6}$
$1.662 \cdot 10^{-6}$



$$\sigma = 2,906 \cdot 10^{-11} \text{ м}$$

#### Распределение с учётом

введённой погрешности ( $\Delta = 0,1$  мм)

 $\nu_{2i} =$ 

0
$1.676 \cdot 10^{-7}$
$3.328 \cdot 10^{-7}$
$4.954 \cdot 10^{-7}$
$6.542 \cdot 10^{-7}$
$7.978 \cdot 10^{-7}$
$9.453 \cdot 10^{-7}$
$1.076 \cdot 10^{-6}$
$1.198 \cdot 10^{-6}$
$1.303 \cdot 10^{-6}$
$1.404 \cdot 10^{-6}$
$1.487 \cdot 10^{-6}$
$1.552 \cdot 10^{-6}$
$1.608 \cdot 10^{-6}$
$1.642 \cdot 10^{-6}$
$1.662 \cdot 10^{-6}$



$$\sigma = 2,907 \cdot 10^{-11} \text{ м}$$

В результате проведенного точностного анализа с учётом расширенного динамического диапазона на основе представленного метода калибровки рассматриваемое устройство на основе двух роботов-манипуляторов, имеющих типичную погрешность позиционирования торцев концов 0,1 мм, позволяет



регистрировать параметры ангстремного уровня шероховатости в области высоких пространственных частот с погрешностью по СКО в третьем знаке после запятой, что является вполне удовлетворительным и приемлемым результатом для высокоточных измерений астрономической, космической и лазерной оптики.

5 Взаимное позиционирование модулей системы формирования излучения 2 и фотодетектора 3, а также движение модуля фоторегистрации 3 при детектировании индикатрисы рассеянного излучения с линейным состоянием поляризации (на Р или S - компоненте), с высоким уровнем контраста по состоянию поляризации, учитываемая инструментальная погрешность на основе представленного метода калибровки являются  
10 важными для метода дифференциального рассеяния. Именно это обстоятельство определяет расширение функциональных возможностей заявляемого устройства для контроля крупногабаритных оптических деталей. Заявляемое устройство имеет максимальные линейные размеры, не превышающие половину светового диаметра контролируемой крупногабаритной оптической детали (прим.: для сравнения  
15 максимальные линейные размеры устройства установки Ногос должны превышать размеры светового диаметра контролируемой крупногабаритной оптической детали).

Также заявляемое устройство системы обеспечивает возможность проведения оперативного контроля на этапах оптического формообразования детали методами глубокой полировки, не снимая деталь с технологической оснастки, благодаря наличию  
20 двух роботов-манипуляторов с модулями системы формирования излучения 2 и фоторегистрации 3.

В дополнение на фиг. 7, 8, 9 представлены три конструктивных исполнения заявляемого устройства системы для разных габаритов и расположения контролируемых оптических деталей 8:

25 на фиг. 7 - исполнение заявляемого устройства системы с контролируемой деталью небольших размеров до 200-300 мм, которая устанавливается непосредственно на рабочий стол устройства;

на фиг. 8 - исполнение заявляемого устройства системы с горизонтально расположенной крупногабаритной контролируемой деталью до 1000 мм и более -  
30 отдельный стол соответствующей большой площади;

на фиг. 9 - исполнение заявляемого устройства системы с вертикально расположенной крупногабаритной контролируемой деталью до 1000 мм и более - с дополнительным ножничным подъемником 14 роботов-манипуляторов для подвода роботов-манипуляторов к любым контрольным точкам оптической детали.

35

#### (57) Формула изобретения

1. Система для определения параметров ангстремного уровня шероховатости и поверхностных неоднородностей контролируемой оптической поверхности, содержащая оптически связанные блок источников лазерного излучения, оптическую систему  
40 формирования узконаправленного пучка лазерного излучения подсвета на контролируемую поверхность и фотодетектор на основе фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) для ответного излучения, рассеянного на контролируемой поверхности, выход фотодетектора связан со входом блока управления и обработки зарегистрированной индикатрисы рассеяния излучения подсвета, причем оптическая система установлена  
45 в одноосной направляющей с возможностью изменения угла падения узконаправленного пучка излучения подсвета на контрольную точку контролируемой поверхности, а фотодетектор установлен в двухосной направляющей с возможностью регистрации рассеянного излучения в заданном диапазоне углов рассеяния, отличающаяся тем, что

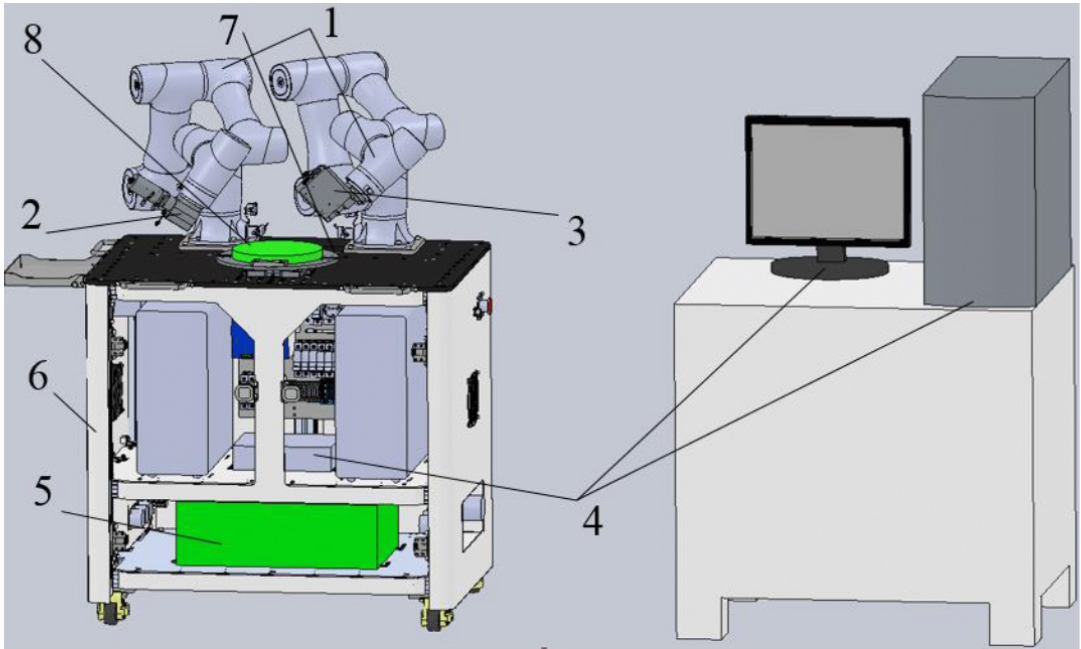
содержит два трехосных робота-манипулятора с возможностью пространственных перемещений точности позиционирования их торцов концов порядка 0,1 мм, при этом на рабочем торце конца первого из них расположена вышеуказанная оптическая система формирования узконаправленного пучка излучения, а на рабочем торце конца второго робота-манипулятора расположен вышеуказанный фотодетектор ответного излучения с возможностью регистрации индикатрисы рассеяния в углах дифракции, приближенных к 90°, при этом устройство выполнено с возможностью работы в диапазонах углов дифракции от 5° до 85° в области высоких пространственных частот свыше 100 мм<sup>-1</sup> с осуществлением предварительной калибровки посредством использования эталонной оптической поверхности, имеющей минимальное остаточное светорассеяние в условиях минимального внешнего освещения, для измерения шумовой инструментальной погрешности измерений системы.

2. Система по п. 1, дополнительно содержащая рабочий стол, выполненный с возможностью установки на него контролируемой детали размерами до 200...300 мм с технологической оснасткой или без неё.

3. Система по п. 1, дополнительно содержащая отдельный стол с площадью, соответствующей размерам детали, выполненный с возможностью установки на него горизонтально расположенной контролируемой детали размерами до 1000 мм и более с технологической оснасткой или без неё.

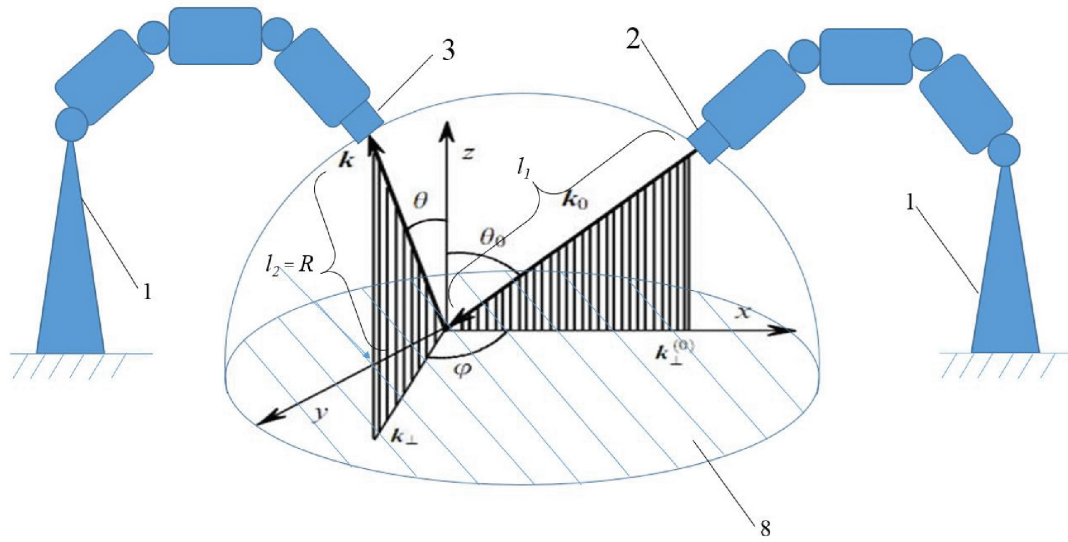
4. Система по п. 1, дополнительно содержащая ножничный подъемник роботов-манипуляторов для возможности их подвода к любым контрольным точкам контролируемой оптической поверхности детали.

1

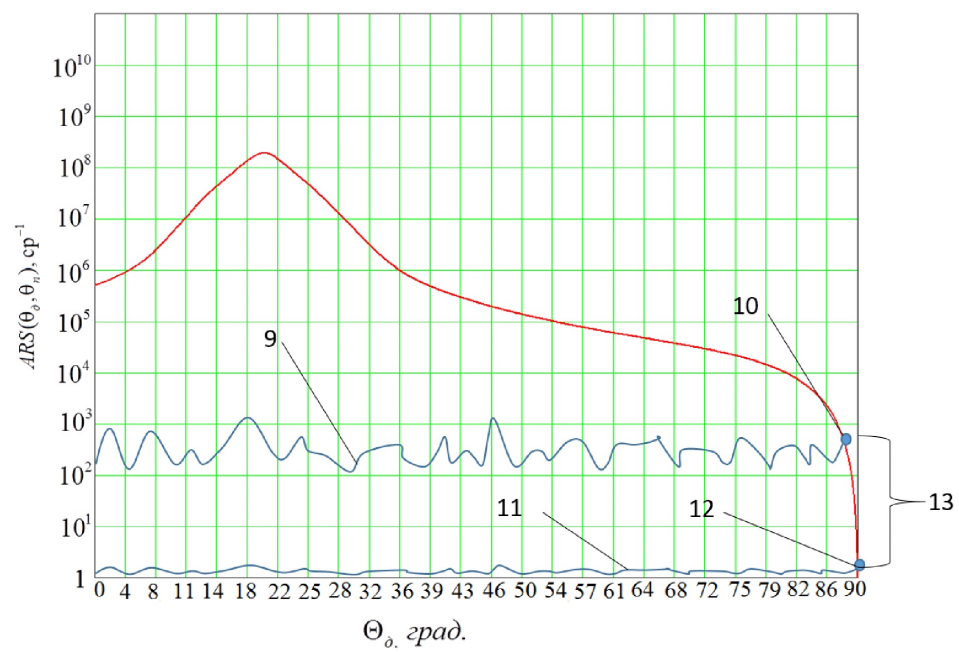


Фиг. 1

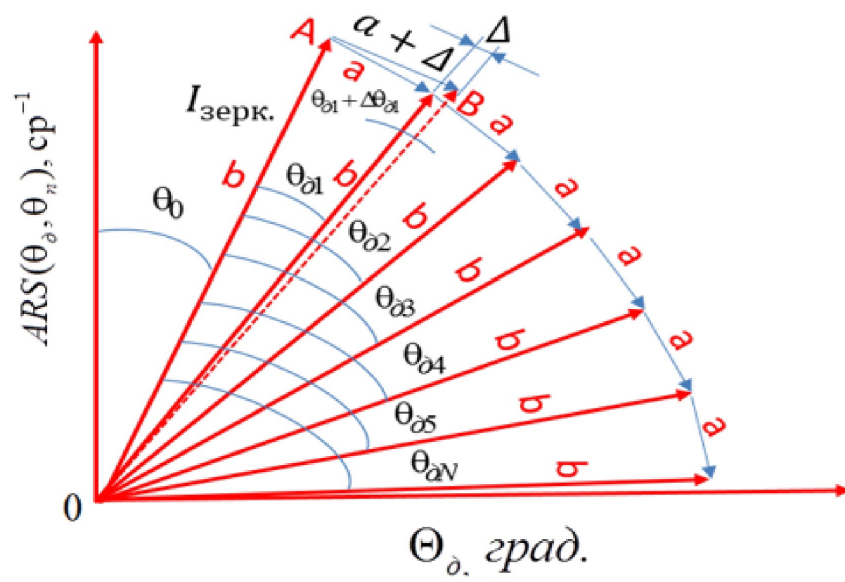
2



Фиг. 2

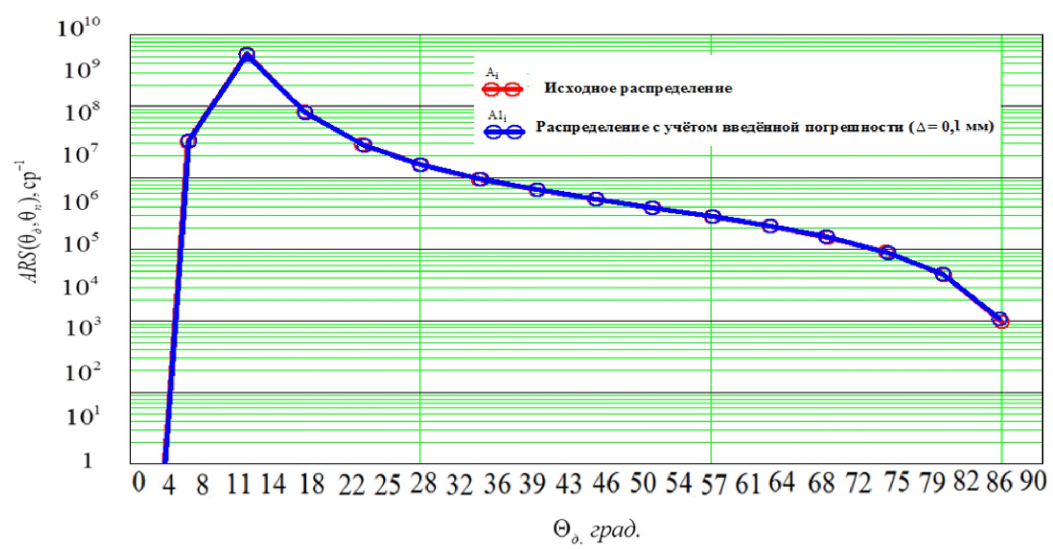


Фиг. 3

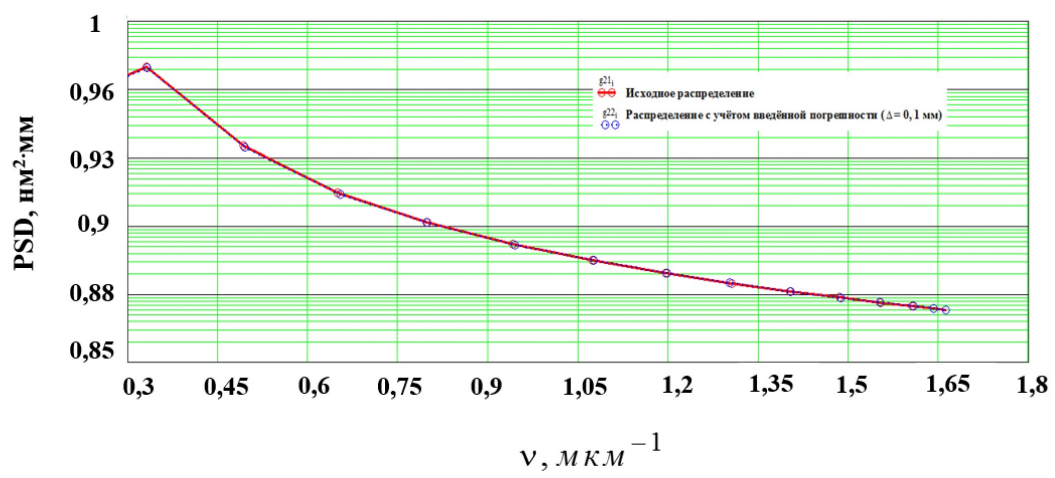


Фиг. 4

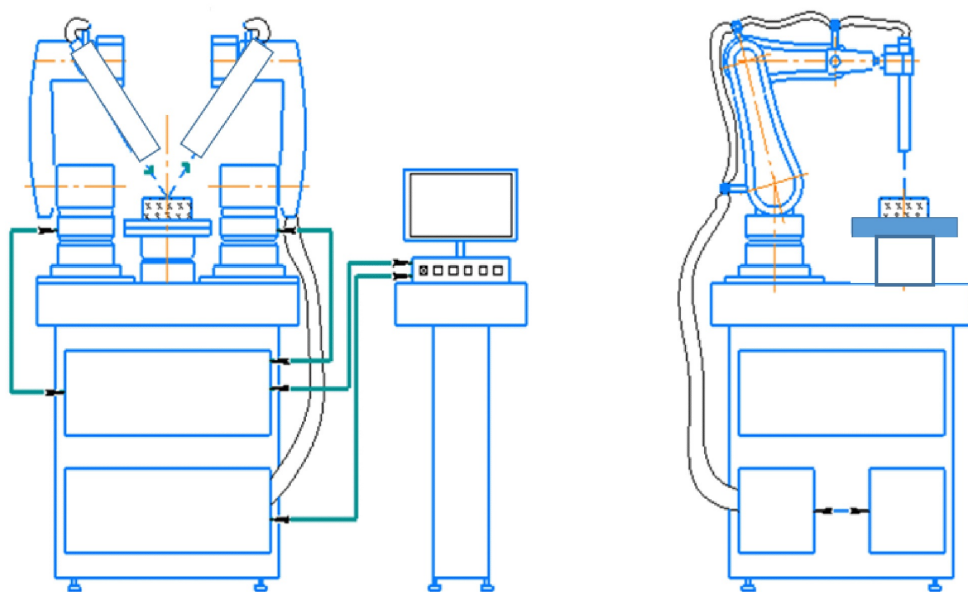




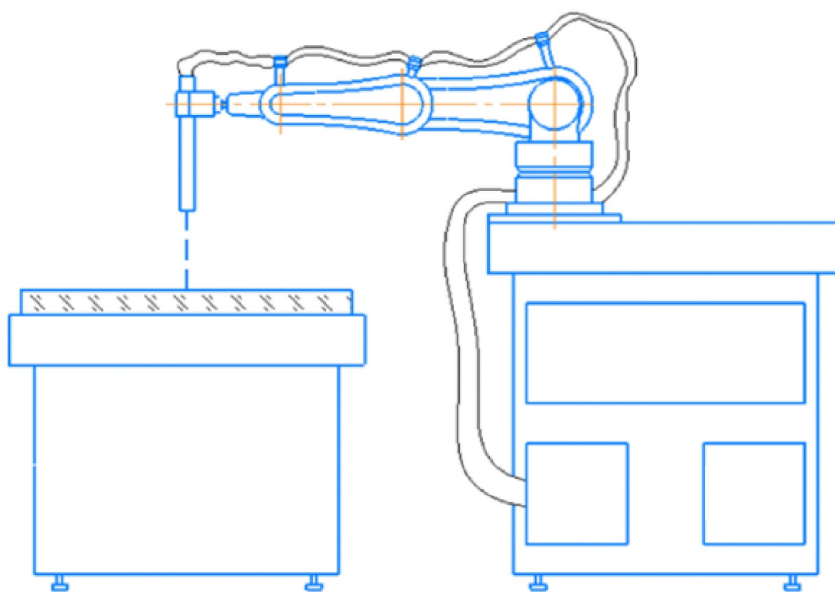
Фиг.5



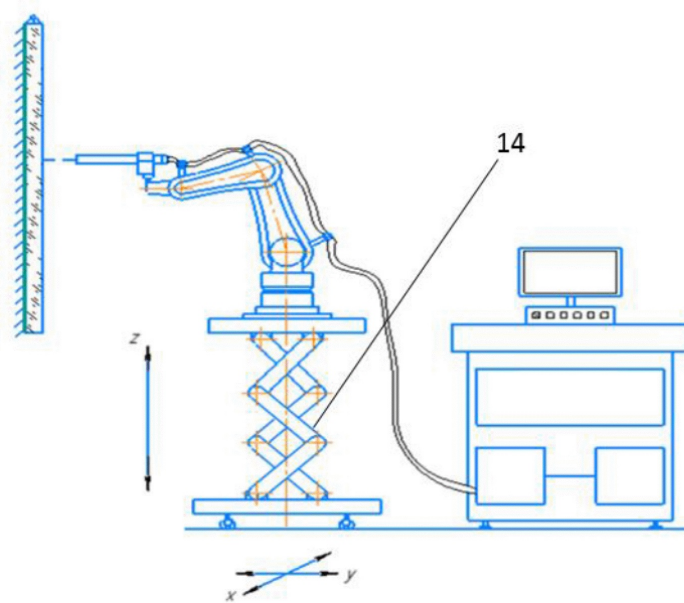
Фиг.6



Фиг.7



Фиг.8



Фиг.9