



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01B 11/30 (2024.01); G01B 11/306 (2024.01)

(21)(22) Заявка: 2023131460, 30.11.2023

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
30.11.2023

Дата регистрации:
17.07.2024

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 30.11.2023

(45) Опубликовано: 17.07.2024 Бюл. № 20

Адрес для переписки:

105005, Москва, вн.тер.г. Муниципальный
округ Басманный, 2-я Бауманская ул., 5, стр.
1, МГТУ им. Н.Э.Баумана, Амелина Ксения
Евгеньевна

(72) Автор(ы):

Денисов Дмитрий Геннадьевич (RU),
Барышников Николай Васильевич (RU),
Животовский Илья Вадимович (RU),
Карасик Валерий Ефимович (RU),
Сахаров Алексей Александрович (RU),
Патрикеева Анастасия Андреевна (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: SU 1795277 A1, 15.02.1993. SU
1649264 A1, 15.05.1991. SU 654853 A1, 30.03.1979.
SU 1262280 A1, 07.10.1986. DE 3426332 C2,
14.04.1988. Denisov D. G., Prosovskii O. F.,
Prosovskii Y. O. Investigation of the Influence of
the Quality of Surfaces of Optical Substrates on
the Performance Characteristics of Thin-Film
Coatings //Journal of Communications (см.
прод.)

(54) Способ определения среднеквадратического отклонения шероховатости оптической поверхности

(57) Реферат:

Изобретение относится к области оптического приборостроения, точнее к оптико-электронным системам контроля качества оптических поверхностей, и может быть использовано для исследования параметров шероховатостей высокоточных оптических поверхностей. Способ предусматривает проведение аппроксимации зарегистрированной индикатрисы рассеянного излучения $ARS(\theta_x, \theta_n)$ по точкам, которые назначаются по результатам регистрации самой индикатрисы $ARS(\theta_x, \theta_n)$, по заданному значению минимальной пространственной частоты

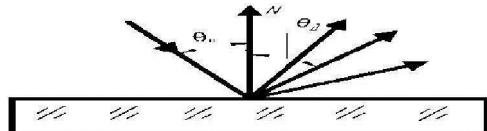
неоднородностей v_{min} , а также по вычисленным значениям $PSD(v)$ и максимальной частоты v_{max} . Оптическую поверхность подсвечивают узким пучком излучения на длине волны λ под углом падения θ_n , регистрируют индикатрису $ARS(\theta_x, \theta_n)$, определяют функцию спектральной плотности рассеянного излучения $PSD(v)$ по выражению. Определяют эффективное значение среднеквадратического отклонения шероховатостей оптической поверхности σ_{eff}^2 в заданных пределах пространственной частоты неоднородностей от v_1 до v_2 по выражению. При

Р У 2 8 2 3 0 1 8 С 1

R U 2 8 2 3 0 1 8 С 1

в этом дополнительно определяют значение максимальной частоты ν_{max} по выражению. Проводят аппроксимацию функции $ARS(\theta_d, \theta_n)$ в диапазоне углов рассеяния от θ_{dmin} до 90° по выражению. Определяют функцию спектральной плотности $PSD_{app}(\nu)$ по выражению и определяют значение среднеквадратического отклонения шероховатостей оптической поверхности в

заданных пределах от ν_{min} до ν_{max} по выражению. Технический результат - расширение частотного диапазона измерений эффективного значения среднеквадратического отклонения шероховатостей оптической поверхности в области высоких пространственных частот поверхностных неоднородностей, что в свою очередь позволяет контролировать поверхности с предельно малыми значениями. 8 ил.



Фиг. 1

(56) (продолжение):

Technology and Electronics. - 2023. - T. 68. - N. 9. - C. 1053-1060. Feidenhans N. A. et al. Comparison of optical methods for surface roughness characterization //Measurement Science and Technology. - 2015. - T. 26. - N. 8. - C. 085208.



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(52) CPC
G01B 11/30 (2024.01); G01B 11/306 (2024.01)

(21)(22) Application: 2023131460, 30.11.2023

(24) Effective date for property rights:
30.11.2023

Registration date:
17.07.2024

Priority:

(22) Date of filing: 30.11.2023

(45) Date of publication: 17.07.2024 Bull. № 20

Mail address:
105005, Moskva, vn.ter.g. Munitsipalnyj okrug
Basmannyj, 2-ya Baumanskaya ul., 5, str. 1, MGTU
im. N.E.Baumana, Amelina Kseniya Evgenevna

(72) Inventor(s):

Denisov Dmitrii Gennadevich (RU),
Baryshnikov Nikolai Vasilevich (RU),
Zhivotovskii Ilia Vadimovich (RU),
Karasik Valerii Efimovich (RU),
Sakharov Aleksei Aleksandrovich (RU),
Patrikeeva Anastasiia Andreevna (RU)

(73) Proprietor(s):

Federalnoe gosudarstvennoe biudzhetnoe
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego
obrazovaniia «Moskovskii gosudarstvennyi
tekhnicheskii universitet imeni N.E. Baumana
(natsionalnyi issledovatelskii universitet)»
(MGTU im. N.E. Baumana) (RU)

(54) METHOD OF DETERMINING MEAN SQUARE DEVIATION OF OPTICAL SURFACE ROUGHNESS

(57) Abstract:

FIELD: optical instrument making.

SUBSTANCE: invention relates to optical-electronic systems for controlling the quality of optical surfaces, and can be used to study roughness parameters of high-precision optical surfaces. Method provides for approximation of recorded indicatrix of scattered radiation $ARS(\Theta_d, \Theta_n)$ by points, which are assigned based on the results of recording the indicatrix itself $ARS(\Theta_d, \Theta_n)$, based on a given value of the minimum spatial frequency of the inhomogeneities v_{min} , as well as based on the calculated values of $PSD(v)$ and the maximum frequency v_{max} . Optical surface is illuminated with a narrow radiation beam at wavelength λ at angle of incidence Θ_n , indicatrix $ARS(\Theta_d, \Theta_n)$ is recorded, scattered radiation spectral density function $PSD(v)$ is determined from the expression. Determining the effective value of the root-mean-square deviation of the roughness of the optical surface δ_{eff}^2 within the

specified limits of the spatial frequency of the inhomogeneities from v_1 to v_2 by the expression. Value of the maximum frequency v_{max} is additionally determined from the expression. Function $ARS(\Theta_d, \Theta_n)$ is approximated in the range of scattering angles from Θ_{dmin} to 90° by expression. Function of spectral density $PSD_{apr}(v)$ is determined from the expression and the value of the root-mean-square deviation of the roughness of the optical surface is determined in the specified range from v_{min} to v_{max} from the expression.

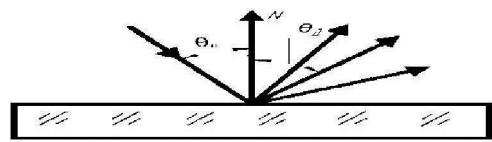
EFFECT: wider frequency range of measuring the effective value of the root-mean-square deviation of the roughness of the optical surface in the region of high spatial frequencies of surface inhomogeneities, which in turn makes it possible to control surfaces with extremely small values.

1 cl, 8 dwg

C1
2823018
RU

R U
2 8 2 3 0 1 8

C 1



Фиг.1

R U 2 8 2 3 0 1 8 C 1

R U 2 8 2 3 0 1 8 C 1

Область техники

Изобретение относится к области оптического приборостроения, точнее к оптико-электронным системам контроля качества оптических поверхностей. Изобретение может быть использовано для исследования параметров шероховатостей высокоточных оптических поверхностей, изделий микроэлектроники со значением среднеквадратического отклонения до единиц нм и менее.

Уровень техники

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

Известен интерферометрический способ измерения уровня шероховатостей оптической поверхности (См. Денисов Д.Г., «Измерение параметров шероховатостей шлифованных и полированных оптических поверхностей с помощью высокоточных методов лазерной интерферометрии».: Успехи прикладной физики . 2017 г. Том 5 №4 Стр.393-410). Способ заключается в подсветке исследуемой поверхности излучением, регистрации отраженного излучения, получении интерференционной картины и измерении уровня среднеквадратического значения отступления неоднородностей поверхности от идеального по данным интерференционной картины.

К недостаткам данного способа относится тот факт, что измерения могут быть

проведены для ограниченного пространственно - частотного диапазона неоднородностей поверхности - максимальная пространственная частота регистрации v_{max} составляет не более нескольких десятков лин/мм. Эти ограничения определяются оптическими параметрами интерферометрической аппаратуры, прежде всего - латеральным размером исследуемой поверхности D и числом элементов разрешения n матричного фотоприемника фоторегистрирующей аппаратуры (См. Денисов Д.Г., «Измерение параметров шероховатостей шлифованных и полированных оптических поверхностей с помощью высокоточных методов лазерной интерферометрии».: Успехи прикладной физики . 2017 г. Том 5 №4 Стр.393-410): $v_{max} = 2*D/n$

Так, например, при исследовании поверхности размером в $D = 100$ мм и числом элементов разрешения матричного фотоприемника в $n = 1000$ элементов, предел пространственного разрешения составит 0,2 лин/мм.

При $D = 1$ мм (для интерферометров, построенных по схеме Линика) этот предел составит соответственно 20 лин/мм.

Именно интерферометры, построенный по схеме Линика, дают максимальный диапазон по пространственному разрешению для интерферометрических систем, т.к. обеспечивают минимальные значения D .

В настоящее время особый научно-технический интерес представляют наноструктурированные оптические поверхности. Они характеризуются высоким качеством поверхности, среднеквадратическое значение уровня их шероховатостей составляет от 1 нм и до десятых долей нм. Пространственно-частотный диапазон поверхностных неоднородностей для таких уровней шероховатостей расширяется до 100 лин/мм и более.

Таким образом, расширение спектрального диапазона измеряемых поверхностных неоднородностей позволяет контролировать более качественные поверхности.

Для контроля таких поверхностей в области высоких частот пространственных неоднородностей используется оптико-электронное оборудование, построенное по принципиально иной схеме, реализующей метод дифференциального рассеяния (См. Азарова В.В., Дмитриев В.Г., Лохов Ю.Н., Малицкий К.Н., «Измерение шероховатости

прецизионных кварцевых подложек и лазерных зеркал методом дифференциального рассеяния».:Оптический журнал . 2002 г.том 69 Стр.71-75), выбранный в качестве прототипа.

В способе - прототипе оптическую поверхность подсвечивают узким пучком

- излучения на длине волны λ под углом падения θ_n , регистрируют индикатрису рассеянного излучения $ARS(\theta_d, \theta_n)$, определяют функцию спектральной плотности рассеянного излучения $PSD(v)$ по выражению:

$$PSD(v) = ARS(\theta_d, \theta_n)/(c * F), \quad (1)$$

где:

θ_n - угол падения излучения на контролируемую поверхность;

θ_d - угол рассеяния;

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,

определяют эффективное значение среднеквадратического отклонения

- шероховатостей оптической поверхности σ_{eff}^2 в заданных пределах пространственной частоты поверхностных неоднородностей от v_1 до v_2 по выражению:

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

Недостатком данного способа является ограничения возможности измерения СКО шероховатостей в области именно высоких пространственных частот.

Раскрытие изобретения

Идею предлагаемого изобретения можно пояснить следующим образом.

На фиг. 1 показана общая схема регистрации рассеянного на контролируемой детали излучения.

Узкий пучок излучения подсвета падает на контролируемую поверхность под углом θ_n .

- Приемный канал регистрирует значение индикатрисы рассеяния $ARS(\theta_d, \theta_n)$ под углами θ_d

Вид зарегистрированной индикатрисы рассеяния для идеального случая показан на фиг. 2.

Известна (См. Азарова В.В., Дмитриев В.Г., Лохов Ю.Н., Малицкий К.Н., «Измерение шероховатости прецизионных кварцевых подложек и лазерных зеркал методом дифференциального рассеяния».:Оптический журнал . 2002 г. том 69 Стр.71-75) связь между углами θ_n, θ_d и пространственной частотой неоднородностей:

$$|\sin(\theta_n)/\lambda - \sin(\theta_d)/\lambda| = v \quad (3)$$

Вид вычисленной функции $PSD(v)$ для идеального случая показан на фиг. 3

- Эффективное значение среднеквадратического отклонения шероховатостей оптической поверхности в области высоких пространственных частот и в заданных пределах пространственной частоты неоднородностей от v_1 до v_2 вычисляются по выражению (2)

Функция спектральной плотности рассеянного излучения $PSD(v)$ может быть вычислена по выражению (1) и построена до некоторой максимальной пространственной частоты неоднородностей - v_{max} .

Исходя из выражения (3), можно определить предельную, или максимальную частоту v_{max} при $\theta_d = 90$ град, т.е. для $\sin(\theta_d) = 1$:

$$|\sin(\theta_n)/\lambda - 1/\lambda| = v_{max} \quad (4)$$

Отметим, что значение v_{max} определяется исключительно физическими свойствами оптического излучения и представляет собой предел по пространственной частоте, в котором возможно проводить измерения.

Минимальное значение диапазона частот v_{min} назначается исследователем на основе необходимого для исследований спектрального диапазона.

Вместе с тем, существует целый ряд ограничений возможности регистрации индикаторы дифференциального рассеяния $ARS(\theta_d, \theta_n)$ для больших углов θ_d . Эти ограничения связаны с аппаратными возможностями системы регистрации. Прежде всего - с ограничением ее чувствительности. Действительно, при увеличении углов θ_d диапазон значений регистрируемой интенсивности рассеянного излучения расширяется в область малых величин, снижаясь на несколько порядков. Поэтому ограничения по чувствительности аппаратуры регистрации играют определяющую роль для измерения $ARS(\theta_d, \theta_n)$.

На фиг. 4 показана индикаторика $ARS(\theta_d, \theta_n)$, зарегистрированная с учетом ограничений по чувствительности аппаратуры регистрации.

Для этой индикаторы можно выделить предельный угол θ_d^* , для которого возможна регистрация рассеянного излучения.

Вид вычисленной функции $PSD(v)$ для этого случая показан на фиг. 5.

Предельная пространственная частота v^* для этого случая определяется из (3) через значение θ_d^* следующим образом:

$$|\sin(\theta_n)/\lambda - \sin(\theta_d^*)/\lambda| = v^* \quad (5)$$

Из фиг. 5 видно, что возможности вычисления эффективного значения среднеквадратического отклонения σ_{eff}^2 шероховатостей оптической поверхности в области высоких пространственных частот и в заданных пределах пространственной частоты неоднородностей от v_{min} до v_{max} по выражению (2) ограничены, т.к. значения $PSD(v)$ в области частот от v^* до v_{max} невозможно вычислить.

Таким образом, частотный диапазон измерения эффективного значения среднеквадратического отклонения σ_{eff}^2 шероховатостей оптической поверхности в области высоких пространственных частот ограничен значением v^* .

Задачей изобретения является существенное расширение частотного диапазона измерений эффективного значения среднеквадратического отклонения шероховатостей оптической поверхности в области высоких пространственных частот.

Технический результат - расширение частотного диапазона измерения эффективного значения среднеквадратического отклонения шероховатостей оптической поверхности в области высоких пространственных частот поверхностных неоднородностей, что в свою очередь позволяет контролировать поверхности с предельно малыми значениями.

Изобретение предусматривает проведение аппроксимации зарегистрированной индикатрисы рассеянного излучения $ARS(\theta_d, \theta_n)$ по точкам, которые назначаются по результатам регистрации самой индикатрисы $ARS(\theta_d, \theta_n)$, по заданному значению минимальной пространственной частоты неоднородностей ν_{min} , а также по вычисленным значениям $PSD(\nu)$ и максимальной частоты ν_{max} .

Для этого в известном способе, заключающемся в том, что оптическую поверхность подсвечивают узким пучком излучения на длине волны λ под углом падения θ_n , регистрируют индикатрису рассеянного излучения $ARS(\theta_d, \theta_n)$, определяют функцию спектральной плотности рассеянного излучения $PSD(\nu)$ по выражению:

$$PSD(\nu) = ARS(\theta_d, \theta_n)/(c^*F),$$

где:

θ_n - угол падения излучения на контролируемую поверхность;

θ_d - угол рассеяния;

c - коэффициент пропорциональности, 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,

и определяют значение среднеквадратического отклонения шероховатостей оптической поверхности σ_{eff}^2 в заданных пределах пространственной частоты неоднородностей от ν_1 до ν_2 по выражению:

$$\sigma_{eff}^2 = \int_{\nu_1}^{\nu_2} PSD(\nu) d\nu$$

дополнительно:

определяют значение максимальной частоты ν_{max} по выражению

$$/\sin(\theta_n)/\lambda - 1/\lambda = \nu_{max}$$

проводят аппроксимацию функции $ARS(\theta_d, \theta_n)$ в диапазоне углов рассеяния от θ_{dmin} до 90° по выражению:

$$ARS_{app}(\theta_d, \theta_n) = f(ARS(\theta_{dmin}, \theta_n), ARS(\theta_d^*, \theta_n), ARS(90^\circ, \theta_n)), (6)$$

где:

$ARS(\theta_{dmin}, \theta_n)$ - значение зарегистрированной индикатрисы рассеянного излучения для минимального угла θ_{dmin} , который определяется из (3) по заданной минимальной пространственной частоте анализируемых неоднородностей поверхности ν_{min} следующим образом:

$$\theta_{dmin} = \text{ArcSin}(\nu_{min}\lambda + \sin(\theta_n))$$

где $ARS(\theta_d^*, \theta_n)$ - значение зарегистрированной индикатрисы рассеянного излучения для предельного угла θ_d^* , которые определяются по результатам измерений;

$ARS(90^\circ, \theta_n) = 0$ - минимальное значение зарегистрированной индикатрисы рассеянного

излучения для максимального угла 90° ;

определяют функцию спектральной плотности рассеянного излучения $PSD_{app}(\nu)$ по выражению:

$$PSD_{app}(\nu) = ARS_{app}(\theta_d, \theta_n)/(c^*F)$$

И определяют эффективное значение среднеквадратического отклонения шероховатостей оптической поверхности в заданных пределах пространственной частоты неоднородностей от ν_{min} до ν_{max} по выражению:

$$5 \quad \sigma_{eff}^2 = \int_{\nu_{min}}^{\nu_{max}} PSD_{apr}(\nu) d\nu \quad (7)$$

На фиг. 7 показан вид $PSD_{apr}(\nu)$ в диапазоне частот от ν_{min} до ν_{max} .

Как видно из фиг. 6 и выражения (7), предел частотного диапазона измерений 10 эффективного значения среднеквадратического отклонения шероховатостей оптической поверхности увеличивается со значения ν^* до значения физического предела - ν_{max} .

Перечень фигур

На фигуре 1 показана общая схема регистрации рассеянного на контролируемой поверхности излучения.

15 На фигуре 2 показан вид зарегистрированной индикатрисы рассеяния для идеального случая

На фигуре 3 показан вид вычисленной функции $PSD(\nu)$ для идеального случая

На фигуре 4 показана индикатриса $ARS(\theta_d, \theta_n)$, зарегистрированная с учетом ограничений по чувствительности аппаратуры регистрации.

20 На фигуре 5 (а, б) показаны два вида вычисленной функции $PSD(\nu)$ с учетом ограничений по чувствительности аппаратуры регистрации.

На фигуре 6 показан вид $PSD_{apr}(\nu)$ в диапазоне частот от ν_{min} до ν_{max} .

На фигуре 7 показаны графики функций индикатрис рассеянного лазерного излучения 25 для исходных данных

На фигуре 8 показаны графики спектральных плотностей корреляционных функций для функций индикатрис рассеянного лазерного излучения для исходных данных, построенные в соответствии с данными изображенными на фиг.7.

Осуществление изобретения.

30 Пример осуществления изобретения

Рассмотрим пример аппроксимации индикатрисы рассеянного лазерного излучения для следующих исходных данных:

длина волны лазерного излучения: 0,6328 мкм;

СКО параметров шероховатости кварцевой подложки: 0,1 нм;

35 Длина корреляции (латеральная область постоянства статистических свойств шероховатой подложки): 1,3 мкм;

Тип статистики распределения высотных параметров шероховатости - экспоненциальный.

Тип материала отражающей подложки: кварц оптический (SiO2);

40 Диэлектрическая проницаемость кварцевой подложки: 2,12;

Угол падения оси лазерного излучения на шероховатую поверхность кварцевой подложки: 20 градусов;

На фиг.7 представлены графики функций индикатрис рассеянного лазерного излучения для исходных данных:

45 1а) исходное пространственное распределение интенсивности в заданном телесном угле - индикатриса в диапазоне углов дифракции от 0 до 90 градусов (идеализированная интерпретация характера, рассеянного лазерного - результат математического моделирования);

1б) пространственное распределение интенсивности в заданном телесном

угле - индикатриса в диапазоне углов дифракции от 0 до 70 градусов (реальная интерпретация характера, рассеянного лазерного - результат математического моделирования, имитирующий аппаратные ограничения);

1в) пространственное распределение интенсивности в заданном телесном

5 угле - индикатриса в диапазоне углов дифракции от 0 до 90 градусов (реальная интерпретация характера, рассеянного лазерного - результат математического моделирования, аппроксимационной функции, имитирующей нивелирование аппаратных ограничений, согласно выражению (6))

На фиг. 8 представлены графики спектральных плотностей корреляционных функций,

10 соответствующих графикам индикатрис рассеянного лазерного излучения для исходных данных, изображённых на фиг. 7:

2а) исходный график СПКФ, соответствующий пространственному распределению интенсивности в заданном телесном угле - индикатриса в диапазоне углов дифракции от 0 до 90 градусов (в соответствии с выражением (3 и 4) значение пространственной частоты - от $v_{min} = 0$ и до $v_{max} = 1040 \text{ мм}^{-1}$) (идеализированная интерпретация характера, рассеянного лазерного - результат математического моделирования, согласно выражению (1));

2б) график СПКФ, соответствующий пространственному распределению интенсивности в заданном телесном угле - индикатриса в диапазоне углов дифракции от 0 до 70 градусов (в соответствии с выражением (5) значение пространственной частоты - от $v_{min} = 0$ и до $v^* = 945 \text{ мм}^{-1}$) (реальная интерпретация характера, рассеянного лазерного - результат математического моделирования, имитирующий аппаратные ограничения, согласно выражению (1));

25 2в) график СПКФ, соответствующий пространственному распределению интенсивности в заданном телесном угле - индикатриса в диапазоне углов дифракции от 0 до 90 градусов (в соответствии с выражением (3 и 4) значение пространственной частоты - от $v_{min} = 0$ и до $v_{max} = 1040 \text{ мм}^{-1}$) (реальная интерпретация характера, рассеянного лазерного - результат математического моделирования, аппроксимационной функции, имитирующей нивелирование аппаратных ограничений, согласно выражению (1));

30 В результате апробации рассмотренной в заявке формулы изобретения на основе представленных графических распределений (фиг. 7, 8) были получены следующие численные результаты для возможности восстановления СКО шероховатости профиля кварцевой подложки:

Исходное СКО: 0,1 нм;

СКО, измеряемое в результате влияния аппаратных ограничений: 0,092 нм;

СКО, измеряемое в результате применения аппроксимации: 0,11 нм.

40 Используемая аппроксимационная зависимость распределения индикатрисы рассеянного лазерного излучения от углов дифракции в диапазоне от 70 градусов до 90 градусов:

$$Y_1(X_1) = 465900 - 916600X_1 + 625600X_1^2 - 147000X_1^3$$

Относительная погрешность восстановления СКО, менее 0,01 нм.

45 Таким образом, предел частотного диапазона измерений эффективного значения среднеквадратического отклонения шероховатостей оптической поверхности увеличивается со значения $v^* = 945 \text{ мм}^{-1}$ до значения физического предела $v_{max} = 1040$

мм⁻¹.

(57) Формула изобретения

Способ определения среднеквадратического отклонения шероховатости оптической 5 поверхности, заключающийся в том, что оптическую поверхность подсвечивают узким пучком излучения на длине волны λ под углом падения θ_n , регистрируют индикатрису рассеянного излучения $ARS(\theta_d, \theta_n)$, определяют функцию спектральной плотности рассеянного излучения $PSD(v)$ по выражению:

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

где θ_n - угол падения излучения на контролируемую поверхность;

θ_d - угол рассеяния;

c - коэффициент пропорциональности, б/р;

15 F - оптический фактор, зависящий от длины волны, углов падающего и рассеянного излучений, диэлектрической проницаемости среды и состояния поляризации падающего и рассеянного излучений, б/р,

определяют эффективное значение среднеквадратического отклонения

шероховатостей оптической поверхности σ_{eff}^2 в заданных пределах пространственной 20 частоты неоднородностей от v_1 до v_2 по выражению:

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

отличающийся тем, что

25 определяют значение максимальной частоты v_{max} по выражению

$$/Sin(\theta_n)/\lambda - 1/\lambda = v_{max},$$

проводят аппроксимацию функции $ARS(\theta_d, \theta_n)$ в диапазоне углов рассеяния от θ_{dmin} до 90° по выражению:

$$ARS_{app}(\theta_d, \theta_n) = f\{ARS(\theta_{dmin}, \theta_n), ARS(\theta_d^*, \theta_n), ARS(90^\circ, \theta_n)\},$$

30 где $ARS(\theta_{dmin}, \theta_n)$ - значение зарегистрированной индикатрисы рассеянного излучения для минимального угла θ_{dmin} , который определяют по заданной минимальной пространственной частоте анализируемых неоднородностей поверхности v_{min} следующим образом:

$$\theta_{dmin} = ArcSin(v_{min}\lambda + Sin(\theta_n)),$$

где $ARS(\theta_d^*, \theta_n)$ - значение зарегистрированной индикатрисы рассеянного излучения

40 для предельного угла θ_d^* , которые определяют по результатам измерений по зарегистрированной предельной частоте v^* следующим образом:

$$\theta_d^* = ArcSin(v^*\lambda + Sin(\theta_n)),$$

где $ARS(90^\circ, \theta_n) = 0$ - значение зарегистрированной индикатрисы рассеянного излучения для максимального угла 90° ;

45 определяют функцию спектральной плотности рассеянного излучения $PSD_{app}(v)$ по выражению:

$$PSD_{app}(v) = ARS_{app}(\theta_d, \theta_n)/(c^*F)$$

и определяют значение среднеквадратического отклонения шероховатостей

оптической поверхности в заданных пределах пространственной частоты неоднородностей от ν_{min} до ν_{max} по выражению:

$$\gamma_{eff}^2 = \int_{\nu_{min}}^{\nu_{max}} PSD_{amp}(\nu) d\nu .$$

5

10

15

20

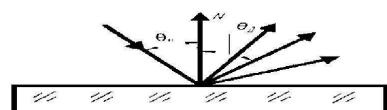
25

30

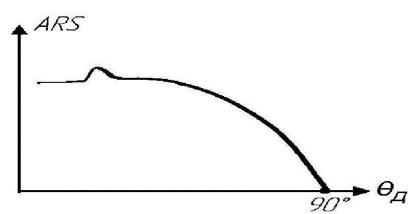
35

40

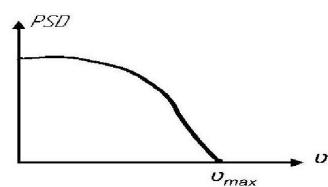
45



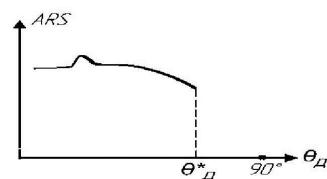
Фиг. 1



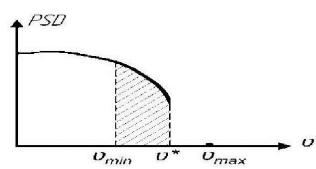
Фиг. 2



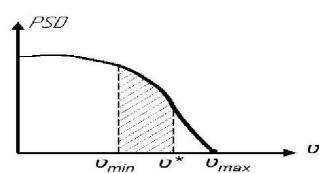
Фиг. 3



Фиг. 4

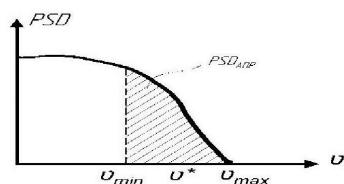


a)

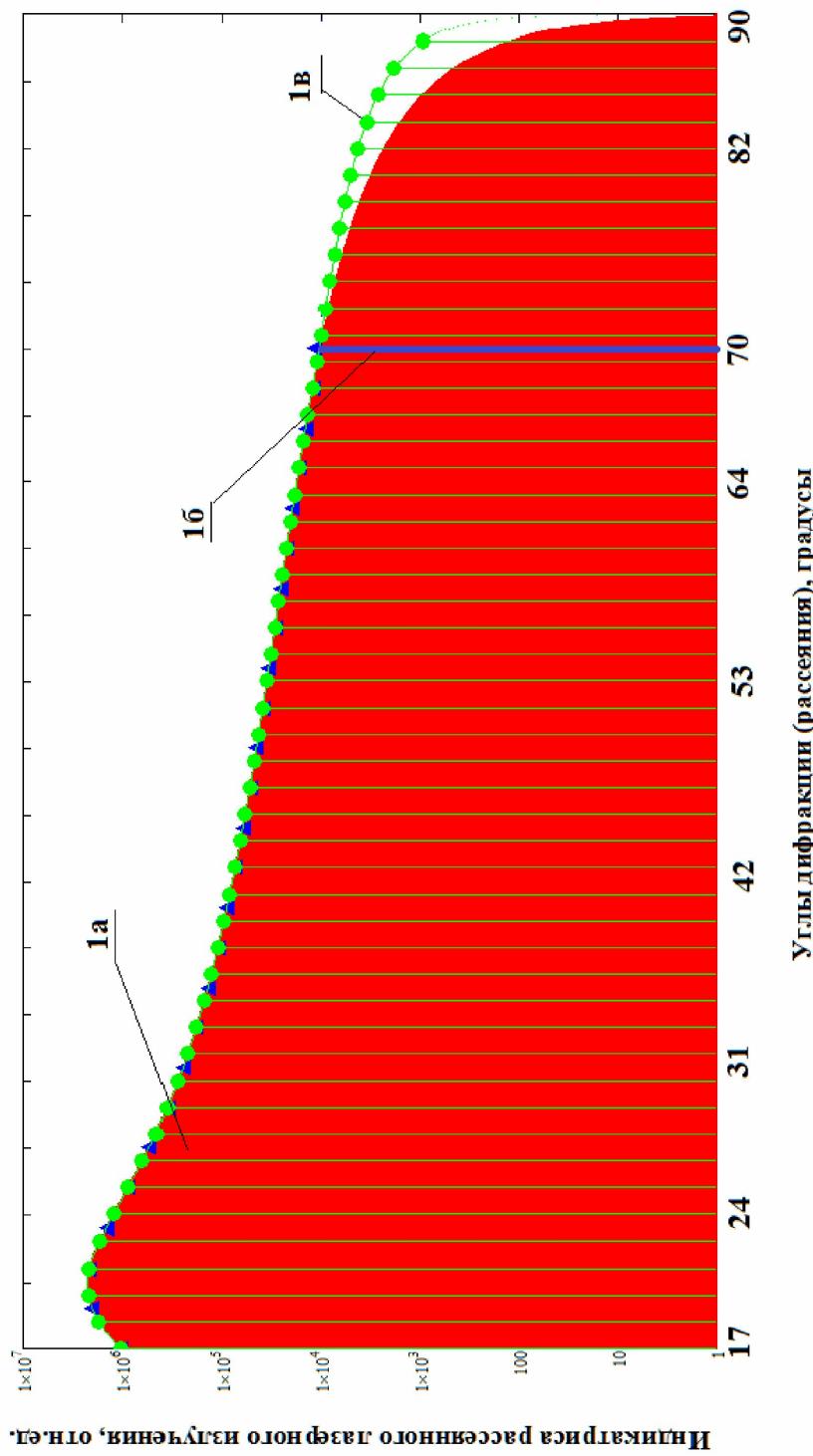


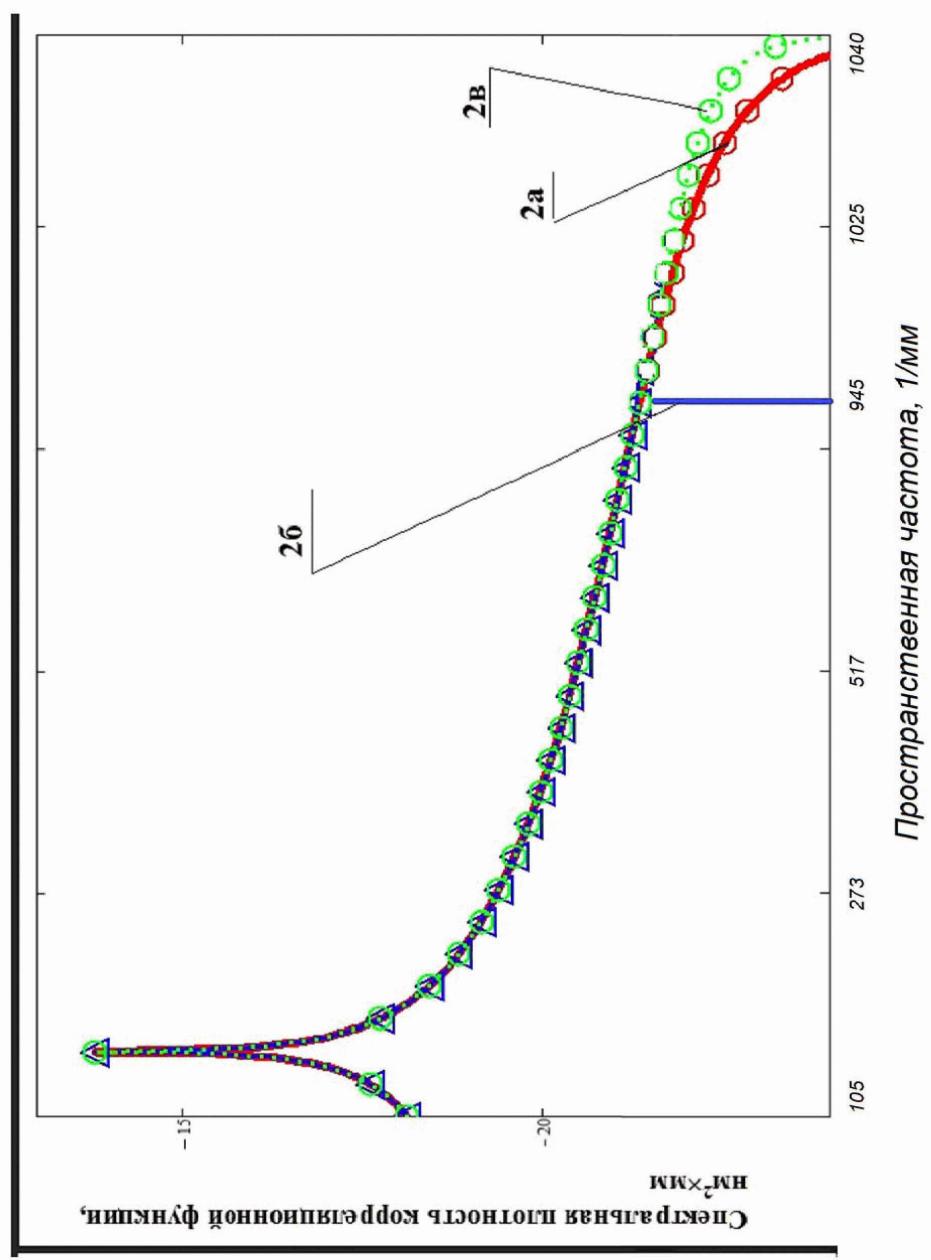
б)

Фиг. 5



Фиг. 6





Фиг. 8