

УДК 681.787

© Е. Е. Майоров, В. В. Курлов, Ю. М. Бородянский, А. В. Дагаев, И. С. Таюрская, 2024

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ УСТАНОВКИ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ МИКРОСКАНИРОВАНИЕМ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТИ

В работе рассмотрена возможность применения экспериментальной интерференционной установки с пространственным микросканированием для контроля геометрических параметров поверхности. Получение высокоточной и достоверной информации о геометрических параметрах поверхности объектов всегда являлось важной задачей метрологии, поэтому данная работа актуальна и перспективна. В работе определена цель и поставлена задача исследования. Приведены оптическая схема, режим измерений микрорельефа поверхности с помощью экспериментальной интерференционной установки, а также оптическая пленка для определения угловой амплитуды колебаний. Полученные формулы позволяют рассчитать все параметры микросканирования зондирующего пятна по поверхности объекта экспериментальной интерференционной установкой.

Кл. сл.: интерференционная установка, микрорельеф, микросканирование, диапазон измерений, точность измерений, погрешность измерений, поперечная составляющая, продольная составляющая

ВВЕДЕНИЕ

Современные методы и технические средства контроля рельефа поверхности объектов являются важнейшим инструментарием для метрологии [1, 2]. Эти методы и средства имеют большой диапазон измерений от миллиметров до метров [3, 4].

На сегодняшний день существует огромное количество приборов и комплексов контроля рельефа поверхности, которые используют методы разрушающего и неразрушающего контроля [5, 6]. Механические приборы и комплексы основаны на методах разрушающего контроля (контактные). Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы применяют методы неразрушающего контроля (бесконтактные).

Механические приборы и комплексы позволяют измерять рельеф поверхности с точностью до десятых микрометра. В свою очередь, они имеют ограничения по классу измеряемых поверхностей, а также мало пригодны для решения динамических задач. Они практически не используются для измерения поверхности объектов с малой устойчивостью к механическим воздействиям, требуют высокую виброзащиту и частую смену контактного элемента, соприкасающегося с поверхностью [7, 8].

У оптических и оптико-электронных приборов и комплексов точность измерения рельефа поверхности варьируется от 10^{-2} мкм до 10^{-6} мкм [9, 10]. Конечно же, они лишены упомянутых выше недостатков.

В настоящее время наблюдается тенденция развития интерференционных приборов и комплексов, которые в качестве источника излучения используют полупроводниковые диоды белого света, а также применяют оптические пленки для пространственного микросканирования исследуемой поверхности вместо традиционных плоскопараллельных пластинок (материал: кварцевое стекло К8) [11, 12]. Это направление в оптическом приборостроении в последние годы бурно развивается, т.к. такие приборы и комплексы получили широкое применение в медицине, экологии и в отдельных направлениях машиностроения.

Работа этих приборов основана на анализе отраженного светового излучения от исследуемого рельефа поверхности объекта [13, 14]. Анализируя научную литературу, можно выделить тот факт, что экспериментаторы в области полупроводниковой оптики исследуют полупроводниковые материалы, которые применяются в источниках излучения, где длина когерентности менее одного микрометра. А это означает, что при контроле микрорельефа поверхности появляется возможность проводить измерения с высокой точностью, превышающей традиционные методы и средства в разы. Однако, несмотря на определенные достижения в практическом применении таких приборов и комплексов, остаются вопросы теоретического характера и функционирования, включая эксплуатацию и построение этих систем [15, 16].

Поэтому представляет интерес изучение метрологических возможностей разработанной интер-

ферометрической низкокогерентной установки с пространственным сканированием микрорельефа поверхности. Данное исследование позволит по полученным экспериментальным данным изготавливать такие интерференционные приборы и комплексы, усовершенствовав конструкцию оптоэлектронной системы и выводя точностные параметры на новый уровень.

Цель работы состояла в лабораторном исследовании продольной составляющей отраженного сигнала от микрорельефа поверхности при совпадении направлений перемещения интерференционной установки и светового пятна.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Провести анализ интерференционной установки, введя вспомогательное микросканирование светового пучка между низкокогерентным источником излучения и микрообъективом, контролируя микрорельеф исследуемой поверхности. Определить параметры микросканирования предложенного варианта.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННАЯ НИЗКОКОГЕРЕНТНАЯ УСТАНОВКА

Данная установка используется для измерения микрорельефа поверхности и включает в себя источник белого света (полупроводниковый диод с длиной когерентности, равной 0.5 мкм). Работа основана на зависимости контраста интерференционной картины от разности хода интерферирующих лучей. В установке реализован способ

изменения разности хода в ветвях интерферометра посредством изменения оптической длины объектной ветви и в дальнейшем компенсацией высокоточным координатно-измерительным устройством, которое перемещается по трем координатным осям.

Основной частью экспериментальной интерференционной установки является оптико-измерительный блок, который содержит интерферометр Майкельсона. Измерения микрорельефа поверхности проводятся оптико-измерительным блоком, который устанавливается на специально сконструированном координатно-измерительном устройстве (рис. 1).

Назначение координатно-измерительного устройства в том, чтобы просканировать область исследуемого микрорельефа поверхности объекта. Исследуя каждую i -ю точку микрорельефа поверхности с координатами x_i, y_i , величину Δz_i находят при движении оптико-измерительного блока к поверхности по оси z . Итак, данные о функции поверхности $\Delta z_i = f(x_i, y_i)$ берутся с показаний координатно-измерительного устройства.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При измерениях микрорельефа поверхности необходимо учитывать не только поперечную составляющую отраженного излучения, но и продольную составляющую. При сложении когерентно рассеивающих компонент продольная структура суммарной световой волны состоит из столбовобразных тел, вытянутых вдоль направления распространения падающего излучения на поверхность.

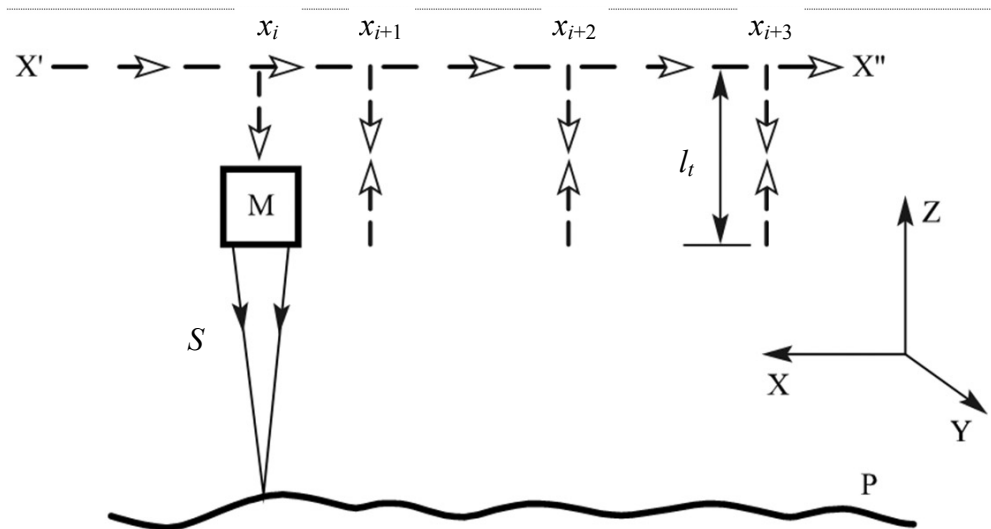


Рис. 1. Перемещение оптико-измерительного блока в режиме измерения. M — оптико-измерительный блок; P — микрорельеф поверхности; S — световой луч; $X'X''$ — траектория движения оптико-измерительного блока; x_i, \dots, x_{i+3} — точки нахождения оптико-измерительного блока на поверхности, определяемые дискретностью съема информации; l_t — расстояние, на которое смещается оптико-измерительный блок за один проход

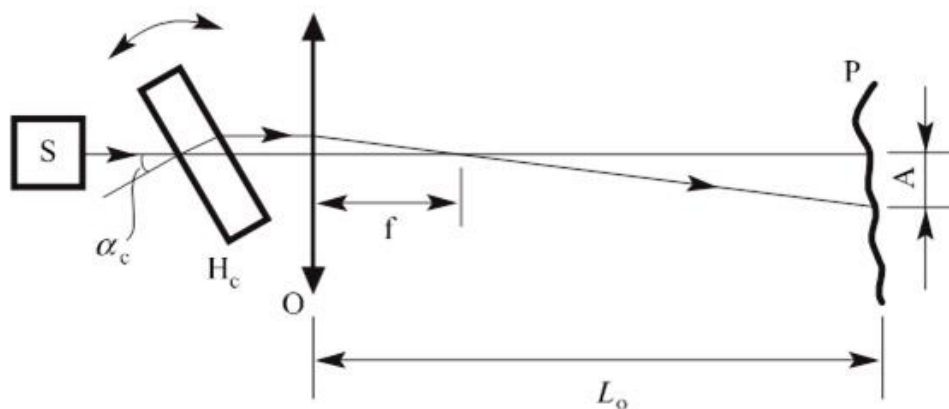


Рис. 2. Реализация способа пространственного микросканирования посредством оптической пленки.

S — источник излучения; α_c — амплитуда колебаний пленки; H_c — пленка; O — микрообъектив; f — фокусное расстояние микрообъектива; P — микрорельеф поверхности; L_o — расстояние от микрообъектива до изучаемой поверхности; A — амплитуда микросканирования

Продольный размер столбообразного тела b_l определяется следующей формулой [17]:

$$b_l = 4\lambda L^2 / d^2,$$

где λ — длина волны излучения, L — расстояние от освещенной поверхности до плоскости наблюдения, d — линейный размер освещенной области поверхности.

Отношение b_l/b_s определяется как

$$b_l / b_s = L / 0.3d,$$

где b_s — поперечный размер столбообразного тела.

В эксперименте $L = 100$ мм, а $d = 30$ мкм, значит $b_l / b_s = 10^4$. Если соблюдать равенство скоростей оптико-измерительного блока в продольном и поперечном направлениях, то изменения контрастной картины практически не будет, поэтому экспериментатор не сможет провести серию независимых измерений.

Поэтому в данной конструкции экспериментальной интерференционной установки было реализовано пространственное микросканирование микрорельефа поверхности объекта. Между микрообъективом, формирующим зондирующий пучок, и источником света была введена оптическая пленка, которая совершала угловые колебания (рис. 2). Амплитуду сканирования, дискретность отсчетов выбирали таким образом, чтобы контраст интерференционной картины у поперечной и продольной составляющих был отличен друг от друга.

Время перемещения оптико-измерительного блока равно

$$\tau = l / v,$$

где l — диапазон измерений интерференционной установки, v — скорость оптико-измерительного блока.

В эксперименте время τ совпадало с периодом пространственного микросканирования. Тогда частота микросканирования будет

$$f_m = 1 / \tau.$$

В работе полупериоды движения оптической пленки в положительном и отрицательном направлениях в процессе контроля поверхности были равны. Это условие позволило удерживать центр тяжести комбинированного пятна на поверхности в одной точке, не давая пятну смещаться. Если τ_1 — время одного измерения, то

$$\tau / 2 = m \tau_1,$$

где m — число измерений за один полупериод.

Тогда частота модуляции в опорной ветви интерферометра равна

$$f_{оп} = 1 / \tau_1 = 2mv / l.$$

Для определения угловой амплитуды этих колебаний воспользуемся рис. 3.

В результате проведенных расчетов получим следующее выражение, связывающее амплитуду микросканирования, амплитуду угловых колебаний и толщину оптической пленки:

$$A = \frac{(L_o - f) \Delta_c}{f}.$$

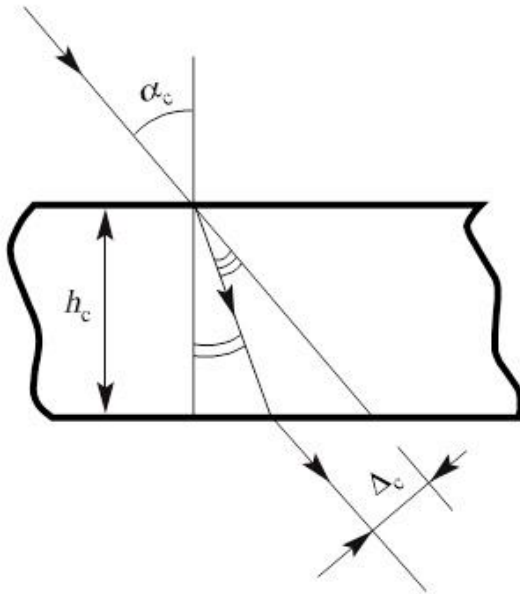


Рис. 3. К расчету параметров микросканирования. h_c — толщина оптической пленки; α_c — амплитуда колебаний пленки; Δ_c — амплитуда колебаний на микрообъективе

Далее

$$A = \frac{(L_o - f)h_c}{f \cos \frac{\sin \alpha_c}{n_p}} \sin \left[\alpha_c - \arcsin \frac{\sin \alpha_c}{n_p} \right],$$

где A — амплитуда микросканирования, h_c — толщина оптической пленки, α_c — амплитуда колебаний пленки, n_p — показатель преломления материала пленки.

В эксперименте: $L_o = 120$ мм, $v = 50$ мм/с, $l = 100$ мкм, $m = 3$, $n_p = 1.5$, $f = 15$ мм, $h_c = 0.5$ мм, $A = 10$ мкм. Тогда из приведенных выше формул были получены: $f_m = 500$ Гц, $f_{оп} = 3$ кГц, $\alpha_c = 0.01$ рад.

Таким образом, полученные формулы позволяют рассчитать все параметры микросканирования зондирующего пятна по поверхности объекта экспериментальной интерференционной установкой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В оптическом приборостроении огромное внимание уделяется современным разработкам и схемным решениям, которые направлены на увеличение диапазона измерений, повышение точности измерений и простоту эксплуатации оптических и оптико-электронных приборов и комплексов.

В работе показан способ измерения микрорельефа поверхности исследуемого объекта при малом смещении поперечной составляющей отраженного светового сигнала в объектной ветви интерферометра. Приведена оптическая схема с оптической пленкой экспериментальной интерференционной установки с пространственным микросканированием светового луча по микрорельефу поверхности. Сформулированы требования к элементам и параметрам микросканирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 855 с.
2. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. М.: Машиностроение, 1987. 264 с.
3. Франсон М., Сланский С. Когерентность в оптике / пер. с франц. под ред. К.С. Шифрина. М.: Наука, 1967. 80 с.
4. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976. 926 с.
5. Малакара Д. Оптический производственный контроль / пер. с англ. под ред. А.Н. Соснова. М.: Машиностроение, 1985. 340 с.
6. Афанасьев В.А. Оптические измерения. М.: Недра, 1968. 263 с.
7. Коломийцев Ю.В. Интерферометры. Л.: Машиностроение, 1976. 296 с.
8. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М., 1981. 640 с.
9. Майоров Е.Е., Федоренко А.Г., Чабаненко А.В., Хохлова М.В., Гулиев Р.Б., Дагаев А.В. Исследование геометрии освещения в двухлучевых интерферометрах // Известия тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 8. С. 75-80. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49521599>
10. Майоров Е.Е. Исследование выходного интерференционного сигнала в фазоизмерительной системе // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Четвертая Всероссийская научная конференция (СПб., 18–22 апреля 2023 г.). Сб. докл. СПб.: ГУАП, 2023. С. 56–60. URL: <https://elibrary.ru/itzldp>
11. Майоров Е.Е., Пушкина В.П., Арефьев А.В., Бородянский Ю.М., Дагаев А.В., Гулиев Р.Б. Математическое моделирование интерференционного сигнала на выходе интерферометра для оценки погрешности измерений // Известия тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 12. С. 230–234. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50128366>
12. Майоров Е.Е. К вопросу о погрешности измерений в сдвиговой интерферометрии // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Четвертая Всероссийская научная конференция (СПб., 18–22 апреля 2023 г.). Сб. докл. СПб.: ГУАП, 2023. С. 61–64. URL: <https://elibrary.ru/itzldp>
13. Майоров Е.Е. Исследование сложных форм поверхностей когерентно ограниченной во времени системой //

Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Четвертая Всероссийская научная конференция (СПб., 18–22 апреля 2023 г.). Сб. докл. СПб.: ГУАП, 2023. С. 65–68. URL: <https://elibrary.ru/itzldp>

14. *Арефьев А.В., Коцкович В.Б., Майоров Е.Е., Пузикова В.П., Сорокин А.А., Удахина С.В.* Исследование разработанного интерференционного зонда для измерения неровностей реальных поверхностей // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2022. № 2. С. 1–6. DOI: 10.25791/pribor.2.2022.1319
15. *Бородянский Ю.М., Майоров Е.Е., Петрова Е.А., Попова Е.В., Курлов В.В., Удахина С.В.* Измерение геометрических параметров поверхностей сложной формы низкокогерентной оптической системой // Приборы. 2022. № 5 (263). С. 3–7. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48969218>
16. *Хохлова М.В., Дагаев А.В., Майоров Е.Е., Арефьев А.В., Гулиев Р.Б., Громов О.В.* Интерференционная система измерения геометрических параметров отражающих поверхностей // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 6 (108). С. 184–189. DOI: 10.23670/IRJ.2021.108.6.029
17. *Франсон М.* Оптика спеклов / пер. с франц. под ред. проф. Ю.И. Островского. М.: Мир, 1980. 171 с.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП), Санкт-Петербург (Майоров Е.Е., Курлов В.В.)

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург (Бородянский Ю.М.)

Ивангородский гуманитарно-технический институт (филиал ГУАП), г. Ивангород (Дагаев А.В.)

Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики, Санкт-Петербург (Тяюрская И.С.)

Контакты: *Майоров Евгений Евгеньевич, majorov_ee@mail.ru*

Материал поступил в редакцию 18.09.2023

INVESTIGATION OF AN EXPERIMENTAL INTERFERENCE INSTALLATION WITH SPATIAL MICROSCANNING TO CONTROL THE GEOMETRIC PARAMETERS OF THE SURFACE

E. E. Maiorov¹, V. V. Kurlov¹, Y. M. Borodyansky², A. V. Dagaev³, I. S. Tayurskaya⁴

¹*Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (GUAP), Saint Petersburg, Russia*

²*The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, Saint Petersburg, Russia*

³*Ivangorodskii Humanitarian-Technical Institute*

(branch of Saint Petersburg University of Aerospace Instrumentation), Ivangorod, Russia

⁴*Saint Petersburg University of Management Technologies and Economics, Saint Petersburg, Russia*

The paper highlights the possibility of using an experimental interference setup with spatial microscanning to control the geometric parameters of the surface. Obtaining high-precision and reliable information about the geometric parameters of the surface of objects has always been an important task of metrology, so this work is relevant and promising. The paper defines the purpose and sets the task of the study. An optical scheme, a mode of measuring the surface microrelief using an experimental interference device, as well as the optical film for determining the angular amplitude of vibrations are presented. The formulas make it possible to calculate all the parameters of the micro-scanning of the probing spot on the surface of the object with an experimental interference installation.

Keywords: interference installation, microrelief, microscanning, measurement range, measurement accuracy, measurement error, transverse component, longitudinal component

REFERENCES

1. Born M., Wolf E. *Principles of Optics*. 1st ed. Pergamon Press, 1959. 852 p. (Russ. ed.: Born M., Vol'f Eh. *Osnovy optiki*. Translate S.N. Breusa, A.I. Golovashkina, A.A. Shubina, eds. G.P. Motulevich. Moscow, Nauka Publ., 1970. 855 p.).
2. Kreopalova G.V., Lazareva N.L., Puryaev D.T. *Opticheskie izmereniya* [Optical measurements]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 264 p. (In Russ.).
3. Franson M., Slanski S. *Kogerentnost' v optike* [Coherence in optics]. K.S. Shifrin, ed. Moscow, Nauka Publ., 1967. 80 p. (In Russ.).
4. Landsberg G.S. *Optika* [Optics]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 926 p. (In Russ.).
5. Malakara D. *Opticheskii proizvodstvennyi kontrol'* [Optical production control]. A.N. Sosnov, ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 340 p. (In Russ.).
6. Afanas'ev V.A. *Opticheskie izmereniya* [Optical measurements]. Moscow, Nedra Publ., 1968. 263 p. (In Russ.).
7. Kolomiitsev Yu.V. *Interferometriya* [Interferometers]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1976. 296 p. (In Russ.).
8. Akhmanov S.A., D'yakov Yu.E., Chirkin A.S. *Vvedenie v statisticheskuyu radiofiziku i optiku* [Introduction to statistical radiophysics and optics]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 640 p. (In Russ.).
9. Maiorov E.E., Fedorenko A.G., Chabanenko A.V., Khokhlova M.V., Guliyev R.B., Dagaev A.V. [Investigation of the geometry of illumination in two-beam interferometers]. *Izvestiya tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of Tula State University. Technical sciences], 2020, no. 8, pp. 179–189. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49521599>
10. Maiorov E.E. [Investigation of the interference output signal in the phase measurement system]. *Sbornik dokladov 4 Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii "Modelirovanie i situatsionnoe upravlenie kachestvom slozhnykh sistem"* [Proc. 4 All-Russ. conf. "Modelling and situational quality management of complex systems"], Saint Petersburg, GUAP, 2023, pp. 56–60. URL: <https://elibrary.ru/itldp> (In Russ.).
11. Maiorov E.E., Pushkina V.P., Arefiev A.V., Dagaev A.V., Borodyansky Yu.M., Guliyev R.B. [Determination of the optical signal at the output of the photodetector system by direct integration *Izvestiya tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of Tula State University. Technical sciences], 2022, no. 12, pp. 230–234. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50128366>
12. Maiorov E.E. [On the issue of measurement error in shear interferometry]. *Sbornik dokladov 4 Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii "Modelirovanie i situatsionnoe upravlenie kachestvom slozhnykh sistem"* [Proc. 4 All-Russ. conf. "Modelling and situational quality management of complex systems"], Saint Petersburg, GUAP, 2023, pp. 61–64. URL: <https://elibrary.ru/itldp> (In Russ.).
13. Maiorov E.E. [Investigation of complex shapes of surfaces by a coherent time-limited system]. *Sbornik dokladov 4 Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii "Modelirovanie i situatsionnoe upravlenie kachestvom slozhnykh sistem"* [Proc. 4 All-Russ. conf. "Modelling and situational quality management of complex systems"], Saint Petersburg, GUAP, 2023, pp. 65–68. URL: <https://elibrary.ru/itldp> (In Russ.).

14. Arefiev A.V., Koskovich V.B., Maiorov E.E., Pushkina V.P., Sorokin A.A., Udakhina S.V. [Investigation of the developed interference probe for measuring the irregularities of real surfaces]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics], 2022, no. 2, pp. 1–6. (In Russ.). DOI: 10.25791/pribor.2.2022.1319
15. Borodyanskii Yu.M., Maiorov E.E., Petrova E.A., Popova E.V., Kurlov V.V., Udakhina S.V. [Measurement of geometrical parameters of complex shaped surfaces by low-coherent optical system]. *Pribory* [Instruments], 2022, no. 5 (263), pp. 3–7. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48969218>
16. Khokhlova M.V., Dagaev A.V., Maiorov E.E., Arefiev A.V., Guliev R.B., Gromov V.O. [Interference system for measuring the geometric parameters of reflecting surfaces]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal* [International research journal], 2021, no. 6 (108), pp. 184–189. DOI: 10.23670/IRJ.2021.108.6.029 (In Russ.).
17. Franson M. *Optika speklov* [Speckle optics]. Translate from French. Yu.I. Ostrovskii, ed. Moscow, Mir Publ., 1980. 171 p. (In Russ.).

Contacts: *Maiorov Evgeniy Evgen'evich*,
majorov_ee@mail.ru

Article received by the editorial office on 18.09.2023

INTRODUCTION

Modern methods and technical means of monitoring the surface relief of objects are the most important tools for metrology [1, 2]. These methods have a wide measurement range, from millimeters to meters [3, 4].

Today, there are a huge number of devices and complexes for monitoring surface topography that use destructive and non-destructive testing methods [5, 6]. Mechanical devices and complexes are based on destructive (contact) testing methods. Optical and optical-electronic devices and complexes use non-destructive (non-contact) testing methods.

Mechanical devices and complexes make it possible to measure surface topography with accuracy up to tenths of a micrometer. In turn, they have restrictions on the class of measured surfaces and are also of little use for solving dynamic problems. They are practically not used to measure the surface of objects with low resistance to mechanical influences, they require high vibration protection and frequent changes of the element in contact with the surface [7, 8].

For optical and optoelectronic devices and complexes, the accuracy of measuring surface relief varies from 10^{-2} μm to 10^{-6} μm [9, 10]. Of course, they are free from the disadvantages mentioned above.

Currently, there is a tendency to develop interference devices and complexes that use semiconductor white light diodes as a radiation source and also to apply optical films for spatial microscanning of the surface under study instead of traditional plane-parallel plates (material: quartz glass K8) [11, 12]. This direction in optical instrument making has been rapidly developing in recent years because such devices and complexes are widely used in medicine, ecology, and some areas of mechanical engineering.

The operation of these devices is based on the analysis of the reflection of light emission from the studied surface relief of the object [13, 14]. Analyzing the scientific literature, we can highlight the fact that experimenters in the field of semiconductor optics are studying semiconductor materials that are used in radiation sources where the coherence length is less than one micrometer. This means that when monitoring the surface microrelief, it becomes possible to carry out measurements with high accuracy, exceeding traditional methods and means.

However, despite certain achievements in the practical application of such devices and complexes, questions of a theoretical nature remain, including the operation and construction of these systems [15, 16].

Therefore, it is of interest to study the metrological capabilities of the developed interferometric low-coherence setup with spatial scanning of surface microrelief. Based on the experimental data obtained, this research allows us to manufacture such interference devices and complexes, improving the design of

the optoelectronic system and bringing precision parameters to a new level.

The purpose of the work was a laboratory study of the longitudinal component of the reflected signal from the surface microrelief when the directions of movement of the interference setup and the light spot coincide.

PURPOSE FORMULATION

Conduct an analysis of the interference setup by introducing auxiliary microscanning of the light beam between a low-coherence emission source and a microlens, controlling the microrelief of the surface under study. Determine the microscanning parameters of the proposed option.

EXPERIMENTAL INTERFERENCE LOW-COHERENCE SETUP

This setup is used to measure surface microrelief and includes a white light source (semiconductor diode with a coherence length of 0.5 μm). The work is based on the dependence of the contrast of the interference pattern on the difference in the path of the interfering rays. The setup implements a method for changing the path difference by changing the optical length of the object branch in the interferometer branches and subsequently compensating with a high-precision coordinate measuring device that moves along three coordinate axes.

The main part of the experimental interference setup is the optical-measuring unit, which contains a Michelson interferometer. Surface microrelief measurements are carried out with an optical measuring unit, which is installed on a specially designed coordinate-measuring device (Fig. 1).

Fig. 1. Moving the optical measuring unit in measurement mode.

M — optical measuring unit; P — surface microrelief; S — light beam; X'X'' — trajectory of movement of the optical-measuring unit;

x_i, \dots, x_{i+3} — points of location of the optical-measuring unit on the surface; points are determined by the discreteness of information collection; l_i is the distance by which the optical-measuring unit moves in one pass

The purpose of the coordinate-measuring device is to scan the area of the studied microrelief on the surface of the object. By examining each i -th point of the surface microrelief with coordinates x_i, y_i , the value Δz_i is found when the optical-measuring unit moves towards the surface along the z axis. So the data about

the surface function $\Delta z_i = f(x_i, y_i)$ are taken from the readings of the coordinate measuring device.

EXPERIMENTAL RESULTS

When measuring surface microrelief, it is necessary to take into account not only the transverse component of the reflected emission but also the longitudinal component. When adding coherently-scattering components, the longitudinal structure of the total light wave consists of columnar bodies elongated along the direction of propagation of incident radiation onto the surface.

The longitudinal size of the columnar body b_l is determined by the following formula [17]:

$$b_l = 4\lambda L^2 / d^2,$$

where λ is the emission wavelength, L is the distance from the illuminated surface to the observation plane, d is the linear size of the illuminated area of the surface.

The b_l/b_s ratio is defined as

$$b_l / b_s = L / 0.3d,$$

where b_s is the transverse size of the columnar body.

In the experiment, $L = 100$ mm, and $d = 30$ μm , which means $b_l / b_s = 10^4$. If we maintain the equality of the speeds of the optical-measuring unit in the longitudinal and transverse directions, then there will be practically no change in the contrast pattern, therefore, the experimenter will not be able to carry out a series of independent measurements.

Therefore, in this design of the experimental interference setup, a spatial microscanning of the microrelief of the object's surface was implemented. An optical film was introduced between the microlens, which forms the probing beam, and the light source, and this film performed angular oscillations (Fig. 2). The scanning amplitude and sampling discreteness were chosen in such a way that the contrast of the interference pattern of the transverse and longitudinal components was different from each other.

Fig. 2. Implementation of the spatial microscanning method using optical film.

S—emission source; α_c is the amplitude of film vibrations; H_c — film; O — microlens; f — the focal length of the microlens; P—surface microrelief; L_o is the distance from the microlens to the surface under study; A — microscanning amplitude

The moving time of the optical-measuring unit is

$$\tau = l / v,$$

where l is the measurement range of the interference setup, v is the speed of the optical measuring unit.

In the experiment, time τ coincided with the period of spatial microscanning. Then the microscanning frequency will be

$$f_M = 1 / \tau.$$

In the work, the half-periods of movement of the optical film in the positive and negative directions during surface testing were equal. This condition made it possible to keep the center of gravity of the combined spot on the surface at one point, preventing the spot from moving. If τ_1 is the time of one measurement, then

$$\tau / 2 = m \tau_1,$$

where m is the number of measurements per half-cycle.

Then the modulation frequency in the reference branch of the interferometer is equal to

$$f_{\text{on}} = 1 / \tau_1 = 2mv / l.$$

To determine the angular amplitude of these oscillations, we will use Fig. 3.

Fig. 3. For the calculation of microscanning parameters.

h_c — the thickness of the optical film; α_c — the amplitude of film vibrations; Δ_c — amplitude of oscillations on a microlens

As a result of the calculations, we obtain the following expression relating the microscanning amplitude, the amplitude of angular vibrations, and the thickness of the optical film:

$$A = \frac{(L_o - f)\Delta_c}{f}.$$

Further

$$A = \frac{(L_o - f)h_c}{f \cos \frac{\sin \alpha_c}{n_p}} \sin \left[\alpha_c - \arcsin \frac{\sin \alpha_c}{n_p} \right],$$

where A is the microscanning amplitude, h_c is the thickness of the optical film, α_c is the amplitude of film vibrations, n_p is the refractive index of the film material.

In the experiment: $L_o = 120$ mm, $v = 50$ mm/s, $l = 100$ μm , $m = 3$, $n_p = 1.5$, $f = 15$ mm, $h_c = 0.5$ mm, $A = 10$ μm . Then, from the above formulas, we obtained: $f_M = 500$ Hz, $f_{\text{on}} = 3$ kHz, $\alpha_c = 0.01$ rad.

Thus, the obtained formulas make it possible to calculate all the parameters of microscanning of

a probing spot over the surface of an object using an experimental interference setup.

CONCLUSION

In optical instrumentation, great attention is paid to modern developments and circuit solutions that are aimed at increasing the measurement range, measurement accuracy and ease of operation of optical and optical-electronic devices and complexes.

The work shows a method for measuring the microrelief of the surface of the object under study with a small displacement of the transverse component of the reflected light signal in the object branch of the interferometer. An optical scheme with an optical film of an experimental interference setup with spatial microscanning of a light beam along the micro-relief of the surface is presented. Requirements for elements and microscanning parameters are formulated.