

УДК 681.7

© Е. Е. Майоров, В. П. Пушкина, Р. Б. Гулиев, А. В. Дагаев, 2025

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ УСТАНОВКИ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ ИСТОЧНИК БЕЛОГО СВЕТА ДЛЯ КОНТРОЛЯ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ

Исследование освещает проблему метрологии негладких поверхностей и выявление технических характеристик разработанной интерферометрической установки, где в качестве источника излучения применялся диод белого света. Получение высокоточной информации о геометрии оптической либо негладкой поверхности является значимой проблемой для метрологического обеспечения, и интерференционные приборы и комплексы, использующие источники света, которые заглубляют лазерный режим, способны обеспечить исследователя такой информацией. В работе исследованы метрологические параметры экспериментальной установки: диапазон, погрешность измерений, амплитуду интерференционного сигнала. Полученные экспериментальные результаты представлены в виде технических характеристик.

Ключевые слова: длина световой волны, контраст интерференционного поля, длина когерентности, погрешность измерений, диапазон измерений, амплитуда интерференционного сигнала, диаметр светового пятна

ВВЕДЕНИЕ

Выявление высокоточной информации о геометрии оптической либо негладкой поверхности является значимой проблемой для метрологического обеспечения [1–5]. Развитие электронной промышленности, электротехнических, компьютерных технологий позволило вывести на новый уровень измерения оптико-информационных систем и технологий [6]. Появилась возможность проводить измерения в режиме реального времени, где производительность выросла в разы, при решении сложных задач усовершенствовалась динамика измерений [7].

Оптические методы измерений микрорельефа поверхности делятся на высококогерентные, когерентно-ограниченные и методы геометрической оптики, где когерентность практически отсутствует. В основе этих методов лежит такое физическое явление, как отражение световой волны от поверхности исследуемых объектов или сред [8].

Исследователи отмечают, что среди оптических методов измерений микрорельефа поверхности наиболее универсальными являются интерферометрические, в которых используют источники излучения с малой длиной когерентности [9]. На сегодняшний день в оптическом приборостроении огромное внимание уделяется характеристикам источников излучения, в частности светодиодам белого света. Из научной литературы известно, что длина когерентности этих излучате-

лей находится в диапазоне от 1 мкм до 5 мкм [10]. Точность измерений интерференционных приборов и комплексов контроля поверхности, которые используют когерентно-ограниченные излучатели (суперлюминесцентные, белого света и другие полупроводниковые светодиоды) зависит от длины когерентности источника [11]. Поэтому разработчики этой аппаратуры проявляют повышенный интерес к развитию оптико-электронной базы излучателей.

Несмотря на определенные достижения в практическом применении интерферометров с источниками с малой длиной когерентности, их исследования функциональных возможностей, схемных решений явно недостаточны [12].

Поэтому представляет интерес получение информации метрологического характера, связанной с исследованием интерференционной установки, в которой реализован светодиод белого света.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы явилось исследование факторов ограничения точности измерений в интерференционной установке с излучателем малой длины когерентности для контроля сложной формы поверхности.

Исследовать метрологические параметры экспериментальной установки: диапазон, погрешность измерений, амплитуду интерференционного

сигнала. Полученные экспериментальные результаты свести в таблицу.

МАТЕРИАЛ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Измерения проводились с помощью плоскопараллельной стеклянной пластины с аттестованной поверхностью шестого класса шероховатости ($R_a = 1.6$ мкм). В эксперименте использовались стеклянные плоскопараллельные пластины разной толщины 1, 2 и 3 мм для изменения диаметра светового пятна на поверхности.

В работе предложено рассмотреть экспериментальную интерференционную установку с источником белого света с длиной волны излучения $\lambda = 525$ нм и длиной когерентности $l_c = 2$ мкм для контроля микрорельефа поверхности сложной формы. В качестве источника излучения используется светодиод белого света на основе гетерост-

руктуры InGaN/AlGaIn с активным слоем InGaIn, легированным Zn, и нанесенным на него слоем желтого люминофора. Оптическая схема экспериментальной измерительной установки приведена на рис. 1.

В установке основной измерительный блок построен по классической схеме Майкельсона, где в опорную ветвь установлен объект с аттестованной поверхностью. Волновые фронты, отраженные от плоскости зеркала R и плоскости поверхности испытуемого объекта R' проецируются в фотокамеру Nikon. Источник излучения S находится на равном расстоянии от плоскостей R и R'.

В процессе исследования изменялось расстояние в опорной ветви за счет перемещения зеркала R, которое приводилось в движение специально сконструированным пружинным механизмом, колебания которого осуществлялись электромагнитом.

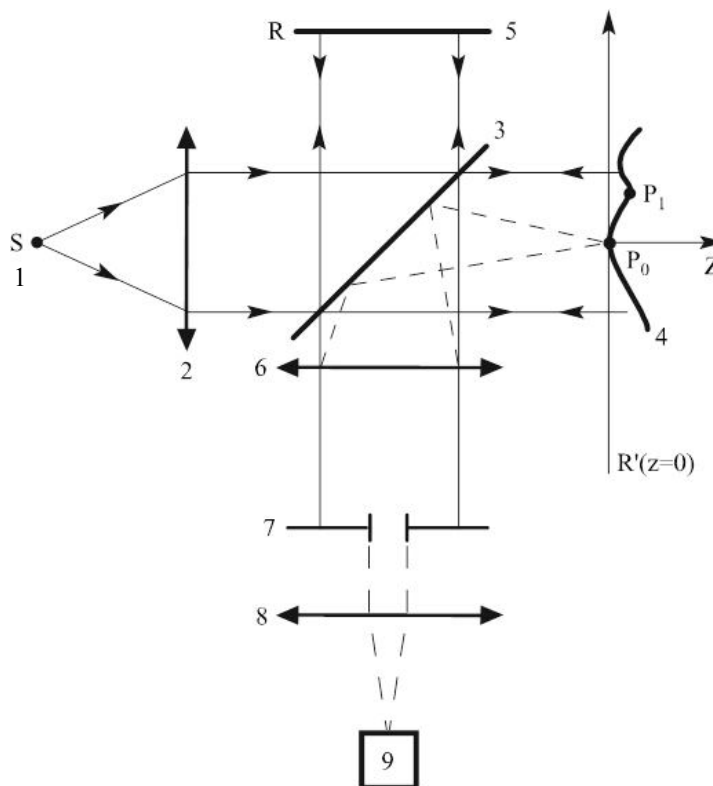


Рис. 1. Оптическая схема экспериментальной измерительной установки.

S (1) — светодиод белого света; (2) — коллиматорный объектив; (3) — светоделитель; (4) — поверхность стеклянной плоскопараллельной пластины (объект); R (5) — зеркало в опорной ветви; R' — плоскость поверхности объекта; (6) — объектив осветительной системы; (7) — точечная диафрагма; (8) — объектив регистрации интерференционного поля; (9) — фотокамера Nikon

Равенство расстояний в ветвях соответствовало максимальному контрасту интерференции и максимальному значению на фотокамере 9. Началом отсчета служила дополнительная оптическая пластина, прикрепленная к испытываемому образцу, поверхность которой формировала опорный сигнал, отраженный от этой поверхности. В данной установке амплитуду интерференционного сигнала определял диаметр светового пятна на поверхности. Для того, чтобы световое пятно не изменялось в процессе измерений, пространственное положение источника излучения S приводилось в движение с частотой перемещения опорного зеркала R , причем соотношение амплитуд источника и зеркала было $1 : 50$. Фокусное расстояние собирающей линзы (8) ($f = 12.5$ мм) и расстояние до поверхности объекта (4) являлись основанием этого соотношения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В экспериментальной интерферометрической установке при измерении негладкой поверхности сложной формы диапазон измерений формы определяется пределами смещения опорного зеркала в опорной ветви измерений интерферометра Майкельсона. В процессе исследования при равенстве расстояний в ветвях интерферометра обеспечивается необходимая величина амплитуды интерференционного сигнала. Изменение амплитуды при разных расстояниях от выходного зрачка установки до контролируемой поверхности и определяло пределы диапазона измеряемых величин. Когда опорное зеркало находилось в неподвижном состоянии наблюдался максимальный контраст интерференционной картины, что соответствовало начальному расстоянию (исходная точка). Расстояние составляло 100 мм. Амплитуда интерференционного сигнала регистрировалась при пере-

мещении стеклянной плоскопараллельной пластины с аттестованной поверхностью вдоль направления распространения светового излучения в одну и другую сторону от исходной точки. Опорное зеркало работало при частоте модуляции $f_m = 44$ Гц. Результаты измерений представлены на рис. 2, а.

Из рис. 2, а, видно, что диапазон измерений экспериментальной измерительной установки составляет от 0 до 7.8 мм.

Важной характеристикой является зависимость диапазона измерений от резонансной частоты модулятора f_p . Модулятор возбуждается переменным током с частотой модуляции f_m . Перемещения опорного зеркала осуществляются с частотой $f_m = f_p$. На рис. 2, б, приведена зависимость $\Delta z(f_p)$. Итак, при увеличении f_p растет частота измерений, но при этом наблюдается падение амплитуды интерференционного сигнала, вследствие чего уменьшается диапазон измерений. Полученная зависимость позволяет выбрать оптимальное соотношение между этими параметрами для определенной задачи.

Для высококогерентных или низкокогерентных интерференционных приборов и комплексов амплитуда интерференционного сигнала всегда являлась значимой характеристикой, которая дает возможность полезному сигналу преобладать над уровнем шумов. Выявление данных об изменениях амплитуды интерференционного сигнала при перемещении опорного зеркала позволяет показать влияние побочных явлений (изменение спеклов) на точность измерений. Регистрировалась амплитуда интерференционного сигнала при перемещении поверхности относительно светового излучения в продольном направлении OZ .

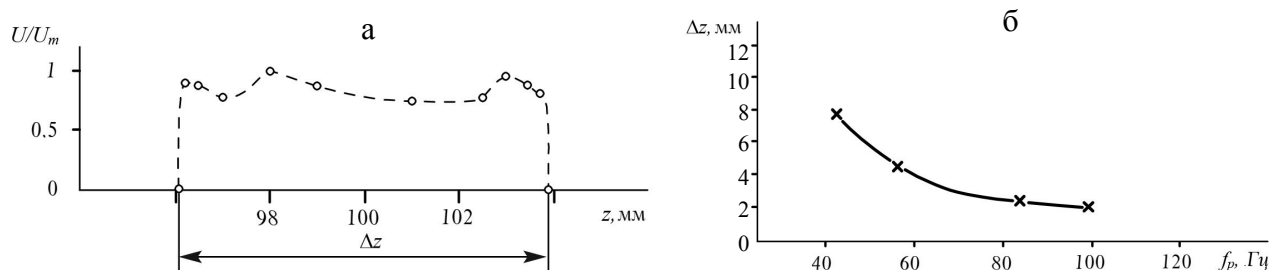


Рис. 2. Экспериментальное исследование диапазона измерений.

а — изменение амплитуды сигнала при изменении расстояния до объекта от начальной точки $z = 100$ мм при $f_m = 44$ Гц; б — зависимость диапазона измерений от резонансной частоты модулятора f_p ($f_m = f_p$)

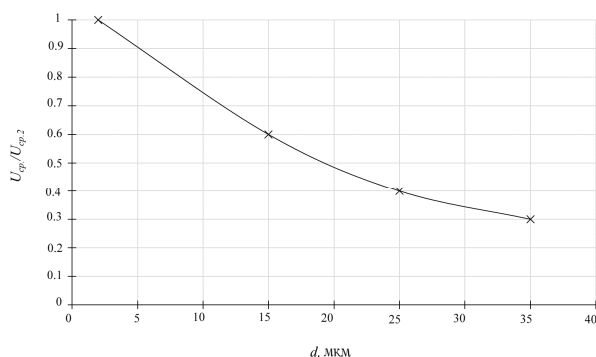


Рис. 3. Зависимость усредненной амплитуды от диаметра светового пятна на поверхности.

$U_{ср,2}$ — амплитуда сигнала при $d = 2$ мкм

В качестве объекта использовалась плоскопараллельная стеклянная пластина шестого класса шероховатости ($R_a = 1.6$ мкм). Объект устанавливался на подвижной платформе микрометрического столика. Контролировалась поверхность разным диаметром светового пятна, который изменялся посредством введения стеклянных плоскопараллельных пластин различной толщины между выходным зрачком установки и измеряемой поверхностью.

В эксперименте диаметры светового пятна составляли 15, 25, 35 мкм соответственно толщинам пластин 1, 1.25, 1.5 мм. На рис. 3 показана зависимость усредненной амплитуды $U_{ср}$ интерференционного сигнала от диаметра светового пятна на поверхности, нормированная величиной при минимальном диаметре $U_{ср,2}$ ($d = 2$ мкм).

Важным параметром экспериментальной установки является точность измерений. В работе фиксировались данные расстояния до стеклянной плоскопараллельной пластины, причем пластина ориентировалась относительно светового пятна под разными углами $\theta = 0^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$. Платину перемещали на платформе микрометрического столика в поперечном направлении (вдоль оси OX) с шагом 25 мкм, и для каждого угла проводилось 20 измерений. Экспериментальные данные представлены в Приложении на рис. П. Графическая зависимость среднего квадратического отклонения результатов измерений от угла наклона плоскопараллельной пластины приведены на рис. 4.

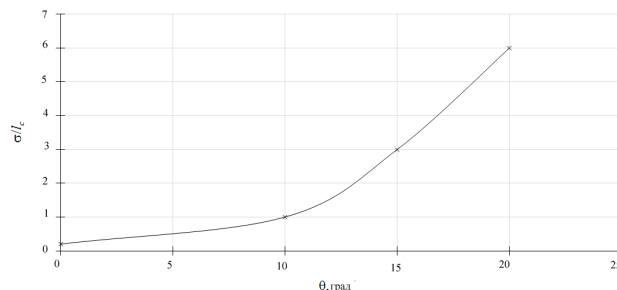


Рис. 4. Зависимость среднеекватического отклонения от угла ориентации пластины относительно светового луча.

Экспериментальное исследование интерференционной установки, использующей источник белого света для контроля микрорельефа поверхности показало, что данная установка позволяет производить контроль поверхности при следующих технических характеристиках:

- длина волны излучения — 525 нм;
- погрешность измерений
 $\sigma = 0.2 l_c$ — для $\theta = 0^\circ$,
 $\sigma = 1 l_c$ — для $\theta = 10^\circ$,
 $\sigma = 3 l_c$ — для $\theta = 15^\circ$,
 $\sigma = 6 l_c$ — для $\theta = 20^\circ$;
- диапазон измерений — 0–7.8 мм;
- частота измерений — 88 Гц;
- расстояние от оптического зрачка до поверхности — 100 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально исследованы диапазон измерений и частота перемещения опорного зеркала, которая определяет скорость измерений. Выявлено, что при увеличении f_p растет частота измерений, но при этом наблюдается падение амплитуды интерференционного сигнала, вследствие чего уменьшается диапазон измерений. Получены данные об амплитуде интерференционного сигнала при контроле испытуемой поверхности, ориентированной под разными углами к световому лучу, таким образом изменяя диаметр светового пятна на поверхности.

Экспериментальной проверке подлежала погрешность измерений установки, где регистрировалось расстояние от выходного оптического зрачка до исследуемой поверхности при передвижении плоскопараллельной пластины

в поперечном направлении OX относительно оси установки. Показано, что при нормальном падении светового излучения на поверхность объекта

погрешность измерений не превышает $\sigma = 0.2 l_c$, что соответствует 0.4 мкм.

ПРИЛОЖЕНИЕ

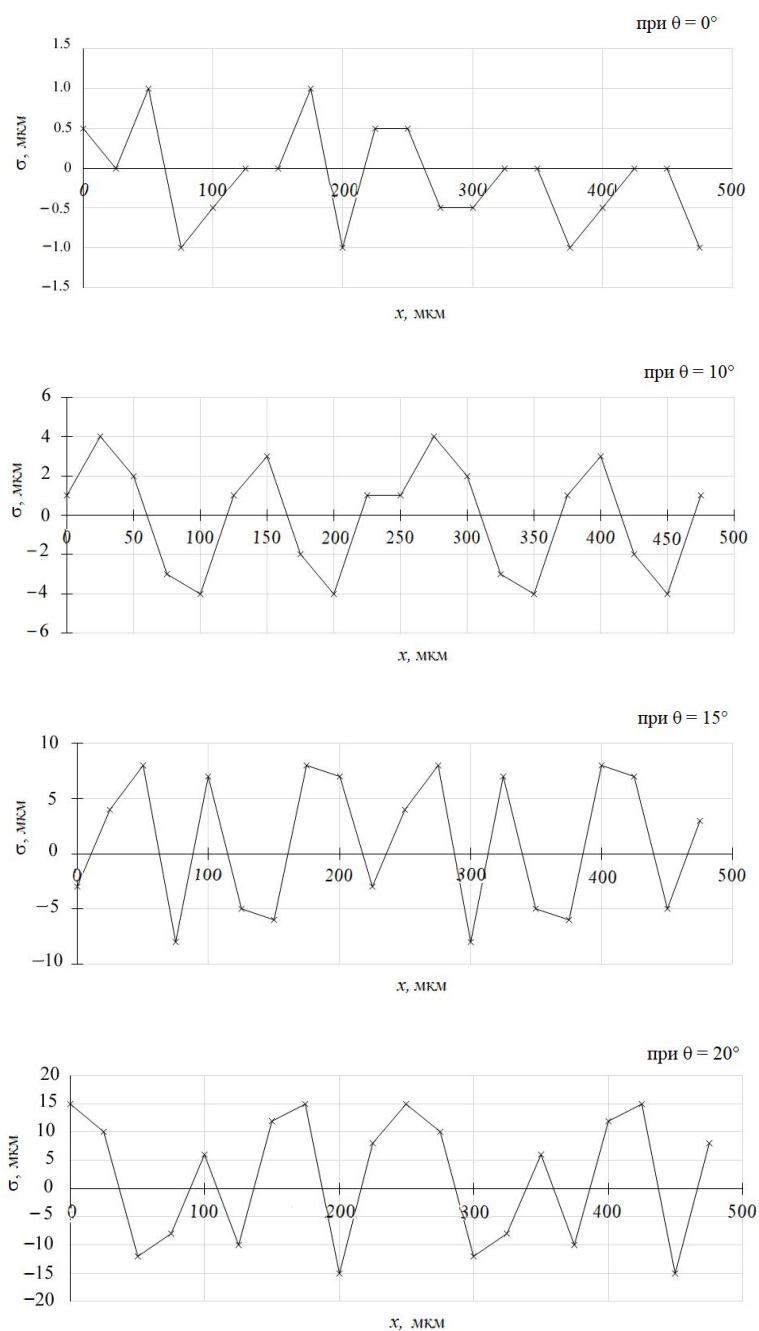


Рис. II. Оперативные отклонения от среднего результатов измерений расстояния до поверхности стеклянной плоско-параллельной пластины при различных углах ориентации θ пластины относительно светового луча.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

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. Майоров Е.Е., Голубков В.А., Гулиев Р.Б., Дагаев А.В. Использование частично когерентного интерференционного зонда для измерения микрорельефа поверхности обработанных керамических пластин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2025. Вып. 1. С. 210–217.
4. Малакара Д. Оптический производственный контроль / Пер. с англ. под ред. А.Н. Соснова. М.: Машиностроение, 1985. 340 с.
5. Афанасьев В.А. Оптические измерения. М.: Недра, 1968. 263 с.
6. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М., 1981. 640 с.
7. Майоров Е.Е., Костин Г.А., Черняк Т.А., Баранов Н.Е. Использование излучения с малой временной когерентностью для исследования поверхности щелевых закрылок на крыле самолета // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 7. С. 577–581.
8. Майоров Е.Е., Арефьев А.В., Курлов В.В., Пушкина В.П., Бородинский Ю.М., Таюрская И.С. Экспериментальное исследование косметических масел низкокогерентным интерференционным радаром // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 7. С. 585–590.
9. Майоров Е.Е., Арефьев А.В., Гулиев Р.Б., Пушкина В.П., Дагаев А.В. Интерференционный метод в исследовании поверхности микроканалов полимерных и кварцевых микрофлюидных чипов // Приборы. 2024. № 2. С. 28–32. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=63878360>
10. Майоров Е.Е., Костин Г.А., Курлов В.В., Баранов Н.Е. Исследование динамической поверхности летательного аппарата интерференционным методом // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 8. С. 722–726. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-8-722-726
11. Майоров Е.Е., Костин Г.А., Баранов Н.Е., Жулега И.А., Новиков А.В. Инновационный подход к измерению микрорельефа поверхности материалов сложной формы интерференционным методом // Приборы. 2025. № 1. С. 31–35.
12. Майоров Е.Е., Курлов В.В., Арефьев А.В., Пушкина В.П. Применение частично когерентного излучения в интерференционном устройстве для контроля рабочей поверхности полировочного материала оптических изделий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2025. Вып. 1. С. 201–209.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП), г. Санкт-Петербург (Майоров Е.Е., Пушкина В.П., Гулиев Р.Б.)

Ивангородский гуманитарно-технический институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения", г. Ивангород (Дагаев А.В.)

Контакты: Майоров Евгений Евгеньевич,
majorov_ee@mail.ru

Материал поступил в редакцию 16.04.2025

EXPERIMENTAL STUDY OF INTERFERENCE SETUP USING WHITE LIGHT SOURCE FOR SURFACE MICRORELIEF MONITORING

E. E. Maiorov¹, V. P. Pushkina¹, R. B. Guliyev¹, A. V. Dagaev²

¹Saint Petersburg state university of aerospace instrumentation (GUAP), Saint Petersburg, Russia

²Ivangorod Humanitarian and Technical Institute (branch) of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation", Ivangorod, Russia

The study highlights the problem of metrology of non-smooth surfaces and the identification of the technical characteristics of the developed interferometric installation, where a white light diode was used as a radiation source. Obtaining high-precision information about the geometry of an optical or non-smooth surface is a significant problem for metrological support, and interference devices and complexes using light sources that block the laser mode are able to provide the researcher with such information. The metrological parameters of the experimental setup are investigated: the range, measurement error, and amplitude of the interference signal. The experimental results obtained are presented in the form of technical specifications.

Keywords: light wavelength, contrast of the interference field, coherence length, measurement error, measurement range, amplitude of the interference signal, diameter of the light spot

REFERENCES

1. Born M., Wolf E. *Principles of Optics*. UK, Pergamon Press, 1959. 852 p. (Russ. ed.: Born M., Vol'f Eh. *Osnovy optiki*. 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. Maiorov E.E., Golubkov V.A., Guliyev R.B., Dagaev A.V. [Use of a partially coherent interference probe to measure microrelief of the surface of treated ceramic plates]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Technicheskie nauki* [News of Tula State University. Technical sciences], 2025, iss. 1, pp. 210–217. (In Russ.).
4. Malacara D. *Optical shop testing*. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, John Wiley and Sons. (Russ. ed.: Malakara D. *Opticheskii proizvodstvennyi kontrol'*. Translate A.N. Sosnova. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 340 p.).
5. Afanas'ev V.A. *Opticheskie izmereniya* [Optical measurements]. Moscow, Nedra Publ., 1968. 263 p. (In Russ.).
6. 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.).
7. Maiorov E.E., Kostin G.A., Chernyak T.A., Baranov N.E. [Use of radiation with low time coherence to study the surface of slotted flaps on the aircraft wing]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Technicheskie nauki* [News of Tula State University. Technical sciences], 2023, iss. 7, pp. 577–581. (In Russ.).
8. Maiorov E.E., Arefev A.V., Kurlov V.V., Pushkina V.P., Borodyanskiy Yu.M., Tayurskaya I.S. [Experimental study of cosmetic oils with low-coherence interference radar]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Technicheskie nauki* [News of Tula State University. Technical sciences], 2023, iss. 7, pp. 585–590. (In Russ.).
9. Maiorov E.E., Arefev A.V., Guliyev R.B., Pushkina V.P., Dagaev A.V. [Interference method in the study of the surface of polymer microchannels and quartz microfluidic chips]. *Pribory* [Measuring instrument], 2024, no. 2, pp. 28–32. (In Russ.).
10. Maiorov E.E., Kostin G.A., Kurlov V.V., Baranov N.E. [Study of the dynamic surface of an aircraft by the interference method]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2024, vol. 67, no. 8, pp. 722–726. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-8-722-726 (In Russ.).
11. Maiorov E.E., Kostin G.A., Baranov N.E., Zhulega I.A., Novikov A.V. [Innovative approach to measuring the microrelief of the surface of materials of complex shape by interference method]. *Pribory* [Measuring instrument], 2025, no. 1, pp. 31–35. (In Russ.).
12. Maiorov E.E., Kurlov V.V., Arefev A.V., Pushkina V.P. [Use of partially coherent radiation in an interference device to control the working surface of the polishing material of optical products]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Technicheskie nauki* [News of Tula State University. Technical sciences], 2025, iss. 1, pp. 201–209. (In Russ.).

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

Article received by the editorial office on 16.04.2025

INTRODUCTION

New challenges faced by the world community require prevention in various spheres of human activity [1]. In order to preserve and further develop scientific potential, it is necessary to improve high-tech production, as well as methods and technical means in various scientific fields [2]. Any scientific field strives to obtain convincing, reliable, and trustworthy information about the studied object or environment [3]. There are a large number of methods and means for measuring substances of different aggregate states: mechanical, chemical, physical, optical, etc. [4]. An important place among the variety of measurement methods is occupied by optical control methods.

Identification of high-precision information about the geometry of an optical or rough surface is a significant problem for metrological support [5]. The development of the electronics industry, electrical engineering, and computer technologies has allowed us to bring optical information systems and technologies to a new level of measurement [6]. It has become possible to carry out measurements in real time, when productivity has increased several times, and the dynamics of measurements have been improved when solving complex problems [7].

Optical methods for measuring surface microrelief are divided into highly coherent, coherently limited, and geometric optics methods, where coherence is practically absent. These methods are based on such a physical phenomenon as the reflection of a light wave from the surface of the objects or environments being studied [8].

Researchers note that among the optical methods for measuring surface microrelief, the most universal are interferometric methods, which use radiation sources with a short coherence length [9]. Today, in optical instrumentation, great attention is paid to the characteristics of radiation sources, in particular, white light LEDs. It is known from scientific literature that the coherence length of these emitters is in the range from 1 μm to 5 μm [10]. The accuracy of measurements of interference devices and surface control systems that use coherence-limited emitters (superluminescent, white light, and other semiconductor LEDs) depends on the coherence length of the source [11]. Therefore, the developers of this equipment show increased interest in the development of the optical-electronic base of emitters.

Despite certain achievements in the practical application of interferometers with sources with a small coherence length, studies of their functional capabilities, circuit solutions are clearly insufficient [12].

Therefore, it is of interest to obtain metrological information related to the study of the interference setup in which a white light LED is implemented.

STATEMENT OF THE PROBLEM

The aim of the work was to study the factors limiting the accuracy of measurements in an interference setup with a short coherence length emitter for monitoring a complex surface shape.

The next aim is to investigate the metrological parameters of the experimental setup: range, measurement error, interference signal amplitude. The experimental results obtained are summarized in a table.

MATERIAL AND RESEARCH METHOD

The measurements were carried out using a plane-parallel glass plate with a certified surface of the sixth roughness class ($R_a = 1.6 \mu\text{m}$). In the experiment, glass plane-parallel plates of different thicknesses of 1, 2, and 3 mm were used to change the diameter of the light spot on the surface.

In this paper, it is proposed to consider an experimental interference setup with a white light source, a radiation wavelength of $\lambda = 525 \text{ nm}$, and a coherence length of $l_c = 2 \mu\text{m}$ for monitoring the microrelief of a non-smooth surface. A white light LED based on an InGaN/AlGaIn heterostructure with an active InGaN layer doped with Zn and a yellow phosphor layer deposited on it is used as a radiation source. The optical diagram of the experimental measuring setup is shown in Fig. 1.

Fig. 1. Optical diagram of the experimental measuring setup.

S (1) — white light LED; (2) — collimator objective; (3) — beam splitter; (4) — surface of a glass plane-parallel plate (object); R (5) — mirror in the reference arm; R' — plane of the object surface; (6) — lens of the lighting system; (7) — pinhole diaphragm; (8) — interference field registration lens; (9) — Nikon camera

The main measuring unit of the setup is constructed according to the classical Michelson scheme, where an object with a certified surface is installed in the reference arm. Wave fronts reflected from the plane of the mirror R and the plane of the surface of the test object R' are projected into the Nikon camera. The radiation source S was at an equal distance from the planes R and R'.

During the study, the distance in the reference arm changed by moving the mirror R, which was set in motion by a specially designed spring mechanism, the oscillations of which were carried out by an electromagnet. The equality of the distances in the arms corresponded to the maximum interference contrast and the maximum value on the camera (9).

The reference point was an additional optical plate attached to the test sample, the surface of which formed the reference signal reflected from this surface. In this setup, the amplitude of the interference signal was determined by the diameter of the light spot on the surface. In order for the light spot not to change during the measurements, the spatial position of the radiation source S was set in motion with the frequency of movement of the reference mirror R , and the ratio of the amplitudes of the source and mirror was 1 : 50. The focal length of the collecting lens (8) ($f = 12.5$ mm) and the distance to the surface of the object (4) were the basis of this ratio.

EXPERIMENTAL RESULTS

In the experimental interferometric setup, when measuring a non-smooth surface of complex shape, the range of shape measurements is determined by the limits of the reference mirror displacement in the reference arm of the Michelson interferometer measurements. During the study, equality of distances in the interferometer branches ensures the required amplitude of the interference signal. The change in amplitude at different distances from the exit pupil of the setup to the controlled surface determined the limits of the range of measured values. When the reference mirror was stationary, the maximum contrast of the interference pattern was observed, which corresponded to the initial distance (initial point). The distance was 100 mm. The amplitude of the interference signal was recorded when moving a glass plane-parallel plate with a certified surface along the direction of propagation of light radiation in one direction and the other from the starting point. The reference mirror operated at a modulation frequency of $f_M = 44$ Hz. The measurement results are shown in Fig. 2, a.

It can be seen in Fig. 2, a, that the measurement range of the experimental measuring setup is from 0 to 7.8 mm.

Fig. 2. Experimental study of the measurement range. a — change in signal amplitude with a change in the distance to the object from the initial point $z = 100$ mm at $f_M = 44$ Hz; б — dependence of the measurement range on the resonant frequency of the modulator f_p ($f_M = f_p$)

An important characteristic is the dependence of the measurement range on the resonant frequency of the modulator f_p . The modulator is excited by alternating current with a modulation frequency f_M . The reference mirror is moved with a frequency of $f_M = f_p$. The dependence $\Delta z(f_p)$ is shown in Fig. 2, б. Thus, with

increasing f_p the measurement frequency grows, but at the same time a drop in the interference signal amplitude is observed, as a result, the measurement range decreases. The obtained dependence allows choosing the optimal ratio between these parameters for a specific task.

For highly-coherent or low-coherent interference devices and complexes, the interference signal amplitude has always been a significant characteristic, which allows the useful signal to prevail over the noise level. Revealing data on changes in the interference signal amplitude when moving the reference mirror allows us to show the influence of side effects (speckle changes) on the measurement accuracy. The interference signal amplitude was recorded when the surface was moved relative to the light radiation in the longitudinal direction OZ .

A plane-parallel glass plate of the sixth roughness class ($R_a = 1.6$ μm) was used as an object. The object was mounted on a movable platform of the micrometer table. The surface was controlled by different diameters of the light spot, which was changed by introducing glass plane-parallel plates of different thicknesses between the exit pupil of the setup and the measured surface.

In the experiment, the diameters of the light spot were 15, 25, 35 μm , respectively, for plate thicknesses of 1, 1.25, 1.5 mm. Figure 3 shows the dependence of the average amplitude U_{cp} of the interference signal on the diameter of the light spot on the surface, normalized by the value at the minimum diameter U_{cp2} ($d = 2$ μm).

Fig. 3. Dependence of the average amplitude on the diameter of the light spot on the surface. U_{cp2} — signal amplitude at $d = 2$ μm

An important parameter of the experimental setup is the accuracy of measurements. In the work, the data on the distance to the glass plane-parallel plate were recorded, and the plate was oriented relative to the light spot at different angles $\theta = 0^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$. The plate was moved on the platform of the micrometer table in the transverse direction (along the OX axis) with a step of 25 μm , and 20 measurements were taken for each angle. Experimental data are presented in the Appendix to Fig. II. The graphical dependence of the standard deviation of the measurement results on the angle of inclination of the plane-parallel plate is shown in Fig. 4.

Fig. 4. Dependence of the standard deviation on the angle of the plate orientation relative to the light beam.

The experimental study of the interference setup using a white light source to control the surface microrelief showed that this setup allows for surface control with the following technical characteristics:

- radiation wavelength — 525 nm;
- measurement error
- $\sigma = 0.2 l_c$ — for $\theta = 0^\circ$,
- $\sigma = 1 l_c$ — for $\theta = 10^\circ$,
- $\sigma = 3 l_c$ — for $\theta = 15^\circ$,
- $\sigma = 6 l_c$ — for $\theta = 20^\circ$;
- measurement range — 0–7.8 mm;
- measurement frequency — 88 Hz;
- distance from the optical pupil to the surface — 100 mm.

CONCLUSION

The measurement range and the frequency of the reference mirror movement, which determines the measurement speed, were experimentally studied. It was found that the frequency of measurements increases with increasing f_p but at the same time a drop in the amplitude of the interference signal is observed, as a result the measurement range decreases. Data on the amplitude of the interference signal were obtained when monitoring the test surface oriented at different

angles to the light beam, thus changing the diameter of the light spot on the surface. The measurement error of the setup, where the distance from the exit optical pupil to the surface under study was recorded when moving a plane-parallel plate in the transverse direction OX relative to the setup, was subject to experimental verification. It was shown that with normal incidence of light radiation on the surface of the object, the measurement error does not exceed $\sigma = 0.2 l_c$, which corresponds to $0.4 \mu\text{m}$.

APPENDIX

Fig. II. Operational deviations from the average of the results of measurements of the distance to the surface of a glass plane-parallel plate at different orientation angles θ of the plate relative to the light beam.