

---

---

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

---

---

УДК 531.715.1  
DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-4-381-385

### ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ МИКРОИНТЕРФЕРОМЕТРА ЛИННИКА

К. Р. ГУБАЙДУЛЛИН, В. К. КИРИЛЛОВСКИЙ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: vkkir@mail.ru*

Модернизирован микроинтерферометр Линника с целью расширения возможностей прибора и упрощения обработки результатов. Введен дополнительный оптический модуль переноса изображения на чувствительную площадку матрицы, использована компьютерная обработка интерференционной картины. Это в значительной мере позволило усовершенствовать методику исследований, проводимых с помощью микроинтерферометра Линника.

**Ключевые слова:** микроинтерферометр Линника, модернизация, исследование интерферограмм, МИИ-4

**Введение.** Оптические методы измерения относятся к наиболее точным. Пороговая чувствительность и точность классических методов оптических измерений находятся на уровне длины волны применяемого излучения, которая для видимого излучения составляет порядка 0,5 мкм. Современные технологии, в том числе электронные и компьютерные, дают возможность повышения точности и чувствительности [1].

Анализ функции преобразования (ФП) метода интерферометрии деформаций волнового фронта показывает, что относительная интенсивность  $\tilde{I}$  связана с искажениями волнового фронта  $\omega$  (в волновой мере) периодической зависимостью

$$\tilde{I} = \cos^2 \pi \omega, \quad (1)$$

$\tilde{I} = I_i / I_0$ , где  $I_i$  — значение интенсивности в заданной точке интерференционного изображения;  $I_0$  — интенсивность в той же точке при отсутствии аберрации;

$$\omega = W / \lambda, \quad (2)$$

где  $W$  — нормальное отклонение волнового фронта;  $\lambda$  — длина волны излучения [2].

Работу интерферометра в режиме поперечной расфокусировки удобно рассматривать, используя двумерную функцию (характеристику) преобразования метода исследования прецизионных поверхностей. Введение в характеристику преобразования дополнительной координаты (здесь — заклон на угол  $\theta$ ) позволяет достичь того, что карта деформаций волнового фронта (как система изолиний — „горизонталей“ карты деформаций с шагом дискретизации, равным или кратным длине световой волны) преобразуется в систему полос, соответствующих системе профилей поверхности ошибок исследуемого волнового фронта. Такой прием повышает наглядность интерферограммы, облегчает ее расшифровку и особенно важен, когда измеряемые ошибки меньше шага дискретизации, т.е. меньше шага интерференционной полосы (здесь  $\lambda/2$  или  $\lambda$ ) [3].

Разработанный В. П. Линником в 1933 г. [4] микроинтерферометр применяется для измерений неровностей на наружных поверхностях с направленными следами механической

обработки, а также для определения толщины пленок, величины малых перемещений и т.п. Существуют такие модели, как МИИ-4М, МИА-1, МИИ-4.

Рассмотрим схему МИИ-4 (рис. 1, 1 — источник света, 2 — коллимирующий объектив, 3 — делительная пластина, 4 — компенсационная пластина, 5, 6 — микрообъективы, 7 — контролируемый объект, 8 — эталонное зеркало, 9 — объектив, 10 — шкала окуляр-микрометра, 11 — окуляр), сочетающую в себе элементы схемы Майкельсона и схем двух перекрещенных микроскопов. Из точечного источника 1 исходит сферический волновой фронт, который проходит через коллимирующий объектив 2 и преобразуется в плоский волновой фронт, который светоделителем 3 расщепляется на два пучка.

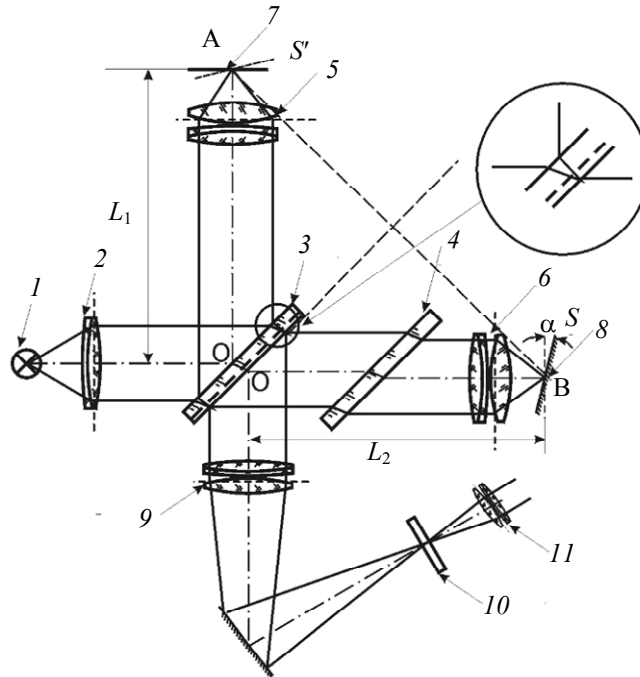


Рис. 1

Отразившийся пучок, пройдя через микрообъектив, падает на поверхность исследуемого образца, отражается, проходя через объектив, преобразуется преимущественно в параллельный пучок лучей, волновой фронт которой сформирован с искажениями за счет ошибок и неровностей поверхности исследуемого образца.

Пучок, который прошел сквозь светоделитель, микрообъективом 6 фокусируется на образцовую оптическую поверхность В. Затем пучок отражается от образцовой поверхности как сферический волновой фронт, проходит через микрообъектив 6 и становится плоским волновым фронтом, не имеющим искажений, поскольку ошибки образцовой оптической поверхности В пренебрежимо малы.

Далее оба пучка лучей интерферируют друг с другом и дают картину, состоящую из параллельных полос (вследствие искажений исследуемой поверхности эти интерференционные полосы имеют отклонения). Далее пучки попадают в объектив 9, в результате формируется интерференционная картина на освещенном фоне.

Достоинство МИИ-4 состоит в том, что можно наблюдать и измерять отклонение рабочего волнового фронта от исходной плоской формы. Недостаток состоит в том, что интерференционная картина, состоящая из системы полос, распределение освещенности в которых является синусоидальным, глазом воспринимается как нерезкая.

Согласно проведенным ранее исследованиям, порог чувствительности оптической измерительной наводки на такую полосу составляет 0,1 шага полосы в случае отсутствия в картине шумов. При наличии шумов эта точность уменьшается и может составлять 1/5 шага полосы [5, 6].

С помощью специально разработанного оптического модуля, размещаемого между окуляром интерферометра и объективом регистрирующей камеры, изображение интерференционной картины с сетки интерферометра переносится на чувствительную площадку матричной камеры, например ПЗС-матрицу, которая подключается к компьютеру.

Параксиальные характеристики оптической системы модуля:

$$F=-19,5; F'=19,5; SF=-13,51; SF'=16,5; SH=5,5; SH'=-2,5; S'=16,5 \text{ мм}; \Gamma=24.$$

Результаты оценки aberrаций и качества изображения насадки, полученные с помощью оптического модуля (см. таблицу), приведены на рис. 2 и 3.

Конструктивные параметры оптического модуля

№ поверхности	Радиус, мм	Осевое расстояние, мм	Марка стекла
1	8,5	1	TK16
2	-37	2,5	
3	-6,5	0,5	Ф4
4	8,5	2	
5	$\infty$	1,5	TK16
6	-5,5		

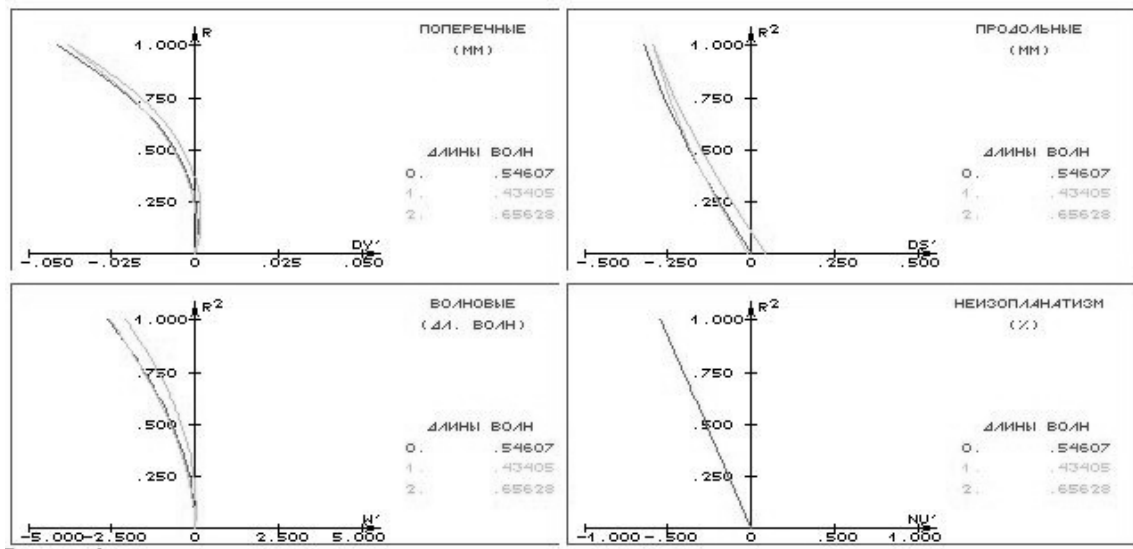


Рис. 2

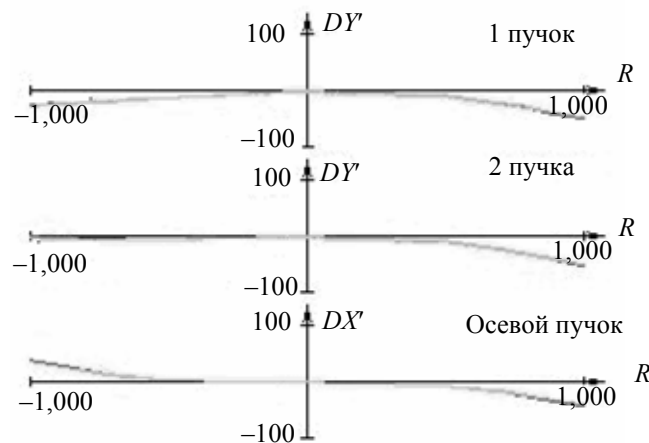


Рис. 3

Одна из задач настоящей работы — с помощью компьютерной обработки исходного изображения интерференционной картины превратить систему нерезких интерференционных полос в систему соответствующих им четких контуров.

Каждый из этих контуров дает линию, состоящую из точек, соответствующих координатам центров полос исходной интерферограммы.

Путем многократного измерения координат полос до (рис. 4, а) и после оконтуривания (рис. 4, б) получены значения случайных погрешностей:

— до оконтуривания

$$\bar{m}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_{1i} = 4,5 \text{ — среднее арифметическое (} n \text{ — число измерений, } m_i \text{ — результат } i\text{-го измерения),}$$

$$\sigma_{m_1} = \mp \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_{1i} - \bar{m}_1)^2}{n-1}} = \mp 0,015 \text{ — среднее квадратическое отклонение,}$$

$$\sigma_{\bar{m}_1} = \mp \frac{\sigma_{m_1}}{\sqrt{n}} = \mp 0,006 \text{ — характеристика точности результата измерения;}$$

— после оконтуривания

$$\bar{m}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_{2i} = 4,7 \text{ — среднее арифметическое,}$$

$$\sigma_{m_2} = \mp \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_{2i} - \bar{m}_2)^2}{n-1}} = \mp 0,005 \text{ — среднее квадратическое отклонение,}$$

$$\sigma_{\bar{m}_2} = \mp \frac{\sigma_{m_2}}{\sqrt{n}} = \mp 0,002 \text{ — характеристика точности результата измерения.}$$

Видно, что  $\sigma_{m_1} / \sigma_{m_2} = 0,006 / 0,002 = 3$ .

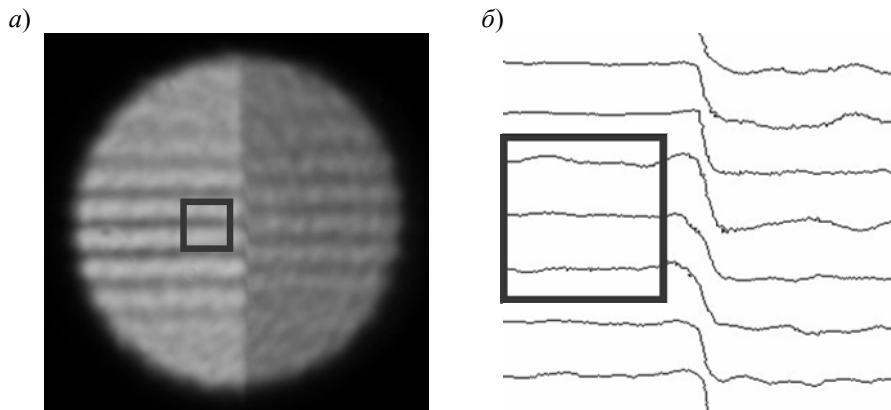


Рис. 4

Погрешность результата измерения после оконтуривания сократилась в три раза, такое повышение точности измерения можно считать существенным, поскольку речь идет о производстве пленок толщиной 0,1 мкм.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирилловский В. К. Оптические измерения. Ч. 2. СПб: СПб ИТМО, 2003.
2. Кирилловский В. К. Оптические измерения. Ч. 5. СПб: СПб ИТМО, 2006.
3. Кирилловский В. К. Современные оптические исследования и измерения. СПб: Лань, 2010.
4. Егоров В. А. Оптические и щуповые приборы для измерения шероховатости поверхности. М.: Машиностроение, 1965.

5. Пуряев Д. Т., Креопалова Г. В. Исследование и контроль оптических систем. М.: Машиностроение, 1978.
6. Ливиц Э. М. Оптические измерения. Л.: ЛИТМО, 1985.
7. Кирилловский В. К., Точилина Т. В. Оптические измерения: Учеб. пособие по лабораторному практикуму. СПб: СПб ИТМО, 2014.
8. Коломийцов Ю. В. Интерферометры. Л.: Наука, 1976.

**Сведения об авторах****Камиль Равилевич Губайдуллин**

— студент; Университет ИТМО; кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: Kamilfo94@gmail.com

**Владимир Константинович Кирилловский**

— д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: vkkir@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
прикладной и компьютерной оптикиПоступила в редакцию  
28.11.16 г.**Ссылка для цитирования:** Губайдуллин К. Р., Кирилловский В. К. Повышение точности микроинтерферометра Линника // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 4. С. 381—385.**IMPROVING THE ACCURACY OF LINNIK MICROINTERFEROMETER****K. R. Gubaidullin, V. K. Kirillovsky***ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia**E-mail: vkkir@mail.ru*

Modernization of Linnik microinterferometer is performed with the aim of expanding the instrument capabilities and simplify processing of results. An additional optical unit is introduced for image transfer to sensitive area of the matrix. Computer processing of interference pattern is applied. These innovations greatly help to improve the methodology of research conducted using microinterferometer Linnik.

**Keywords:** Linnik microinterferometer, modernization. Interference pattern research**Data on authors****Kamil R. Gubaidullin**

— Student; ITMO University; Department of Applied and Computer Optics; E-mail: Kamilfo94@gmail.com

**Vladimir K. Kirillovsky**

— Dr. Sci., Professor; ITMO University; Department of Applied and Computer Optics; E-mail: vkkir@mail.ru

**For citation:** Gubaidullin K. R., Kirillovsky V. K. Improving the accuracy of Linnik microinterferometer // Journal of Instrument Engineering. 2017. Vol. 60, N 4. P. 381—385 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-4-381-385