

**МЕТОД ЧАСТИЧНОГО СКАНИРОВАНИЯ КОРРЕЛОГРАММ  
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТЕЙ****Е. В. Сысоев**

*Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,  
г. Новосибирск  
E-mail: evsm1@mail.ru*

Представлен метод измерения микропрофиля поверхности с нанометровым разрешением, основанный на неполном сканировании коррелограмм в интерферометре Линника с частично когерентным источником света. Приведены экспериментальные результаты измерений толщины тонких пленок. Показано, что при сканировании коррелограмм в пределах 1–2 периодов может быть достигнуто разрешение по глубине лучше 1 нм.

**Введение.** Сканирующие интерферометры частично когерентного света широко используются для бесконтактных измерений микро рельефа поверхностей во многих областях науки и техники [1, 2]. Это объясняется отсутствием в регистрируемых интерферограммах спекл-шума, свойственного когерентному свету, что позволяет получать разрешение в несколько нанометров как на гладких, так и на шероховатых поверхностях [3, 4].

Методика измерений основана на регистрации и анализе набора интерферограмм, полученных в процессе сканирования поверхности вдоль оптической оси  $z$  интерферометра [5]. Как правило, сканирование с шагом несколько десятков нанометров производится перемещением либо объекта [6], либо интерферометра или его части [7]. По набору интерферограмм для каждой точки измеряемой поверхности находится коррелограмма  $I(z)$ , представляющая собой зависимость интенсивности светового потока от координаты сканирования  $z$  [8].

В качестве примера на рис. 1 приведен типичный вид коррелограммы, полученной при использовании частично когерентного источника света с длиной когерентности  $l_c = 15$  мкм.

Нахождение максимума коррелограммы, соответствующего нулевой разности хода световых волн, рассеянных сопряженными участками поверхностей в опорном и измерительном плечах интерферометра, определяет абсолютное осевое положение участка измеряемой поверхности [9]. Диапазон сканирования зависит от длины когерентности используемого источника света и может составлять десятки микрон. Для обеспечения высокой точно-

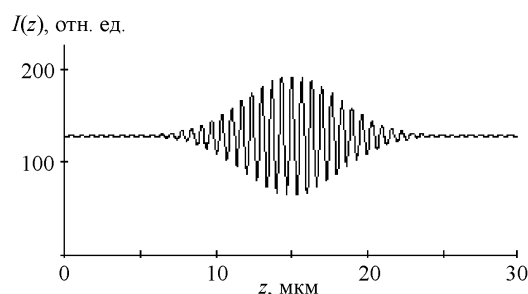


Рис. 1

сти измерений необходимо дополнительно контролировать процесс сканирования также с высокой точностью, что ведет к усложнению конструкции интерферометра.

Целью данной работы является повышение точности измерений и упрощение конструкции измерительной системы. Предложен метод измерения микрорельефа поверхности, основанный на неполном сканировании коррелограмм (в пределах 1–2 периодов), что составляет 0,4–0,8 мкм. В этом случае регистрируется относительный набег фазы коррелограмм между соседними участками измеряемой поверхности.

Период коррелограмм составляет половину периода эффективной длины волны используемого света  $\bar{\lambda}$ , поэтому локальный перепад измеряемого микрорельефа не должен превышать  $\pm\bar{\lambda}/4$ , что составляет  $\approx 150\text{--}200$  нм. Применение данного метода к измерению поверхностей с плавным изменением высоты микрорельефа не приводит к появлению неоднозначности.

В связи с тем что интерференция пучков опорного и измерительного плеч интерферометра происходит только тогда, когда разность их оптических длин хода не превышает длины когерентности  $l_c$  используемого источника света, общее изменение микрорельефа измеряемой поверхности должно быть в пределах  $l_c$ , что составляет  $\approx 10\text{--}50$  мкм в зависимости от используемого источника света.

Задачи такого типа возникают при измерениях толщины напыленных тонких пленок, микрорельефа микрооптики, глубины механических дефектов поверхностей, шероховатости и т. д.

Преимущество данного метода состоит в том, что для измерения микрорельефа поверхности сканирование коррелограмм можно производить в диапазоне долей микрона посредством перемещения опорного зеркала интерферометра, что упрощает конструкцию интерферометра в целом, так как в этом случае нет необходимости в прецизионном относительном перемещении интерферометра и измеряемого объекта относительно друг друга.

**Метод измерения.** Для экспериментальных исследований метода была создана установка, схема которой показана на рис. 2. Она включает в себя интерферометр Линника 1, ПЗС-камеру 2, контроллер управления пьезокерамикой 3 и компьютер 4. Интерферометр Линника состоит из источника частично когерентного света 5, светоделительного кубика 6, опорного зеркала 7, объективов О1–О4 и измеряемого объекта 8.

Опорное зеркало интерферометра 7 установлено на пьезокерамике 9. Длина оптического пути в опорном плече интерферометра регулируется напряжением на пьезокерамике, подключенной к контроллеру 3. В качестве ис-

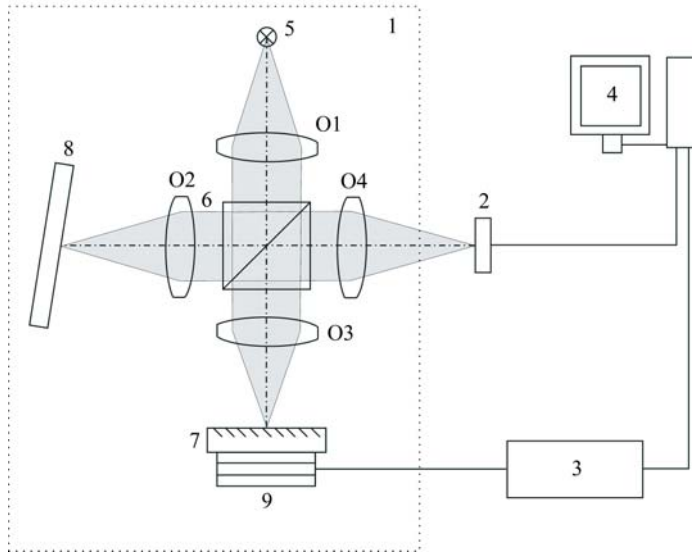


Рис. 2

точника частично когерентного света 5 используется галогенная лампа накаливания. Шаг и диапазон перемещения зеркала управляются персональным компьютером 4. Интерферограммы регистрируются ПЗС-камерой 2 и передаются в компьютер, где с помощью специальных алгоритмов для каждой точки измеряемой поверхности находится коррелограмма.

При непрерывном перемещении опорного зеркала вдоль оптической оси  $z$  регистрируемую на ПЗС-матрице интенсивность света (амплитуду коррелограммы) в каждом  $j$ -м пикселе  $i$ -й строки можно описать функцией [10]

$$I_{ij}(z) = I_{ij}^0 (1 + A_{ij}(z) \cos(4\pi(z_{ij}^0 - z)/\bar{\lambda} + \varphi_{ij})), \quad (1)$$

где  $I_{ij}^0$  – амплитуда интенсивности,  $i=0, \dots, N-1$ ,  $j=0, \dots, M-1$  ( $N$  – число пикселей в строке,  $M$  – число строк);

$$A_{ij}(z) = A_{ij}^0 \exp\left(-16 \ln 2 \left[\frac{z_{ij}^0 - z}{l_c}\right]^2\right)$$

– амплитуда огибающей коррелограммы ( $A_{ij}^0$  определяется соотношением амплитуд и фаз интерферирующих полей,  $l_c = \frac{2 \ln 2 \bar{\lambda}^2}{\Delta\lambda}$  – длина когерентности,  $\Delta\lambda$  – ширина спектра источника света);  $\bar{\lambda}$  – эффективная длина волны;  $z_{ij}^0$  – координата соответствующего участка измеряемой поверхности (относительно некоторой базы);  $\varphi_{ij}$  – начальная фаза коррелограмм.

В экспериментах опорное зеркало интерферометра, установленное на пьезокерамике, перемещалось дискретно с шагом  $\Delta z \approx 4,2$  нм. Учитывая, что  $z_k = k\Delta z$ , для дискретных значений  $z_k$  функция (1) примет вид

$$I_{ij}(z_k) = I_{ij}^0 (1 + A_{ij}(z_k) \cos(4\pi(z_{ij}^0 - z_k)/\bar{\lambda} + \varphi_{ij})), \quad (2)$$

где  $k \in (0, 1 \dots K)$ ,  $K$  – максимальное количество шагов,  $K\Delta z \ll l_c$ , т. е. диапазон перемещения опорного зеркала интерферометра значительно меньше длины когерентности  $l_c$  используемого источника света. Для каждого пикселя регистрировались фрагменты (обозначенные верхним индексом  $f$ ) коррелограмм  $I_{ij}^f(z_k)$ , описываемые общей функцией (2). С учетом того, что участки измеряемой поверхности, которым соответствуют выбранные пиксели  $(i, j)$ , обладают различными рассеивающими свойствами, а также принимая во внимание неравномерность (среднее значение) освещенности поверхности ПЗС-матрицы, связанную с источником света и конструктивными особенностями интерферометра, для каждого  $(i, j)$  функцию (2) можно записать как

$$I_{ij}(z_k) = a_{ij} I_{ij}^f(z_k) + b_{ij}, \quad (3)$$

где  $a_{ij}$  определяется в основном рассеивающими свойствами измеряемой поверхности, а  $b_{ij}$  учитывает некоррелированные составляющие освещенности ПЗС-матрицы. В идеальном случае, когда имеется линейная зависимость  $z_k = k\Delta z$  и шум в регистрируемых фрагментах коррелограмм  $I_{ij}^f(z_k)$  отсутствует, для нормированной функции  $I_{ij}(z_k)$  коэффициенты  $a_{ij}$  и  $b_{ij}$  можно получить, используя (2) и (3):

$$a_{ij} = \frac{1}{(I_{ij}^0)^f (A_{ij}^0)^f}; \quad b_{ij} = 1 - \frac{1}{(A_{ij}^0)^f}. \quad (4)$$

Функции  $I_{ij}^f(z_k)$  сдвинуты по переменной  $z_k$  относительно друг друга. Графики фрагментов коррелограмм для двух произвольно выбранных пикселей в зависимости от номера шага сканирования показаны на рис. 3. В качестве объекта измерения использовалась плоская поверхность стеклянной пластинки, наклоненной к оптической оси интерферометра ( $I(k)$  – интенсивность  $I^f(z_k)$  в относительных единицах,  $k$  – номер шага сканирования).

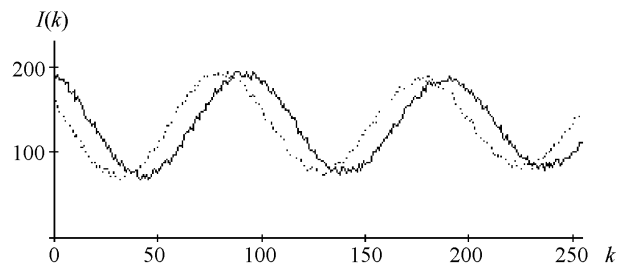


Рис. 3

Сдвиг  $\Delta k$  по номеру шага сканирования  $k$  между коррелограммами, показанными на рис. 3, определяется изменением высоты микрорельефа  $\Delta h$  между участками поверхности, проецируемыми на эти пиксели:

$$\Delta h = \Delta k \Delta z. \quad (5)$$

Для двух произвольно выбранных участков измеряемой поверхности, которые проецируются оптической системой интерферометра (см. рис. 2) на соответствующие пиксели  $(l, m)$  и  $(n, q)$ , с учетом уравнения (3) можно записать выражения для коррелограмм:

$$\left. \begin{aligned} I_{lm}(z_k) &= a_{lm} I_{lm}^f(z_k) + b_{lm}; \\ I_{nq}(z_k) &= a_{nq} I_{nq}^f(z_k) + b_{nq}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Так как  $I_{lm}(z_k) = I_{nq}(z_k + \Delta k_{nq} \Delta z)$ , то из (4) и (6) получим

$$I_{lm}^f(z_k) = a'_{nq} I_{nq}^f(z_k + \Delta k_{nq} \Delta z) + b'_{nq}, \quad (7)$$

где  $\Delta k_{nq}$  – число шагов сдвига между коррелограммами  $I_{lm}(z_k)$  и  $I_{nq}(z_k)$ ;

$$a'_{nq} = \frac{I_{lm}^0 A_{lm}^0}{I_{nq}^0 A_{nq}^0}; \quad b'_{nq} = I_{nq}^0 \left[ 1 - \frac{A_{lm}^0}{A_{nq}^0} \right].$$

Например, для реальных коррелограмм таких, как показаны на рис. 3, равенство в (7) выполняется лишь приближенно:

$$I_{lm}^f(z_k) \approx a'_{nq} I_{nq}^f(z_k + \Delta k_{nq} \Delta z) + b'_{nq}. \quad (8)$$

Задача нахождения сдвига  $\Delta k_{nq}$  между коррелограммами может быть решена численно, например методом последовательных приближений с использованием минимизации среднеквадратичного отклонения фрагментов двух коррелограмм  $I_{lm}^f(z_k)$  и  $I_{nq}^f(z_k)$  в области их пересечения по  $z_k$ . В этом случае выражения для  $a'_{nq}$  и  $b'_{nq}$  могут быть использованы в качестве параметров начального приближения при решении уравнения (8).

Так как сетка значений коррелограмм по дискретному параметру  $k$  является достаточно грубой, то вместо  $k$  была введена непрерывная интерполирующая переменная  $\xi$ . Таким образом,  $k = (\xi)$ , где скобками обозначена операция выделения целой части  $\xi$ . Тогда выражение (8) можно записать в виде

$$I_{lm}^f(\xi) \approx a'_{nq} I_{nq}^f(\xi + \Delta \xi_{nq}) + b'_{nq}, \quad (9)$$

где  $|\Delta \xi_{nq}| \leq \xi \leq K - |\Delta \xi_{nq}|$ ;  $\Delta \xi_{nq}$  определяет сдвиг по  $\xi$  между коррелограммами для пикселей  $(l, m)$  и  $(n, q)$ .

По  $\Delta \xi_{nq}$  рассчитывается осевое изменение высоты профиля поверхности между участками поверхности, отображаемыми на эти пиксели:

$$\Delta h_{nq} = \Delta \xi_{nq} \Delta z. \quad (10)$$

Функция рассогласования  $Q(\Delta\xi_{nq}, a'_{nq}, b'_{nq})$ , представляющая собой нормированную среднеквадратическую разницу между сравниваемыми коррелограммами, использовалась для нахождения  $\Delta\xi_{nq}$ :

$$Q(\Delta\xi_{nq}, a'_{nq}, b'_{nq}) = \frac{1}{K - \Delta\xi_{nq}} \sqrt{\theta + \sum_{k=0}^{k=(K-\Delta\xi_{nq})} (I_{lm}^f(k) - I_{nq}^f(k + \Delta\xi_{nq}))^2}, \quad (11)$$

где  $\theta = (I_{lm}^f(K - \Delta\xi_{nq}) - I_{nq}^f(K))^2$ . График части функции  $Q(\Delta\xi)$ , рассчитанный для коррелограмм, которые приведены на рис. 3, показан на рис. 4.

Минимум функции  $Q(\Delta\xi)$  соответствует значению сдвига  $\Delta\xi$  (сдвиг между коррелограммами в единицах шагов сканирования), когда сравниваемые коррелограммы совпадают наиболее полно.

Так как в интерферометре Линника (см. рис. 1) в опорном и измерительном плечах оптический ход лучей удваивается, то функция  $Q(\Delta\xi)$  периодична по параметру  $\Delta\xi$  с периодом, определяемым условием  $\Delta\xi \Delta z = \bar{\lambda}/2$ . В связи с этим расчет изменения высоты микрорельефа между двумя произвольно выбранными участками измеряемой поверхности будет однозначным, если перепад высоты между ними не будет превышать  $\pm\bar{\lambda}/4$ .

Величина  $\Delta\xi_{lm}$  находилась методом подгонки сравниваемых коррелограмм по параметрам  $\Delta\xi_{nq}, a'_{nq}, b'_{nq}$  таким образом, чтобы функция  $Q(\Delta\xi_{nq}, a'_{nq}, b'_{nq})$  принимала минимальное значение:

$$\Delta\xi_{nq} = \min_{\Delta\xi_{nq}, a'_{nq}, b'_{nq}} Q(\Delta\xi_{nq}, a'_{nq}, b'_{nq}). \quad (12)$$

При линейной зависимости смещения опорного зеркала интерферометра от напряжения на пьезокерамике расчетное значение изменения микрорельефа поверхности  $\Delta h_{nq}$  получаем из выражения (10).

Погрешность  $\delta(\Delta h_{nq})$  определения величины  $\Delta h_{nq}$  зависит от шума, вносимого источником света и фотоприемным устройством, от фазового шума, вызванного вибрацией интерферометра, а также от погрешностей алгоритма подгонки. Для определения влияния этих факторов строилась модель набора коррелограмм в соответствии с выражением (2) для плоской наклонной по-

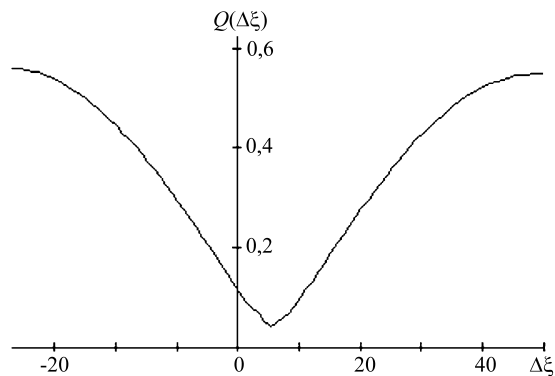


Рис. 4

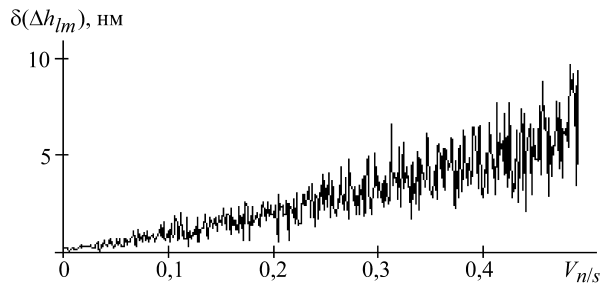


Рис. 5

верхности. При расчете в модель добавлялись амплитудный и фазовый шумы. Профиль моделируемой поверхности для выбранной строки ПЗС-матрицы восстанавливался с помощью алгоритма подгонки. Затем определялось максимальное отклонение профиля, рассчитанного в соответствии с (5), и профиля модели. После этого амплитуда шума в модели изменялась и процедура повторялась снова. Амплитуда шума устанавливалась таким образом, что отношение шум/сигнал ( $V_{n/s}$ ) для интенсивности варьировалось в пределах 0–0,5. Зависимость погрешности восстановления высоты профиля  $\delta(\Delta h_{lm})$  от относительной амплитуды фазового шума  $V_{n/s}$  в коррелограмме приведена на рис. 5. Результаты численного моделирования показывают, что при  $V_{n/s} < 0,05$  (реально достигалось в экспериментах) среднеквадратичное отклонение по высоте измеряемого профиля в регистрируемых коррелограммах может быть лучше 1 нм.

**Экспериментальные результаты.** В экспериментах измерения микропрофиля поверхности производились на установке, схема которой показана на рис. 2. Интерференция регистрировалась 8-разрядной видеокамерой с ПЗС-матрицей размера 576 строк по 740 пикселей. В качестве объектов измерений использовались стеклянные пластинки с напылением пленки хрома, часть которого была удалена до подложки жидкостным травлением. Шаг сканирования  $\Delta z$  определялся по периоду  $\Lambda_{cor}$  и числу шагов  $N$  в периоде коррелограммы. Так как  $\Lambda_{cor} = \bar{\lambda}/2$ , то  $\Delta z = \Lambda_{cor}/N = \bar{\lambda}/(2N)$ . Эффективная длина волны  $\bar{\lambda}$  определялась сравнением результатов измерений высоты ступеньки хрома на стекле описываемым методом с результатами измерений, выполненных с помощью микроскопа Solver P47-PRO, и составила 0,723 мкм. Пе-

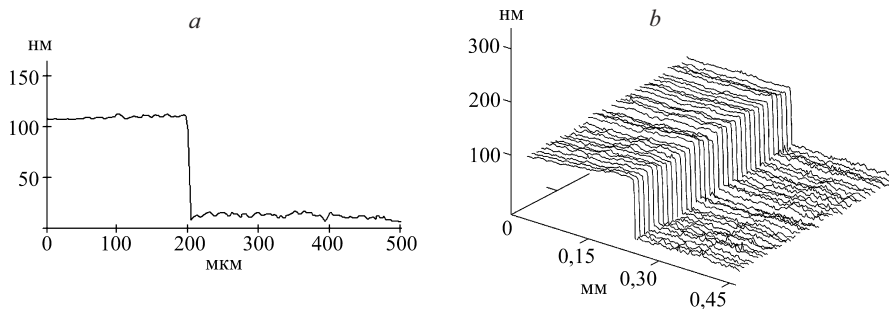


Рис. 6

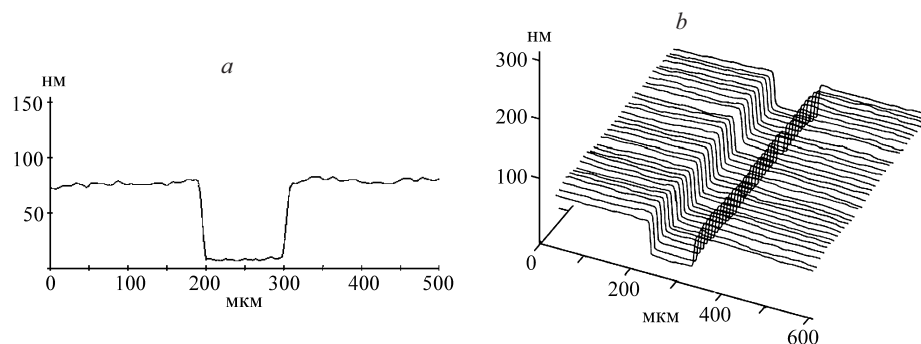


Рис. 7

ремещение зеркала, установленного на пьезокерамике в опорном плече интерферометра, осуществлялось программно с помощью контроллера. В экспериментах измерялась высота ступеньки пленки хрома на стеклянной подложке и глубина канавки, вытравленной в пленке хрома. Сечение и изображение трехмерной реконструкции профиля ступеньки в пленке хрома показаны на рис. 6, *a*, *b* соответственно. Поперечный размер зоны измерения на рис. 6, *b* составляет  $0,6 \times 0,6$  мм. По результатам измерений толщина пленки хрома равна 102 нм. Данные результаты сравнивались с результатами измерений, проведенных на сканирующем зондовом микроскопе. Расхождение не превышало 5 нм.

Поперечное сечение профиля канавки, вытравленной в другой пленке хрома, показано на рис. 7, *a*. Изображение трехмерной реконструкции профиля канавки в зоне  $0,6 \times 0,6$  мм приведено на рис. 7, *b*.

**Заключение.** Предложен метод измерения микрорельефа поверхности с нанометровым разрешением, основанный на неполном сканировании коррелограмм. Измерение микропрофиля осуществлялось посредством расчета относительного набега фазы коррелограмм между соседними участками измеряемой поверхности.

Показано, что сканирование коррелограмм можно производить перемещением опорного зеркала интерферометра вдоль оси его опорного плеча в диапазоне менее 1 мкм.

Моделирование влияния амплитуды шума на погрешность измерения профиля поверхности показало, что при уровне шума до 5 % от уровня сигнала регистрируемых коррелограмм вертикальное разрешение предложенного метода может составлять менее 1 нм.

Измерение толщины пленки хрома на стеклянной поверхности с помощью сканирующего зондового микроскопа дало хорошее совпадение с результатами измерений, выполненных рассмотренным методом.

Предложенный метод применим для решения задач, когда измеряемый объект имеет общие изменения профиля поверхности в пределах длины когерентности и локальные перепады высоты профиля не превышают четверти эффективной длины волны используемого источника света. Для поверхностей с известными свойствами (например, пилообразный микрорельеф дифракционных оптических элементов) диапазон измерений может быть расширен за счет устранения (алгоритмическими методами) неоднозначностей на крутых перепадах микрорельефа.



Результаты данной работы могут быть использованы при проектировании высокоразрешающих систем измерений микрорельефа поверхностей в нанометровом диапазоне разрешений, а также систем контроля качества поверхностей изделий в промышленном производстве.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **De Groot P., Biegen J., Clark J. et al.** Optical interferometry for measurement of the geometric dimensions of industrial parts // Appl. Opt. 2002. **41**, N 19. P. 3853.
2. **Davidson M., Kaufman K., Mazor I.** The coherence probe microscope // Solid State Technol. 1987. **30**. P. 57.
3. **Caber P. J., Martinek S. J., Niemann R. J.** A new interferometric profiler for smooth and rough surface // Proc. SPIE. 1993. **2088**. P. 195.
4. **Aziz D. J.** Interferometric measurement of surface roughness in engine cylinder walls // Opt. Eng. 1998. **37**, N 5. P. 1429.
5. **De Groot P., De Lega X. C., Kramer J., Turzhitsky M.** Determination of fringe order in white-light interference microscopy // Appl. Opt. 2002. **41**, N 22. P. 4571.
6. **Fleischer M., Windecker R., Tiziani H. J.** Fast algorithms for data reduction in modern optical three-dimensional profile measurement system with MMX technology // App. Opt. 2000. **39**, N 8. P. 1290.
7. **Kino G. S., Chim S. S. C.** Mirau correlation microscope // Appl. Opt. 1990. **29**, N 6. P. 3775.
8. **Harasaki A., Schmit J., Wyant J. C.** Improved vertical-scanning interferometry // Appl. Opt. 2000. **39**, N 13. P. 2107.
9. **Deck L., De Groot P.** High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry // App. Opt. 1994. **33**, N 31. P. 7334.
10. **Fleischer M., Windecker R., Tiziani H. J.** Theoretical limits of scanning white-light interferometry signal evaluation algorithms // Appl. Opt. 2001. **40**, N 17. P. 2815.

*Поступила в редакцию 3 июля 2006 г.*