

УДК 681.723.26; 681.786.5

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ МИКРОСКОП-ПРОФИЛОМЕТР

Е. В. Сысоев, И. А. Выхристюк, Р. В. Куликов, А. К. Поташников,
В. А. Разум, Л. М. Степнов

*Учреждение Российской академии наук
Конструкторско-технологический институт научного приборостроения
Сибирского отделения РАН,
630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41
E-mail: evsml@mail.ru*

Представлены структура и функциональные возможности цифрового оптического микроскопа-профилометра, работающего в двух режимах: микро- и наноизмерений. Принцип работы прибора основан на измерении фазовой функции волнового фронта света, рассеянного контролируемой поверхностью. Рассмотрены возможности программного обеспечения и технические характеристики микроскопа-профилометра.

Ключевые слова: оптический профилометр, сканирующий интерферометр частично когерентного света, нанорельеф, 3D-реконструкция, микрорельеф.

Введение. Интерферометрия применяется для контроля микрорельефа и микродефектов рассеивающих поверхностей твёрдых тел, шероховатости жёстких дисков и т. д. [1–4]. Это связано с бесконтактным неразрушающим характером интерференционных измерений и их высокой точностью. Активно развивающаяся фазосдвигающая интерферометрия значительно увеличила популярность интерференционных измерений в промышленных и научных применениях благодаря своей высокой помехоустойчивости. Широкое распространение получили и методы низкокогерентной интерферометрии, в которых измерения основаны на анализе огибающей интерференционных колебаний интенсивности светового поля, определяемой функцией временной или пространственной когерентности [3, 5, 6].

Особый интерес низкокогерентная дифференциальная интерферометрия представляет для диагностики ступенчатых структур, оптической 3D-профилометрии, оптической томографии полупрозрачных биологических объектов и некоторых других приложений, так как она позволяет однозначно измерять разности высот (толщин), превышающие $\lambda/2$ [2, 3].

Источник света с малой длиной когерентности в интерферометре позволяет значительно уменьшить паразитную пространственную модуляцию интенсивности в интерферограммах [7], существенно снижая погрешность измерений [8], улучшая отношение сигнал/шум и увеличивая разрешение по глубине. Совместное использование интерферометрических методов и современных информационных технологий приводит к новым возможностям применения интерферометрии для измерения, 3D-реконструкции и визуализации структурно-морфологических особенностей поверхностей объектов исследования на микро- и наномасштабах [2].

Работы в областях нанотехнологий и наноинженерии привели к появлению соответствующего диагностического и контрольно-измерительного оборудования, необходимого как для фундаментальных исследований, так и для сборочного производства [9]. Интенсивное развитие этих направлений требует непрерывного обновления приборной базы, разработки и создания новых быстродействующих методов и средств измерения. Поэтому совершенствование оптических методов и аппаратуры измерения применительно к задачам микроиндустрии актуально.

Целью данной работы является создание автоматизированного интерференционного микроскопа-профилометра, работающего в режимах микро- и наноизмерений и имеющего экспериментально подтверждённое разрешение по глубине менее 0,1 нм.

Первый режим предназначен для измерения рельефа поверхностей низкого качества, имеющих большие локальные и общие перепады высот. Второй — обеспечивает измерения высоты рельефа высококачественных поверхностей, имеющих локальные перепады высоты не более 150 нм и общее изменение рельефа в зоне измерения не более 50 мкм.

Структура и принцип действия прибора. Прибор разработан на принципах оптической интерферометрии и представляет собой сканирующий интерферометр частично когерентного света. Методика измерений основана на регистрации и анализе набора интерферограмм, полученных в процессе сканирования поверхности вдоль оптической оси Z интерферометра. По набору интерферограмм для каждой точки измеряемой поверхности находится дискретная функция $I(z_i)$, описывающая зависимость интенсивности светового потока от относительной координаты z_i i -го шага сканирования. Функция $I(z_i)$ используется далее для получения измерительной информации и реконструкции профиля поверхности.

Автоматизированный интерференционный микроскоп-профилометр, структурная схема которого приведена на рис. 1, состоит из блока интерферометра 1, контроллера управления 5, двухкоординатного предметного столика 11 и персонального компьютера 6.

Оптико-механический блок включает в себя основание с кронштейном, на котором закреплены столик вертикального перемещения 2 с интерферометром и горизонтальный двухкоординатный столик перемещения 11 объекта исследования 10. Контроль перемещения z интерферометра осуществляется при помощи оптической линейки 3, подключённой к контроллеру управления 5, который через интерфейс USB2.0 соединён с компьютером 6.

На рис. 2 показаны расположение и компоновка основных узлов микроскопа-профилометра, схематично представленных на рис. 1.

Интерферометр выполнен по схеме микроинтерферометра Линника [4], различные модификации которой нашли широкое применение в фазосдвигающих интерферометрах. В его состав входят: источник света с малой длиной когерентности 4; светоделиТЕЛЬ 16; объективы 12–15; опорное зеркало 7, закреплённое на пьезокерамическом актюаторе 8; объект исследования 10 и цифровая ПЗС-камера 9.

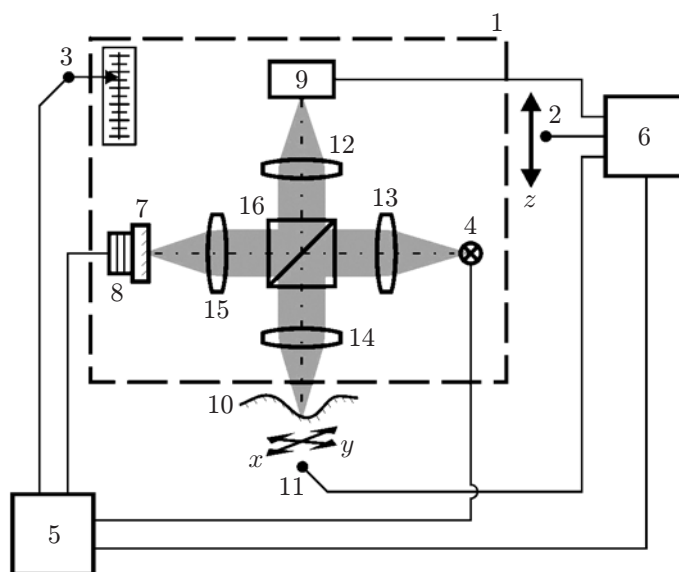


Рис. 1. Структурная схема прибора

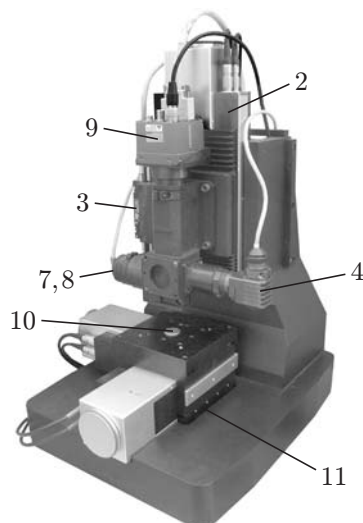


Рис. 2. Общий вид оптико-механического блока

В качестве источника света в приборе используется галогенная лампа накаливания, ток в которой управляется контроллером. Положение зеркала 7 в опорном плече интерферометра можно регулировать в небольших пределах (менее 1 мкм) от компьютера через контроллер. Интерферограммы регистрируются на ПЗС-камере и со скоростью 30 кадр./с вводятся в компьютер, где производится их автоматическая обработка.

Измерение микрорельефа поверхности. Принцип работы прибора в режиме микроизмерения заключается в получении и обработке дифференциальных интерферограмм [10].

Измерение микрорельефа поверхности выполняется методом сканирования объекта по глубине с заданным шагом. В процессе сканирования для каждого положения блока интерферометра z_i регистрируются интерферограммы, по которым производится расчёт и локализация зон интерференции. Результирующая интенсивность $I(x, y, z_i)$ в каждой измеряемой точке поверхности для заданного положения z_i рассчитывается в соответствии с выражением

$$I(x, y, z_i) = \sum_{j=1}^k A_j \left\{ I_j^0(x, y) + I_j(x, y, z_i, \varphi_j) \right\}, \quad (1)$$

где (x, y) — координаты, определяющие конкретную точку в зоне измерения (и соответствующий элемент изображения на ПЗС-камере); j — номер интерферограммы; k — число интерферограмм; φ_j — сдвиг фазы интерферограммы для j -го положения опорного зеркала; $I_j^0(x, y)$ — среднее значение интенсивности в точке (x, y) ; $I_j(x, y, z_i, \varphi_j)$ — интерференционный член, зависящий от φ_j и z_i ; A_j — весовой коэффициент, определяемый алгоритмом обработки интерферограмм. Например, при $k = 2$ (используются две интерферограммы с фазовым сдвигом $\varphi_2 - \varphi_1 = \pi$), $A_1 = -A_2$ и $|A_1| = |A_2| = 1$ производится простое вычитание интерферограмм. Так как средняя освещённость измеряемой поверхности при фазовом сдвиге изменяется незначительно, можно считать, что $I_1^0(x, y) = I_2^0(x, y)$. В этом случае дифференциальная интерферограмма определяется как

$$I(x, y, z_i) = I_2(x, y, z_i, \varphi_2) - I_1(x, y, z_i, \varphi_1). \quad (2)$$

Для каждой измеряемой точки поверхности (x, y) может регистрироваться $p(x, y)$, $p \in \{0, 1, 2, \dots\}$, значений амплитуды сигнала $[I(x, y, z_i)]$ так, чтобы $|I(x, y, z_i)| \geq I_p$, где

I_p — заданное пороговое значение амплитуды сигнала, превышающее шум. Далее в соответствии с некоторым алгоритмом $M([I(x, y, z_i), z_i])$ производится вычисление высот точек $Z(x, y)$ измеряемой поверхности, так что

$$Z(x, y) = M([I(x, y, z_i), z_i]). \quad (3)$$

В качестве алгоритма M может использоваться, например, процедура усреднения значений z_i :

$$Z(x, y) = \frac{1}{p(x, y)} \sum_{i=1}^{p(x, y)} z_i \quad \text{для } p(x, y) > 0. \quad (4)$$

Если $p(x, y) = 0$, т. е. в точке (x, y) не зарегистрировано ни одного значения сигнала, превышающего порог, то такая точка считается неизмеренной и в дальнейших расчётах не учитывается. Максимальная погрешность измерения высоты рельефа в этом случае определяется длиной когерентности используемого источника света. В результате обработки измеренный рельеф представляется в виде двумерного массива высот

$$Z(x, y) = \begin{cases} Z(x, y) & \text{для } p(x, y) > 0, \\ \text{не определено} & \text{для } p(x, y) = 0. \end{cases}$$

Измерение нанорельефа поверхности. Принцип работы микроскопа в режиме наноизмерения основан на частичном сканировании коррелограмм, предложенном в [11].

Для измерения нанорельефа поверхности производится сдвиг фазы интерферограмм посредством перемещения зеркала в опорном плече интерферометра вдоль его оси. Для каждого положения зеркала s_i с помощью ПЗС-камеры интерферограммы регистрируются и передаются в компьютер. По окончании сканирования для каждой точки (x, y) измеряемой поверхности формируется коррелограмма $\tilde{I}(x, y, s_i)$, представляющая собой изменение интенсивности интерференции в зависимости от шага сканирования. Типичный вид коррелограмм для двух разновысоких точек поверхности показан на рис. 3.

Разность фаз коррелограмм для двух произвольных точек поверхности (x, y) и (x', y') обусловлена разностью высот рельефа $\Delta h(x, y, x', y')$ между ними. Для вычисления Δh производится расчёт и минимизация среднеквадратичного отклонения фазы между коррелограммами [11]. По рассчитанным значениям Δh проводится 3D-реконструкция всей измеренной поверхности.

Отличительной особенностью метода частичного сканирования коррелограмм при измерении высоты рельефа поверхности является то, что сканирование производится в малом диапазоне (менее 1 мкм). В связи с этим его можно осуществлять смещением положения опорного зеркала интерферометра. Кроме того, при расчёте изменения фазы не

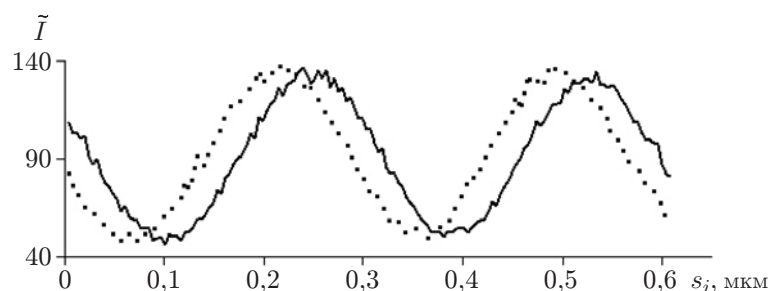


Рис. 3. Коррелограммы для двух выбранных точек измеряемой поверхности

используется значение самой фазы, что позволяет избежать проблем с неоднозначностью в том случае, когда общее изменение нанорельефа поверхности превышает половину эффективной длины волны.

Программное обеспечение поддерживает работу интерференционного микроскопа в режимах микро- и наноизмерений. Оно делится на два уровня.

Нижний уровень — это алгоритмы управления, функционирующие в контроллере электронного блока. Они обеспечивают интерфейс основной программы, управляют перемещением опорного зеркала, осветителем, питанием видеокамеры и вычисляют вертикальное положение интерферометра (координату z_i) по отсчётам линейного датчика положения.

Программное обеспечение верхнего уровня реализовано в виде оконного приложения на ПК и выполняет следующие основные функции:

1. Настройку основных параметров системы. В этом режиме существует возможность регулирования параметров измерительных алгоритмов, алгоритмов $3D$ -реконструкции и ряд параметров визуализации.

2. Управление всеми элементами системы. Данная функция используется в режимах измерения и калибровки системы. Часть элементов системы управляется непосредственно с ПК, а часть — через диалог с контроллером электронного блока.

3. Измерение микрорельефа поверхности с синхронной $3D$ -реконструкцией. Такой режим даёт возможность просматривать изображение с камеры в реальном времени, манипулировать осветителем и шаговым двигателем, настраивать ряд параметров алгоритмов измерения и $3D$ -реконструкции. Алгоритмы восстановления микропрофиля позволяют осуществлять $3D$ -реконструкцию практически синхронно с процессом измерения.

4. Измерение нанорельефа поверхности выполняется в два этапа. На первом этапе происходит накопление интерферограмм и сохранение их в виде файла. $3D$ -реконструкция нанорельефа поверхности выполняется на втором этапе измерения. При этом можно выбирать область реконструкции, а также исключать из реконструкции выбранные фрагменты измеряемой поверхности.

5. Визуализацию $3D$ -модели поверхности. В режиме просмотра результатов измерения $3D$ -модель поверхности отображается на плоскости экрана с некоторого ракурса. Параметры перспективы, угла зрения и положения наблюдателя, а также вида поверхности настраиваются с помощью управляющих элементов окна. В этом режиме есть возможность задать плоскость сечения, построить гистограмму распределения высот, измерить: линейные размеры элементов поверхности, шероховатость на выбранном участке, перепад высоты между выбранными точками анализируемой поверхности.

6. Постобработку результатов $3D$ -реконструкции. Доступны следующие функции постобработки: фильтрация усреднением по площади, интерполяция пропущенных точек, инверсия и смещение по вертикали.

Экспериментальные исследования. В экспериментах определялась максимальная разрешающая способность микроскопа по высоте измеряемого рельефа. При этом длина когерентности источника света составляла $l_c \approx 1,8$ мкм.

Объектом измерения была выбрана высококачественная плоскопараллельная наклонная стеклянная пластинка ПИ60. Наклон поверхности определялся экспериментально. Устанавливался шаг Δz_i перемещения интерферометра. Затем производилось измерение микрорельефа $Z(x, y)$ поверхности пластинки. По полученным значениям $Z(x, y)$ и значениям $Z^0(x, y)$, определяемым в эксперименте по наклону измеряемой поверхности пластинки, вычислялись отклонения

$$\Delta Z(x, y) = Z(x, y) - Z^0(x, y) \quad (5)$$

и среднеквадратичное отклонение

$$\sigma_{\Delta Z} = \sqrt{\frac{\sum_{x,y} (\Delta Z(x,y) - \overline{\Delta Z}(x,y))^2}{P}}. \quad (6)$$

Здесь суммирование осуществляется по всем измеренным точкам поверхности P (для которых $p(x,y) \neq 0$).

Далее шаг сканирования изменялся и снова проводилось измерение микрорельефа и расчёт $\sigma_{\Delta Z}$. Зависимость рассчитанных значений $\sigma_{\Delta Z}$ от шага сканирования показана на рис. 4. Для определения разрешения и сравнения с результатами, полученными экспериментально, строилась также математическая модель процесса измерения. Модель сигнала для наклонной плоскопараллельной пластинки рассчитывалась в соответствии с методикой, приведённой в [11]. К сигналу добавлялся шум с требуемой амплитудой. Затем в соответствии с (2)–(4) производился расчёт моделируемого рельефа $Z(x,y)$ и по выражениям (5) и (6) определялось $\sigma_{\Delta Z}$. На рис. 4 показаны результаты расчёта для модели с шумом 5 % и равновероятным положением сетки сканирования относительно каждой измеряемой точки в пределах шага сканирования. Так как смещение интерферограмм относительно точек измеряемой поверхности происходит с удвоенным шагом сканирования, то при его увеличении возрастает вероятность появления пропусков, т. е. для некоторых точек поверхности интерференция не регистрируется и расчёт $\sigma_{\Delta Z}$ становится некорректным. Во избежание этой ситуации максимальный шаг сканирования выбирался меньше $0,8l_c$ (экспериментально подобранная величина).

Из рисунка видно, что максимальное разрешение при измерении микрорельефа достигается на минимальном шаге сканирования, который для рассматриваемого микроскопа равен $0,25 \text{ мкм}$, а лучшее измеренное разрешение составляет $0,19 \text{ мкм}$. Из графика также видно, что разрешение микроскопа в режиме микроизмерений с использованием дифференциальных интерферограмм пропорционально шагу сканирования. Следовательно, более высокую разрешающую способность микроскопа можно получить, если использовать высококачественный микрометрический столик и систему контроля его перемещения.

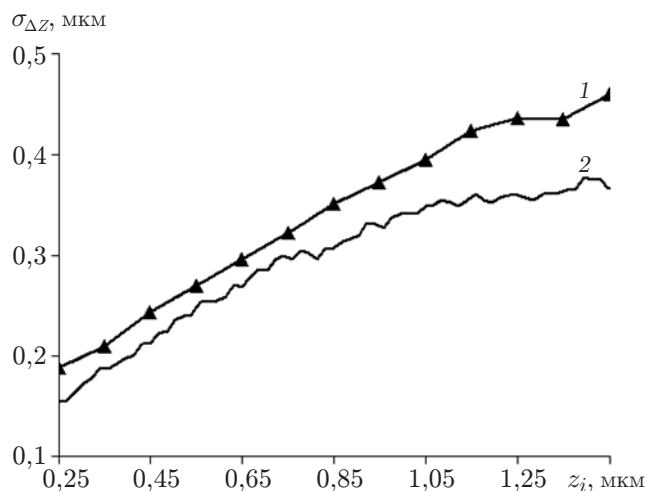


Рис. 4. Зависимости разрешающей способности от шага сканирования в режиме микроизмерений: экспериментальная (1) и модельная (2)

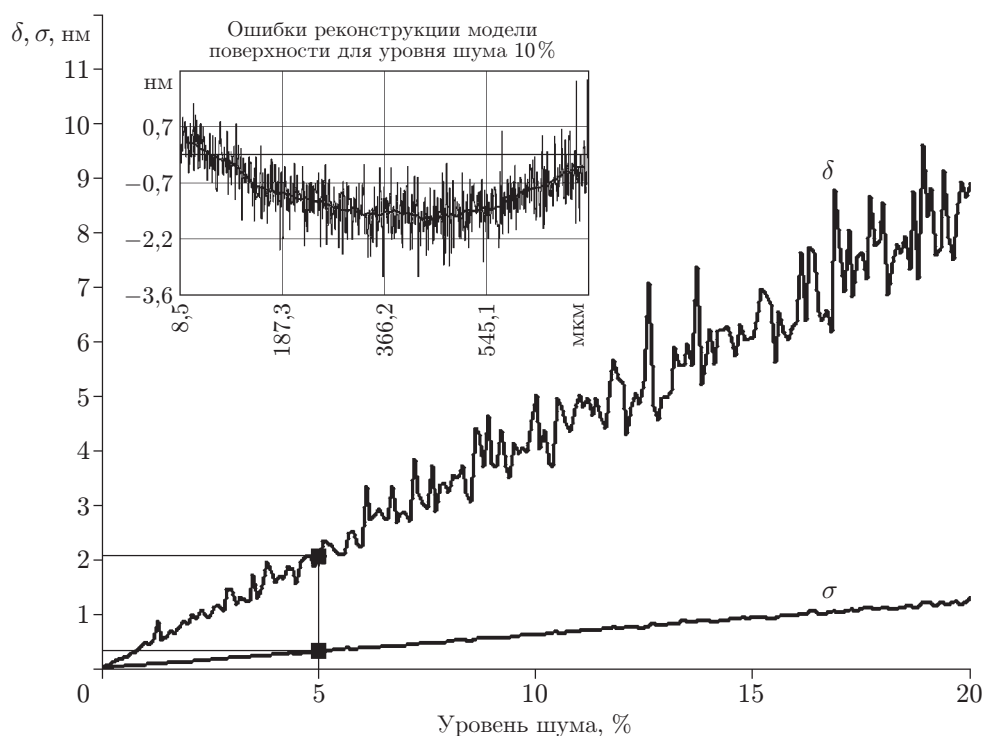


Рис. 5. Зависимости ошибки δ измерения и разрешающей способности σ от шума в интерферограммах

Погрешность метода δ , основанного на использовании частичного сканирования коррелограмм, и его разрешающая способность зависят в основном от шумов в интерферограммах. Они рассчитывались путём моделирования интерференции на наклонной плоскопараллельной пластинке, при этом в интерферограммы модели добавлялся нормальный шум различного уровня. Затем восстанавливался нанорельеф и сравнивался с его моделью. Максимальная разность между пиками определяет ошибку метода δ , а разрешающую способность определяет дисперсия σ , рассчитанная по восстановленному рельефу. Результаты моделирования представлены на рис. 5. В качестве примера на этом же рисунке приведён фрагмент графика восстановленной поверхности для модели, имеющей шум 10 %. Видно, что при шуме менее 2,5 % ошибка метода составляет менее 1 нм, а разрешающая

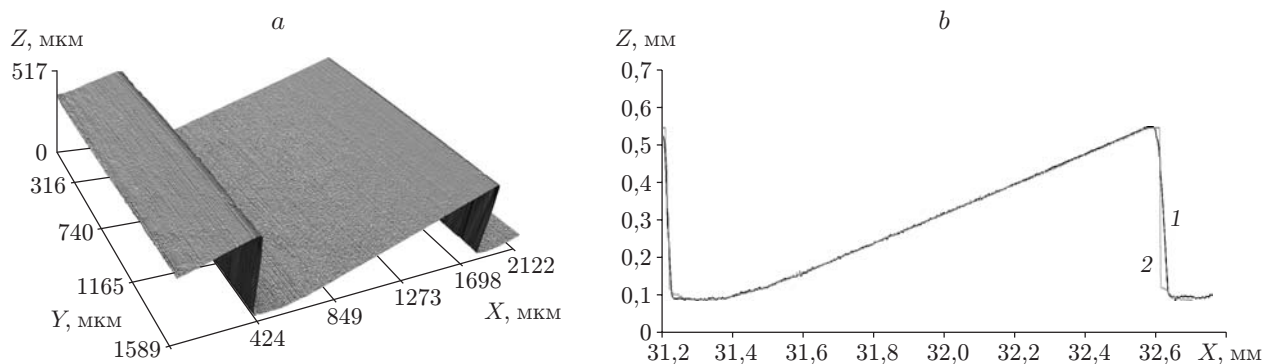


Рис. 6. Результаты измерения пуансона: а — 3D-реконструкция рельефа участка пуансона, б — сечение рельефа (кривая 1 — измерение микроскопом-профилометром, 2 — измерение микроскопом μ -Surf)

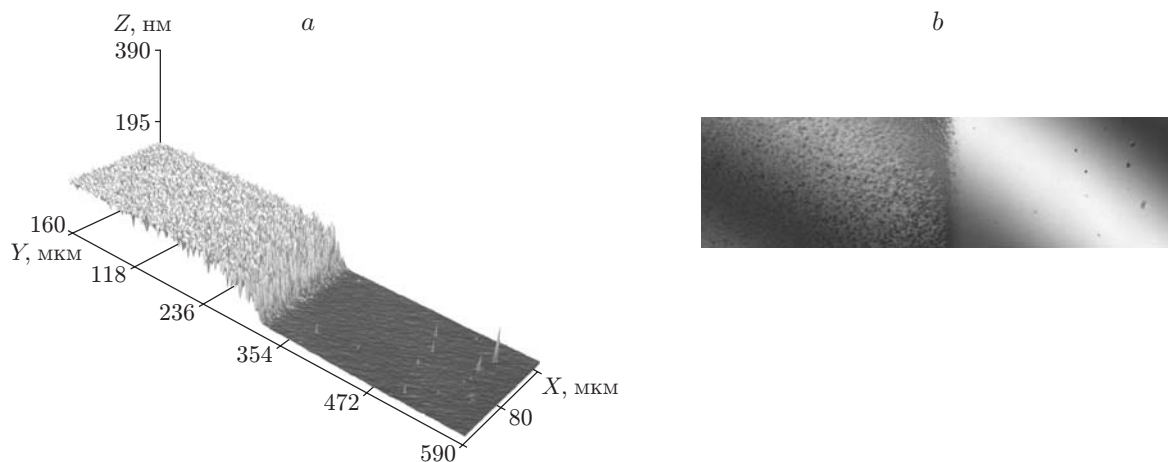


Рис. 7. Пластинка кремния с нанесённым слоем металла: *a* — 3D-реконструкция рельефа плёнки металла на кремнии, *b* — изображение интерферограммы на измеряемой поверхности

способность — менее 0,15 нм.

В экспериментах уровень шума, как показано на коррелограммах, приведённых на рис. 3, составлял $\sim 5\%$. Это соответствует разрешающей способности 0,31 нм и случайной погрешности измерений ~ 2 нм (см. рис. 5). Случайная погрешность и разрешающая способность могут быть значительно улучшены за счёт хорошей виброизоляции микроскопа и использования метода накопления с последующим их усреднением.

Результаты измерения микрорельефа поверхности пуансона для изготовления фазовой дифракционной линзы представлены на рис. 6. Сравнение измерений рельефа в сечении показывает, что разность высот рельефов составляет менее 2 мкм при полной глубине рельефа ~ 450 мкм и находится в пределах измеренной шероховатости поверхности пуансона.

Результат измерения нанорельефа поверхности пластинки кремния с нанесённым слоем металла толщиной ~ 101 нм приведён на рис. 7. Шероховатость поверхности кремния составляет менее 2 нм (рис. 7, *a*). Граница плёнки металла имеет неоднородную по плотности заполнения структуру (рис. 7, *b*).

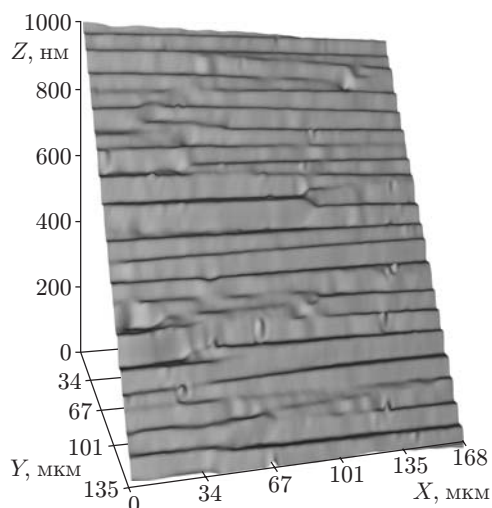


Рис. 8. Эшелоны атомных ступеней кремния

Несмотря на сложную морфологию поверхности, методами обработки интерферограмм получено высокое разрешение по высоте нанорельефа.

Результат измерения нанорельефа эшелонов атомных ступеней кремния, подробно представленных в работе [12], показан на рис. 8. Высота атомных ступеней варьируется от 5 до 80 нм.

Приведём основные технические характеристики разработанного интерференционного микроскопа-профилометра для микрообъективов с увеличением $3,7\times$, $8\times$, $20\times$.

— Измерение микрорельефа: диапазон от 0 до 10 мкм; разрешение по глубине 0,1 мкм; поперечное разрешение 1,7/0,8/0,3 мкм; площадь до $2,4 \times 1,8/1,1 \times 0,8/0,4 \times 0,3$ мм; время 10 с.

— Измерение нанорельефа: диапазон от 0 до 50 мкм; разрешение по глубине 0,1 нм; поперечное разрешение 1,7/0,8/0,3 мкм; площадь до $2,4 \times 1,8/1,1 \times 0,8/0,4 \times 0,3$ мм; время 10 с.

Заключение. В предлагаемой работе создан интерференционный микроскоп-профилометр, функционирующий в режимах нано- и микроизмерений, что расширяет сферы его применения. Микроскоп имеет высокое быстродействие, устойчивость к внешним вибрациям, высокую степень автоматизации процесса измерения, развитый программный интерфейс пользователя, высококачественный графический интерфейс для работы с многоплановыми 3D-представлениями результатов измерений, широкие возможности настройки микроскопа на разные типы морфологии измеряемых поверхностей, автоматизированное позиционирование объекта измерения по трём координатам.

Измерения разрешающей способности микроскопа производились с использованием кремниевых подложек с атомно-гладкой поверхностью [12] и показали, что разрешающая способность (среднеквадратичное отклонение) микроскопа по глубине менее 0,1 нм.

Разработанный микроскоп может использоваться для измерений высоты рельефа поверхности в режиме микроизмерений в диапазоне от 0,5 мкм до 10 мкм с разрешением по высоте 0,1 мкм и в режиме наноизмерений в диапазоне от 0,3 нм до 50 мкм с разрешением 0,1 нм. Во втором случае микроскоп может использоваться для измерений толщины наноплёнок в диапазоне от 0,2 до 150 нм при наличии резкой границы плёнки (ступеньки) на подложке.

Коллектив авторов выражает благодарность чл.-корр. РАН А. В. Латышеву (Институт физики полупроводников СО РАН), д-ру хим. наук И. К. Игуменову (Институт неорганической химии СО РАН), с. н. с. В. М. Ведерникову (Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН) за предоставленные образцы.

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. 3853–3860.
2. Тычинский В. П. Когерентная фазовая микроскопия внутриклеточных процессов // УФН. 2001. **171**, № 6. С. 649–662.
3. Иванов В. В., Маркелов В. А., Новиков М. А., Уставщиков С. С. Дифференциальная низкокогерентная интерферометрия для in situ диагностики прозрачных микроструктур // Письма в ЖТФ. 2004. **30**, № 9. С. 82–87.
4. Розенберг Г. В. Интерференционная микроскопия // УФН. 1953. **50**, вып. 2. С. 271–302.
5. Harasaki A., Schmit J., Wyant J. C. Improved vertical-scanning interferometry // Appl. Opt. 2000. **39**, N 13. P. 2107–2115.
6. Власов Н. Г. Получение изображений на основе использования когерентных свойств зондирующего излучения // ЖНПФ. 1999. **4**, № 5. С. 67–74.

7. **Франсон М.** Оптика спеклов. М.: Мир, 1980. 22 с.
8. **Pavlicek P., Hybl O.** White-light interferometry on rough surfaces-measurement uncertainty caused by surface roughness // Appl. Opt. 2008. **47**, N 16. P. 2941–2949.
9. **Нанотехнология** в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований: Пер. с англ. /Под ред. М. К. Роко, Р. С. Уильямса, П. Аливисатоса. М.: Мир, 2002. 292 с.
10. **Сысоев Е. В., Голубев И. В., Чугуй Ю. В.** Измерение поверхностных дефектов на основе низкокогерентной интерферометрии // Датчики и системы. 1999. № 6. С. 25.
11. **Сысоев Е. В.** Метод частичного сканирования коррелограмм для измерения микрорельефа поверхностей // Автометрия. 2007. **43**, № 1. С. 107–115.
12. **Latyshev A. V.** Precision measuring in nanoscale range // Proc. of the 9th ISMTII-2009. Saint-Petersburg, Russia, 2009. Vol. 1. P. 089–095.

Поступила в редакцию 16 июля 2009 г.
