

А. Тагучи, Н. Ямакита, Ю. Такая, Т. Миёши, С. Такахаша

(Осака – Токио, Япония)

ПРОФИЛОМЕТР ДЛЯ ОПЕРАТИВНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ 3D-МИКРОСТРУКТУР ПО ИХ СПЕКТРАМ*

Рассмотрен оптический метод измерения профиля поверхности трехмерных микроструктур. Информацию о пространственном спектре профиля поверхности получают путем измерения интенсивности дифракции света, по которой посредством восстановления фазы реконструируют поверхность. Приведен пример восстановления случайной неперидической поверхности ступенчатой структуры с высотой каждой ступеньки, равной 70 нм. Представлен результат успешной реконструкции поверхности. Рассмотренный дифракционный метод целесообразно использовать для оперативных измерений.

Введение. Непрерывный контроль пространственных параметров трехмерных микроструктур с использованием измерительных средств, функционирующих в режиме *in-process* или *in situ*, дает существенные преимущества в изготовлении подобных микроструктур. Оперативное (*in-process*) тестирование в сочетании с коррекцией процессов микросборки в реальном времени позволяет повысить эффективность производства и выход качественной продукции. Более того, с помощью непрерывного контроля можно адаптироваться к случайным изменениям условий производства. Хотя и предпринимаются значительные усилия по стабилизации условий производства, чтобы выполнить требования к все увеличивающейся прецизионности изделий, прямая компенсация и адаптация к неконтролируемым изменениям, возникающим в ходе производства, являются все еще востребованными при работе с объектами микро- и нанометрового диапазона. Для этого необходим быстродействующий, высокоточный, бесконтактный измеритель профиля, не искажающий поверхность, с большим рабочим диапазоном, устойчивый к вибрациям в условиях производства, простой в обращении, легко автоматизируемый.

Методы рассеяния были исследованы с целью получения усредненной по площади топографической информации о параметрах шероховатости поверхности [1–4] и до сих пор находят широкое применение в промышленности. Так как рассеяние представляет собой многолучевую интерференцию в дальнем поле, то измерения могут выполняться устойчиво даже в условиях

* Работа выполнена при частичной поддержке Научного общества молодых ученых (JSPS) (проект № 01145).

вибраций. Расширение применения методов рассеяния в процессе получения данных о профиле поверхностей может стать мощным средством оперативного контроля при производстве микроповерхностных структур.

В данной работе представлен оптический метод, с помощью которого можно определять профили поверхностей, измеряя интенсивность дифракции света на этих поверхностях. Информацию о пространственном спектре профиля поверхности получают из измеренной интенсивности дифракции Фраунгофера. Затем используют те или иные методы восстановления фазы [5, 6], чтобы из спектра синтезировать профиль поверхности. Основные преимущества представленного метода следующие: профиль поверхности в пределах освещенной области может быть измерен сразу весь и специального сканирования поверхности не требуется; достигаются большие рабочие смещения без контакта с рабочей поверхностью; вибрации рабочей поверхности не возмущают результаты измерений интенсивности дифракции.

Далее описаны принципы реализации предложенного метода (разд. 1), экспериментальная установка (разд. 2) и результаты экспериментов (разд. 3). Возможность работать со случайными непериодическими поверхностями была экспериментально продемонстрирована путем измерения специально подготовленного образца. Измерения периодических поверхностных структур отражены в [7].

1. Принцип измерений. 1.1. *Реконструкция профиля поверхности по интенсивности дифракции света.* Плоская монохроматическая волна падает нормально к поверхности, профиль которой представлен как $z = h(x, y)$. Искажение фронта волны сразу же после отражения поверхностью представлено в комплексной форме как

$$f(x, y) = |f(x, y)| \exp[i\theta(x, y)], \quad (1)$$

где

$$\theta(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} h(x, y) \quad (2)$$

– разность фаз, вносимая нерегулярностью высот на поверхности, а λ – длина волны излучения, падающего на поверхность. Будем считать возмущенную волну $f(x, y)$ объектной. Поле дифракции Фраунгофера, получаемое с помощью одиночной линзы, связано с объектной волной фурье-преобразованием

$$F(u, v) = \iint_D f(x, y) \exp[-i2\pi(ux + vy)] dx dy, \quad (3)$$

где (u, v) – координата в частотном пространстве [8]. Дифракция Фраунгофера позволяет картировать фурье-спектр объектной волны. Используя эту спектральную информацию, можно определить интересующую нас фазу объектной волны.

Фурье-спектр характеризуется комплексной функцией. Однако измерение интенсивности дифракции $I(u, v) = |F(u, v)|^2$ дает только спектральную плотность мощности (СПМ) объектной волны. Определение объектной волны по ее СПМ возможно, если использовать восстановление фазы. Имеется несколько разновидностей методов восстановления фазы: итеративный ме-

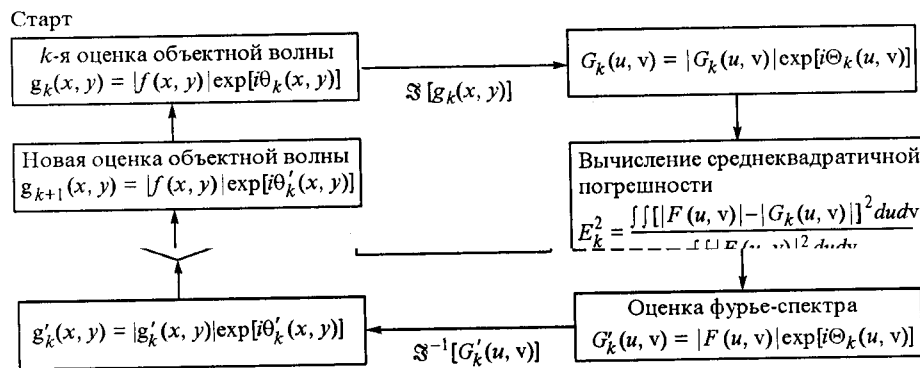


Рис. 1. Блок-схема алгоритма восстановления фазы. Сходимость алгоритма отслеживания путем вычисления нормированной среднеквадратичной погрешности E_k^2

тод, использующий пару сигналов о двух интенсивностях, измеренных в пространственной области и в области пространственных частот [5–7]; итеративное восстановление фазы по единственному сигналу интенсивности при использовании дополнительных ограничений [6, 9–11] и прямой (неитеративный) метод [12–15]. В работах [11, 15] показано, что устойчивость к шуму, содержащемуся в измеренных данных интенсивности, является неотъемлемым условием и успех восстановления фазы комплексно-оцениваемых объектов существенно зависит от количества доступной информации об интенсивности и ограничениях. Далее мы используем методику итеративного восстановления фазы с двумя измерениями интенсивности. Данные об интенсивности в пространственной области $i(x, y) = |f(x, y)|^2$ получают, используя обычный оптический микроскоп.

1.2. *Алгоритм восстановления фазы.* На рис. 1 показана блок-схема алгоритма восстановления фазы. Алгоритм включает в себя прямое и обратное итеративное фурье-преобразование между пространственной областью и областью пространственных частот и использование измеренных в каждой области данных об интенсивности. Обозначим значение фазы для k -го цикла итерации как $\theta_k(x, y)$, значение объектной волны как $g_k(x, y) = |f(x, y)| \exp[i\theta_k(x, y)]$. Четыре следующих шага применяют последовательно к выражению $g_k(x, y)$:

- 1) фурье-преобразование значения объектной волны;
- 2) замена модуля результирующего фурье-преобразования измеренными модулями Фурье для получения значений спектра Фурье;
- 3) обратное фурье-преобразование значений спектра Фурье;
- 4) замена модуля результирующей функции измеренными модулями для получения нового значения объектной волны.

Эти четыре шага описываются следующим образом:

$$G_k(u, v) = |G_k(u, v)| \exp[i\Theta_k(u, v)] = \mathfrak{F}[g_k(x, y)], \quad (4)$$

$$G'_k(u, v) = |F(u, v)| \exp[i\Theta_k(u, v)], \quad (5)$$

$$g'_k(x, y) = |g'_k| \exp[i\theta'_k(x, y)] = \mathfrak{F}^{-1}[G'_k(x, y)], \quad (6)$$

$$g_{k+1}(x, y) = |f(x, y)| \exp[i\theta_{k+1}(x, y)] = [i\theta'_k(x, y)], \quad (7)$$

где $G_k(u, v)$ и $\Theta_k(u, v)$ – значения амплитуды и фазы фурье-спектра, а \mathfrak{F} и \mathfrak{F}^{-1} – операторы прямого и обратного преобразования Фурье соответственно.

Качество восстановления фазы контролируют по нормированной среднеквадратичной погрешности E_k^2 , определяемой в области пространственных частот как

$$E_k^2 = \frac{\iint [|F(u, v)| - |G_k(u, v)|]^2 dudv}{\iint |F(u, v)|^2 dudv}. \quad (8)$$

Текущее значение среднеквадратичной погрешности E_k^2 уменьшается на каждом цикле итерации [5]. Процесс итераций продолжается до тех пор, пока значение погрешности E_k^2 не перестанет изменяться с ростом числа циклов итераций, т. е. достигнет минимума. Отметим, что в двумерном случае восстановление фазы имеет, как известно, почти всегда единственное решение, исключая малозначащие неопределенности, например поворот на $2/\pi$, линейный сдвиг и умножение на единичное значение комплексной постоянной [16].

В качестве начальной оценки алгоритма целесообразно давать точное распределение фазы, чтобы уменьшить необходимое время вычислений, а также устранить малозначащие неопределенности в фазовых решениях. Поскольку мы имеем дело с инженерными поверхностями, можем использовать *a priori* информацию о поверхности, например, планируемое геометрическое качество, размеры и величины параметров.

2. Экспериментальная установка. 2.1. Оптическая схема. На рис. 2 в упрощенном виде приведена оптическая схема установки для проверки предложенного метода. В качестве когерентного источника света использован аргоновый ионный лазер (MELLES GRIOT 543-100BS; длина волны 488 нм). Излучение лазера подводится к установке с помощью одномодового световолоконного кабеля. Чтобы получить входную плоскую волну, падающую на образец нормально, используется центральный иллюминатор Кехлера. При этих условиях освещения обеспечивается большая глубина фокусировки на освещаемой поверхности, вследствие чего не требуется точно позиционировать и устанавливать образец. Свет, рассеянный поверхностью образца, собирается объективом 1 (Nikon CFIC-EPI PLAN ELWD, 50×, числовая апертура 0,55, световой диаметр 8,7 мм), формирующим фраунгоферовскую картину дифракции на его задней фокальной плоскости. Дифракционный образ увеличивается в 4 раза с помощью оптической системы микроскопа, состоящей из объектива 2 (Nikon CFI PLAN, 4×, числовая апертура 0,10, световой диаметр 30 мм), хода лучей 1 и окуляра ($f = 200$ мм) (см. рис. 2). С другой стороны, оптический микроскоп (ход лучей 2 на рис. 2) в

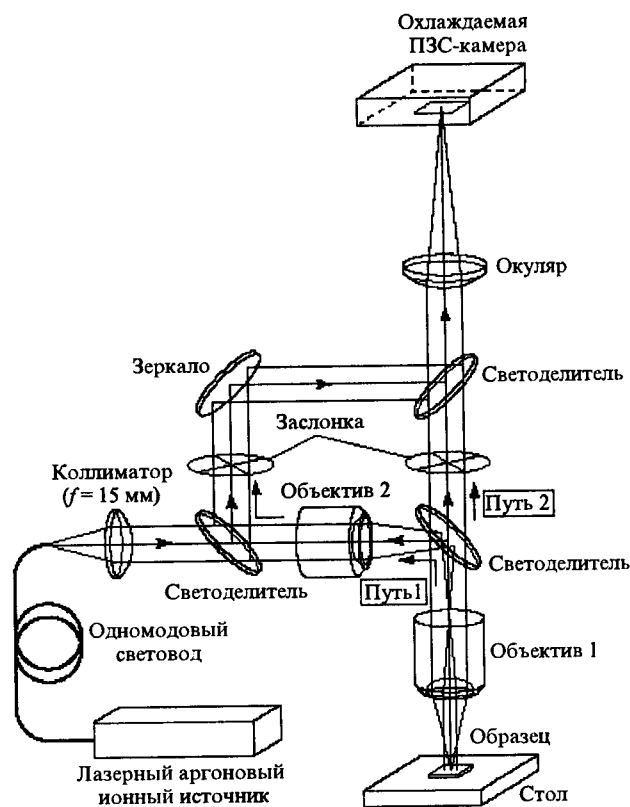


Рис. 2. Упрощенная оптическая схема установки

плоскости изображения создает увеличенное изображение поверхности образца, которое требуется один раз, чтобы измерить интенсивность объекта. Интенсивность света по каждому направлению измеряется отдельно путем управления двумя заслонками, которые перекрывают соответствующие лучи. Увеличение обеих систем в боковом направлении калибруют, используя стандартные решетки, постоянные которых (пространственный период) хорошо известны.

Изображение поля интенсивностей регистрируется с помощью охлаждаемой ПЗС-камеры (Apogee Instrument AO-4; Kodak KAF-4200, число точек растра 2048×2048 , размер пиксела 9×9 мкм; динамический диапазон > 75 дБ). В течение измерений интенсивности смещение, темновой ток и изменение чувствительности между пикселями в ПЗС-чипе калибруются, чтобы улучшить значение отношения сигнал/шум в измеренных интенсивностях изображений, поданных на ПЗС. Установка была размещена в «чистой» комнате класса 5000.

2.2. Компенсация падающего фронта. Реконструированная фаза может быть интерпретирована как разность фаз, добавленная в волновой фронт падающего луча, освещающего поверхность. Таким образом, требуется достаточно плоский волновой фронт, чтобы реконструированная фаза точно отображала профиль поверхности. На практике падающий волновой фронт может быть искажен при его прохождении через оптические компоненты, например светоделители и линзы. Искаженный фронт должен быть вычтен

из реконструированной фазы, чтобы получить собственный профиль поверхности.

Волновой фронт освещающего луча измерялся в пределах данной измерительной схемы, однако в этом случае необходимо в качестве образца использовать оптически плоскую поверхность, которая будет выступать в качестве опорной плоскости. Такая процедура выполняется перед каждым реальным измерением. Обычно получается слегка возмущенный сферический волновой фронт, полное искажение которого достигает несколько десятков нанометров.

3. Эксперимент. 3.1. Образец был сконструирован в соответствии с эскизом на рис. 3, *a*. Он содержит четыре последовательно уменьшающихся в размерах квадратных углубления (глубина каждого 70 нм). Длины сторон каждого углубления составляют 105, 75, 45 и 15 мкм соответственно. Все углубления, за исключением самого малого, расположены в центре нижнего. Самое маленькое углубление фактически смещено на 5 мкм от точного центра. Образец был изготовлен на кремниевой подложке с помощью сфокусированного ионного пучка на установке SMI 9200 фирмы "Seiko Instruments". На

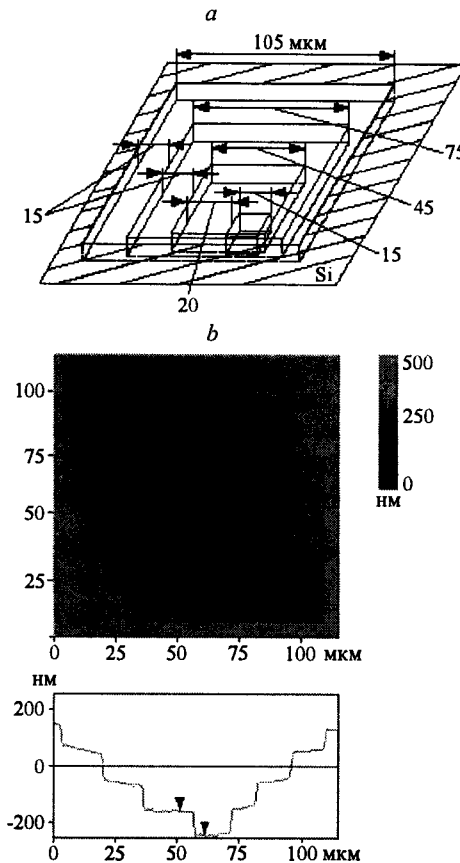


Рис. 3. Эскиз конфигурации образца. Высота всех ступенек 70 нм (*a*). Карта высот и типичное сечение образца, полученное с помощью атомно-силового микроскопа. Расстояния между двумя треугольниками в горизонтальном и вертикальном направлениях равны 10,3 мкм и 84,5 нм соответственно (*b*)

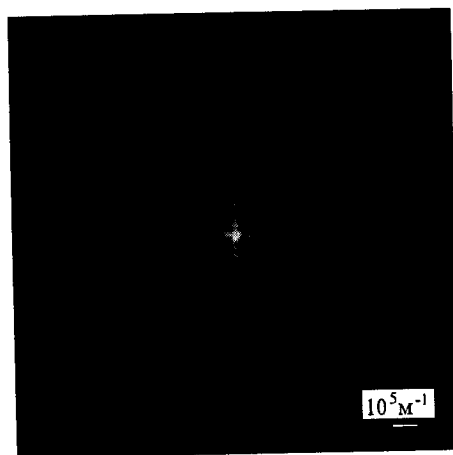


Рис. 4. Интенсивность дифракции света $I(u, v) = |F(u, v)|^2$

рис. 3, *b* представлена поверхность образца, полученная с помощью атомно-силового микроскопа (Digital Instrument: Veeco metrology group, Nanoscope IIIa Dimension 3100).

3.2. *Измерение.* Образец был освещен гауссовым пучком, имеющим диаметр ~ 160 мкм. На рис. 4 представлено зарегистрированное с помощью ПЗС-камеры изображение измеряемой интенсивности дифракции $I(u, v) = |F(u, v)|^2$. Поскольку изображение содержит значения интенсивности, распределенные в широком динамическом диапазоне, серые уровни представленного изображения растянуты в логарифмическом масштабе. Чтобы убрать нежелательные артефакты и шумы измерений, данные об интенсивности дифракции и дополнительно измеренная интенсивность объекта $i(x, y) = |f(x, y)|^2$ были обработаны предварительно (до начала процедуры восстановления фазы с помощью методов обработки изображений).

Выполнено 15 циклов итераций для восстановления искомой фазы. Характер изменения нормированной среднеквадратичной погрешности измерений E_k^2 представлен на рис. 5, *a*. После первых циклов итераций значение нормированной среднеквадратичной погрешности быстро достигает величины, равной $\sim 0,07$. Длительность 15 циклов итераций составляет ~ 37 мин на процессоре Sun Ultra 2/2200 (200 МГц). Это достаточно большая величина, однако не критическая, если принять во внимание прогресс в росте скорости работы центральных процессоров современных компьютеров. Значение реконструированной фазы при восстановлении получается в свернутом виде, т. е. модуль ограничен пределами $[-\pi, \pi]$. Затем вручную разворачиваем фазу так, чтобы получить непрерывную поверхность с изменением высот, превышающим 2π . Падающий волновой фронт, параметры которого определены заранее, затем вычитается из развернутой поверхности. Окончательный вариант поверхности представлен на рис. 5, *b*. На рис. 6, *a, b* показаны трехмерные изображения части поверхности образца, выделенной на рис. 5, *b* пунктирной линией и символом Σ . Здесь же приведены сечения профиля поверхности вдоль линии $X-X'$.

Для сравнения профилей, полученных с помощью атомно-силового микроскопа и предлагаемого метода, были проанализированы данные о высоте профилей, полученных с помощью этих двух методов путем записи гисто-

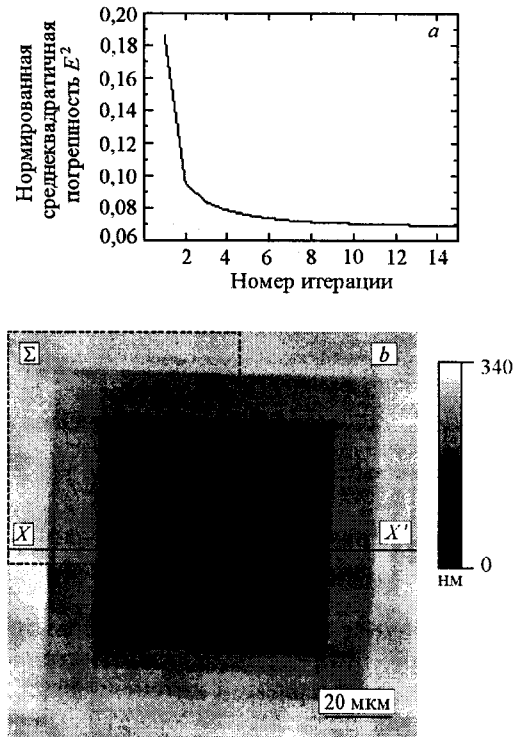


Рис. 5. Реконструкция поверхности по методу восстановления фазы: значение нормированной среднеквадратичной погрешности как функция числа итераций (а); реконструированная поверхность, высота поверхности представлена уровнем серого (b)

грамм распределения высот. Гистограммы имели пять следующих один за другим пиков, соответствующих пяти уступам, созданным четырьмя углублениями. Позиции пиков, проявившихся на этих гистограммах, и их измеренная полуширина (full-width half-measure (FWHM)) приведены в таблице. Пики пронумерованы в порядке увеличения их позиций вдоль z-координаты. Измеренное значение высоты ступенек здесь определялось как интервал между позициями двух соседних пиков. Для данного метода выделенные высоты ступенек составили (от основания до вершины) 76,0; 77,3; 85,4 и 68,0 нм соответственно, в то время как результаты, полученные с помощью атомно-силового микроскопа, составляют 86,2; 92,2; 82,1 и 74,8 нм соответственно. Усредненные значения высот четырех ступенек отклонялись приблизительно на 10 % друг от друга. Высоты ступенек измеряемого профиля на самом деле меньше задаваемой высоты (70 нм). Это объясняется тем фактом, что профиль, полученный с помощью атомно-силового микроскопа, имеет тенденцию изгибаться при сканировании вдоль горизонтального направления, формируя профиль, медленно спадающий к центру (см. рис. 3, b). Наибольшее различие в высоте ступенек, зарегистрированное в ходе измерений, составило 14,9 нм. Принимая во внимание упомянутую выше тенденцию в профилях, регистрируемых с помощью атомно-силового микроскопа, можно сделать заключение, что высоты ступенек, регистрируемые с помощью данного метода, повторяют результаты измерений с помощью атом-

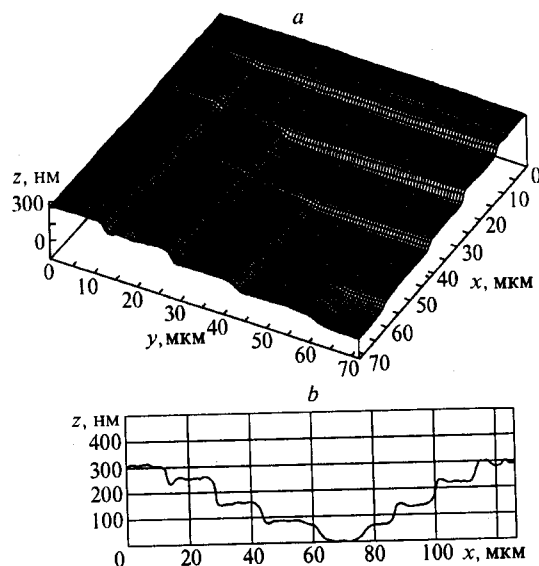


Рис. 6. Трехмерное изображение поверхности в области, отмеченной на рис. 5, *b* символом Σ , (*a*): контур сечения поверхности вдоль линии $X-X'$ (см. рис. 5, *b*) (*b*)

но-силового микроскопа со степенью согласия, по крайней мере, лучше чем 14,9 нм.

Характеристики волнистости, проявившейся на профиле (см. рис. 6, *b*), отнесены к возможным погрешностям измерений, поскольку это не наблюдается на профиле, зарегистрированном атомно-силовым микроскопом. Погрешность измерений была количественно оценена с помощью данных о FWHM из таблицы. Ряд наблюдаемых больших значений FWHM лежал в диапазоне от 12,0 до 40,0 нм (в среднем 27,2 нм). Эта погрешность может

Данные о высоте ступенек, выбранные из гистограммы измеренных высот при картировании поверхности

Метод	Пик 1		Пик 2		Пик 3	
	Позиция	Полуширина	Позиция	Полуширина	Позиция	Полуширина
Восстановление фазы	0	17,3	76,0	12,0	153,3	34,7
АСМ	0	9,8	86,2	23,5	178,4	19,6

Метод	Пик 4		Пик 5	
	Позиция	Полуширина	Позиция	Полуширина
Восстановление фазы	238,7	40,0	306,7	32,0
АСМ	260,5	23,5	335,3	47,1

быть отнесена к шуму измерения изображений интенсивностей. По сравнению с этим реконструкция поверхности из симулированных компьютером изображений интенсивностей (свободных от шума, с бесконечным динамическим диапазоном) дает полуширину, равную нескольким нанометрам. В этом случае нормированная среднеквадратичная погрешность достигает значения $9 \cdot 10^{-4}$ при тех же пятнадцати итерациях.

Заключение. Представлен оптический профилометр, основанный на методе восстановления фазы. Профиль поверхности реконструируют определенным образом из интенсивности дифракции света на этой поверхности, используя восстановление фазы. Предложенный метод экспериментально проверен путем измерения неперiodической ступенчатой структуры (высота каждой ступеньки 70 нм). Получена удовлетворительная реконструкция профиля поверхности. Хотя погрешность измерений, обусловленная шумом в измеренных данных интенсивностей, была достаточно высокого уровня, измеренные значения высот ступенек, получаемые с помощью предлагаемого метода и атомно-силового микроскопа, находились в согласии с отклонением, по крайней мере, лучше чем 15 нм.

Предлагаемый метод является потенциальной альтернативой обычно используемым интерферометрическим методам для измерений профиля микроструктур непосредственно в ходе изготовления структур. Процедура фазового развертывания, осуществляемая на основе априорной информации о структуре поверхности, может быть автоматизирована с помощью методик устранения фазовых неоднозначностей на основе методов многих длин волн или сканирования по длинам волн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Beckmann P., Spizzichino A.** The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces. Norwood, MA: Artech House, 1987.
2. **Vorburger T. V., Marx E., Lettieri T. R.** Regimes of surface roughness measurable with light scattering // Appl. Opt. 1993. **32**, N 19. P. 3401.
3. **Valliant J. R., Feloy M. P., Bennett J. M.** Instrument for on-line monitoring of surface roughness of machined surfaces // Opt. Eng. 2000. **39**, N 12. P. 3247.
4. **Hertzsch A., Kröger K., Truckenbrodt H.** Microtopographic analysis of turned surfaces by model-based scatterometry // Prec. Eng. 2002. **26**, N 3. P. 306.
5. **Gerchberg R. W., Saxton W. O.** A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures // Optik. 1972. **35**, N 2. S. 237.
6. **Fienup J. R.** Phase retrieval algorithms: a comparison // Appl. Opt. 1982. **21**, N 15. P. 2758.
7. **Taguchi A., Miyoshi T., Takaya Y., Takahashi S.** High precision instrument for micro surface profile measurement based on optical inverse scattering phase method // Proc. of XVII IMEKO World Congress, Metrology in the 3rd Millennium. Dubrovnik, Croatia, 2003. In press.
8. **Born M., Wolf E.** Principles of Optics. N. Y.: Pergamon Press, 1980.
9. **Fienup J. R.** Reconstruction of an object from the modulus of its Fourier transform // Opt. Lett. 1978. **3**, N 1. P. 27.

10. **Fienup J. R.** Reconstruction of a complex-valued object from the modulus of its Fourier transform using a support constraint // Journ. Opt. Soc. Amer. A. 1987. **4**, N 1. P. 118.
11. **Taguchi A., Miyoshi T., Takaya Y. et al.** 3-D micro-profile measurement using optical inverse scattering phase method // Ann. CIRP. 2000. **49**, N 1. P. 423.
12. **Lane R. G., Fright W. R., Bates R. H. T.** Direct phase retrieval // IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process. 1987. **ASSP-35**, N 4. P. 520.
13. **Nakajima N.** Phase retrieval from two intensity measurements using the Fourier series expansion // Journ. Opt. Soc. Amer. 1987. **A4**, N 1. P. 154.
14. **Nakajima N.** Phase retrieval using the logarithmic Hilbert transform and the Fourier-series expansion // Journ. Opt. Soc. Amer. 1988. **A5**, N 2. P. 257.
15. **Miyoshi T., Takaya Y., Saito K.** Micromachined profile measurement by means of optical inverse scattering phase method // Ann. CIRP. 1996. **45**, N 1. P. 497.
16. **Luke D. R., Burke J. V., Lyon R. G.** Optical wavefront reconstruction: theory and numerical methods // SIAM Rev. 2002. **44**, N 2. P. 169.

*Университет г. Осака,
Университет г. Токио,
E-mail: taguchi@optim.mech.eng.osaka-u.ac.jp*

*Поступила в редакцию
17 июня 2003 г.*