

6. Мясникова Н. В., Берестень М. П., Долгих Л. А. Методы разложения сигналов на основе экстремальной фильтрации // Датчики и системы. 2011. № 2. С. 8—11.

7. Долгих Л. А., Мясникова Н. В., Мясникова М. Г. Применение разложения по эмпирическим модам в задачах цифровой обработки сигналов // Датчики и системы. 2011. № 5. С. 8—10.

8. Мясникова Н. В., Берестень М. П., Строганов М. П. Аппроксимация многоэкстремальных функций и ее приложения в технических системах // Известия вузов. Технические науки. Поволжский регион. 2011. № 2. С. 113—119.

9. Ломтев Е. А., Терехина А. В., Цыпин Б. В. Применение метода на основе экстремальной фильтрации в задачах сжатия измерительных сигналов // Измерение, мониторинг, управление, контроль. Пенза: Изд-во ПГУ, 2013. № 1 (3). С. 55—60.

10. Терехина А. В. Сравнительная оценка алгоритмов сжатия информации на основе метода Прони // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 1.

Дата принятия 23.09.2015 г.

ЛИНЕЙНЫЕ И УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

539.25+537.533.35+620.187

Трехмерная реконструкция поверхностей рельефных структур по стереоизображениям, полученным в растровом электронном микроскопе

В. П. ГАВРИЛЕНКО¹, Д. А. КАРАБАНОВ¹, А. Ю. КУЗИН¹, В. Б. МИТЮХЛЯЕВ¹,
А. А. МИХУТКИН², П. А. ТОДУА¹, М. Н. ФИЛИППОВ¹, Т. Н. БАЙМУХАМЕТОВ^{2, 3},
А. Л. ВАСИЛЬЕВ^{2, 4}

¹ Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума, Москва, Россия, e-mail: fgupnicpv@mail.ru

² Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

³ Московский физико-технический институт (государственный университет), Москва, Россия

⁴ Институт кристаллографии РАН, Москва, Россия

Методом трехмерной реконструкции по стереоизображениям, полученным в растровом электронном микроскопе, восстановлен профиль поверхности двух образцов из монокристаллического кремния, содержащих выступы трапецеидальной формы, и определено среднее значение высоты их выступов.

Результаты сравнивали с результатами измерений атомно-силовым микроскопом.

Преимущество по точности реконструкции для образца, подвергнутого дополнительной плазменной обработке, объяснено образованием наноразмерных морфологических особенностей поверхности в виде контрастных элементов, повышающих точность совмещения изображений в процессе 3D-реконструкции.

Ключевые слова: 3D-реконструкция, профиль поверхности, растровый электронный микроскоп, атомно-силовая микроскопия, стереоизображения, рельефные элементы.

A method of 3D reconstruction by stereo scanning electron microscope images for calculation of the surface profile of two samples comprising trapezoidal protrusions in single-crystal silicon was applied and the average value of the protrusions height was calculated.

The measurements results received by the method 3D reconstruction and atomic force microscope were compared.

Better accuracy of 3D reconstruction for the sample additionally treated by plasma magnitudes of the protrusions has been explained by formation of nanometer-sized features on its surface as a result of plasma treatment improving the precision of image superposition during the 3D reconstruction.

Key words: 3D reconstruction, surface profile, scanning electron microscope, stereo-pair images, relief elements.

Растровый электронный микроскоп (РЭМ) — один из приборов, наиболее часто используемых для получения изображений поверхностей, который обладает большой глубиной фокуса и высокой разрешающей способностью (до 1 нм). Метод трехмерной (3D) реконструкции поверхности образца по изображениям, полученным в РЭМ, позволяет извлечь

информацию о его трехмерной поверхностной структуре из пары двумерных РЭМ-изображений, полученных при различных углах наклона образца [1, 2]. Данный метод использует явление стереоэффекта, проявляющегося вследствие параллакса — изменения видимого положения объекта относительно удаленного фона в зависимости от положения на-

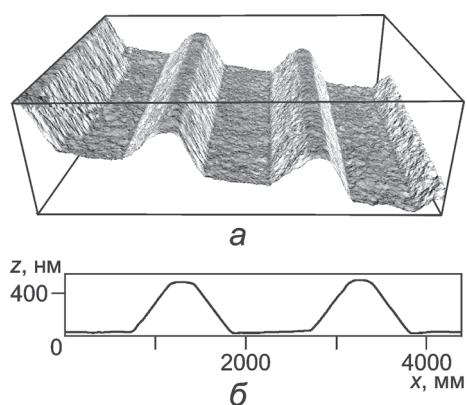


Рис. 1. 3D-реконструкция поверхностей образца 1 по РЭМ-стереоизображениям (а) и усредненный профиль реконструированной поверхности образца 1 (б)

блюдателя. На этом же основано, в частности, бинокулярное зрение человека и животных: пространственное представление об объекте формируется на основе двух изображений (с правого и левого глаза), полученных из разных точек обзора (под разными углами). На основе различий в изображениях формируется пространственное (объемное) восприятие наблюдаемого объекта (стереоэффект). Такие изображения называют стереоизображениями (в случае двух изображений — стереопарой), причем различия в стереоизображениях тем больше, чем больше разница в углах, под которыми наблюдается объект (стереоугол).

Методика получения стереопары изображений в РЭМ заключается в повторной съемке одного и того же объекта, наклоненного под разными углами ($1\text{--}20^\circ$) по отношению к электронному зонду, а угол наклона образца изменяется с помощью гониометра. Желательно, чтобы образец в гониометре находился в эуцентрической позиции, когда при наклоне отсутствует (или минимизировано) его перемещение в плоскости изображения. Стереоскопические изображения дают представление о рельефе образца и позволяют в отдельных случаях количественно оценить высоту некоторых

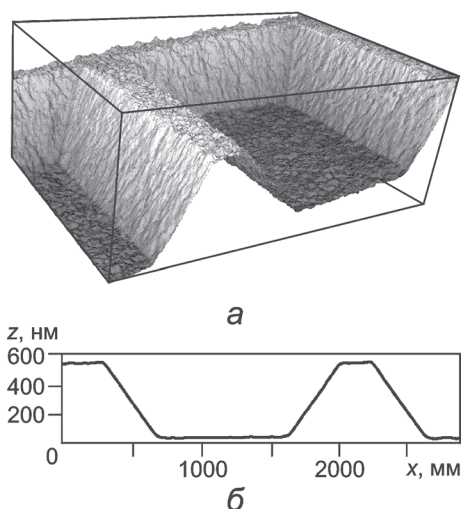


Рис. 2. 3D-реконструкция поверхности образца 2 по РЭМ-стереоизображениям (а) и усредненный профиль реконструированной поверхности образца 2 (б)

объектов, однако они недостаточны для полноценных измерений высоты рельефа и комплексного анализа морфологии поверхности [2—5].

Появление новых алгоритмов обработки изображений позволило на основе полученных изображений создать 3D-модель исследуемой поверхности с высоким разрешением (нанометровым разрешением по высоте) и провести полноценный анализ поверхности, в том числе измерить высоты неровностей поверхности, объемы углублений и выпуклостей и т. д. [6—10]. При этом необходимо исследование точности данного метода, в частности, определение погрешности измерений параметров рельефа.

Предварительные оценки точности измерений проведены в [1, 6, 9], в них также рассмотрены факторы, влияющие на разрешение метода.

В настоящей работе приведены результаты исследований показателей точности измерений параметров рельефа поверхности по стереоизображениям, полученным в РЭМ.

Эксперимент. Объекты исследования — два тестовых образца, имеющие рельефную структуру, полученную на подложке из монокристаллического кремния, поверхность которого параллельна плоскости (100). Элементы рельефа формировали методом фотолитографии с последующим анизотропным травлением, в результате чего образовавшиеся выступы имели трапециевидную форму. Боковые стенки выступов совпадали с плоскостями {111} и составляли угол $54,7^\circ$ с плоскостью подложки. В данном методе глубина профиля рельефной структуры определяется временем травления и поэтому одинакова для всех выступов. Трапециевидная форма элементов рельефа, полученных по описанной выше технологии, подтверждается при исследовании их поперечного среза методом просвечивающей электронной микроскопии [11].

Для исследования характеристик 3D-реконструкции по РЭМ-изображениям использовали два тестовых образца: образец 1, изготовленный по описанной выше технологии, и аналогичный образец 2, прошедший дополнительную процедуру плазменной обработки. Плазменную обработку проводили в установке плазменной очистки Plasma Cleaner PC-2000 (Southbay Technology), при этом исследуемый образец помещали в камеру, где индуцировался тлеющий высокочастотный разряд мощностью 15 Вт в аргоне или кислороде. Процедура плазменной обработки состояла из 10 циклов, каждый из которых включал 15 мин обработки в аргоне и 5 мин в кислороде. Промежуток между циклами составлял 2 ч, при этом образец извлекался из камеры и выдерживался при лабораторных условиях.

Для получения РЭМ-изображений использовался РЭМ S-4800 (фирма Hitachi), оснащенный автоэмиссионным катодом холодного типа. Исследуемый образец помещали в эуцентрическую позицию, задаваемую положением образца относительно столика объектов. Для определения параметров профиля рельефной структуры образцов использовали атомно-силовой микроскоп Ntegra Aura (NT-MDT), который калибровали с применением меры высоты ступени TGZ3.

Сравнение РЭМ-изображений образцов 1, 2 показывает, что при плазменной обработке на поверхности второго образца образуются дополнительные контрастные элементы с латеральными размерами порядка 10 нм. В результате измерений методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) получено, что параметр шероховатости R_q , определяемый как

среднее квадратическое отклонение (СКО) профиля, для верхней поверхности выступа составил 0,9 и 1,5 нм для образцов 1, 2, соответственно. Высоты выступов по данным АСМ-измерений составили 545 и 563 нм для образцов 1, 2, соответственно. Абсолютная погрешность АСМ-измерений для высоты выступов составила $\Delta = \pm 4$ нм ($P = 0,95$).

При ускоряющих напряжениях 2 и 15 кВ получены серии РЭМ-изображений исследуемых образцов при разных углах их наклона ($\pm 7^\circ$; $\pm 10^\circ$) с использованием двух значений силы тока электронного зонда (30 и 200 пА), различного времени экспозиции при увеличениях $25000\times$ и $40000\times$. На основе каждой стереопары изображений с использованием программного обеспечения MeX (Alicona, Австрия) выполняли 3D-реконструкцию исследуемого участка поверхности для различных комбинаций параметров эксперимента (ускоряющего напряжения, углов наклона образца, силы тока электронного зонда). По результатам 3D-реконструкции для каждого образца определены значения высоты трапециевидных выступов при всех комбинациях параметров, СКО результатов измерений высоты выступов и R_q для верхнего основания выступов.

Высоту выступов усредняли по участкам образцов размерами $4,6 \times 2,5$ и $2,9 \times 1,2$ мкм. Вычисление параметров шероховатости реконструированных поверхностей проводили следующим образом: выбирали интересующую область поверхности; рассчитывали гистограмму распределения по высотам в пределах выбранного участка поверхности; вычисляли параметры шероховатости для данного участка.

Обсуждение результатов. Наилучшая 3D-реконструкция поверхности образца 1, при которой достигалось наименьшее значение параметра шероховатости ($R_q = 15$ нм) по верхнему основанию выступов и более близкое соответствие реконструируемого профиля форме трапеции, получилась для углов наклона $\pm 10^\circ$ при ускоряющем напряжении 2 кВ (рис. 1, а). На рис. 1, б представлен профиль, образованный усреднением по 1000 реконструируемых профилей участка образца размером $4,6 \times 2,5$ мкм.

Разброс значений высоты выступов при вариации параметров эксперимента для образца 1 характеризуется СКО 8 нм, а их среднее значение $H_1 = 576$ нм, отличается на $\Delta H_1 = 13$ нм от данных АСМ-измерений (563 нм).

Для образца 2 выявлено, что при 3D-реконструкции профиля рельефных элементов наименьшее значение параметра шероховатости ($R_q = 10$ нм) по верхнему основанию выступов возникает при следующих параметрах эксперимента: ускоряющее напряжение 15 кВ, углы наклона $\pm 7^\circ$. На рис. 2, а представлена 3D-реконструкция поверхности, полученная при использовании указанных выше параметров эксперимента, а на рис. 2, б — профиль рельефных элементов, усредненный по 1000 реконструируемым профилям (участка образца размером $2,9 \times 1,2$ мкм). Из анализа изображений следует, что форма полученного профиля более точно соответствует трапециевидальной форме выступа, чем показанная на рис. 1, б для образца 1.

Среднее квадратическое отклонение результатов измерений высоты выступов, найденных при варьировании параметров эксперимента (ускоряющее напряжение, углы наклона), составило 2,2 нм, а среднее значение высоты выступов $H_2 = 543,5$ нм, отличается на $\Delta H_2 = 1,5$ нм от данных АСМ-измерений (545 нм) для образца 2.

Результаты 3D-реконструкции профиля элементов рельефа образцов сведены в таблицу, где H_{3D} — усредненное значение высоты выступов по данным, полученным при различных параметрах эксперимента; $H_{АСМ}$ — значение высоты выступов по данным АСМ.

Данные 3D-реконструкции профиля рельефных элементов образцов 1, 2

Номер образца	Измеряемые параметры		
	R_q , нм	СКО, нм	$H_{3D} - H_{АСМ}$, нм
1	15	8	13
2	10	2,2	-1,5

Меньшее значение СКО для образца 2 можно объяснить морфологическими особенностями его поверхности, созданными плазменной обработкой. Хотя указанные морфологические особенности не создают существенного увеличения неоднородности рельефа поверхности исследуемого образца (по данным АСМ-измерений R_q верхнего основания выступов увеличивается 0,9—1,5 нм в результате плазменной обработки), они проявляются на РЭМ-изображениях в виде контрастных элементов нанометрового масштаба. Дополнительные контрастные элементы на них обеспечивают более точное совмещение отдельных частей изображений и, таким образом, повышают точность 3D-реконструкции и уменьшают значения параметров R_q , СКО и $H_{3D} - H_{АСМ}$ (см. таблицу). При этом среднее значение высоты выступов (образец 2) совпадает с данными АСМ-измерений в пределах погрешности АСМ-метода (4 нм). Следует отметить, что значение R_q , указанное в таблице, для обоих образцов существенно превышает значение, определенное методом АСМ, что можно объяснить особенностями программного обеспечения и шумами видеотракта РЭМ.

Закключение. Исследованы показатели точности измерений параметров профиля структур, содержащих выступы трапециевидальной формы в монокристаллическом кремнии, методом 3D-реконструкции в РЭМ. Показано, что среднее значение высоты выступов, определенное данным методом, отличается от данных АСМ-измерений (563 нм) на 13 нм (2,3 %) для образца 1, в то время как для образца 2 полученные значения совпадают в пределах погрешности АСМ-метода (4 нм). Улучшение показателей точности для образца 2 происходит из-за образования в результате дополнительной плазменной обработки этого образца морфологических особенностей его поверхности в виде контрастных элементов, повышающих точность совмещения отдельных участков поверхности на РЭМ-изображениях в процессе 3D-реконструкции. Среднее квадратическое отклонение результатов измерений высоты выступов составило 8 и 2,2 нм для образцов 1 и 2, соответственно.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках реализации Федеральной целевой программы

«Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014—2020 годы» (соглашение № 14.576.21.0027, уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57614X0027).

Л и т е р а т у р а

1. **Михуткин А. А., Васильев А. Л.** Трехмерная реконструкция поверхности по изображениям, полученным в растровом электронном микроскопе // Кристаллография. 2014. Т. 59. № 6. С. 999—1007.
2. **Goldstein J., Newbury D., Joy D.** Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis. N. Y.: Kluwer Academic, Plenum Publishers, 2003. P. 212—220.
3. **Соколов В. Н., Лебедев А. А., Юрковец Д. И.** Метод трехмерной реконструкции микрорельефа поверхности твердых тел по их РЭМ-стереоизображениям // Известия РАН. Сер. физ. 1995. Т. 59. № 2. С. 28—35.
4. **Minnich B., Leeb H., Bernroider E. W. N., Lametschwandner A.** Three-dimensional morphometry in scanning electron microscopy: a technique for accurate dimensional and angular measurements of microstructures using stereopaired digitized images and digital image analysis // J. Microscopy. 1999. V. 195. N. 1. P. 23—33.
5. **Pouchou J.-L., Boivin D., Beauchêne P., Besnerais G. L., Vignon F.** 3D Reconstruction of Rough Surfaces by SEM Stereo Imaging // Microchimica Acta. 2002. V. 139. N. 1—4. P. 135—144.

6. **Schroettner H., Schmied M., Scherer S.** Comparison of 3D Surface Reconstruction Data from Certified Depth Standards Obtained by SEM and an Infinite Focus Measurement Machine (IFM) // Microchimica Acta. 2006. V. 155. N. 1—2. P. 279—284.

7. **Roy S., Meunier J., Marian A. M., Vidal F., Brunette I., Costantino S.** Automatic 3D reconstruction of quasi-planar stereo Scanning Electron Microscopy (SEM) images // 34th Annual Int. Conf. of the IEEE EMBS (Engineering in Medicine and Biology Society). San Diego (Cf, USA). 2012. P. 4361—4364.

8. **Marinello F., Bariani P., Savio E., Horsewel A., Chiffre L.** Critical factors in SEM 3D stereo microscopy // Measurement Science and Technology. 2008. V. 19. N. 6. P. 065705.1—065705.12.

9. **Carli L., Genta G., Cantatore A., Barbato G., Chiffre L., Levi R.** Uncertainty evaluation for three-dimensional scanning electron microscope reconstructions based on the stereo-pair technique // Measurement Science and Technology. 2011. V. 22. N. 3. P. 035103.1—035103.11.

10. **Соколов В. Н.** Количественный анализ микроструктуры горных пород по их изображениям в растровом электронном микроскопе // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 8. С. 72—78.

11. **Filippov M. N., Gavrilenko V. P., Kovalchuk M. V., Mityukhyayev V. B., Ozerin Yu. V., Rakov A. V., Roddatis V. V., Todua P. A., Vasiliev A. L.** Reference material for transmission electron microscope calibration // Measurement Science and Technology. 2011. V. 22. P. 094014.1—094014.5.

Дата принятия 12.11.2014 г.

62.181.1

Оптимизация измерений геометрии деталей со сложными поверхностями

В. А. ПЕЧЕНИН, М. А. БОЛОТОВ, Н. В. РУЗАНОВ, М. В. ЯНЮКИНА

Самарский государственный аэрокосмический университет им. С. П. Королева
Национальный исследовательский университет, Самара, Россия,
e-mail: maikl.bol@gmail.com

Предложена методика оптимизации измерений поверхностей сложной формы одной серии деталей контактным методом. Приведены результаты применения методики для измерений в сечениях и на поверхностях серии лопаток компрессора газотурбинного двигателя.

Ключевые слова: сложная поверхность, количество и схема распределения точек, нелинейная оптимизация, лопатка компрессора газотурбинного двигателя.

A procedure for optimizing the parameters of measuring the complexform surfaces at contact measurement method ensuring the measurement accuracy for series of one type components is suggested. The results of procedure application for cross-sections and surfaces of gas-turbine engine compressor blades are presented.

Key words: complex surface, number and distribution pattern of points, curvature, equidistant surface, nonlinear optimization, gas-turbine engine compressor blade.

В настоящее время значительно возросло количество современных трехосевых координатно-измерительных машин (КИМ), имеющих компьютерную поддержку. В них используют

координатный метод измерений геометрических параметров, основанный на косвенном сличении. Координаты точек поверхностей можно измерять контактным и бесконтактным