

Измерение высоты элементов нанорельефа поверхности методом трёхмерной реконструкции в растровом электронном микроскопе

С. А. ДАРЗНЕК¹, Д. А. КАРАБАНОВ¹, А. Ю. КУЗИН²,
В. Б. МИТЮХЛЯЕВ¹, П. А. ТОДУА^{1, 3}, М. Н. ФИЛИППОВ^{1, 3, 4}

¹ Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума, Москва, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы, Москва, Россия

³ Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

⁴ Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, Россия, e-mail: fgupnicpv@mail.ru

Проведены сравнительные измерения высоты ступени нанорельефа поверхности кремниевой пластины методами трёхмерной реконструкции с помощью растрового электронного микроскопа и профилометрии. Для реализации метода трёхмерной реконструкции на поверхности тестового образца сформирована островковая плёнка золота. Профилометр AlphaStep D-600 откалиброван с помощью меры высоты ступени KTS-4500 QS. Установлено совпадение результатов измерений методами трёхмерной реконструкции и профилометрии. Проанализированы возможности уменьшения неопределённости результатов измерений методом трёхмерной реконструкции.

Ключевые слова: трёхмерная реконструкция, растровый электронный микроскоп, рельефная структура, профилометр.

The comparison measurements of step height of surface nanorelief of silicon plate as the test sample using methods of three-dimensional reconstruction in scanning electron microscope and surface profilometry were carried out. An aurum island film on the surface of test sample was formed for realization of 3D reconstruction method. The surface profiler AlphaStep D-600 was calibrated against the KTS-4500 QS step height standard. The consistent results of measurements by 3D and profilometry methods were obtained. The possibilities of decreasing the measurement uncertainty by 3D reconstruction method in scanning electron microscope were analyzed.

Key words: three-dimensional reconstruction, scanning electron microscope, relief structure, surface profiler.

Измерение высоты элементов нанорельефа является актуальной задачей. В частности, такая задача возникает при калибровке ступенчатых мер высоты, используемых для калибровки атомно-силовых микроскопов и профилометров различных типов. Определение размерных параметров указанных мер обычно производится методом компарирования с помощью референтных мер, откалиброванных независимым способом. Для аттестации референтных мер чаще всего применяют зондовые системы, совмещённые с лазерным интерферометром [1, 2]. Такая схема позволяет достичь расширенной неопределённости измерений (несколько нанометров) в субмикрометровом диапазоне значений высот ступеней и обеспечивает прослеживаемость результатов измерений.

Тем не менее для некоторых технологических приложений, прежде всего в электронной технике, требуются субнанометровые значения расширенной неопределённости измерений высоты объектов [3], что предопределяет потребность в создании новых методов измерений высоты рельефа и аттестации соответствующих стандартных образцов. Рассмотрим метод трёхмерной (3D) реконструкции поверхности исследуемых объектов по их стереоизображениям, полученным с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ). Данный метод предполагает совместную обработку РЭМ-изображений одного и того же участка поверхности образца, полученных при различных углах наклона образца относительно электронно-оптической оси микроскопа.

Метод 3D-реконструкции предложен в 1973 г. [4], но до настоящего времени использовался в основном в микрометровом диапазоне, а метрологическое обеспечение метода находится в стадии разработки [5–10]. В частности, в работах [8, 10] описаны методы уменьшения погрешности 3D-реконструкции в РЭМ, а в работе [9] отмечено, что для произвольного образца указанная погрешность может быть трудно определима, поскольку зависит от структуры поверхности образца. В данной статье представлены результаты измерений высоты ступени рельефной кремниевой структуры, полученные методом 3D-реконструкции в субмикрометровом диапазоне, и выражение для расширенной неопределённости измерений.

Теоретическая часть. На рис. 1 представлена геометрия эксперимента. Рассмотрим точку 1 на образце, расположенном в камере объектов РЭМ. Ось X совпадает с осью наклона образцов в РЭМ, референтная плоскость XY — с плоскостью фокусировки РЭМ. Для получения стереопары образец наклоняют вокруг оси X на углы $\pm\alpha$. Падающий на точку 1 электронный пучок исходит из точки S , находящейся на электронно-оптической оси РЭМ на расстоянии d от референтной плоскости. Значение проекционного расстояния d складывается из значения WD рабочего отрезка (расстояние плоскости фокусировки от наконечника объективной линзы) и параметра ϵ , значение которого определяется конструкцией данного РЭМ.

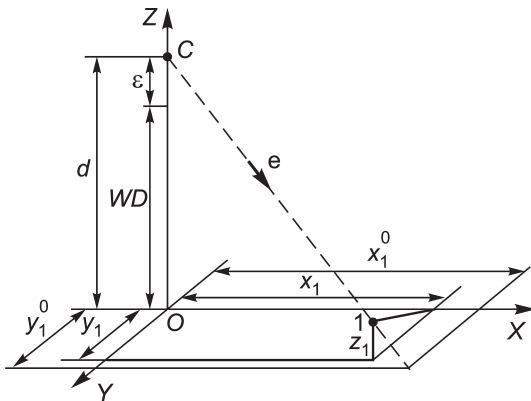


Рис. 1. Схематическое изображение взаимного расположения электронного пучка РЭМ и точки 1 на поверхности исследуемого объекта

Пусть x_1, y_1, z_1 — координаты точки 1 (см. рис. 1) при нулевом наклоне образца, x_1^0, y_1^0 — координаты точки 1 на РЭМ-изображении. Обозначим Y-координаты точки 1 при наклоне образца на углы $-\alpha, +\alpha$ соответственно y_1', y_1'' . Тогда справедливо выражение [7]:

$$z_1 = \frac{(y_1' - y_1'') \cos \alpha + 2y_1' y_1'' \sin \alpha / d}{(1 + y_1' y_1'' / d^2) \sin 2\alpha + (y_1' - y_1'') \cos 2\alpha / d}. \quad (1)$$

Аналогично произвольная точка 2 (не приведена на рис. 1) на РЭМ-изображении при нулевом наклоне образца имеет координату z_2 и при наклоне на углы $-\alpha, +\alpha$ — соответственно координаты y_2' и y_2'' . Тогда для точки 2 можно записать

$$z_2 = \frac{(y_2' - y_2'') \cos \alpha + 2y_2' y_2'' \sin \alpha / d}{(1 + y_2' y_2'' / d^2) \sin 2\alpha + (y_2' - y_2'') \cos 2\alpha / d}. \quad (2)$$

При условии, что размер кадра не более 10×10 мкм (это соответствует значениям y_1', y_1'', y_2', y_2'' менее 5 мкм) и максимальная высота рельефа не более 10 мкм, можно считать, что знаменатели в уравнениях (1), (2) равны $\sin 2\alpha$. В указанном диапазоне значений координат и высот рельефа это вносит дополнительную относительную погрешность не более 0,05 % (для углов наклона $\alpha = \pm 15^\circ$). С учётом этого приближения для разности высот точек 1, 2 справедливо:

$$z_1 - z_2 = \frac{[(y_1' - y_2') - (y_1'' - y_2'')] \cos \alpha + (2/d)(y_1' y_1'' - y_2' y_2'') \sin \alpha}{\sin 2\alpha}. \quad (3)$$

Представим (3) через параметры, измеряемые по РЭМ-изображению:

$$z_1 - z_2 = \Delta y \cos \alpha + \left(2/(dM^2)\right) S_0^2 M_0^2 (n_1' n_1'' - n_2' n_2'') \sin \alpha / \sin 2\alpha; \\ \Delta y = [(n_1' - n_2') - (n_1'' - n_2'')] S_0 M_0 / M, \quad (4)$$

где n_1', n_1'', n_2', n_2'' — выраженные в пикселах значения координат точек на РЭМ-изображении, соответствующие координатам y_1', y_1'', y_2', y_2'' ; S_0 — номинальный размер пиксела; M_0 — номинальное значение увеличения, M — действительное значение увеличения.

Экспериментальная часть. Экспериментальные исследования проводили с помощью РЭМ S-4800 (фирма Hitachi) и стилусного профилометра AlphaStep D-600 (фирма KLA Tencor), имеющего радиус зонда 2 мкм. Объектом исследования являлся тестовый образец (ТО), представляющий рельефную структуру в виде канавки, сформированной на поверхности (100) кремниевой пластины методом фотолитографии и анизотропного травления в растворе гидроксид калия. Боковые стенки рельефной структуры совпадали с кристаллографическими плоскостями (111) кремния, и составляли угол $54,7^\circ$ относительно плоскости (100), а дно канавки, совпадающее с плоскостью (100), имело ширину около 5 мкм.

Перед измерением профилометр калибровали с помощью меры высоты ступени KTS-4500 QS (фирма VLSI) с паспортным значением $(451,2 \pm 2,9)$ нм, расширенная неопределённость измерений 2,9 нм указана для доверительной вероятности $P = 95$ %. Результаты измерения с помощью профилометра представлены на рис. 2. Средняя глубина профиля ТО, определённая по результатам 10 измерений, составила $H = 457,0$ нм, расширенная неопределённость $U = 3,4$ нм. Основной вклад в значение U вносит неопределённость аттестации меры KTS-4500 QS.

В исходном виде ТО является сложным объектом для реализации метода 3D-реконструкции в РЭМ, поскольку поверхности рельефной структуры ТО имеют достаточно высокое качество и на них практически отсутствуют контрастные элементы, координаты которых в плоскости изображения необходимо определять с высокой точностью. В данном случае контраст РЭМ-изображения рельефной структуры обусловлен в основном областями пересечения поверхностей структуры, имеющих разный наклон, например боковой стенки с дном канавки. Поэтому для проведения измерений методом 3D-реконструкции в РЭМ на поверхности ТО была сформирована островковая плёнка золота Au. Для этого с помощью установки Q150T ES (фирма Quorum Technologies) методом магнетронного распыления наносили плёнку Au эффективной толщиной 2 нм (для горизонтальных участков), далее ТО подвергали нагреву в вакууме до температуры 300°C в течение 30 мин.

Трёхмерную реконструкцию поверхности рельефной структуры ТО в РЭМ S-4800 осуществляли при углах наклона столика объектов $\pm 15^\circ$. Для этого образец размещали на держателе под углом 10° , и гониометрический столик РЭМ из углового положения -5° переводили в угловое положение $+25^\circ$. Исследуемый образец устанавливали в эуцентрическую позицию с использованием оптического микроскопа, при этом уход центра изображения по высоте при наклоне $\pm 15^\circ$ составлял не более 15 мкм. Выведение направления строчной развертки перпендикулярно оси наклона столика образцов РЭМ с погрешностью менее 1° осуществлялось с помощью электронного вращения раstra.

Для каждого угла наклона образца ($-15^\circ, +15^\circ$) были получены по два РЭМ-изображения при увеличении $20000\times$, где изображение 1 включало левую боковую стенку канавки (левую ступеньку), а изображение 2 — правую боковую стенку (правую ступеньку). Одно из таких РЭМ-изображений представлено на рис. 3. Таким образом, для каждой из ступенек были получены по две стереопары при углах наклона $\pm 15^\circ$, для обработки которых была разработана специальная программа анализа стереоизображений. В программе заложен алгоритм, реализующий обработку стереоизображений в

соответствии с (4) в полуавтоматическом режиме. Для этого на изображении при угле наклона -15° выбиралась совокупность пар островков, причём измерялось расстояние между центрами отдельных островков в паре вдоль направления строчной развёртки в зависимости от угла наклона образца. Количество анализируемых островков определяется оператором и в данном случае составляло 20 пар для каждого изображения. В итоге алгоритм работы программы позволяет вычислять среднее значение высоты ступеньки ТО и среднее квадратическое отклонение (СКО) результатов измерений.

Для осуществления 3D-реконструкции в соответствии с (4) необходимо определить: действительное значение увеличения РЭМ при соответствующих условиях измерений (в данном случае ускоряющем напряжении 15 кВ, рабочем отрезке $WD = 9,8$ мм, значении угла электронного вращения расстра $90,2^\circ$); действительное значение угла наклона столика образцов, соответствующего номинальным значениям $\pm 15^\circ$; проекционное расстояние d .

В [6] было сделано допущение, что проекционное расстояние равно длине рабочего отрезка ($d = WD$), т. е. $\varepsilon = 0$ (см. рис. 1). В реальной ситуации $\varepsilon \neq 0$, что вносит вклад в неопределённость вычислений z -координат по (4). В данной работе было измерено фактическое проекционное расстояние. Для этого использовалась специальная структура, сформированная на поверхности пластины монокристаллического кремния. Структура включала два рельефных элемента, расположенных на расстоянии 200 мкм. При минимальной диафрагме объективной линзы РЭМ получены два изображения указанной рельефной структуры: сфокусированное изображение положения столика объектов $z_0 = 7,8$ мм и соответствующее значению рабочего отрезка $WD = 9,8$ мм (изображение 1); изображение без изменения фокусировки ($WD = 9,8$ мм) при положении столика объектов $z = 8,8$ мм (изображение 2).

Проекционное расстояние определяли с помощью изображений 1, 2 по формуле

$$d = L(z - z_0) / [L_0 (1 - L/L_0)],$$

где L , L_0 — измеренные по изображениям 1, 2 расстояния между рельефными элементами.

В результате многократных измерений получено среднее значение $d = 13,4$ мм, что соответствует значению $\varepsilon = 3,6$ мм, стандартные неопределённости $u(\varepsilon) = u(d) = 0,5$ мм.

В соответствии с (3) составляющая неопределённости измерений разности высот точек 1, 2, обусловленная неточным значением d , не превышает значения

$$u_d(z_1 - z_2) = D_y^2 u(d) / (4d^2 \cos \alpha), \quad (5)$$

где D_y — размер кадра вдоль оси Y .

На основании проведённых оценок $u(d)$ при размере расстра на образце не более 10 мкм (что соответствует увеличению не менее $12000\times$) в соответствии с (5) справедливо $u_d(z_1 - z_2) < 0,1$ нм. Таким образом, указанной составляющей погрешности можно пренебречь.

Действительное значение увеличения M (для номинального значения $20000\times$) определяли по методике, описанной в [11], где носителем единицы длины являлась керамическая концевая мера длины номинальным значением 4 мм.

Оценка относительной стандартной неопределённости измерений действительного значения M увеличения РЭМ даёт значение $u(M)/M = 10^{-3}$.

Для определения действительного значения угла наклона исследуемого образца в процессе получения стереоизображений (при переходе от номинального углового положения столика образцов -5° к положению $+25^\circ$) использовали стеклянную призму с углом при вершине $(30,0 \pm 0,1)^\circ$, запылённую тонким слоем хрома для обеспечения проводящего покрытия. Призму устанавливали на столик образцов РЭМ таким образом, чтобы при угловом положении столика образцов -5° одна из граней призмы была ориентирована примерно вертикально, а появление указанной грани на РЭМ-изображении происходило при переходе из углового положения -5° к $-4,9^\circ$. Наклон призмы из углового положения $+24,9^\circ$ в положение $+25^\circ$ приводил к исчезновению на РЭМ-изображении второй грани призмы. Стандартная неопределённость измерения угла наклона столика образцов (угла 2α) указанным методом (при допущении равномерного распределения) составляет $u(2\alpha) = 0,2^\circ / (2\sqrt{3}) \approx 0,001$ рад.

На основании анализа (4), если пренебречь вкладом второго слагаемого в числителе, то можно получить значение расширенной неопределённости измерений высоты H рельефа методом 3D-реконструкции (для доверительной вероятности $P \approx 0,95$):

$$U = 2H \sqrt{(u(M)/M)^2 + (u(2\alpha) \operatorname{ctg} \alpha/2)^2 + S^2},$$

где $u(M)/M$ — относительная стандартная неопределённость определения действительного значения увеличения M РЭМ; $u(2\alpha)$ — стандартная неопределённость определения действительного значения угла 2α ; S — выраженное в относительных единицах СКО среднего значения результатов измерений высоты профиля рельефа по (4).

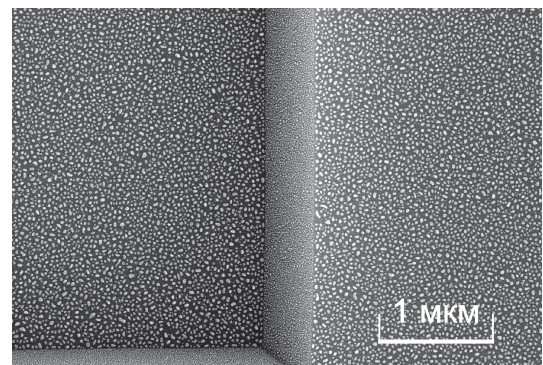


Рис. 3. РЭМ-изображение элемента рельефа (ступеньки) тестового образца при угле наклона $+15^\circ$

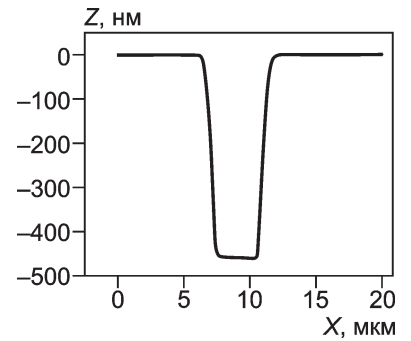


Рис. 2. Профиль рельефной структуры тестового образца, полученный с помощью профилометра AlphaStep D-600

Значение S , определённое по результатам 20 измерений, составило 0,0026. Данные, полученные методами 3D-реконструкции и профилометрии, приведены в таблице.

Результаты измерений глубины профиля ТО методами 3D-реконструкции и профилометрии

Метод	Глубина профиля, нм	Расширенная неопределённость, нм ($P = 95\%$)
Профилометрия	457,0	3,4
3D-реконструкция	457,3	3,1

Выводы. Совпадение результатов 3D-реконструкции рельефной структуры ТО с данными, полученными методом профилометрии, свидетельствует о правильности подходов, используемых для процедуры количественной 3D-реконструкции по стереоизображениям, полученным в РЭМ, в нанометровом диапазоне. Основные составляющие неопределённости измерений высоты рельефа данным методом связаны с углом наклона гониометрического столика РЭМ и статистическим разбросом результатов измерений. Значения расширенной неопределённости метода 3D-реконструкции по стереоизображениям РЭМ близки к значениям, полученным при использовании профилометрии. Это позволяет в перспективе применять метод 3D-реконструкции для аттестации мер высоты. Дальнейшее снижение неопределённости результатов, получаемых этим методом, может быть достигнуто при уменьшении неопределённости калибровки угла наклона гониометрического столика РЭМ и более полной автоматизации обработки стереоизображений, что позволит увеличить количество измеряемых на изображении точек.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках реализации Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса РФ на 2014—2020 годы» (соглашение № 14.576.21.0027, RFMEFI57614X0027).

Л и т е р а т у р а

1. Kim J. A., Kim J. W., Park B. C., Eom T. B. Measurement of microscope calibration standards in nanometrology using a metrological atomic force microscope // Meas. Sci. Technol. 2006. V. 17. P. 1792—1800.
2. Dixon R., Orji N. G., Fu J., Cresswell, Allen R., Guthrie W. Traceable Atomic Force Microscope Dimensional Metrology at NIST // Proc. SPIE. 2006. V. 6152. P. 61520P-1—61520P-11.

3. Thomsen-Schmidt P., Hasche K., Ulm G., Hermann K., Krumrey M., Ade G., Stumpel J., Busch I., Schädlich S., Schindler A., Frank W., Hirsch D., Procop M., Beck U. Realisation and metrological characterization of thickness standards below 100 nm // Appl. Phys. A. 2004. V. 78. P. 645—649.

4. Piazzesi G. Photogrammetry with the scanning electron microscope // J. Phys. E: Sci. Instrum. 1973. V. 6. No. 4. P. 392—396.

5. 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. No. 3. P. 035103-1—035103-11.

6. Marinello F., Bariani P., Savio E., Horsewel A., Chiffre L. Critical factors in SEM 3D stereo microscopy // Measurement Science and Technology. 2008. V. 19. No. 6. P. 065705-1—065705-12.

7. Bariani P., De Chiffre L., Hansen H. N., Horsewell A. Investigation on the traceability of three-dimensional scanning electron microscope measurements based on the stereo-pair technique // Precis. Eng. 2005. V. 29. P. 219—228.

8. Гавриленко В. П., Карабанов Д. А., Кузин А. Ю., Митюхляев В. Б., Михуткин А. А., Тодуа П. А., Филиппов М. Н., Баймухаметов Т. Н., Васильев А. Л. Трёхмерная реконструкция поверхности рельефных структур по стереоизображениям, полученным в растровом электронном микроскопе // Измерительная техника. 2015. № 3. С. 15—18.

9. Кузин А. Ю., Васильев А. Л., Митюхляев В. Б., Михуткин А. А., Тодуа П. А., Филиппов М. Н. Анализ факторов, влияющих на погрешность трёхмерной реконструкции поверхности объектов с субмикронным рельефом, по полученным в РЭМ стереоизображениям // Измерительная техника. 2016. № 3. С. 20—23.

10. Кузин А. Ю., Васильев А. Л., Карабанов Д. А., Митюхляев В. Б., Михуткин А. А., Пресняков М. Ю., Тодуа П. А., Филиппов М. Н. Экспериментальные исследования трёхмерной реконструкции рельефных структур по стереоизображениям, полученным в растровом электронном микроскопе // Измерительная техника. 2016. № 8. С. 21—24.

11. Киртаев Р. В., Кузин А. Ю., Маслов В. Г., Митюхляев В. Б., Тодуа П. А., Филиппов М. Н. Калибровка растровых электронных микроскопов в широком диапазоне увеличений // Измерительная техника. 2016. № 12. С. 7—10.

Дата принятия: 09.11.2016.