РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

Трехмерная сканирующая электронная микроскопия топографии поверхности с учетом влияния функции отклика детекторной системы

А. А. Борзунов,[1] В. В. Забродский,[2] С. В. Зайцев,[3] В. Ю. Караулов,[3] Д. В. Лукьяненко,[1,4] Э. И. Рау,[3,a] Е. В. Шерстнев,[2] А. Г. Ягола[1]

[1] Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра математики. Россия, 119992, Москва, Ленинские горы, д. 1.

[2] Государственный физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН. Россия, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.

[3] Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физической электроники. Россия, 119992, Москва, Ленинские горы, д. 1.

[4] Московский центр фундаментальной и прикладной математики. Россия, 119234, Москва.

Поступила в редакцию 09.04.2021, после доработки 04.05.2021, принята к публикации 15.05.2021.

Приводится описание экспериментальной системы детектирования отраженных электронов (ОЭ) в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) для трехмерной (3D) визуализации поверхностного рельефа микроструктур. 3D-реконструкция топографии осуществляется по алгоритму восстановления профилей по заранее определенным угловым зависимостям ОЭ на тестовом калибровочном образце. Показано большое влияние на детектируемый сигнал аппаратной функции детекторной системы, т. е. функции отклика, а также геометрического фактора, учитывающего трансформацию углового распределения для однократного и многократного рассеяния ОЭ.

Ключевые слова: сканирующая электронная микроскопия, отраженные электроны, 3D-реконструкция топографии поверхности, угол наклона, функция отклика детектора.
УДК: 53.03, 385.833. PACS: 73.21–b, 71.15.Qe, 07.78.+s.

ВВЕДЕНИЕ

Из-за зрительного восприятия окружающих предметов двумя глазами человеку присуще объемное представление геометрических форм. Поэтому понятно стремление исследователей к трехмерному изображению микроструктур, получаемых при их визуализации в различных микроскопах. Но если в оптических и зондовых атомно-силовых микроскопах уже с начала зарождения и развития разрабатывалось их сопровождение методами трехмерного представления изображений, то практическое осуществление 3D-визуализации в СЭМ развивалось медленнее. В принципе СЭМ является «одноглазым» прибором, так как обзор объекта проводится из одной точки, т. е. взгляд на объект односторонний, в отличие от двустороннего у человека. Этой точкой наблюдения в СЭМ является источник электронов (электронная пушка). Иллюзия некоторой объемности на СЭМ-изображениях объясняется большой глубиной фокуса объективной линзы СЭМ и световым эффектом оттенения — аналогом оптической подсветки образца со стороны расположения детектора электронов.

В настоящее время наиболее распространенным методом получения 3D-изображений в СЭМ является обработка стереоизображений, т. е. двух снимков, полученных при разных углах наклона образца относительно направления падения облучающих электронов. Параллакс на двух изображениях служит предметом компьютерной обработки и дальнейшей реконструкции 3D-изображений [1, 2]. Но стереометрический метод обладает рядом ограничений и недостатков, в частности слабой чувствительностью к сравнительно малым наклонам и трудностями с проблемой точного совмещения координат образца, снятого при двух ракурсах. Поэтому в последние десятилетия более интенсивно развивается прогрессивный метод «оттенения» неподвижного образца, снятого при различных углах «освещения объекта», так называемый «Shape of shadow»-метод. Здесь по-прежнему взгляд на образец идет со стороны источника электронов, но в качестве направленных источников освещения используется не один, а минимум два детектора, расположенных симметрично относительно оптической оси микроскопа. Снимок с левого детектора L вычитается из снимка от правого детектора R, и сигнал ($L-R = \sin\alpha$) приравнивается к градиенту угла наклона α элементарного участка поверхности [3, 4]. Система из твердотельных, как правило, полупроводниковых детекторов, состоит обычно из целого ряда одиночных пластин, расположенных осесимметрично по осям X и Y либо горизонтально, либо под определенными углами, минимизирующими потери на отражение ОЭ от самих детекторов [5, 6]. Большое внимание в таких системах уделяется учету геометрического фактора, а именно зависимости сигнала с детектора от его телесного угла и углов между нормалью к поверхности наклонного участка образца и углом расположения детектора относительно оси СЭМ [7–9], а также комбинации математических операций над сигналами с отдельных детекторов [10, 11].

[a] E-mail: rau@phys.msu.ru

В общем попытка восстановления 3D-топографии в СЭМ по аналитическим выражениям для сигналов с детекторов представляет собой в основном познавательное, а не практическое значение. Большие трудности в расчетах возникают из-за неустойчивости многопараметрической аналитической задачи и из-за прогрессивного нарастания ошибок вследствие применения приближенных формул. Более простым и надежным способом получения исходных данных для решения обратной задачи реконструкции 3D-поверхности является калибровка угловых зависимостей сигнала с каждого детектора на тестовом образце с заранее известной геометрией. Обычно для этих целей используется полусферическая поверхность металлического шарика [6, 10–12].

В настоящей работе мы также воспользуемся начальной калибровкой угловых зависимостей на тестовом титановом шарике. Существенным развитием метода служат добавленные нами операции учета энергетических зависимостей сигналов с детекторов, аппаратных функций отклика полупроводниковых детекторов ОЭ, а также фактор трансформации углового сферического распределения диффузных многократно рассеянных ОЭ в эллипсоидальное распределение однократно рассеянных ОЭ по мере наклона образца по отношению к направлению падения первичных электронов. Настоящая статья продолжение и развитие работы [13].

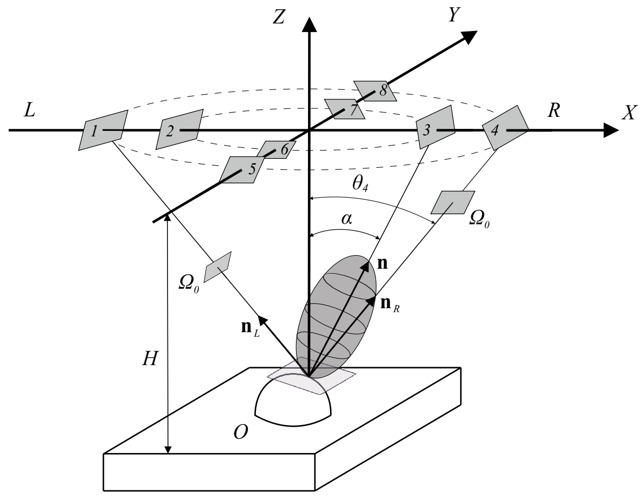

Рис. 1. Схема детектирования сигнала отраженных электронов в СЭМ. Z — оптическая ось микроскопа, L, R — условные обозначения левого и правого направления оси X, соответствующие обозначения направлений для оси Y опущены. $(1-8)$ — полупроводниковые детекторные кристаллы, α — угол наклона участка образца O относительно оси микроскопа Z, θ_4 — угол расположения одного из детекторов (4), Ω_0 — телесный угол сбора каждого детектора по направлениям $\mathbf{n}_L, \mathbf{n}_R, \mathbf{n}$ — вектор нормали к поверхности, H — рабочее расстояние от образца O до объектива СЭМ

1. ФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА

Эксперименты проводились в СЭМ LEO-455, снабженным как стандартным четырехквадрантным полупроводниковым детектором, так и разработанной авторами новой мультидетекторной системой. Ее устройство подробно описано в работах [14, 15], а расчеты эффективности — в [15, 16]. Поэтому здесь дадим лишь краткую схему эксперимента (рис. 1).

Электронный зонд СЭМ падает на образец O по направлению электронно–оптической оси микроскопа Z. Рабочее расстояние от объектива СЭМ до подложки образца равно H. Образец на рисунке представлен в виде полусферической поверхности. По осям X и Y осесимметрично расположены одиночные полупроводниковые детекторы 1–8. Ближние к оси СЭМ детекторы смонтированы под углом 30°, а дальние — под углом 60° к оси Z. Их площадь подобрана так, чтобы телесный угол сбора ОЭ Ω_0 был одинаковым для всех детекторов. Если попарно соединить детекторные пластины с левой (L) и правой (R) сторон по оси X (и аналогично по оси Y), то получим средний угол детектирования $\theta_D = 45°$. Таким образом обеспечивается преимущественно нормальное падение отраженных электронов на пластины детекторной системы (обозначены векторами $\mathbf{n}_L$ и $\mathbf{n}_R$). Вектор нормали $\mathbf{n}$ к поверхности наклоненного на угол α участка образца является сложной функцией углового распределения ОЭ. Эта функция характеризует трансформацию сферического распределения в эллиптическое по мере возрастания угла наклона α. За сферическую часть ответственны диффузно рассеянные ОЭ, покидающие образец по косинусоидальному закону Ламберта. С другой стороны, при увеличении α растет доля однократно рассеянных высокоэнергетических электронов η_s, угол отражения которых больше, чем α. В итоге распределение ОЭ по углам выхода постепенно трансформируется из распределении $\cos\theta$, при $\alpha = 0°$, в распределение $\cos 2\theta$, при $\alpha = 90°$, то есть в подобие зеркального отражения. К сожалению, в литературе нет согласия о взаимной доле числа многократно и однократно рассеянных ОЭ, поэтому мы в расчеты детектируемого сигнала с детекторов ОЭ ввели новое эмпирическое выражение

$$h = \cos\left[(1 - \sin k\alpha)\alpha - 45°\right], \qquad (1)$$

где константа $k = 0.333$. Эта константа найдена из граничных условий $h = 0$ при $\alpha = 90°$ для $\theta_D = 45°$. Аналогичное преобразование происходит и по азимутальному углу трехмерного эллипсоидального распределения ОЭ, поэтому в расчетах берется функция h^2. Учитывая приведенное соображение, запишем выражение для сигнала с каждого детектора в виде:

$$I_s = C\Phi F = Cfgh^2F, \qquad (2)$$

где C — константа, Φ — падающий на детектор поток ОЭ, F — отраженный от детектора поток ОЭ, f и g — функции характеризующие зависимости числа ОЭ (f) и их энергии (g) от угла наклона α. Рассмотрим каждый сомножитель в (2) по отдельности. Коэффициент $C = I_0 \Omega E_i^{-1}$, где E_i — энергия генерации электронно-дырочной пары носителей в Si-детекторе ($E_i = 3E_g = 3.6$ эВ). Сомножитель f характеризует зависимость коэффициента отражения η от угла α, а g — зависимость средней отраженной энергии $\overline{E}$ от угла α [17]:

$$f = \eta(\alpha) = \eta_0 \exp\left[|\ln \eta_0|(1 - \cos\alpha)\right], \quad g = \frac{\overline{E}}{E_0} = 0.5(1 + f). \tag{3}$$

В аппаратную функцию F (функцию отклика детектора) входит часть отраженного потока электронов F_1 от лицевой поверхности детектора и часть поглощенного потока F_2 в «мертвом» слое детектора [14–16]:

$$F = F_1 F_2 = \left[1 - \eta_{Si}(\alpha)\frac{\overline{E}_{Si}}{\overline{E}_{Si}(\alpha)}\right]\left[1 - \frac{E_{th}}{\overline{E}_{Si}(\alpha)}\right], \tag{4}$$

$\eta(\alpha)$ и $\overline{E}_{Si}/\overline{E}_{Si}(\alpha) = 0.13\cos^{-1}(\theta_D - \alpha)$ выражают долю количества и энергии ОЭ от Si-детектора, E_{th} — пороговая энергия детектирования ОЭ.

Результаты расчетов сигналов I_s по выражениям (1)–(4) удовлетворительно (с разбросом 20%) совпадают с экспериментальными графиками, представленными на рис. 2, где приводятся характеристики сигналов I_s в зависимости от угла наклона α локального участка поверхности. Представлены: график 1 — с детектора 2 (по рис. 1), график 2 — с детектора 3, разности сигналов с этих двух детекторов (график 3) и их суммы (график 4). Из графиков следует, что максимальная чувствительность к перепаду углов наклона наблюдалась в диапазоне углов 0°–45° и 60°–80°. Сумма сигналов с этих детекторов, представленная графиком 4, характеризует вклад в сигнал состава образца (в данном случае Ti–шарик) и геометрического фактора устройства. При делении разности сигналов на их сумму влияние этого фактора мало влияет на форму сигнала. Исходя из того, что человеческий глаз различает двухпроцентный перепад интенсивности двух соседних точек изображения, из графиков рис. 2 можно заключить, что при разности сигнала ΔI_S в 2% дискриминируется разность углов $\Delta\alpha = 5°$ на шаге сканирования $\Delta x = 20$ нм. Поэтому минимальный перепад высот Δh, различимый в наших экспериментах, равен (согласно выражению $\Delta h/\Delta x = \operatorname{tg}\alpha$) $\Delta h \approx 2$ нм, что соответствует лучшим результатам, полученным в теоретических оценках для случая детектирования вторичных электронов [3].

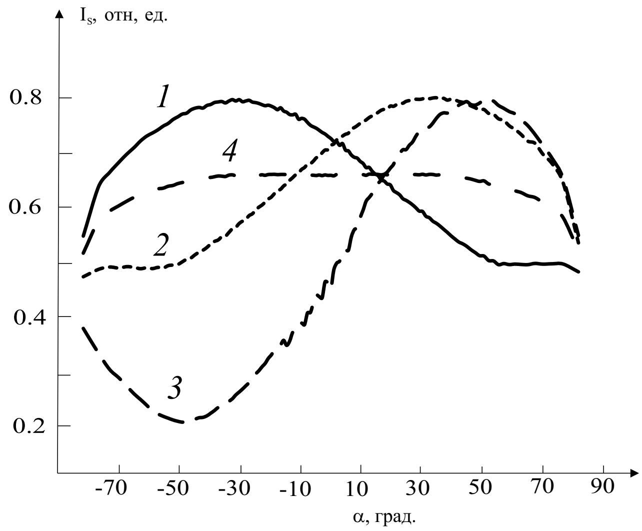

Рис. 2. Сигналы с детекторов 2 и 3 (рис. 1) как функции угла наклона α локального участка поверхности. График 1 — сигнал с детектора 2, график 2 — с детектора 3, график 3 — разность сигналов с детекторов 3 и 2, график 4 — сумма сигналов с детекторов 2 и 3

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА

Наша основная задача — восстановить функцию $z = Z(x, y)$, определяющую поверхность в декартовой системе координат (см. рис. 1), по измеренным в эксперименте компонентам J_x и J_y градиента искомой функции. Таким образом, разностный сигнал, например четвертого и первого детектора $I_{S_x} = D_4 - D_1$, связан с компонентой градиента J_x, а разностный сигнал $I_{S_y} = D_8 - D_5$ — с компонентой градиента J_y. Пример разностного сигнала изображен на рис. 2.

Прежде чем перейти к восстановлению поверхности, необходимо определить компоненты J_x и J_y по значениям разностных сигналов I_{S_x} и I_{S_y}. Для этого мы представим СЭМ как пару некоторых математических функций F_x и F_y (будем называть их аппаратными функциями), которые сопоставляют углу наклона между нормалью к элементу поверхности и осями X и Y значения интенсивности разностного сигнала I_{S_x}, I_{S_y} соответственно. В результате можно определить функции F_x^{-1} и F_y^{-1}, обратные к аппаратным и переводящие значения разностных сигналов I_{S_x} и I_{S_y} в значения углов наклона между нормалью к участку поверхности и осями X и Y соответственно. Это позволит по изображению поверхности, получаемому на СЭМ, восстановить градиент этой поверхности.

Для составления аппаратных функций используется калибровочная поверхность известной геометрии. С помощью нее можно сопоставить значениям разностных сигналов I_{S_x} и I_{S_y} значения соответствующих углов наклона нормалей участка заданной калибровочной поверхности. Это дает возможность составить таблицу сеточных значений аппаратных функций F_x и F_y. Выделяя участки взаимооднозначного отображения, можно построить функции F_x^{-1} и F_y^{-1}. Подробный алгоритм, описывающий эти действия, описан в [13]. В качестве калибровочной поверхности с известной геометрией использовалась титановая полусфера диаметром 265 нм. Имеющиеся незначительные дефекты на поверхности калибровочной сферы не сказываются на точности составления аппаратных функций в связи с тем, что доля площади, занимаемая этими дефектами, пренебрежимо мала по отношению к площади всей сферы. При составлении аппроксимаций аппаратных функций по известным сеточным значениям использовались некоторые допущения, подробно описанные в [13].

После задания градиента поверхности задача восстановления функции $Z(x, y)$ сводится к интегрированию системы из двух дифференциальных уравнений, определяемых с помощью найденных компонент градиента. Эта задача является классической, но тем не менее имеет некоторые сложности.

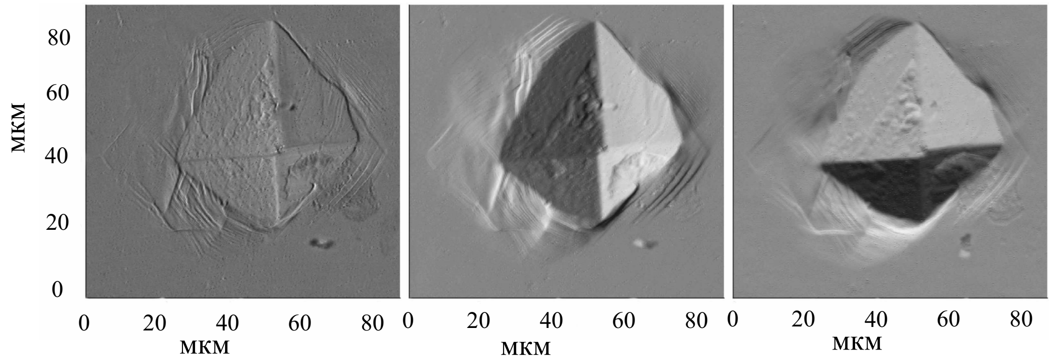

Рис. 3. Исходные изображения индентерного отпечатка в режимах (слева направо): суммарного сигнала с детекторов 1, 2, 3, 4; разностный сигнал с детекторов $I_{S_x} = 1 - 4$; разностный сигнал с детекторов $I_{S_y} = 5 - 4$

Существует множество методов решения, основанных на интегрировании системы дифференциальных уравнений [18–20]. Несмотря на кажущуюся простоту, реализация простейших алгоритмов не приводит к удовлетворительному результату. Сложности вызваны тем, что изображение в СЭМ формируется построчно (измерения проводятся вдоль параллельных прямых с некоторым сдвигом), поэтому ошибки восстановления функции вдоль каждого направления независимы. Интегрирование вдоль каждого из направлений приводит к независимому накоплению ошибок, что в свою очередь приводит к быстрому расхождению интегральных кривых вдоль соседних направлений из-за ошибок, которые накапливаются по мере интегрирования от одной границы области до другой. В результате приемлемое восстановление поверхности становится невозможным. Попытки применить сглаживание (регуляризирующие алгоритмы) приводит к значительным потерям в детализации рельефа восстанавливаемой поверхности. Чтобы обойти эти сложности, можно использовать метод наименьших квадратов для поиска приближенного решения физически переопределенной задачи (в задаче мы восстанавливаем функцию двух переменных по двум функциям двух переменных).

Для решения задачи, запишем ее в операторном виде:

$$A[Z] = \mathbf{J}, \tag{5}$$

где S — квадратная область наблюдения, оператор $A : W_2^2(S) \to L_2(S)$ непрерывен, он связывает функцию $z(x, y)$, представляющую трехмерную поверхность с ее градиентом. В ходе эксперимента мы получаем не точное значение градиента $\overline{J}$, а его приближенное значение J_δ, где величина погрешности удовлетворяет неравенству $\|\overline{J} - J_\delta\|_{L_2} \leqslant \delta$. Тогда решение задачи будем искать в виде элемента $Z_\delta \in W_2^2(S)$, который реализует минимум функционала $F[Z] = \|A[Z] - \overline{J}_\delta\|^2_{L_2}$.

Входные данные, например, те, что изображены на рис. 3, представляются в виде матриц K^x и K^y, элементами которых является интенсивность разностного сигнала в каждой точке. Применяя восстановленные с помощью калибровочной поверхности обратные аппаратные функции F_x^{-1} и F_y^{-1} ко входным данным поэлементно, получим градиент восстанавливаемой поверхности J_x и J_y. После чего следует решить конечномерный аналог уравнения (5), где «начальное» условие выбирается произвольно:

$$\begin{cases} \nabla Z(x, y) = (J_x, J_y)^T_\delta, & (x, y) \in S, \\ Z(x_0, y_0) = 0. \end{cases}$$

Для этого следует переупорядочить элементы матриц восстановленных компонент градиента J_x и J_y в векторы B^x и B^y, развертывая элементы матрицы по столбцам. Элементы искомой матрицы Z аналогичным образом представляются в виде вектора $\hat{Z}$, после чего уравнение необходимо записать в виде

$$\begin{cases} \hat{A}\hat{Z} = \begin{pmatrix} B^x \\ B^y \end{pmatrix} \equiv B_\delta, \\ Z(x_0, y_0) = 0, \end{cases} \tag{6}$$

где матрица $\hat{A}$ — конечноразностная аппроксимация оператора A (частных производных $\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}$) [13].

Искомая поверхность находится в виде вектора $\hat{Z}$ (переупорядоченного по столбцам сеточного представления искомой функции Z_δ) как псевдорешение переопределенной системы алгебраических уравнений (6) методом наименьших квадратов.

3. ПРИМЕРЫ 3D-РЕКОНСТРУКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Ниже приводится ряд результатов по реконструкции рельефа поверхности по предложенной нами методике. На рис. 3 изображена поверхность железной полированной пластины с отпечатком углубления, нанесенного индентором Виккерса. Укол индентором образовал вогнутую четырехгранную пирамиду с углом при вершине между противоположными гранями 136°. Реконструированное объемное изображение этого образца приведено на рис. 4, а на рис. 5 дано изображение выпуклой пирамиды, которая является калибровочным тест-образцом для СЭМ-микроскопии [12].

Заметим, что некоторая несимметричность границ граней пирамиды на рис. 4 вызвана качественным несовершенством использованного индентора, его дефектностью.

Демонстрацией эффективности 3D-реконструкции не только гладких, но и шероховатых поверхностей

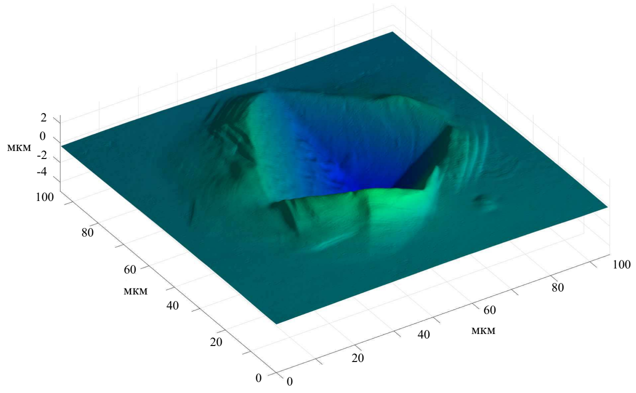

Рис. 4. Восстановленная поверхность отпечатка индентора — вогнутая пирамида

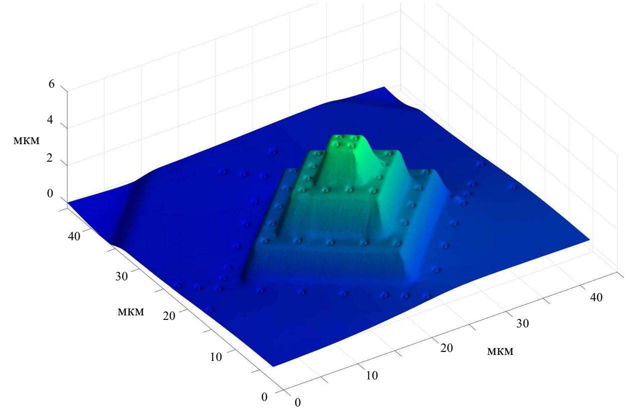

Рис. 5. Восстановленная поверхность выпуклой пирамиды — контрольного тест-образца

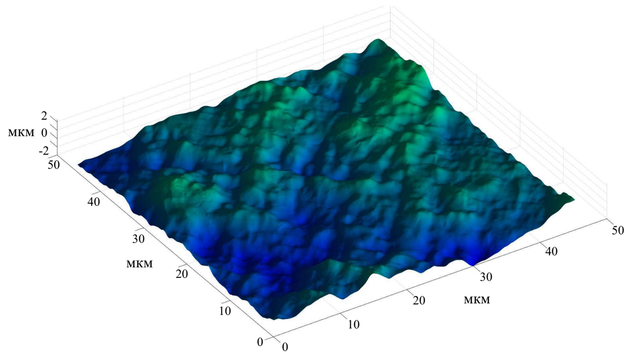

Рис. 6. Восстановленная поверхность участка пьезокерамической пластины

с сильно изрезанным рельефом, служит рис. 6. На нем приводится трехмерное изображение поверхности PZT — пьезокерамики.

Описанный выше метод позволяет визуализировать в 3D-пространстве микроструктуры с перепадом высот до единиц нанометров, но в пределах максимальных углов наклона локальных участков до 60°.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная высокоэффективная система детектирования отраженных электронов в сканирующем электронном микроскопе и оптимальный алгоритм реконструкции позволяют получать 3D-изображения поверхности с повышенной в 1.5–2 раза чувствительностью к градиентам наклона по сравнению с известными решениями. Точность восстановления изображения рельефа поверхности микроструктуры в СЭМ по предложенной методике (ошибки до 5%) также выше известных аналогов. Улучшенные характеристики достигаются не только усовершенствованием физического эксперимента и оптимизацией математического сопровождения, но и учетом влияния на детектируемые сигналы аппаратной функции полупроводниковых детекторов. Предложенная методика позволяет визуализировать топографию образцом с меньшими дозами облучения, что важно при исследовании радиационно-чувствительных объектов, например биологических препаратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Beil W., Carlsen I. C.* // Machine Vision and Applications. 1991. **4**(4). P. 271.
2. *Tafti A. P., Kirkpatrick A. B., Alavi Z.* et al. // Micron. 2015. **78**, N 11. P. 54.
3. *Reimer L.* Scanning Electron Microscopy. Springer Berlin Heidelberg, 1998.
4. *Lebiedzik J.* // Scanning. 1979. **2**(4). P. 230.
5. *Kaczmarek D.* // Scanning Microscopy. 1998. **12**(1). P. 161.
6. *Castle J. E., Zhdan P. A.* // J. of Phys. D: Appl. Phys. 1997. **30**(5). P. 722.
7. *Drzazga W., Paluszynski J., Slowko W.* // Measurement Science and Technology. 2005. **17**(1). P. 28.
8. *Czepkowshi T., Slowko W.* // Scanning. 2006. **18**(6). P. 433.
9. *Slowko W., Wiatrowski A., Krysztof M.* // Micron. 2018. **104**. P. 45.
10. *Timischl F., Inoue N.* // Ultramicroscopy. 2018. **186**(3). P. 82.
11. *Chen D., Miyamoto A., Kaneko S.* // Robust surface reconstruction in SEM with two BSE detectors. In 2012 9th France-Japan and 7th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS) / 13th Intl Workshop on Research and Education in Mechatronics (REM). IEEE, November 2012.
12. *Hemmleb M., Bettge D., Driehorst I., Berger D.* // 3D surface reconstruction with segmented BSE detector: New improvements and application for fracture analysis in SEM, p. 489–490. European Microscopy Congress 2016: Proceedings, 2016.
13. *Borzunov A. A., Karaulov V. Y., Koshev N. A.* et al. // Ultramicroscopy. 2019. **207**. 112830.
14. *Rau E. I., Karaulov V. Yu., Zaitsev S. V.* // Review of Scientific Instruments. 2019. **90**(2). 023701.
15. *Zabrodsky V. V., Zaitsev S. V., Karaulov V. Yu.* et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2019. **83**(11). P. 1357.
16. *Rau E. I., Ditsman S. A., Zaitsev S. V.* et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2013. **77**(8). P. 951.
17. *Fitting H.-J.* // Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena. 2004. **136**(3). P. 265.
18. *Bahr M., Breuss M., Queau Y.* et al. // Computational Visual Media. 2017. **3**(2). P. 107.
19. *Harker M., O'Leary P.* // Journal of Mathematical Imaging and Vision. 2014. **51**(1). P. 46.
20. *Ho J., Lim J., Yang M-H., Kriegman D.* // Integrating surface normal vectors using fast marching method. In Computer Vision — ECCV 2006, p. 239–250. S. B. Heidelberg, 2006.

Three-Dimensional Scanning Electron Microscopy of Surface Topography with Consideration of the Effect of the Response Function of the Detector System

A.A. Borzunov[1], **V.V. Zabrodsky**[2], **S.V. Zaitsev**[3], **V.Y. Karaulov**[3], **D.V. Lukyanenko**[1,4], **E.I. Rau**[3,a], **E.V. Sherstnev**[2], **A.G. Yagola**[1]

[1]*Department of Mathematics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119992 Russia*
[2]*Ioffe Institute of Physics and Technology of the Russian Academy of Sciences. St. Petersburg 194021, Russia*
[3]*Department of Physical Electronics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.*
[4]*Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics. Moscow 119234, Russia*
E-mail: [a]*rau@phys.msu.ru*.

An experimental system for detection of back-scattered electrons (BSE) in the scanning electron microscope (SEM) for three-dimensional (3D) visualization of the microstructure topography is described. The 3D surface topography reconstruction is carried out according to the algorithm of profile reconstruction from the preliminarily determined angular dependencies of BSE with the use of a calibration specimen. It is shown that the instrument function of the detector system, i.e., the detector response function, as well as the geometric factor, that takes the transformation of the angle distribution for single and multiple scattering of BSEs into consideration, cause a significant impact on the detected signal.

Keywords: scanning electron microscopy, back-scattered electrons, 3D surface topography reconstruction, inclination angle, detector response function.
PACS: 73.21–b, 71.15.Qe, 07.78.+s.
Received 09 April 2021.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2021. **76**, No. 4. Pp. 209–214.

Сведения об авторах

1. Борзунов Андрей Анатольевич — аспирант; тел.: (495) 939-38-95, e-mail: aborzunov@physics.msu.ru.
2. Забродский Владимир Викторович — науч. сотрудник; тел. (812) 292-73-63 sildet@mail.ioffe.ru.
3. Зайцев Сергей Владимирович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-38-95, e-mail: zai336@mail.ru.
4. Караулов Виктор Юрьевич — аспирант; тел.: (495) 939-38-95, e-mail: karaulov@physics.msu.ru.
5. Лукьяненко Дмитрий Витальевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-38-95, e-mail: lukyanenko@physics.msu.ru.
6. Рау Эдуард Иванович — доктор физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-38-95, e-mail: rau@phys.msu.ru.
7. Шерстнёв Евгений Викторович — мл. науч. сотрудник; тел.: (812) 292-73-63, sildet@mail.ioffe.ru
8. Ягола Анатолий Григорьевич — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-38-95, e-mail: yagola@physics.msu.ru.