

УДК 537.533:620.187:539.25

*Д. С. Бодунов^{1,2}, М. А. Данилова¹, В. А. Кальнов³, А. Ю. Кузин¹,
В. Б. Митюхляев¹, А. А. Орликовский^{2,3}, А. В. Раков¹, П. А. Тодуа^{1,2},
М. Н. Филиппов^{1,2,4}*

¹Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума

²Московский физико-технический институт (государственный университет)

³Физико-технологический институт РАН

⁴Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН

Экспериментальные исследования метода дефокусировки электронного пучка при измерениях геометрических параметров наноразмерных объектов в низковольтном режиме растрового электронного микроскопа

Выполнены измерения линейных размеров элемента нанорельефа с трапецеидальным профилем в растровом электронном микроскопе (РЭМ), работающем при ускоряющем напряжении 800 В, методом дефокусировки электронного пучка. Показано, что видеосигнал во вторичных электронах может быть представлен как кусочно-линейная функция с характерными точками излома. Установлено, что расстояния между экстремумами и точками начала возрастания сигнала линейно зависят от эффективного диаметра d_{ef} электронного пучка РЭМ. Экстраполяция этих прямых к $d_{ef} = 0$ позволяет определить значения размеров верхнего и нижнего оснований упомянутого выше элемента нанорельефа и среднее значение проекции боковой стенки элемента.

1. Введение

Понятие эффективного диаметра электронного пучка РЭМ определено в национальном стандарте ГОСТ Р 8.629 [1]. Метод измерений, основанный на дефокусировке электронного пучка РЭМ (далее метод дефокусировки), изложен в работах [2, 3], где использовался высоковольтный режим РЭМ с ускоряющим напряжением $U > 15$ кВ. Однако при линейных измерениях часто используют РЭМ в низковольтном режиме ($U \leq 1$ кВ). В связи с этим представляет интерес исследовать метод дефокусировки электронного пучка РЭМ в низковольтном режиме.

2. Форма кривой видеосигнала в низковольтном РЭМ при сканировании элемента нанорельефа с трапецеидальным профилем

В качестве наноразмерного объекта рассмотрим элемент нанорельефа из шаговой структуры на поверхности монокристаллического кремния, имеющий профиль в форме равнобедренной трапеции. На рис. 1 приведены схемы трапецеидального профиля элемента нанорельефа (а) и регистрируемого сигнала вторичных электронов при сканировании этого элемента в РЭМ в низковольтном режиме (б). Указанный сигнал можно представить в виде кусочно-линейной функции с характерными точками излома, обозначенными цифрами от 1 до 8. Расстояния по оси X между точками 1 и 2 и точками 7 и 8 позволяют измерить значения D_L и D_R , характеризующие эффективный диаметр d_{ef} электронного пучка РЭМ. Проекция левой и правой боковых сторон трапецеидального профиля элемента нанорельефа a (рис. 1а) A_L и A_R (рис. 1б) могут быть измерены на уровнях $0.5H_1$ и $0.5H_2$, если на отрезке между точками 4 и 5 имеется горизонтальный участок. В случае малых значений верхнего основания профиля элемента нанорельефа (рис. 1а) горизонтальный участок между точками 4 и 5 может отсутствовать. В этом случае проекции боковых сторон профиля исследуемого элемента нанорельефа можно определить по расстояниям на

оси X между точками 1 и 3 и 6 и 8. Нижнее основание профиля элемента нанорельефа можно измерить по расстоянию между точками 1 и 8 (рис. 1б). Обозначим это расстояние как G_p . Верхнее основание этого профиля можно определить с помощью сигнала вторичных электронов по расстоянию между точками 3 и 6 (см. рис. 1б). Обозначим это расстояние как L_p . Его также можно определить по разности между измеренным нижним основанием и суммой измеренных левой и правой проекций боковых сторон профиля элемента нанорельефа.

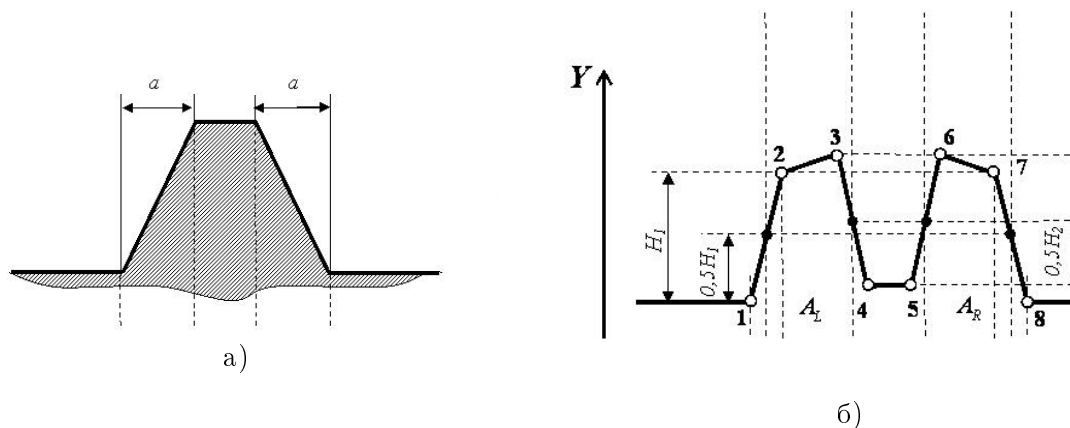


Рис. 1. а) Сечение выступа использованного наноразмерного объекта; б) видеопрофиль выступа, зарегистрированный на РЭМ в низковольтном режиме. X — ось значений координаты электронного зонда в направлении сканирования в нанометрах. Y — ось значений величины информативного сигнала в нанометрах

3. Результаты эксперимента

Эксперименты выполнялись на РЭМ S-4800 (Hitachi) при ускоряющем напряжении 800 В, рабочем отрезке 2.4 мм и увеличении РЭМ $M = 90000$. В качестве наноразмерного объекта использовался элемент нанорельефа (выступ с трапециевидальным профилем) из шаговой кремниевой структуры, полученной анизотропным травлением в КОН. Способ изготовления этой структуры опубликован в работе [4]. При указанных условиях на РЭМ регистрировались видеоизображения упомянутого выступа при разных условиях фокусировки. Изменение условий фокусировки электронного пучка осуществлялось с помощью рукоятки тонкой фокусировки микроскопа. На рис. 2 приведены два регистрируемых сигнала вторичных электронов вдоль оси сканирования. На рис. 2а показан видеосигнал при оптимальной фокусировке электронного пучка $(0.5[D_L + D_R]) = 30.6 \pm 5.2$ пиксель. Здесь и далее использованы обозначения, приведённые на рис. 1б и в разделе 1 настоящей работы. Как видно из этого рисунка, на видеосигнале между двумя экстремумами практически отсутствует горизонтальный участок. Поэтому для измерения геометрических параметров исследуемого наноразмерного объекта был применён способ дефокусировки электронного пучка РЭМ. На рис. 2б показан сигнал вторичных электронов вдоль оси сканирования для структуры, у которой $(0.5[D_L + D_R]) = 91.4 \pm 1.5$ пиксель. Из рис. 2 видно, что с ростом величины $(0.5[D_L + D_R])$ значения L_p (расстояние между двумя экстремумами, точки 3 и 6) и G_p (расстояние между точками начала роста регистрируемого сигнала, точки 1 и 8) растут. Отметим, что по мере роста $(0.5[D_L + D_R])$ проекции боковых сторон A_L и A_R (рис. 1б) практически не меняются, так как эти величины характеризуют постоянную глубину рельефа используемой шаговой структуры. Калиброванный масштабный коэффициент РЭМ для указанных выше условий равен 0.5512 нм/пиксель.

На рис. 3 и 4 приведены результаты измерений L_p и G_p при различных значениях эффективного диаметра электронного зонда d_{ef} . Зависимости $L_p(d_{ef})$ и $G_p(d_{ef})$ хорошо описываются линейными функциями общего вида $A + B \cdot d_{ef}$, где A и B — коэффициенты,

не зависящие от d_{ef} . При этом для зависимости $L_p(d_{ef})$ коэффициент A равен ширине верхнего основания, а для зависимости $G_p(d_{ef})$ — ширине нижнего основания.

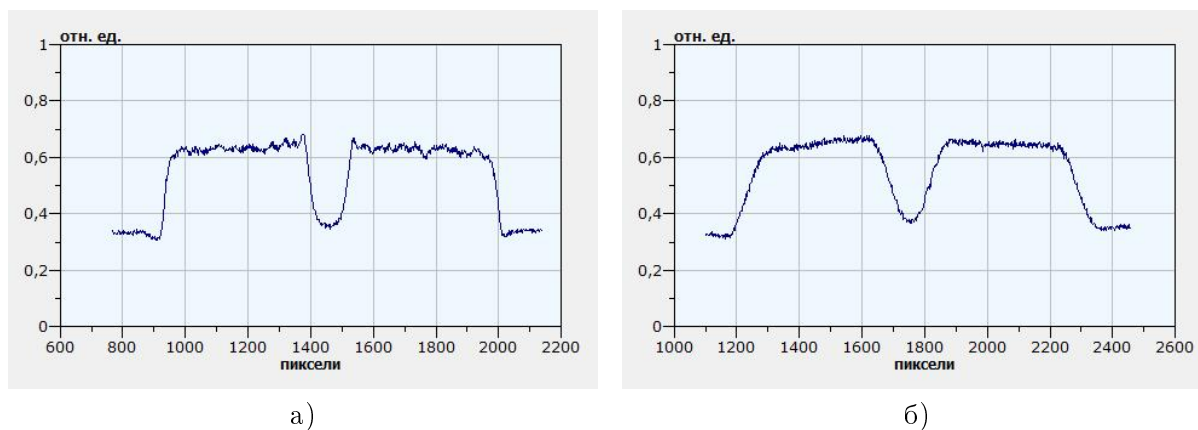


Рис. 2. а) Видеосигнал во вторичных электронах, полученный в РЭМ в низковольтном режиме. Выступы с трапецидальным профилем, при среднем значении $d_{ef} = 28.7$ пиксель; б) видеосигнал во вторичных электронах, полученный в том же РЭМ при регистрации того же объекта при среднем значении $d_{ef} = 92.8$ пиксель. Калиброванное значение масштабного множителя равно 0.5512 нм/пиксель

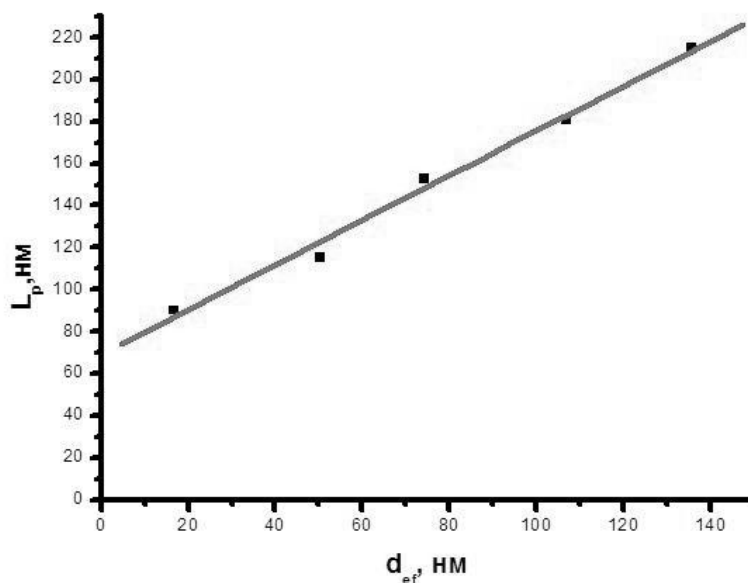


Рис. 3. Экспериментальная зависимость расстояния между двумя экстремумами от эффективного диаметра электронного пучка в РЭМ $L_p(d_{ef})$

Это было экспериментально проверено на симметричных выступах шаговой структуры с шириной верхнего основания, при которой наблюдается горизонтальный участок между экстремумами. В этом случае ширина верхнего основания может быть определена по методике, аналогичной [1]. Сохранение линейного характера зависимости $L_p(d_{ef})$ и $G_p(d_{ef})$ в случае отсутствия горизонтального участка позволяет утверждать, что значения $L_p(0)$ и $G_p(0)$ равны соответственно ширине верхнего и нижнего оснований трапецевидного симметричного выступа, по крайней мере до значений, сопоставимых с эффективным диаметром зонда в условиях оптимальной фокусировки.

Экстраполяция этих зависимостей к $d_{ef} = 0$ дает на оси ординат значения размеров верхнего и нижнего оснований исследуемого элемента нанорельефа (выступа).

Верхнее основание равно 70 ± 5 нм; нижнее основание равно 582 ± 6 нм. Среднее значение проекции боковой стороны исследованного выступа $0.5(A_L + A_R) = 253.9 \pm 0.8$ нм. Этих данных достаточно, чтобы определить все остальные геометрические характеристики исследованного наноразмерного объекта. Так, высота (глубина) рельефа выступа равна $h = 358.6 \pm 1.1$ нм.

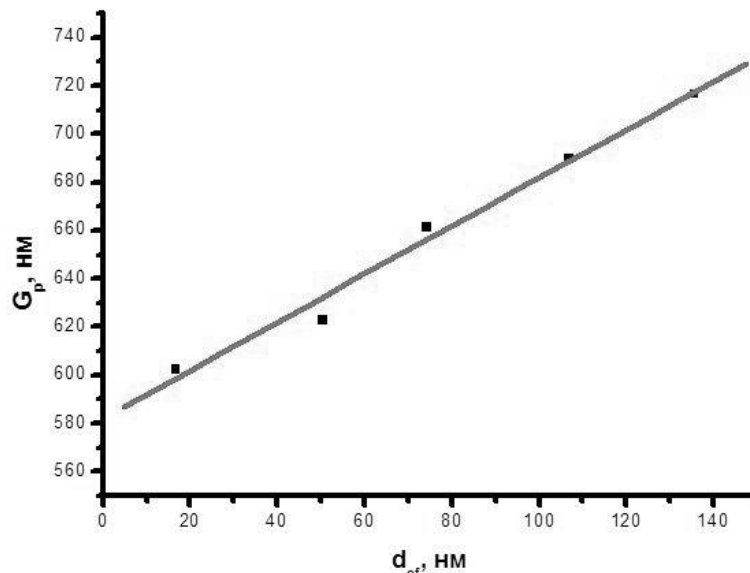


Рис. 4. Экспериментальная зависимость расстояния между точками начала роста регистрируемого сигнала от эффективного диаметра электронного пучка $G_p(d_{ef})$

4. Заключение

Выполненное в РЭМ в низковольтном режиме измерение наноразмерного выступа с трапецеидальным профилем показало, что видеосигнал во вторичных электронах имеет два экстремума, между которыми существует глубокий провал с практически отсутствующим горизонтальным участком. Установлено, что расстояния между экстремумами и точками начала возрастания сигнала линейно зависят от эффективного диаметра d_{ef} электронного пучка РЭМ. Экстраполяция этих прямых к $d_{ef} = 0$ даёт значения размеров верхнего и нижнего оснований упомянутого выше элемента нанорельефа.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации с использованием оборудования Центров коллективного пользования МФТИ и НИЦПВ.

Литература

- ГОСТ Р 8.631–2007. Государственная система обеспечения единства измерений. Микроскопы электронные растровые измерительные. Методика поверки. — М.: Стандартинформ, 2011.
- Filippov M.N., Novikov Yu.A., Rakov A.V., Todua P.A. SEM Probe Defocusing Method of Measurement of Linear Sizes of Nanorelief Elements // Proc. of SPIE. — 2010. — V. 7521. — P. 752116-1–752116-9.
- Валиев К.А., Гавриленко В.П., Жихарев Е.Н., Данилова М.А., Кальнов В.А., Ларионов Ю.В., Митюхляев В.Б., Орликовский А.А., Раков А.В., Тодуа П.А., Филиппов М.Н.

- Whole cell strategies based on lux genes for high throughput applications toward new antimicrobials // Comb. Chem. High Throughput Screen. — 2006. — V. 9. — P. 501–514.
4. *Gavrilenko V.P., Mityukhlyev V.B., Novikov Yu.A.Q., Ozerin Yu.V., Rakov A.V., Todua P.A.* Whole cell-based biosensors for environmental biomonitoring and application // Adv. Biochem. Eng. Biotechnol. — 2004. — V. 87. — P. 268–305.

Поступила в редакцию 16.12.2011