

ТЕСТ-ОБЪЕКТЫ С ПРЯМОУГОЛЬНЫМ И ТРАПЕЦИЕВИДНЫМ ПРОФИЛЯМИ РЕЛЬЕФА ДЛЯ РАСТРОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ И АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

В конце XX и начале XXI века экономику высокоразвитых стран характеризует освоение высоких технологий, главная из которых – нанотехнология. Она оперирует с размерами, лежащими в диапазоне 1–100 нм, что требует обеспечения единства линейных измерений в нанометровом диапазоне [1]. В мировой практике линейные измерения в нанометровой области осуществляются на растровых электронных (РЭМ) [2–4] и атомно-силовых (АСМ) [5–7] микроскопах. Для калибровки РЭМ и АСМ в качестве тест-объектов используются периодические [3], шаговые [2,8] и одиночные [4] рельефные структуры на поверхности твердого тела.

Величины периода и шага тест-объектов аттестованы с использованием дифракции [3] или интерференции [9] лазерного излучения, размер ширины линии одиночной структуры – с помощью эллипсометрии [10].

Большое количество тест-объектов и отсутствие работ по сравнению их достоинств и недостатков затрудняет выбор тест-объекта для конкретного применения и реализацию потенциальных возможностей РЭМ и АСМ.

СТРУКТУРЫ ТЕСТ-ОБЪЕКТОВ

Используя особенности взаимодействия электронного зонда с рельефной поверхностью [4,11], структуры, применяемые в микро- и нанотехнологии, можно разделить на четыре основные группы:

- 1) с прямоугольным профилем,
- 2) с трапецевидным профилем и малыми углами наклона боковых стенок,
- 3) с трапецевидным профилем и большими углами наклона боковых стенок,

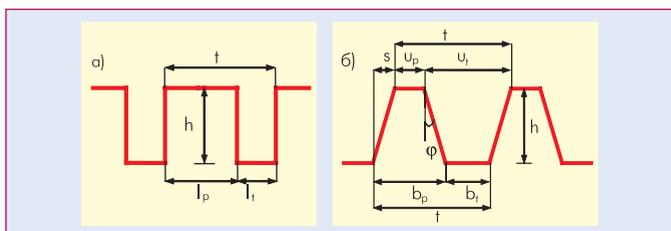


Рис. 1 Схемы шаговых структур, состоящих из прямоугольных канавок (а) и трапецевидных выступов (б)

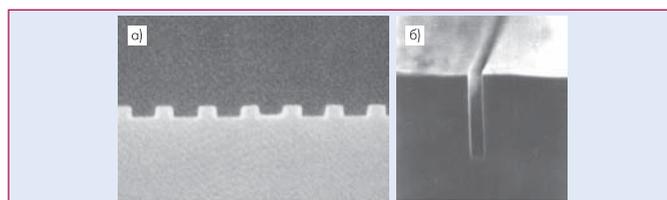


Рис. 2 Сколы прямоугольных структур

4) с трапецевидным профилем и отрицательными углами наклона боковых стенок.

Структуры четвертой группы встречаются довольно часто, однако методы калибровки РЭМ и АСМ с их помощью отсутствуют.

На рис.1 приведены схемы шаговых структур, состоящих из прямоугольных канавок (рис.1а) и трапецевидных выступов (рис.1б), и показаны параметры, характеризующие эти структуры.

Структуры с прямоугольным профилем

У таких структур (см. рис.1а) угол φ наклона боковых стенок относительно нормали к поверхности образца (см. рис.1б)

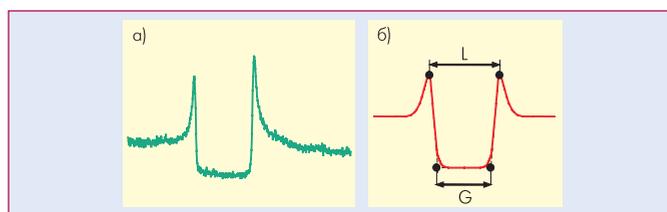


Рис.3 Форма реального сигнала РЭМ (а), получаемого в режиме сбора вторичных медленных электронов при сканировании щелевидной канавки РПС, и схема сигнала (б) с измеряемыми параметрами

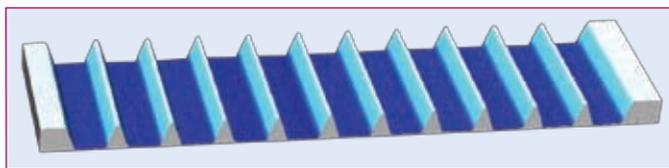


Рис.4 АСМ изображение шаговой структуры тест-объекта МШПС-2.0К

меньше угла расходимости φ_d электронного зонда:

$$\varphi > \varphi_d. \quad (1)$$

Существует два вида прямоугольных структур. В одном прямоугольный рельеф создается по технологии анизотропного травления монокремния с ориентацией поверхности (110) [3] (рис.2а). Аттестация периода осуществляется с помощью дифракции лазерного излучения.

Другим видом являются рельефные прямоугольные структуры (РПС), представляющие собой щелевидные канавки в кремнии (рис.2б) с прямоугольным профилем и известным с высокой точностью расстоянием между противоположными стенками. Технология их изготовления достаточно подробно изложена в работе [12]. Аттестация ширины щели осуществляется с помощью метода эллипсометрии [10,12].

В России изготовлены два вида РПС на основе кремния п- и р-типа проводимости (п-РПС и р-РПС соответственно) с разной шириной канавок.

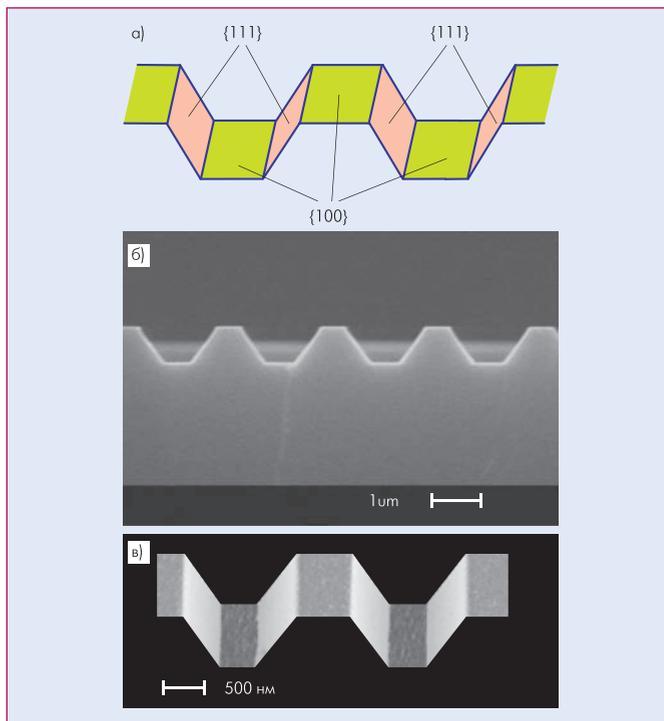


Рис.5 Схема кристаллографических плоскостей кремния (а) в структуре, полученной анизотропным травлением пластины с ориентацией поверхности (100), РЭМ изображение скола (б) и АСМ изображение рельефа (в) шаговой структуры тест-объекта

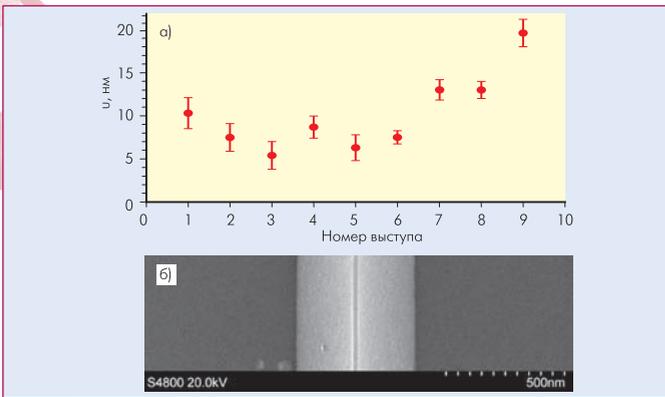


Рис. 6 Изображение выступа с шириной верхнего основания 5,4 нм (а) и размеры верхних оснований выступов шаговой структуры (б) из тест объекта МШПС-2.0К

Особенность прямоугольных структур – узкие максимумы сигнала (рис.3а), получаемые при прохождении зонда около боковых стенок структуры [11].

На рис.3б приведена схема сигнала, получаемого на высоковольтном РЭМ в режиме сбора вторичных медленных электронов (ВМЭ) при сканировании канавки РПС. Ширина канавки l связана с параметрами сигнала с помощью выражений [14]

$$l = mL - 2\delta, \quad (2)$$

$$l = mG + d, \quad (3)$$

где m – размер пикселя на изображении, d – эффективный диаметр зонда [8], δ – сдвиг максимумов сигналов относительно положения стенки структуры.

Структуры с трапецевидным профилем и большими углами наклона боковых стенок

Такие структуры в РЭМ удовлетворяют условиям:

$$s = h \tan \varphi \gg d, \quad (4)$$

$$b_{p,t}, u_{p,t} \gg d. \quad (5)$$

Этим условиям соответствуют шаговые структуры тест-объекта МШПС-2.0К, полученные анизотропным травлением кремния с ориентацией поверхности (100). На рис.4 приведено 3-мерное изображение такой структуры, полученное на метрологической системе LR-AFM (РТВ, Германия). Ширина верхнего основания выступов составляет 5 нм.

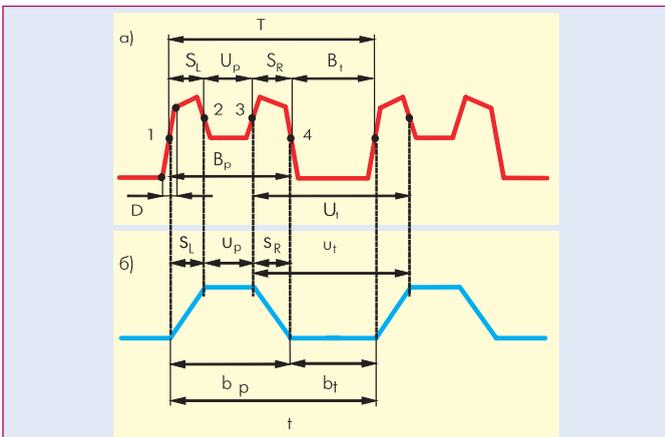


Рис. 7 Схемы сигнала РЭМ (а), получаемого при сканировании шаговой структуры (б) с трапецевидным профилем и большим наклоном боковых стенок, и обозначения параметров элементов структуры и сигнала

Эти структуры имеют форму трапецевидных выступов и канавок, все стороны которых совпадают с кристаллографическими плоскостями кремния (111) и (100) (рис.5а). РЭМ изображение скола (рис.5б) и 3D АСМ изображение рельефа (рис.5в) шаговой структуры подтверждают это. Величина верхнего основания выступа структур (рис.5б и 5в) – 520 нм.

Созданы тест-объекты МШПС-2.0К с номинальным размером шага 2000 нм и различными высотой рельефа и шириной выступа (верхнего основания трапеции) от 500 до 5 нм. На

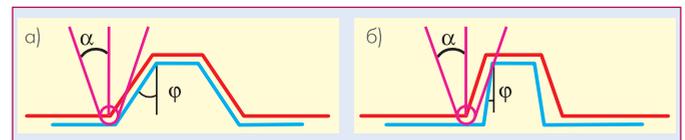


Рис. 8 Схемы формирования сигналов при сканировании вертикальным зондом выступа с большими (а) и малыми (б) углами наклона боковых стенок

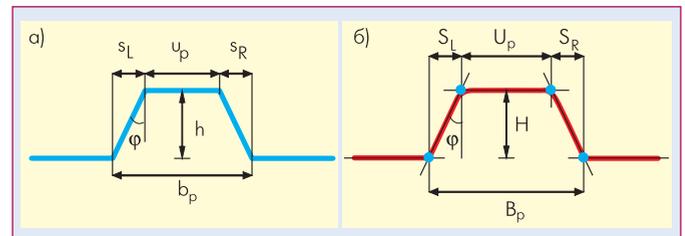


Рис. 9 Схемы выступа с трапецевидным профилем (а) и трапецевидного приближения сигнала (б) с обозначением параметров выступа и сигнала

рис.6 приведено изображение в РЭМ S-4800 FE выступа с шириной верхнего основания $u_p = 5,4$ нм (рис.6а) и размеры верхних оснований выступов шаговой структуры (рис.6б) одного из тест-объектов МШПС-2.0К.

Рис.7 поясняет формирование сигнала РЭМ при сканировании электронным зондом шаговой структуры с большими углами наклона боковых стенок. На рис.7а приведена схема сигнала при сканировании на высоковольтном РЭМ, а на рис.7б – схема самой структуры и параметры сигнала и структуры.

Параметры сигнала (см.рис.7а), шаговой структуры (см. рис.7б) и РЭМ (m и d) связаны с помощью выражений:

$$t = mT, \quad d = mD, \quad s_L = mS_L, \quad s_R = mS_R, \quad (6)$$

$$u_p = mU_p, \quad b_p = mB_p, \quad u_t = mU_t, \quad b_t = mB_t. \quad (7)$$

В АСМ такая структура удовлетворяет условиям:

$$b_p \gg 2r, \quad u_p \gg 2r, \quad s_{L,R} \gg 2r, \quad (8)$$

$$\alpha < \varphi, \quad (9)$$

где r – радиус острия кантилевера [8], α – угол наклона образующей конуса острия кантилевера.

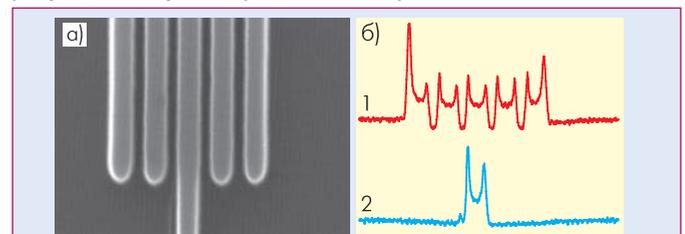


Рис. 10 Тест-объект BCR-97A/G-7 (а) и сигналы (б), полученные при его сканировании

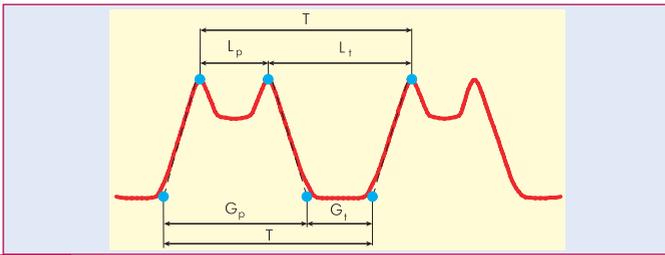


Рис.11 Схема сигнала при сканировании в РЭМ шаговой структуры с трапецевидным профилем и малыми углами наклона боковых стенок

Рис.8а поясняет формирование АСМ сигнала при сканировании вертикальным зондом выступа с большими углами наклона боковых стенок. В результате получается симметричный сигнал, углы наклона боковых стенок которого совпадают с углами наклона боковых стенок выступа (при $m_x = m_z$).

На рис.9 приведены схемы выступа с трапецевидным профилем и большими углами наклона боковых стенок (рис.9а) и сигнала (рис.9б) с обозначением параметров выступа и сигнала, которые связаны с помощью выражений:

$$t = m_x T, \quad h = m_z H, \quad s_L = m_x S_L, \quad s_R = m_x S_R, \quad (10)$$

$$u_p = m_x U_p - rQ(\varphi), \quad b_p = m_x B_p - rQ(\varphi), \quad (11)$$

$$r = (m_x U_p - u_p)/Q(\varphi) = (m_x B_p - b_p)/Q(\varphi), \quad (12)$$

где m_x – цена деления шкалы оси X, $Q(\varphi)$ – универсальная константа, зависящая только от угла φ наклона боковой стенки трапецевидного выступа

$$Q(\varphi) = 2(1 - \sin \varphi)/\cos \varphi. \quad (13)$$

Структуры с трапецевидным профилем и малыми углами наклона боковых стенок

В РЭМ такая структура удовлетворяет условию:

$$\varphi > \varphi_d, \quad s = h \tan \varphi < d. \quad (14)$$

На рис.10 приведено изображение в РЭМ тест-объекта BCR-97A/G-7 (рис.10а) и сигналы (рис.10б), полученные при его сканировании на РЭМ Stereoscan 360 FE поперек шаговой структуры (сигнал 1) и одиночного выступа (сигнал 2).

На рис.11 приведена схема сигнала, получаемого при сканировании на высоковольтном РЭМ такой шаговой структуры, и измеряемые параметры сигнала. Эта схема хорошо совпадает с реальными сигналами высоковольтного РЭМ (рис.10б). Параметры выступа (см. рис.1б) связаны с параметрами сигнала (см. рис.11) с помощью выражений:

$$u_p = m(2L_p - G_p) + d, \quad b_p = mG_p - d. \quad (15)$$

В АСМ структуры с малыми углами наклона боковых стенок выглядят как и структуры с большими углами наклона. Однако наклон боковых стенок у сигналов различен. На рис.8б видно, что боковые стенки сигнала структуры с малыми углами наклона получаются сканированием не сферой, как это у структуры с большими углами наклона боковых стенок, а конусом острия кантилевера. Выражения, связывающие параметры структуры, микроскопа и сигнала:

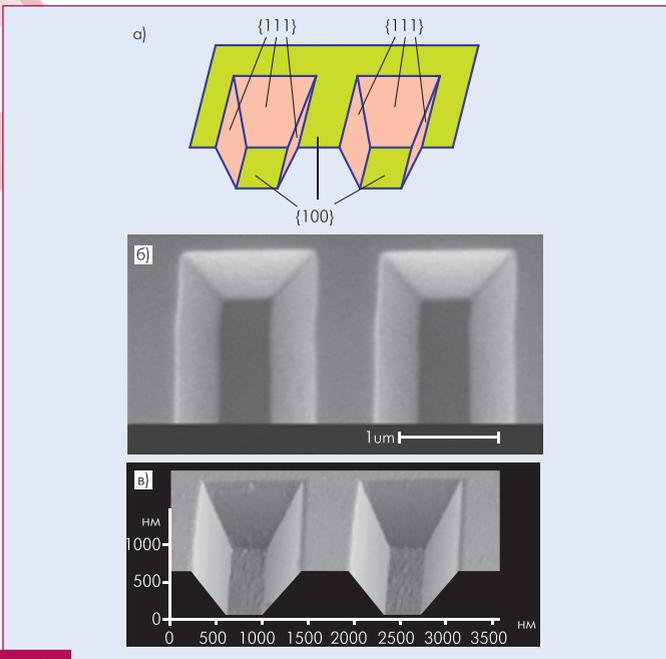


Рис. 12 Схема концевой участка (а) шаговой структуры тест-объекта МШПС-2.0К с указанием положений кристаллографических плоскостей кремния, РЭМ (б) и АСМ (в) изображения этого участка

$$u_p = m_x U_p - rQ(\alpha), \quad b_p = m_x B_p - rQ(\alpha),$$

$$u_t = m_x U_t + rQ(\alpha), \quad b_t = m_x B_t + rQ(\alpha), \quad (16)$$

$$S_L = H \tan \alpha, \quad S_R = H \tan \alpha, \quad (17)$$

$$Q(\alpha) = 2(1 - \sin \alpha) / \cos \alpha. \quad (18)$$

КАЛИБРОВКА РАСТРОВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ И АТОМНО-СИЛОВЫХ МИКРОСКОПОВ

Калибровка РЭМ с помощью прямоугольных структур

Известно шесть способов [13] калибровки РЭМ (включая измерение эффективного диаметра зонда) с помощью РПС. Все они основаны на том, что параметры микроскопа на зависят от ширины канавки. Имея две щели с разными аттестованными ширинами, вместо выражения (3) можно записать систему двух линейных уравнений с двумя неизвестными (m и d)

$$\begin{cases} l_i = mG_i + d \\ l_j = mG_j + d \end{cases} \quad (19)$$

Отсюда размеры пикселя m_{ij} и электронного зонда d_{ij} :

$$m_{ij} = (l_i - l_j) / (G_i - G_j), \quad d_{ij} = (G_i l_j - G_j l_i) / (G_i - G_j), \quad (20)$$

где G_i и G_j – размеры дна соответствующих сигналов. РПС [13] состоит из четырех щелей с разной шириной, поэтому можно определить m_{ij} и d_{ij} и проверить независимость этих величин от ширины щели. Размеры пикселя m и электронного зонда d РЭМ можно получить путем усреднения m_{ij} и d_{ij} по методу наименьших квадратов. Другие методы калибровки РЭМ [13] – модификации метода, описываемого выражениями (19) и (20).

Калибровка РЭМ и АСМ с помощью структур с большими углами наклона боковых стенок

Калибровка РЭМ (определения размера пикселя m и эффективного диаметра зонда d) с помощью выступа с большими углами наклона боковых стенок может быть осуществлена с ис-

пользованием аттестованных размеров выступа u_p , b_p , s_L , s_R и измеренных на сигнале величин U_p , B_p , S_L , S_R и D (см. рис.7):

$$m = u_p / U_p = b_p / B_p = s_L / S_L = s_R / S_R, \quad d = mD. \quad (21)$$

Для шаговой структуры размер пикселя m может быть определен с использованием аттестованного значения шага t :

$$m = t/T, \quad (22)$$

где T – размер шага, измеренный на сигналах РЭМ.

Калибровка АСМ (определения цены деления шкал осей АСМ m_x и m_z и радиуса острия кантилевера r) с помощью шаговой структуры с большими углами наклона боковых стенок может быть осуществлена с использованием аттестованного значения шага t и высоты h рельефа:

$$m_x = t/T, \quad m_z = h/H, \quad (23)$$

а радиуса острия кантилевера – с использованием аттестованных размеров выступа u_p , b_p , s_L , s_R и измеренных на сигнале АСМ величин U_p и B_p (см. рис.9б) в соответствии с выражением (12). Для структур, выполненных по методу анизотропного травления кремния с ориентацией поверхности (100)

$$Q(\varphi) = 2(1 - \sin \varphi) / \cos \varphi = \sqrt{6} - \sqrt{2} \approx 1,0353. \quad (24)$$

При выполнении условия

$$S_L + S_R = 2s/m_x, \quad (25)$$

где S_L , S_R – измеренные на сигнале параметры (см. рис.9б) можно определить неортогональность Z-сканера:

$$Z_x = \frac{m_x}{m_z} \frac{S_L - S_R}{2H}. \quad (26)$$

2D калибровка РЭМ и 3D калибровка АСМ с помощью структур с большими углами наклона боковых стенок

Тест-объекты с такими элементами обладают интересным свойством. С их помощью можно осуществлять калибровку двух осей РЭМ и трех осей АСМ с использованием только одного аттестованного размера тест-объекта. Для этого необходимо воспользоваться концевыми участками шаговых структур.

На рис.12 изображены схема концевой участка (рис.12а) шаговой структуры тест-объекта с указанием положений кристаллографических плоскостей кремния, РЭМ (рис.12б) и АСМ (рис.12в) изображения этого участка. Все три боковые стороны канавок, видимые на рис.12б и в, соответствуют кристаллографическим плоскостям {111} кремния (см. рис.12а). Следовательно, проекции наклонных стенок канавок вдоль разных направлений (s_x и s_y) и их глубина h связаны друг с другом:

$$s_x = s_y = s = (s_L + s_R) / 2 = h / \sqrt{2}. \quad (27)$$

Тогда размеры пикселя m_x по X и m_y по Y координатам РЭМ изображений и цена деления шкал АСМ (m_x , m_y и m_z) будут определяться с помощью выражений

$$m_x = s/S_x, \quad m_y = s/S_y, \quad m_z = s/\sqrt{2}/H, \quad (28)$$

где S_x и S_y – параметры РЭМ и АСМ сигналов от канавки вдоль осей X и Y.

Калибровка РЭМ и АСМ с помощью структур с малыми углами наклона боковых стенок

Калибровка РЭМ в этом случае может осуществляться с использованием аттестованного значения шага t структуры:

$$m_x = t/T. \quad (29)$$

Измерить размер эффективного диаметра зонда РЭМ с помощью таких структур не удается.

Калибровка цены деления шкалы оси X АСМ с помощью этих же структур возможна с использованием аттестованного значения шага структуры (выражение (29)). Возможно определение угла α наклона образующей конуса острия кантилевера и радиус r острия:

$$\alpha = \frac{1}{2} \left\{ \arctan \frac{m_x S_L}{m_z H} + \arctan \frac{m_x S_R}{m_z H} \right\}, \quad (30)$$

$$r = (m_x U_p - u_p)/Q(\alpha) = (m_x B_p - b_p)/Q(\alpha) = (u_t - m_x U_t)/Q(\alpha) = (b_t - m_x B_t)/Q(\alpha). \quad (31)$$

Однако для этого необходимо знать размеры верхних или нижних оснований выступов и канавок.

АНАЛИЗ СВОЙСТВ РЕЛЬЕФНЫХ СТРУКТУР ТЕСТ-ОБЪЕКТОВ

Структуры с трапециевидным профилем и малыми углами наклона боковых стенок

Качество изготовления таких структур гораздо хуже, чем структур с большими углами наклона. С помощью структур с малыми углами наклона не удастся проводить измерения эффективных диаметров зондов РЭМ, хотя для АСМ удастся измерять радиусы острий кантилеверов. Поэтому структуры

с трапециевидным профилем и малыми углами наклона боковых стенок не рекомендуются для калибровки РЭМ и АСМ.

Структуры с прямоугольным профилем

Основным преимуществом таких тест-объектов считается один размер, характеризующий профиль. Технологии производства структур РПС [12] позволяют создавать щелевидные канавки шириной менее 100 нм, однако создавать выступы невозможно. РПС-структуры можно использовать только для калибровки РЭМ. Для калибровки АСМ они не пригодны, так как современные острия кантилеверов не могут достать дна узких канавок.

Прямоугольные структуры по технологии анизотропного травления кремния с ориентацией поверхности (110) [3] можно создавать в виде периодических, шаговых и одиночных структур. Одиночные структуры могут быть в виде выступов или канавок, что позволяет использовать эти структуры для калибровки РЭМ и АСМ.

Достоинством прямоугольных структур является то, что создано шесть методов калибровки РЭМ [13]. Однако все они довольно длительны (2–3 часа). Эти методы существенно зависят от ошибок фокусировки электронного зонда РЭМ.

К недостаткам структур с прямоугольным профилем элементов рельефа следует отнести сложность физической интерпретации получаемых в РЭМ результатов [11] и сложности, связанные со сканированием в АСМ боковых сторон элементов.

Структуры с трапециевидным профилем и большими углами наклона боковых стенок

Основным недостатком тест-объектов [8], полученных методом анизотропного травления кремния с ориентацией поверхности (100), считается большое количество характеризующих профиль параметров. Это на самом деле – дополнительное преимущество тест-объектов. Большое количество размеров, характеризующих рельефные элементы, расширяет диапазон аттестуемых размеров. Так тест-объект МШПС-2.0К имеет аттестуемые размеры в диапазоне от 5 нм до 100 мкм [8].

Технология изготовления тест-объектов позволяет создавать рельефные структуры с размерами верхних оснований выступов от 5 нм до 500 нм. Разработан также метод оценки качества изготовления элементов таких объектов, позволяющий контролировать качество структур в процессе их производства.

Главное преимущество рассматриваемых тест-объектов – возможность прямым методом на РЭМ измерить все размеры, характеризующие эти структуры (выражения (6) и (7)). Такие измерения могут быть выполнены на серийных РЭМ и на специализированных установках на основе РЭМ, контроль перемещения на которых осуществляется лазерными интерферометрами. Аналогичные измерения могут быть выполнены на АСМ (выражения (10)).

Достоинство таких тест-объектов – простота и быстрота (менее 5 мин на РЭМ) калибровки, включая измерение размеров зондов микроскопов. Калибровка РЭМ возможна по двум координатам, а АСМ по трем координатам с использованием одного аттестованного размера тест-объекта. Разработаны методы калибровки РЭМ в широком диапазоне увеличений [14], позволяющие встраивать РЭМ в технологическую линию и осуществлять оперативный контроль размеров рельефных элементов при производстве микросхем.

Созданные методы измерения эффективного диаметра электронного зонда и его зависимостей от тока пучка электронов и фокусировки зонда полезны пользователям РЭМ и разработчикам микроскопов.

Таким образом, структуры с трапециевидным профилем и большими углами наклона боковых стенок, полученные методом анизотропного травления кремния с ориентацией поверхности (100), обладают наибольшими преимуществами перед остальными. Учитывая это, в России разработаны и введены в 2008 году национальные стандарты, основанные на применении таких структур.

Анализ результатов показывает, что наиболее удобны для использования в РЭМ и АСМ – рельефные структуры, имеющие трапециевидный профиль и большие углы наклона боковых стенок и полученные с помощью метода анизотропного травления кремния с ориентацией поверхности (100). Разработана технология изготовления и контроля основных свойств таких структур. Созданы методы измерения разме-

ров элементов структур, включая ширину линии (размеров верхних и нижних оснований трапеции). Диапазон измеряемых размеров верхнего основания выступов – 5–500 нм. Разработаны методы калибровки РЭМ и АСМ, позволяющие измерять диаметры электронных зондов и радиусы острий кантиллеров, линейности и ортогональности сканирования.

Предлагается использовать трапециевидные структуры с большими углами наклона боковых стенок для разработки международных тест-объектов для растровой электронной и атомно-силовой микроскопии нанометрового диапазона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков Ю., Тодуа П. Нанотехнология и нанометрология. – Наноиндустрия, 2007, № 1, с. 20–22.
2. Postek M.T., Vladar A.E. Critical Dimension Metrology and the Scanning Electron Microscope. – Handbook of Silicon Semiconductor Metrology, Ed. A.C.Diebold. Marcel Dekker, Inc. New York - Basel., 2001, p. 295–333.
3. Nakayama Y., Okazaki S., Sugimoto A. Proposal for a new submicron dimension reference for an electron beam metrology system. – J. Vac. Sci. Technol., 1988, v, B6, p. 1930–1933.
4. Новиков Ю.А., Раков А.В. Проблемы РЭМ-измерений размеров субмикронных элементов рельефа поверхности твердого тела. 2. Новая концепция РЭМ метрологии. (Обзор). – Микроэлектроника, 1996, т. 25, № 6, с. 426–435.
5. Nagase M., Namatsu H., Kurihara K., Iwadate K., Murase K. Metrology of Atomic Force Microscopy for Si Nano-Structures. – Jpn. J. Appl. Phys., 1995, v., 34, p. 3382–3387.
6. Новиков Ю.А., Озерин Ю.В., Плотников Ю.И., Раков А.В., Тодуа П.А. Нанометрология линейных измерений в атомно-силовой микроскопии. – Труды ИОФАН, 2006, т. 62, с. 121–143.
7. Горнев Е.С., Новиков Ю.А., Плотников Ю.И., Раков А.В. Измерение параметров профилей субмикронных элементов СБИС на сканирующем силовом микроскопе. // Измерительная техника. 2001. № 1. С. 28–31.
8. Волк Ч.П., Горнев Е.С., Новиков Ю.А., Озерин Ю.В., Плотников Ю.И., Прохоров А.М., Раков А.В. Линейная мера микронного, субмикронного и нанометрового диапазонов для измерений размеров элементов СБИС на растровых электронных и атомно-силовых микроскопах. – Микроэлектроника, 2002, т. 31, № 4, с. 243–262.
9. Haessler-Grohne W., Bosse H. An electron optical metrology system for pattern placement measurements. – Meas. Sci. Technol., 1998. v. 9, p.1120–1128.
10. Новиков Ю.А., Пешехонов С.В. Погрешности эллипсометрического метода определения оптических характеристик кремния и пленки его окисла. – Труды ИОФАН, 1995, т. 49, с. 107–118.
11. Новиков Ю.А., Раков А.В. Механизмы вторичной электронной эмиссии рельефной поверхности твердого тела. – Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 1999, № 8, с. 24–33.
12. Новиков Ю.А., Пешехонов С.В., Стрижков И.Б. Щелевидная линейная мера для калибровки растровых электронных микроскопов и измерений рельефных элементов в субмикронном и нанометровом диапазонах. – Труды ИОФАН, 1995, т. 49, с. 20–40.
13. Волк Ч.П., Горнев Е.С., Новиков Ю.А., Плотников Ю.И., Раков А.В., Тодуа П.А. Проблемы измерения геометрических характеристик электронного зонда растрового электронного микроскопа. – Труды ИОФАН, 2006, т. 62, с. 77–120.
14. Волк Ч.П., Горнев Е.С., Новиков Ю.А., Озерин Ю.В., Плотников Ю.И., Раков А.В. Измерение на растровых электронных микроскопах линейных размеров элементов микроструктур в широком диапазоне увеличений. – Микроэлектроника, 2004, т. 33, № 6, с. 419–428.