

ной формулой (1), имеет тот же вид, что и уравнение преобразования методом сложного отношения.

Следовательно, метод сложного отношения можно эффективно применять для повышения точности линейных широкодиапазонных приборов, полоса погрешности которых нормируется трехчленной формулой (1).

Формулу (4) можно привести к более привычному виду уравнения измерения, связывающего между собой входную и выходную величины. Тогда коэффициенты функции преобразования можно рассчитывать не при каждом измерении, а с учетом интервала стабильности этих коэффициентов. Применим обозначения

$$\gamma_x = (X_3 - X_1)/(X_3 - X_2), \quad \gamma_k = (K_3 - K_1)/(K_3 - K_2),$$

называемые простым отношением трех точек шкалы, и после преобразований получим уравнение измерения в виде дробно-линейной функции, связывающей напрямую входную и выходную величины измерительного преобразования

$$X = (a_0 + a_1K)/(b_0 + b_1K),$$

$$\text{где } a_0 = \frac{\gamma_k K_2 X_1 - \gamma_x K_1 X_2}{\gamma_k K_2 - \gamma_x K_1}; \quad a_1 = \frac{\gamma_x X_2 - \gamma_k X_1}{\gamma_k K_2 - \gamma_x K_1}; \quad b_0 = 1;$$

$$b_1 = \frac{\gamma_x - \gamma_k}{\gamma_k K_2 - \gamma_x K_1}.$$

В частном случае при $\gamma_x = \gamma_k$ получим линейную форму уравнения измерения.

Таким образом, если полоса предельной погрешности широкодиапазонного прибора нормируется трехчленной формулой (1), то в таком приборе для повышения точности измерения можно применять метод сложного отношения.

Л и т е р а т у р а

1. **Цыбульский О. А.** Погрешность широкодиапазонных измерений // Законодательная и прикладная метрология. 2010. № 4. С. 5—10.

2. **Цыбульский О. А.** Инварианты измерительного преобразования // Законодательная и прикладная метрология. 2011. № 1. С. 22—26.

3. **Цыбульский О. А.** Проективные свойства широкодиапазонных измерений // Измерительная техника. 2013. № 1. С. 27—29.

4. **Мазин В. Д.** Способ повышения точности измерительных приборов и преобразователей // Измерительная техника. 1980. № 6. С. 14—15; **Mazin V. D.** Method for raising the precision of measuring instruments and transducers // Measurement Techniques. 1980. V. 23. N 6. P. 479—480.

5. **Мазин В. Д.** Геометрические аспекты измерений: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук. СПб, 1994.

6. **Цыбульский О. А.** Аналого-цифровые преобразователи с гиперболической шкалой (теория и способы построения): Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Л., 1989.

Дата принятия 08.11.2012 г.

НАНОМЕТРОЛОГИЯ

621.382

Искажение профиля рельефных элементов на поверхности монокристаллического кремния в результате их контаминации в низковольтном растровом электронном микроскопе

В. П. ГАВРИЛЕНКО*, **А. Ю. КУЗИН***, **В. Б. МИТЮХЛЯЕВ***, **А. В. РАКОВ***,
П. А. ТОДУА*, **М. Н. ФИЛИППОВ****, **В. А. ШАРОНОВ***

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

** Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова, РАН, Москва, Россия, e-mail: fil@igic.ras.ru

Представлены результаты исследований влияния контаминации в растровом электронном микроскопе S-4800 при энергии электронов 1 кэВ на профиль рельефных элементов меры МШПС-2.0К. Показано, что после электронного облучения наблюдаемая ширина верхнего основания рельефных элементов увеличивается в зависимости от дозы облучения при его разных режимах.

Ключевые слова: контаминация, низковольтный растровый электронный микроскоп (РЭМ), рельефные элементы, доза электронного облучения.

The results of study of the contamination effect of in S-4800 SEM at electron energy 1 keV on the profile of relief elements of the MSHPS-2.0K measure are presented. It is shown that the electron irradiation leads to increase of the relief elements upper base subject to the electron irradiation dose at different irradiation modes.

Key words: contamination, low voltage scanning electron microscope (SEM), relief elements, electron irradiation dose.

Растровые электронные микроскопы (РЭМ) широко используют для измерений геометрических параметров объектов в микро- и нанометровом диапазоне. Их применение

особенно актуально, в частности, в микроэлектронной промышленности, где обычной практикой является использование низковольтного РЭМ для контроля фоторезистов.

Уменьшение энергии электронов пучка до 1 кэВ и менее позволяет минимизировать процессы их деградации в результате электронного воздействия.

Однако при проведении исследований необходимо учитывать процессы электронно-стимулированного возникновения контаминационной пленки на поверхности образца. Эффект контаминации обусловлен полимеризацией углеводородных молекул, адсорбированных поверхностью, под действием электронов пучка РЭМ [1]. Считается, что данный эффект можно уменьшить, но нельзя от него полностью избавиться [2]. Образование контаминационной пленки на рельефных элементах поверхности способно изменить их форму, что необходимо учитывать при измерении объектов нанометровых размеров.

Эффект контаминации способен влиять как на сам объект измерений, подвергшийся изменению, так и на метрологические характеристики микроскопа, поскольку для калибровки его увеличения используется мера, которая сама может подвергаться контаминации в процессе калибровки РЭМ. В [3] исследована проблема контаминационно обусловленной деградации стандартного образца NIST (США), вызванная его многократным облучением электронами с энергией 0,6 кэВ. Образец выполнен в виде шаговой структуры на кремнии. Там же предложена методика оценки допустимого количества измерений в процессе калибровки с применением указанного стандартного образца.

Методика измерений [3] основана на непрерывном сканировании области тестовой структуры и регистрации изменений, происходящих в результате контаминации, а количество измерений, допускаемое при калибровке, определяется в соответствии с выбранным критерием изменения контраста изображения от тестовой структуры.

В [4] показано, что уровень контаминации образца, облучаемого электронами пучка РЭМ с энергией 20 кэВ, зависит не только от количества, но и от характера сканирований — непрерывного или прерывистого. Это имеет существенное значение для корректной оценки контаминации тестового образца при калибровках, поскольку процедуры калибровок не являются процессом непрерывного сканирования.

На примере меры ширины и периода МШПС-2.0К рассмотрим изменения геометрических параметров нанорельефа поверхности в результате контаминации в низковольтном РЭМ.

Условия эксперимента. Мера МШПС-2.0К, используемая в экспериментах, изготовлена на подложке из монокристаллического кремния, ориентированного по плоскости (100), методом фотолитографии с последующим травлением. Она содержит 15 однотипных шаговых структур, каждая из которых имеет номинальный размер шага 2 мкм и состоит из десяти выступов, разделенных канавками. Выступы трапецевидальной формы сформированы в подложке методом анизотропного травления так, что боковые стенки выступов совпадают с плоскостями {111}. Таким образом, выступы имеют в сечении вид равнобедренной трапеции с углом при нижнем основании 54,7°.

Для создания контаминационной пленки и получения РЭМ-изображений меры в режиме вторичной электронной эмиссии применяли РЭМ S-4800, оснащенный автоэмиссионным катодом холодного типа и вакуумной системой, включающей турбомолекулярный и масляный форвакуумный насосы. Энергия электронного пучка составляла 1 кэВ при силе тока 23 пА.

Были реализованы два режима облучения. В первом режиме, называемом далее квазинепрерывным, облучение электронами с энергией 1 кэВ и силой тока 19 пА состояло из четырех циклов. Каждый цикл включал в себя многократное непрерывное сканирование электронным пучком в течение 9 мин и последующий перерыв в течение 3 мин, когда область облучения не подвергалась экспозиции электронным пучком. При этом длительность кадровой развертки при сканировании составляла 40 с. В начале каждого и в конце последнего цикла осуществлялось сканирование с целью записи изображения для его последующей обработки. Облучению подвергались выступы 2 и 3 шаговой структуры, причем размер раstra составлял 3,6×2,7 мкм (увеличение РЭМ 35[×]), а область облучения располагалась симметрично относительно указанных выступов. Во время трехминутного перерыва проводилась корректировка фокуса на элементах меры, удаленных от облучаемой области. Итоговая доза электронного облучения к концу четвертого цикла составила 41 нКл.

Второй режим облучения, называемый далее прерывистым, состоял из повторяющихся циклов, где каждый цикл заключался в однократном сканировании электронным пучком по раstrу размером 3,6×2,7 мкм (увеличение РЭМ 35[×]) в течение 40 с и последующем прерывании электронного пучка на 10 мин. Соответствующее каждому сканированию РЭМ-изображение заносилось в память компьютера для его последующей обработки. Всего было проведено 25 циклов облучения электронами с энергией 1 кэВ и силой тока 19 пА. Облучению подвергались выступы 8 и 9 шаговой структуры меры таким образом, что область облучения располагалась симметрично относительно указанных выступов. Итоговая доза электронного облучения во втором режиме составила 19 нКл.

Экспериментальные результаты и их обсуждение.

Геометрические параметры профиля выступов меры определяли по полученным РЭМ-изображениям в соответствии с моделью [5]. По этой модели для трапецевидального рельефного элемента в кремнии реальный РЭМ-видеосигнал (рис. 1, а) аппроксимируется кусочно-линейной функцией, представленной точками 1—4 на рис. 1, б, которые указывают середины линейных участков профиля видеосигнала, соответствующие характерным точкам профиля элемента рельефа. Обработка РЭМ-изображений проводилась по алгоритму [5] при помощи компьютерной программы, позволяющей усреднять их по группе строк с целью улучшения соот-

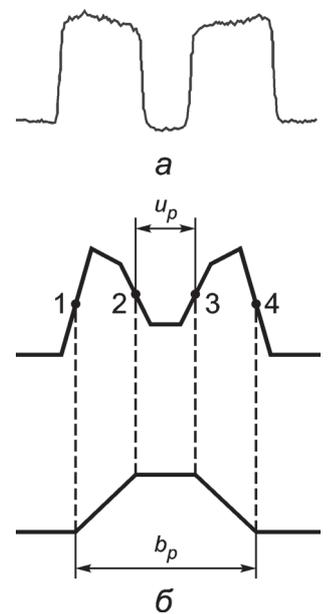


Рис. 1. Профиль видеосигнала (а) низковольтного РЭМ при сканировании выступа трапецевидальной формы (б) и линейная аппроксимация видеосигнала. Штриховыми линиями показаны связи характерных точек выступа с контрольными точками 1—4 видеосигнала

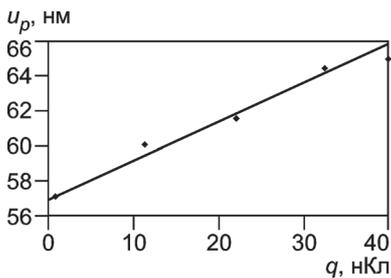


Рис. 2. Зависимость ширины верхнего основания u_p выступа 2 исследуемой меры от дозы q электронного облучения для квазинепрерывного режима

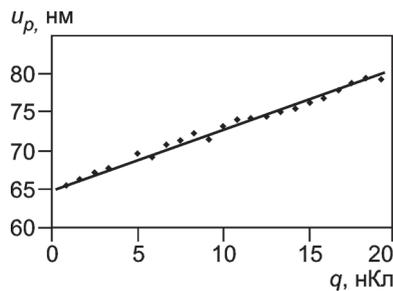


Рис. 3. Зависимость ширины верхнего основания u_p выступа 9 исследуемой меры от дозы q электронного облучения для прерывистого режима облучения

ношения сигнал—шум и вычисления ширины верхнего основания u_p выступов меры.

Зависимости ширины верхнего основания выступа исследуемой меры от дозы электронного облучения для первого и второго режимов облучения приведены на рис. 2, 3, из которых следует, что в результате контаминации происходит уширение верхнего основания выступов меры; обе зависимости носят практически линейный характер, но для прерывистого режима облучения скорость изменения ширины верхнего основания, отнесенная к дозе облучения, примерно в 4 раза выше, чем для квазинепрерывного.

Для анализа полученных результатов рассмотрим механизм формирования контаминационной пленки, источником которой в РЭМ являются различные молекулы углеводородов типа C_nH_{2n+2} [1]. Под действием электронного облучения отдельные органические молекулы, локализованные на поверхности образца, приобретают свободные связи, способные соединять соседние молекулы в конгломераты и таким образом формировать пленку на ее поверхности. В [2] приведены основные источники органических молекул: адсорбированные слои углеводородов на самом образце, возникающие при нахождении образца в атмосферных условиях; молекулы углеводородов, входящие в состав остаточной атмосферы камеры образцов, источником которых может быть вакуумное масло из насосов откачки (например, диффузионного насоса), резиновые вакуумные уплотнения и адсорбированные слои на стенках камеры.

Процесс контаминации можно описать уравнением в частных производных [6]:

$$\frac{dn}{dt} = p/(2\pi mkT)^{1/2} - n/\tau_0 + \lambda \nabla^2 n - K, \quad (1)$$

где n — поверхностная плотность адсорбированных молекул массой m ; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; p — парциальное давление молекул углеводородов; τ_0 — постоянная времени десорбции; λ — константа диффузии; K — темп контаминации.

Первый член в правой части (1) обозначает количество молекул на единицу площади, второй — темп десорбции с поверхности, третий — процесс поверхностной диффузии.

Согласно данным [7] основную роль в электронно-стимулированном осаждении углеводородов играют электроны с энергией от пяти до нескольких сотен электронвольт. Таким образом, контаминация обусловлена медленными вторичными электронами, которые генерируются как первичным

пучком, так и обратнорассеянными электронами при их выходе на поверхность образца. Темп K контаминации можно выразить через ее характерное сечение σ и плотность потока j медленных вторичных электронов [7]:

$$K = n\sigma j.$$

В случае условно «безмасляного» вакуума, который обеспечивается в принятых условиях турбомолекулярным насосом, можно пренебречь первым и вторым членами в правой части (1) и для стационарных условий возбуждения получить

$$K = \lambda \nabla^2 n. \quad (2)$$

Таким образом, темп контаминации определяется поверхностной диффузией углеводородных молекул, а область облучения играет роль их стока.

После прерывания электронного облучения наблюдается диффузия углеводородных молекул к области, где происходило облучение, т. е. $\frac{dn}{dt} = \lambda \nabla^2 n$, в результате чего их концентрация в этой области возрастает. Поэтому в соответствии с (2) темп контаминации, отнесенный к дозе электронного облучения, будет выше при прерывистом облучении, что подтверждается данными изменений параметров рельефных элементов при контаминации.

По совокупности проведенных измерений можно констатировать, что зависимости дозы электронного облучения от ширины верхнего основания выступов меры, обусловленные контаминацией в РЭМ, существенно зависят от характера набора этой дозы. Изменения указанных параметров в расчете на единицу дозы облучения существенно выше (примерно в 4 раза) для прерывистого характера облучения (второй режим), чем для квазинепрерывного (первый режим). Поэтому оценки влияния контаминации, выполненные с учетом непрерывного облучения меры, как это сделано в [3], могут дать завышенные значения допустимого количества измерений в одной области (в [3] рекомендовано 25 измерений).

Таким образом, облучение рельефных элементов трапециевидальной формы на поверхности монокристаллического кремния электронами в низковольтном РЭМ приводит к увеличению ширины верхнего основания элементов рельефа из-за контаминации, вызванной электронным пучком. Скорость такого изменения, отнесенная к дозе облучения (при наличии пауз) увеличивается более чем в 3 раза. В условиях проведенного эксперимента увеличение ширины верхнего основания составило 9 нм при дозе облучения 41 нКл в квазинепрерывном режиме и 15 нм при дозе 19 нКл в прерывистом режиме.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (государственный контракт 16.552.11.7038) с применением оборудования Центра коллективного пользования НИЦПВ в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2013 годы».

Литература

1. **Жданов Г. С.** О скорости углеводородного загрязнения объектов в микронзондовых системах // Поверхность. 1983. № 1. С. 65—72.
2. **Postek M. T.** An approach to the reduction of hydrocarbon contamination in the scanning electron microscope // Scanning. 1996. V. 18. N 4. P. 269—274.
3. **Tortonese M., Guan Y., Prochazka J.** NIST-traceable calibration of CD-SEM magnification using a 100 nm pitch standard // Proc. SPIE. 2003. V. 5038. P. 711—718.

4. **Гавриленко В. П. и др.** Влияние контаминации в РЭМ на профиль рельефных элементов нанометрового диапазона // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 2. С. 2—6.
5. **Novikov Yu. A. e. a.** Method for linear measurements in the nanometre range // Meas. Sci. Technol. 2008. V. 18. N 2. P. 367—374.
6. **Reimer L.** Transmission electron microscopy: Physics of image formation and microanalysis. N.Y.: Springer, 1997. P. 492.
7. **Silvis-Cividjan N., Hagen C.W., Kruit P.** Spatial resolution limits in electron-beam-induced deposition // J. Appl. Phys. 2005. V. 98. P. 084905-1—084905-12.

Дата принятия 13.11.2012 г.

ЛИНЕЙНЫЕ И УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

681.586.787

Новое поколение высокоточных цифровых преобразователей угла

В. Д. АКСЕНЕНКО, О. К. ЕПИФАНОВ

ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», С.-Петербург, Россия,
e-mail: amolochnikov@eprib.ru

Представлены результаты работ по повышению точности, технологичности и информационной надежности цифровых преобразователей угла. Приведены их структуры, особенности синусно-косинусных датчиков угла и принципы обработки информации при самокалибровке. Описаны конструкция и основные характеристики датчиков угла.

Ключевые слова: синусно-косинусный вращающийся трансформатор, многополюсный вращающийся трансформатор, цифровой преобразователь угла, самокалибровка.

The results of works on improvement of accuracy, manufacturability and informational reliability of digital angle converters are presented. Their structures and features of the sine-cosine angle sensors and the principles of data processing at self-calibration are given. Design and main specifications of angle sensors are described.

Key words: sine-cosine rotating transformer, multipolar rotating transformer, digital angle converter, self-calibration.

В системах, работающих в жестких эксплуатационных условиях, угол преобразуется в код, как правило, следящими преобразователями на основе синусно-косинусных датчиков угла (ДУ). Такие преобразователи относятся к преобразователям абсолютного типа: сигналы синусно-косинусных ДУ содержат полную информацию об угловом положении вала, которая в цифровом виде отображается на выходе преобразователя. Несмотря на более чем 50-летнюю историю развития преобразователей этого типа, повышение их точности и технологичности до сих пор остается актуальной задачей и регулярно освещается в отечественной и зарубежной печати [1—4].

Преобразователи данного типа работают на основе отношения сигналов и позволяют использовать ДУ и электронную часть преобразователя на значительных расстояниях. Это их достоинство, поскольку устойчивость ДУ к внешним воздействиям значительно выше, чем электрон-

ной части, особенно если применяются ДУ электромашинного типа (синусно-косинусные трансформаторы, редуктосины и т. п.) [5].

Индукционные ДУ типа синусно-косинусных вращающихся трансформаторов (СКВТ) представляют собой электрические машины с одной или двумя обмотками возбуждения на роторе и двумя обмотками (синусной и косинусной) на статоре. По принципу действия это трансформаторы, у которых взаимоиנדукция между обмоткой возбуждения и выходными обмотками зависит от их пространственного расположения и изменяется согласно функции соответственно синуса и косинуса угла поворота ротора относительно статора. Закон изменения взаимоиנדукции определяется распределением обмоток, уложенных в пазах ротора и статора. У двухполюсных СКВТ в пространстве формируется одна пара полюсов и выходные напряжения изменяются пропорционально синусу и косинусу угла поворота, а у многополюсных