

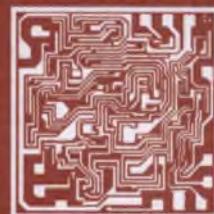
ISSN 0544-1269

Том 44, Номер 4

Июль - Август 2015



МИКРОЭЛЕКТРОНИКА



<http://www.naukaran.ru>
<http://www.maik.ru>



“НАУКА”

Российская академия наук

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

Том 44 № 4 2015 Июль—Август

Основан в 1972 г.
Выходит 6 раз в год
ISSN 0544-1269

*Журнал издается под руководством
Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН*

Главный редактор
А.А. Орликовский

Редакционная коллегия:

В.В. Аристов, А.А. Бухараев, А.Г. Васильев, А.А. Горбацевич,
Г.Я. Красников (*заместитель главного редактора*),
В.Ф. Лукичев (*ответственный секретарь*), П.П. Мальцев,
И.Г. Неизвестный (*заместитель главного редактора*),
А.С. Сигов, М.Н. Стриханов, Р.А. Сурис,
Ю.А. Чаплыгин, В.А. Шахнов

Зав. редакцией Л.Г. Пономарева

Адрес редакции: 117218 Москва, Нахимовский проспект, 36, корп. 1, ФТИАН

Тел. 8-499-129-54-46

ponomareval@mail.ru

Москва
Издательство “Наука”

СОДЕРЖАНИЕ

Том 44, номер 4, 2015

КВАНТОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Моделирование спектроскопического отклика фотонных изомеров с NV-центрами. Часть I

А. В. Цуканов

243

Изучение влияния амплитудной и фазовой релаксации на качество квантовых информационных технологий

*Ю. И. Богданов, Б. И. Бантыш, А. Ю. Чернявский,
В. Ф. Лукичев, А. А. Орликовский*

257

ПРИБОРЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Анализ характеристик субмикронных МДП-транзисторов с периодическим легированием канала для предельных температурных режимов работы

А. А. Краснюк, О. М. Орлов, Э. Ф. Имамединов, Е. В. Марьина

263

Расчет теплораспределяющего элемента конструкции для мощных СВЧ-транзисторов

И. А. Глинский, Н. В. Зенченко

269

Многопиксельный линейный детектор рентгеновского излучения на основе монокристаллов CdZnTe

*В. Ф. Дворянкин, Г. Г. Дворянкина, Ю. М. Дикаев,
А. А. Кудряшов, А. Г. Петров, А. А. Телегин*

275

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Физические свойства контактов с барьером Шоттки на основе силицид иридия–кремний

Э. А. Керимов

278

Формирование межэлементной металлизации GaAs монокристаллов интегральных схем на основе меди

С. В. Ишуткин, В. А. Кагадей, Е. В. Ерофеев, Е. В. Анищенко

282

СХЕМОТЕХНИКА

Помехоустойчивость двухфазной КМОП 28 нм комбинационной логики к переходным эффектам воздействия одиночных ядерных частиц

Ю. В. Катунин, В. Я. Стенин

290

Помехоустойчивое кодирование на двухфазных 28 нм КМОП-логических элементах

Ю. В. Катунин, К. Э. Левин

299

МЕТРОЛОГИЯ

Виртуальный растровый электронный микроскоп. 5. Применение в нанотехнологии и в микро- и нанoeлектронике

Ю. А. Новиков

306

УДК 537.533

ВИРТУАЛЬНЫЙ РАСТРОВЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ МИКРОСКОП. 5. ПРИМЕНЕНИЕ В НАНОТЕХНОЛОГИИ И В МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ

© 2015 г. Ю. А. Новиков

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской АН

E-mail: nya@kapella.gpi.ru

Поступила в редакцию 13.01.2014 г.

Приведены примеры применения виртуального растрового электронного микроскопа, выполненного на основе симулятора, для аттестации размеров тест-объектов на низковольтном РЭМ и калибровки высоковольтного РЭМ, работающего в режиме регистрации вторичных медленных электронов. Демонстрируется использование виртуального РЭМ для решения задачи сравнения разных методов калибровки РЭМ, выполнение которой возможно только с помощью виртуального РЭМ.

DOI: 10.7868/S0544126915030072

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие современных микро- и нанoeлектроники [1] невозможно без измерений характеристик микросхем и контроля технологии их изготовления. Главными из таких характеристик являются линейные размеры [1–5] элементов микросхем. В настоящее время эти размеры лежат в широком диапазоне от 20 нм [1] до сотен микрометров. В микрометровом диапазоне хорошие результаты дают оптические методы измерения линейных размеров. Но менее 1 мкм оптика работает плохо. Здесь лучше всего себя зарекомендовала растровая электронная микроскопия [3–12]. Она перекрывает практически весь необходимый для микро- и нанoeлектроники диапазон размеров. Однако растровые электронные микроскопы (РЭМ) обладают рядом недостатков. Главным из них является то, что для извлечения информации из РЭМ изображений требуется решать обратную задачу, которая некорректна (впрочем аналогичным недостатком обладают практически все измерительные приборы [13]). В таких задачах небольшие отклонения во входных данных могут приводить к большим отклонениям в выходных данных.

Для решения некорректных измерительных задач используются разные методы [13], из которых наиболее перспективным является метод применения виртуальных измерительных приборов (ВИП). Согласно [13] это компьютерная программа, которая, используя входные данные, воспроизводящие характеристики объекта, исследуемого на измерительном (реальном) приборе, генерирует выходные данные, аналогичные выходным данным реального прибора. Можно создать ВИП на основе имитатора или симулятора,

но виртуальный растровый электронный микроскоп (ВРЭМ) нельзя создать на основе имитатора (см. [14]).

В работах [15, 16] был описан виртуальный РЭМ, созданный на основе симулятора информации, аналогичной информации, получаемой на реальном РЭМ при исследовании реальных объектов, аналогичных виртуальным объектам. Этот ВРЭМ ориентирован для работы в нанoeлектронике, где рельеф поверхности микро- и наноструктур имеет трапециевидный профиль. Поэтому в качестве виртуальных объектов в виртуальном РЭМ используются структуры с трапециевидным профилем.

Настоящая работа представляет собой пятую (заключительную) часть описания виртуального растрового электронного микроскопа, посвященную примерам применения виртуального РЭМ в нанoeлектронике и в микро- и нанoeлектронике.

2. КАЛИБРОВКА РЭМ И АТТЕСТАЦИЯ РАЗМЕРОВ ТЕСТ-ОБЪЕКТОВ

Главной задачей виртуального РЭМ как виртуального измерительного прибора [13] является доказательство правильности решения обратной задачи — извлечения информации из изображений, полученных на реальных РЭМ при сканировании реальных объектов. Рассмотрим несколько примеров решения таких задач с помощью виртуального РЭМ, описанного в [15, 16].

Все результаты работы виртуального РЭМ, приведенные в данной статье, были получены на персональном компьютере с двухядерным процессором *Pentium Dual*, работающем в режиме одного

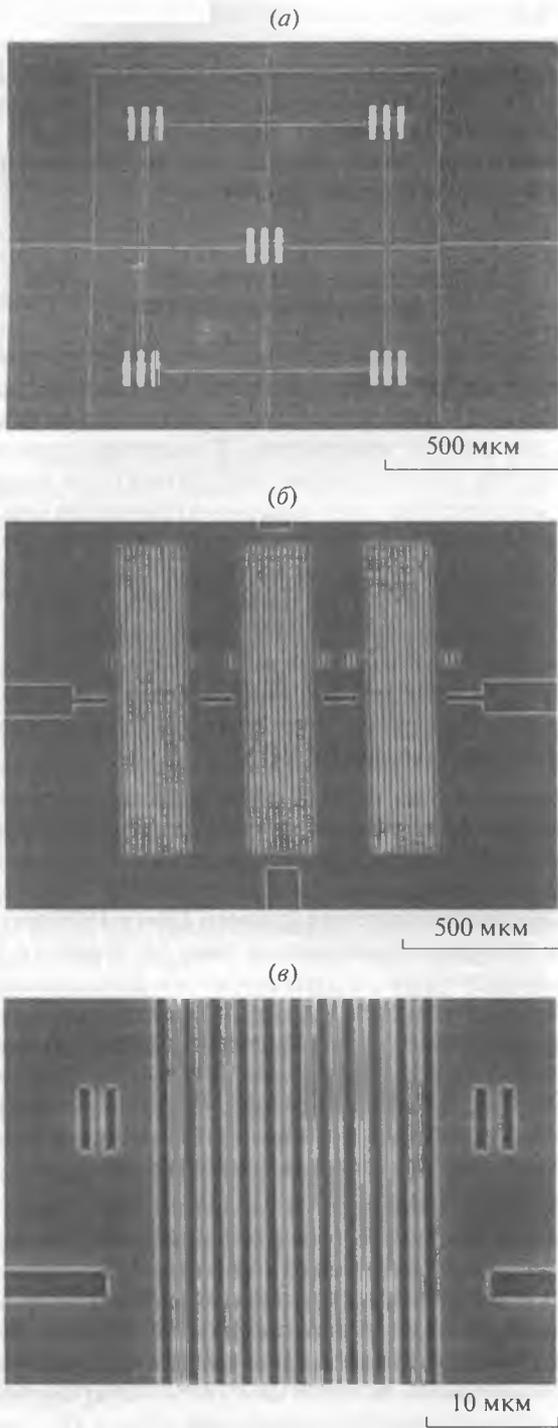


Рис. 1. ВМЭ изображения тест-объекта *МШПС-2.0К* и его отдельных частей, выполненные на РЭМ *S 4800* при разных увеличениях: общий вид тест-объекта (*a*), его центрального модуля (*б*) и 2 шаговой структуры (*в*) в области горизонтальных направляющих линий.

ядра, с тактовой частотой процессора 2.2 ГГц и тактовой частотой шины материнской платы 800 МГц. Эти параметры характерны для современных персональных компьютеров, используемых как в бы-

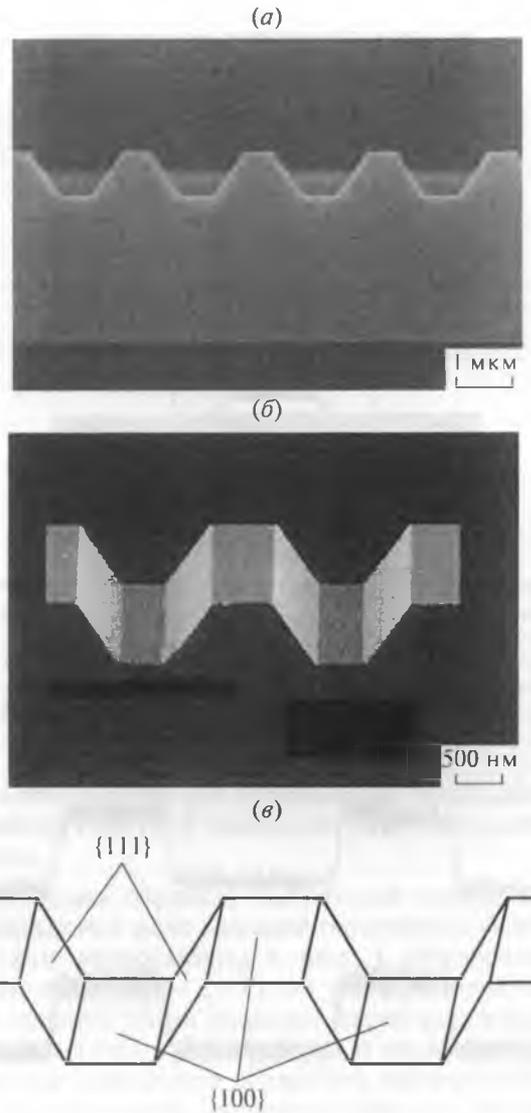


Рис. 2. Изображения в РЭМ скола (*a*), в атомно-силовом микроскопе рельефа (*б*) и схемы (*в*) расположения кристаллографических плоскостей кремния в шаговой структуре тест-объекта *МШПС-2.0К*.

ту, так и для автоматизации работы измерительных приборов.

В качестве реального объекта воспользуемся тест-объектом *МШПС-2.0К* [7, 8, 17, 18] (см. рис. 1), состоящим из 5 групп (рис. 1*a*) по 3 шаговые структуры в группе (рис. 1*a* и 1*б*). Каждая шаговая структура (рис. 1*б* и 1*в*) представляет собой 11 канавок (10 выступов) на поверхности монокремния с ориентацией (100), полученных жидкостным анизотропным травлением. Профиль выступов и канавок имеет вид трапеции (рис. 2*a* и 2*б*) с углом φ наклона боковой стенки относительно вертикали к поверхности тест-объекта. Боковые стенки элементов такого тест-объекта совпадают с кристаллографическими плоскостями {111}

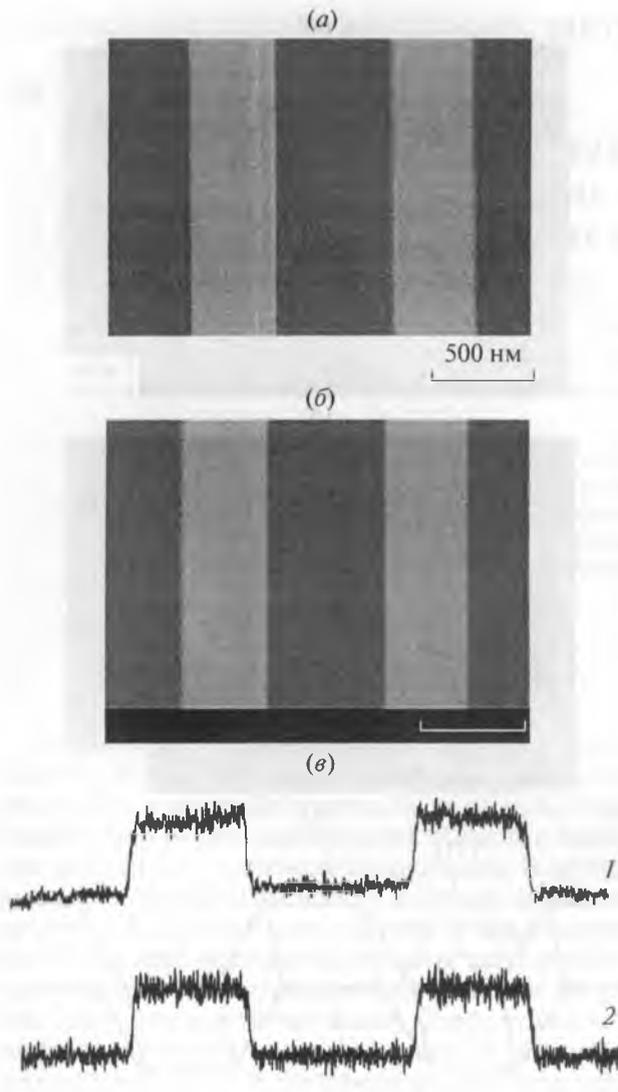


Рис. 3. Реальное (а) и сгенерированное (б) изображения выступа с трапециевидным профилем и большими углами наклона боковых стенок и формы сигналов (в), из которых состоят эти изображения (сигналы 1 и 2 соответственно). Размер меток на изображениях 500 нм.

кремния, а верх выступов и дно канавок — с кристаллографическими плоскостями $\{100\}$ (рис. 2в). Таким образом, угол φ наклона боковых стенок определяется углом между кристаллографическими плоскостями (111) и (100)

$$\varphi = \text{arcctg} \sqrt{2} \approx 35.26^\circ.$$

Более подробно с тест-объектом можно ознакомиться в работах [7–11, 17, 18]. Тест-объекты МШПС-2.0К используются для определения основных параметров растровых электронных микроскопов, применяемых для визуализации и измерения линейных размеров элементов микро-

схем в микро- и нанoeлектронике [7–12, 17–23]. Кроме того, такие тест-объекты соответствуют российским национальным стандартам (ГОСТ Р) [24, 25], обеспечивающим передачу размера от первичного эталона метра в нанодиапазон и регламентирующим работу растровых электронных микроскопов в этом диапазоне.

2.1. Аттестация размеров тест-объектов на низковольтном РЭМ

Аттестация размеров нанометровых элементов тест-объектов является одной из главных задач, решаемых в процессе измерения линейных размеров элементов микросхем. В мировой практике считается, что аттестацию тест-объектов и измерение критических (минимальных) размеров микросхем необходимо проводить на низковольтных растровых электронных микроскопах [17, 18]. Выпускаются даже специальные низковольтные РЭМ (так называемые *CD-SEM*), используемые для измерения критических размеров элементов микросхем. Рассмотрим, как виртуальный РЭМ может помочь в аттестации линейных размеров тест-объекта на низковольтном РЭМ.

Для этого на РЭМ *S 4800*, работающем в низковольтном режиме (энергия электронов зонда $E = 1$ кэВ), было зарегистрировано изображение одного из выступов тест-объекта МШПС-2.0К [7, 8]. Реальное изображение (размер 2560×1920 pix) такого выступа приведено на рис. 3а. В работе [19] это изображение использовалось для определения плотности распределения электронов в зонде низковольтного РЭМ. Размер пикселя m на изображении согласно данным фирмы-изготовителя РЭМ был 0.8268229 нм/pix. Рисунок 3в демонстрирует форму одного из сигналов (сигнал 1), из которых состоит реальное изображение.

На рис. 4 приведены схемы выступа (рис. 4а) трапециевидной формы с большими углами φ наклона боковых стенок относительно перпендикуляра к основанию структуры с параметрами элементов выступа и низковольтного сигнала РЭМ (рис. 4б) с контрольными размерами, измеряемыми на сигналах. Большими считаются углы, которые удовлетворяют условию [26, 27]

$$s = h \text{tg} \varphi \gg d,$$

где d — эффективный диаметр [20, 21] (далее диаметр) зонда РЭМ, h — высота (глубина) рельефа, s — проекция боковой наклонной стенки на основание структуры.

При выполнении условий

$$b, u, s \gg d, \quad (1)$$

параметры выступа (b, u, s), контрольные размеры сигнала (B, U, S, D) и характеристики РЭМ (m, d) связаны друг с другом с помощью выражений

$$d = mD, \tag{2}$$

$$s = mS, \tag{3}$$

$$u = mU, \quad b = mB. \tag{4}$$

Используя формулы (2)–(4), результаты определения контрольных размеров на сигналах (см. рис. 4) и размер пикселя фирмы-изготовителя РЭМ, в работе [19] были получены диаметр электронного зонда РЭМ $d = 28$ нм и параметры выступа, представленные в табл. 1 (тест-объект).

Отметим, что в данном эксперименте использовался размер пикселя, указанный фирмой-изготовителем РЭМ. Однако при аттестации тест-объектов на специализированных микроскопах [17, 18] размер пикселя определяется с помощью лазерной интерференции, что позволяет осуществить аттестацию элементов тест-объекта с высокой точностью. В нашем случае демонстрируется не аттестация, а применение виртуального РЭМ при аттестации. Поэтому высокоточное знание размера пикселя в нашем случае не является необходимым условием. Достаточно той точности, которую дает фирма-изготовитель РЭМ.

Для проверки правильности решения обратной задачи [13] на виртуальном РЭМ, описанном в [15, 16], было сгенерировано изображение модельного аналога выступа тест-объекта с параметрами, представленными в табл. 1 (модель), и параметрами виртуального РЭМ такими же, как были у реального РЭМ [19]. Размер сгенерированного изображения составил 2560×1920 pix. Время генерации 13.8 мин. Это изображение приведено на рис. 3б, а вид сигналов, из которых состоит изображение, показан на рис. 3в (сигнал 2).

Сравнение реального и виртуального изображений друг с другом осуществлялось путем сравнения сигналов, из которых состоят изображения (см. рис. 3в), и с помощью амплитудных спектров изображений [16], которые приведены на рис. 5. Хорошо видно, что и сигналы и амплитудные спектры реального (рис. 5а) и сгенерированного (рис. 5б) изображений хорошо совпадают друг с другом. Поэтому виртуальное изображение мож-

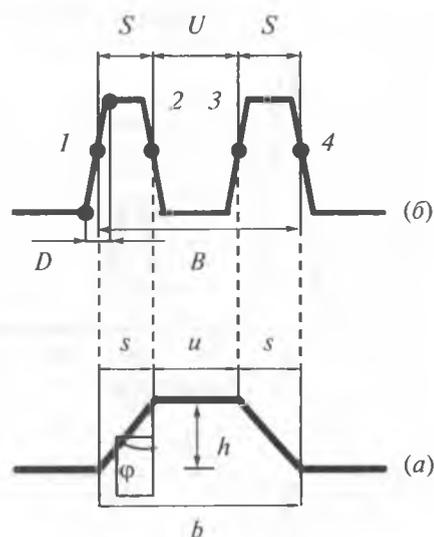


Рис. 4. Схемы профиля выступа (а) с трапецевидной формой и большими углами наклона боковых стенок и сигнала низковольтного РЭМ (б), получаемого при сканировании этой структуры. Штриховыми линиями показаны связи граничных точек профиля и контрольных точек 1–4 сигнала.

но использовать для определения правильности решения обратной задачи для реального изображения.

Решение обратной задачи для виртуального изображения дало размеры параметров выступа, которые представлены в табл. 1 (обработка), и диаметр зонда $d = 29.5 \pm 0.1$ нм. Несмотря на то, что диаметр зонда оказался несколько завышен по сравнению с заложенным в моделирование, размеры параметров элементов модельного выступа определены достаточно хорошо. Это доказывает, что и параметры реального выступа определены правильно. Большие ошибки размеров элементов реального выступа указывают на то, что его размеры имеют больший разброс, чем у виртуального выступа. Этот разброс обусловлен технологией изготовления реального тест-объекта.

2.2. Калибровка высоковольтного РЭМ

Каждый растровый электронный микроскоп необходимо калибровать — определять его основ-

Таблица 1. Параметры выступов тест-объекта МШПС-2.0К, определенные на низковольтном РЭМ, заданные параметры модельного объекта и параметры модельного выступа, полученные при обработке смоделированного изображения

Параметры выступа	Тест-объект	Модель	Обработка
Верх, нм	591.8 ± 0.4	592	591.95 ± 0.07
Низ, нм	1412.5 ± 0.6	1412	1412.02 ± 0.03
Проекция боковой стенки, нм	410.5 ± 0.2	410	410.03 ± 0.04

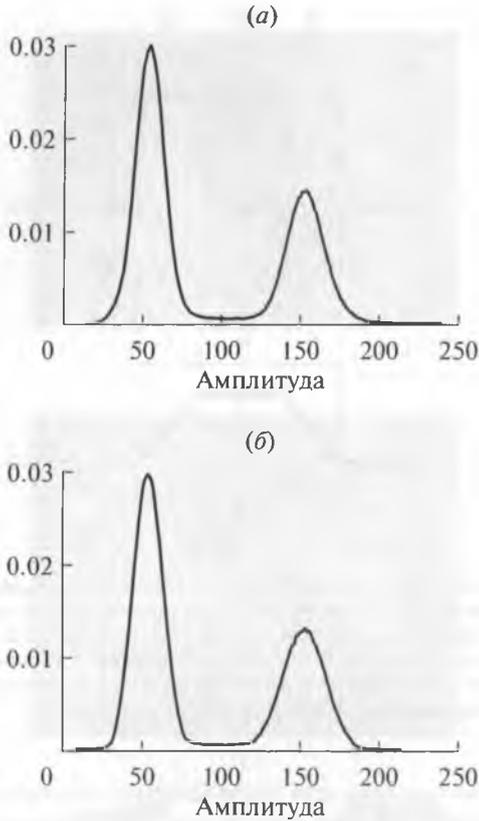


Рис. 5. Амплитудные спектры РЭМ (а) и ВРЭМ (б) низковольтных изображений, представленных на рис. 3а, б соответственно.

ные параметры, такие как размер пикселя m и диаметр d электронного зонда. В настоящее время разработано несколько методов калибровки РЭМ [7–10], работающего в высоковольтном режиме при регистрации вторичных медленных электронов (ВМЭ). Рассмотрим применение виртуального РЭМ для одного из таких методов.

Калибровка РЭМ *S 4800*, работающего в режиме сбора ВМЭ, была осуществлена при энергии электронов зонда $E = 20$ кэВ с помощью тест-объекта *МШПС-2.0К* [7, 8], изображения которого при разных увеличениях представлены на рис. 1. Для калибровки использовалось изображение (размер 2560×1920 pix) 5 и 6 выступов 2 шаговой структуры (рис. 1в) центрального модуля (рис. 1а), которое представлено на рис. 6а. На рис. 6в приведена форма одного из сигналов (сигнал 1), из которых состоит изображение на рис. 6а.

В результате калибровки с использованием аттестованного значения шага $t = 2001 \pm 1$ нм [22] были получены величины размера пикселя $m = 2.250 \pm 0.002$ нм/pix (данные фирмы изготовителя для изображения на рис. 6а составляют $m = 2.254972$ нм/pix), и диаметр электронного зонда РЭМ $d = 15 \pm 2$ нм. Кроме того, были также опре-

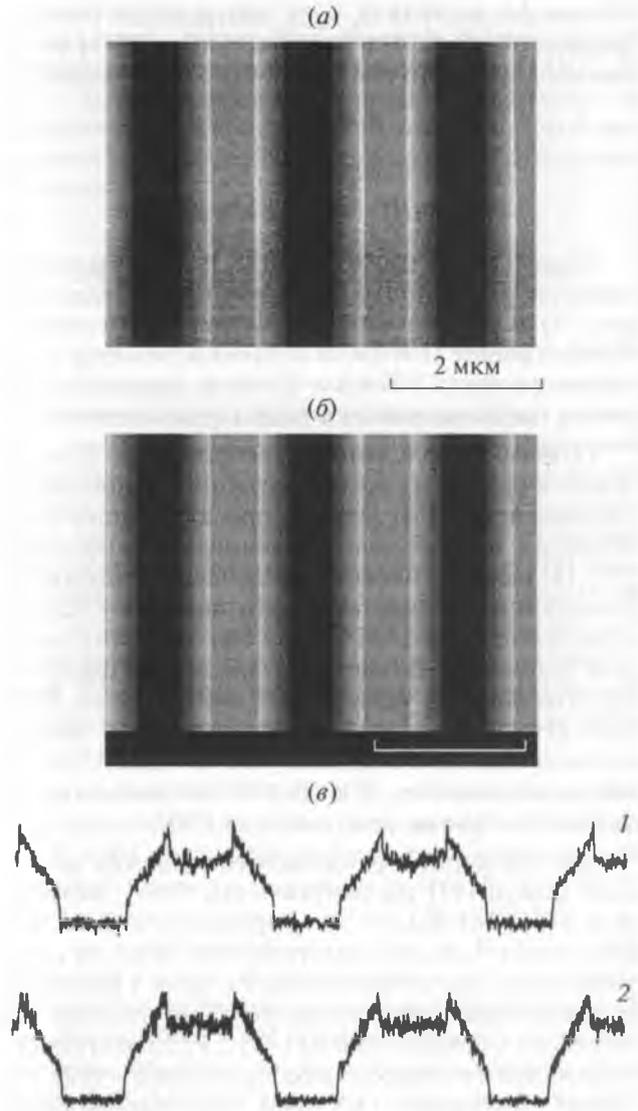


Рис. 6. Реальное (а) и сгенерированное (б) высоковольтные ВМЭ изображения шага (2 выступа и канавка между ними) тест-объекта *МШПС-2.0К* и его виртуального аналога и формы сигналов (в), из которых состоят эти изображения (сигналы 1 и 2 соответственно). Размер меток на изображениях 2 мкм.

делены размеры параметров 5 и 6 выступов и канавки между ними, которые приведены в табл. 2 (тест-объект).

Для создания виртуального (модельного) объекта были использованы размеры, представленные в табл. 2 (модель). В результате с помощью виртуального РЭМ [15, 16] было сгенерировано модельное изображение, приведенное на рис. 6б. Размер изображения 2560×1920 pix. Время генерации 39.3 мин.

Эффективный зонд [15] ВРЭМ во время генерации состоял из двух компонент

$$F_{EF}(x, t) = A_1 F(x, t) - A_2 F_{BSE}(x, t), \quad (5)$$

Таблица 2. Параметры элементов шага тест-объекта *МШПС-2.0К*, определенные на высоковольтном РЭМ (в скобках приведены стандартные отклонения соответствующего размера), заданные параметры модельного объекта и результаты обработки смоделированного изображения

Рельеф	Параметр	Тест-объект	Модель	Обработка
5 выступ	Верх, нм	587(4)	586	586.4 ± 0.3
	Низ, нм	1375(4)	1376	1376.6 ± 0.7
Канавка	Верх, нм	1415(4)	1414	1414.5 ± 0.7
	Низ, нм	623(7)	624	624.5 ± 0.3
6 выступ	Верх, нм	585(4)	586	586.4 ± 0.3
	Низ, нм	1377(4)	1376	1376.6 ± 0.7
Проекция боковой стенки, нм		395.3(1.6)	395	395.1 ± 0.2
Шаг, нм		2001 ± 1	2001	2001 ± 1

где t – координата сканирования, $F(x, t)$ – узкая компонента, имеющая гауссовскую форму (моделирует плотность распределения электронов в электронном зонде РЭМ [15]) с диаметром [20, 21] $d = 15$ нм, $F_{BSF}(x, t)$ – широкая компонента, описываемая гауссовским распределением (моделирует плотность распределения обратно рассеянных электронов [15]), имела диаметр 5 мкм. Вклады компонент A_1 и A_2 в эффективный зонд были одинаковые. Отметим, что эффективный диаметр d зонда [20, 21], имеющего гауссовскую форму

$$F(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(t-x)^2}{2\sigma^2}\right),$$

связан с параметром σ гауссиана с помощью выражения [19]

$$d = \sigma\sqrt{2\pi} \approx 2.5\sigma.$$

Сравнение реального и виртуального изображений друг с другом осуществлялось путем сравнения сигналов, из которых состоят изображения (см. рис. 6а), и с помощью амплитудных спектров изображений [16], которые приведены на рис. 7. Хорошо видно, что и сигналы и амплитудные спектры реального (рис. 7а) и сгенерированного (рис. 7б) изображений хорошо совпадают друг с другом. Поэтому виртуальное изображение можно использовать для определения правильности решения обратной задачи для реального изображения.

В результате решения обратной задачи [13] для модельной структуры были получены параметры виртуального РЭМ (размер пикселя $m = 2.2501 \pm 0.0011$ нм/пикс, диаметр зонда $d = 16.1 \pm 0.7$ нм) и размеры элементов модельной структуры, которые приведены в табл. 2 (обработка). Все результаты калибровки РЭМ (m и d) и аттестации размеров элементов тест-объекта в пределах ошибок

совпадают с данными, представленными на входе виртуального РЭМ (табл. 2 (модель)), и результатами, полученными с использованием реального тест-объекта (табл. 2 (тест-объект)). Это доказывает правильность проведенной калибровки высоковольтного РЭМ и аттестации размеров элементов тест-объекта.

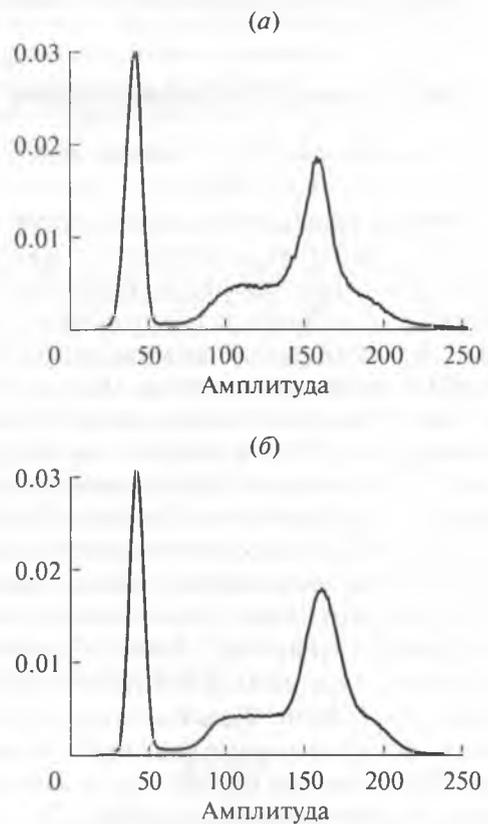


Рис. 7. Амплитудные спектры РЭМ (а) и ВРЭМ (б) высоковольтных ВМЭ изображений, представленных на рис. 6а и 6б соответственно.

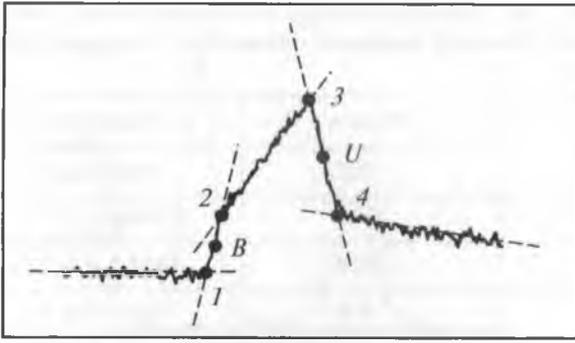


Рис. 8. Изображение реального сигнала, полученного на высоковольтном РЭМ в режиме регистрации ВМЭ при сканировании электронным зондом ступеньки с большим углом наклона боковой стенки, а также приближение отдельных частей сигнала прямыми линиями и определение контрольных точек 1–4.

3. ДЕМОНСТРАЦИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ВИРТУАЛЬНОГО РЭМ

Для демонстрации широких возможностей применения виртуального РЭМ, описанного в работах [15, 16], решим задачу, которую никакими другими способами решить нельзя. Такой задачей является выбор наилучшего метода калибровки РЭМ и аттестации размеров тест-объектов.

3.1. Калибровка РЭМ двумя методами

В [7, 8] были описаны 2 метода калибровки РЭМ с помощью тест-объектов с трапецевидным профилем и большими углами наклона боковых стенок, которые одновременно являются методами аттестации параметров рельефных элементов таких тест-объектов. В основе обоих методов лежит приближение отдельных частей ВМЭ сигнала РЭМ прямыми линиями. На рис. 8 приведена форма реального сигнала, полученного на высоковольтном РЭМ в режиме регистрации ВМЭ при сканировании электронным зондом ступеньки с большим углом наклона боковой стенки. Отдельные участки сигнала аппроксимированы прямыми линиями (штриховые линии на рис. 8). Видно, что такая аппроксимация может быть достаточно хорошей. Точки пересечения прямых линий, называемые контрольными точками (точки 1–4 на рис. 8), используются в обоих методах как входные данные для определения параметров РЭМ при его калибровке и измерении размеров элементов трапецевидных структур при их аттестации. Отметим, что полученные таким образом контрольные точки не лежат на сигнале РЭМ.

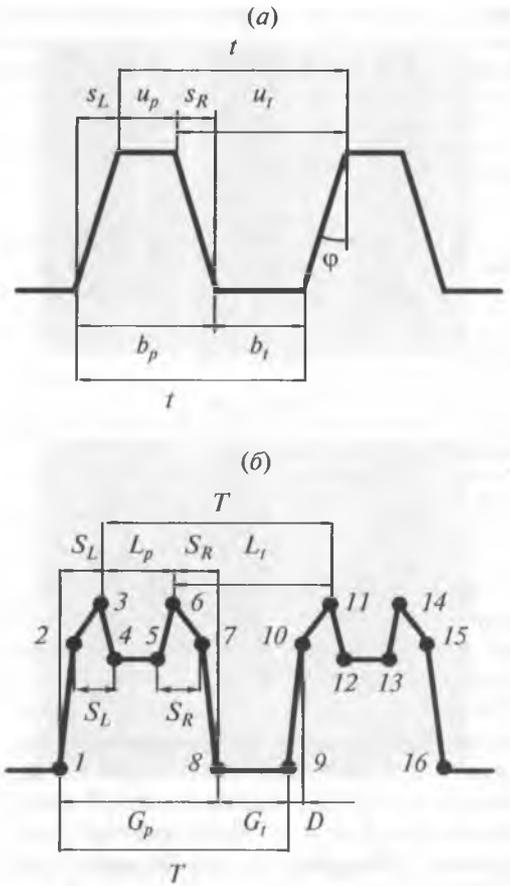


Рис. 9. Схемы профиля шаговой структуры (а) с параметрами, характеризующими структуру, и высоковольтного ВМЭ сигнала РЭМ (б) с измеряемыми на сигнале параметрами.

3.1.1. Первый метод калибровки РЭМ

Этот метод [7] был исторически первым методом калибровки РЭМ с помощью тест-объектов с трапецевидной формой профиля рельефа и большими углами наклона боковых стенок выступов и канавок. Он был создан путем модернизации [28] метода измерения размеров элементов структур с трапецевидным профилем и малыми углами наклона боковых стенок для использования со структурами с большими углами наклона боковых стенок.

Сущность 1 метода заключается в следующем. На рис. 9 показаны схема профиля шаговой структуры (рис. 9а) с параметрами, характеризующими структуру, и схема ВМЭ сигнала высоковольтного РЭМ (рис. 9б) с контрольными точками 1–16, определяющими измеряемые параметры сигнала, которые приведены на рис. 9б. При выполнении условий

$$b_{p,i}, u_{p,i}, S_{L,R} \gg d \tag{6}$$

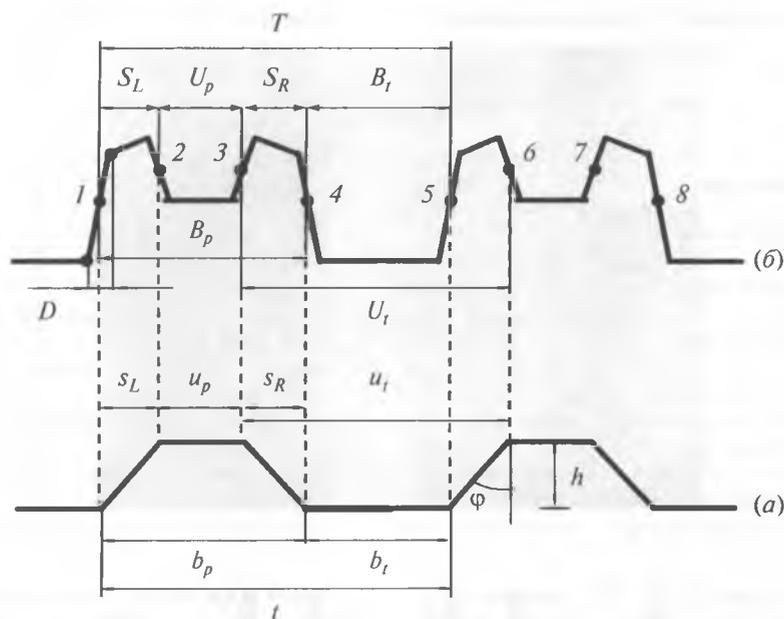


Рис. 10. Схемы профиля шаговой структуры (а) с трапецевидным профилем и большими углами наклона боковых стенок и высоковольтного ВМЭ сигнала РЭМ (б), получаемого при сканировании этой структуры. Штриховыми линиями показаны связи граничных точек профиля и контрольных точек 1–6 сигнала.

в методе 1 выражения, связывающие параметры сигнала, структуры и РЭМ, имеют вид

$$t = mT, \tag{7}$$

$$d = mD, \tag{8}$$

$$s_L = mS_L, \quad s_R = mS_R, \tag{9}$$

$$u_p = mL_p - d, \quad b_p = mG_p - d, \tag{10}$$

$$u_t = mL_t + d, \quad b_t = mG_t + d, \tag{11}$$

где m – размер пикселя [7] на изображении, d – диаметр [20, 21] электронного зонда РЭМ. Остальные параметры структуры и сигнала приведены на рис. 9.

Используя выражения (7)–(9), можно калибровать РЭМ (определять размер пикселя m и диаметр зонда d), если известны шаг t структуры или проекции s_L или s_R боковых наклонных стенок. Можно также аттестовать размеры элементов структуры – размеры верхних и нижних оснований выступов (выражения (10)) и канавок (выражения (11)) и величины проекций боковых наклонных стенок (выражения (9)), если известны размер пикселя m и диаметр d зонда РЭМ.

Отметим одну особенность метода – в выражениях (10) и (11) входит диаметр электронного зонда как систематическая поправка. Поэтому, для аттестации тест-объекта необходимо знать величину диаметра зонда, которую, правда, можно измерить на самом сигнале (см. выражение (8) и рис. 9б). Наличие систематической поправки не позволяет считать 1 метод прямым методом измерения линейных размеров верхних и нижних оснований трапецевидных выступов и канавок

тест-объекта. Однако для измерения шага структуры и величин проекций боковых наклонных стенок элементов структур 1 метод является прямым методом измерений. Этот метод также является прямым методом и для калибровки РЭМ при использовании в качестве аттестованных размеров шага структуры и проекций боковых наклонных стенок.

3.1.2. Второй метод калибровки РЭМ

В методе 2 используются не контрольные точки 1–16, представленные на рис. 9б, а точки 1–8, показанные на схеме сигнала (рис. 10б), которые связаны с граничными точками элементов шаговой структуры (рис. 10а) [8]. Эта связь показана на рис. 10 штриховыми линиями. Точки 1–8 на рис. 10б являются средними точками между соответствующими контрольными точками 1–16 на рис. 9б. Эти новые точки определяют новые параметры сигнала, показанные на рис. 10б.

В методе 2 при выполнении условий (6) выражения, связывающие новые параметры сигнала, размеры элементов структур и характеристики РЭМ, будут иметь вид [8]

$$t = mT, \tag{12}$$

$$d = mD, \tag{13}$$

$$s_L = mS_L, \quad s_R = mS_R, \tag{14}$$

$$u_p = mU_p, \quad b_p = mB_p, \tag{15}$$

$$u_t = mU_t, \quad b_t = mB_t. \tag{16}$$

Таблица 3. Аттестация размеров элементов модельного тест-объекта двумя методами

Параметр		Модель	Метод 1	Метод 2
Шаг, нм		2000	1999.97 ± 0.15	2000.0 ± 0.3
Проекция боковой стенки, нм		500	500.1 ± 1.8	500.07 ± 0.08
Выступ левый	Верх, нм	500	497.4 ± 1.8	499.3 ± 0.2
	Низ, нм	1500	1501.1 ± 1.8	1499.4 ± 0.4
Канавка	Верх, нм	1500	1502.4 ± 1.8	1500.7 ± 0.4
	Низ, нм	500	498.8 ± 1.8	500.6 ± 0.2
Выступ правый	Верх, нм	500	497.8 ± 1.8	499.2 ± 0.2
	Низ, нм	1500	1501.0 ± 1.8	1499.4 ± 0.4

Используя выражения (12)–(16), можно калибровать РЭМ (определять размер пикселя m и диаметр d зонда), если известен любой из размеров элементов структуры (выражения (12) и (14)–(16)). Или аттестовать размеры элементов структуры (шаг структуры (выражение (12)), размеры верхних и нижних оснований выступов (выражения (15)) и канавок (выражения (16)) и величины проекций боковых наклонных стенок (выражения (14))), если известен размер пикселя m .

Отметим особенность формул (15) и (16) по сравнению с выражениями (10) и (11). В формулы (15) и (16) не входит диаметр зонда d . Это делает метод 2 прямым методом измерения любых размеров элементов тест-объекта. Кроме того, 2 метод является прямым методом калибровки РЭМ при использовании в качестве аттестованных размеров элементы любых элементов тест-объекта.

3.2. Сравнение методов калибровки РЭМ

Несмотря на то, что из формул (7)–(11) можно получить формулы (12)–(16) и наоборот, а исходные данные (контрольные точки 1–16 на рис. 9б) одинаковые для обоих методов, методы 1 и 2 дают разные результаты калибровки РЭМ и измерения размеров элементов структур тест-объектов. Решить, который из методов дает правильный (или лучший) результат, можно только с помощью виртуального РЭМ, у которого мы знаем какие параметры имеет структура на входе виртуального РЭМ.

Для решения этой задачи был использован модельный тест-объект, состоящий из 11 канавок с трапециевидным профилем и большими углами наклона боковых стенок, представляющий собой виртуальный аналог тест-объекта МШПС-2.0К. Была осуществлена генерация высоковольтного ВМЭ изображения 5 и 6 выступов и канавки меж-

ду ними для такого модельного объекта. Размер виртуального изображения 2560×1920 pix. Размер пикселя $m = 2.250879$ нм/pix (задан). Время генерации 39.1 мин.

Размеры элементов виртуального объекта представлены в табл. 3 (модель). Высота (глубина) элементов была $h = 707$ нм. Стандартные отклонения координат, определяющих элементы структуры, составляли 1 нм. Эффективный зонд [15], используемый при генерации, состоял из двух компонент (см. выражение (5)). Узкая компонента гауссовской формы (моделирует электронный зонд РЭМ) имела диаметр 30 нм при стандартном отклонении размера диаметра 1 нм. Широкая компонента также гауссовского вида (моделирует вклад обратно рассеянных электронов [15]) имела диаметр 5 мкм при стандартном отклонении размера диаметра 0.1 мкм. Вклады компонент в эффективный зонд (5) были одинаковые.

На рис. 11 приведены сгенерированное ВМЭ изображение высоковольтного РЭМ (рис. 11а), форма сигнала (рис. 11б) и амплитудный спектр [16] (рис. 11в) этого изображения. На сигналах были получены контрольные точки в соответствии со схемой сигнала на рис. 9б, которые использовались для определения размеров элементов структур двумя методами. Эти результаты приведены на рис. 12 и 13 и представлены в табл. 3.

Рис. 12 демонстрирует определение шага t структуры первым (рис. 12а) и вторым (рис. 12б) методами. Учитывая то, что на изображении шага (два выступа) в разных методах можно определить разное количество шагов (по разным контрольным точкам (см. рис. 9б)), то на рис. 12 имеется разное количество результатов, обозначенных “номер измерения”. Средние значения шага, рассчитанные по этим данным, приведены в табл. 3

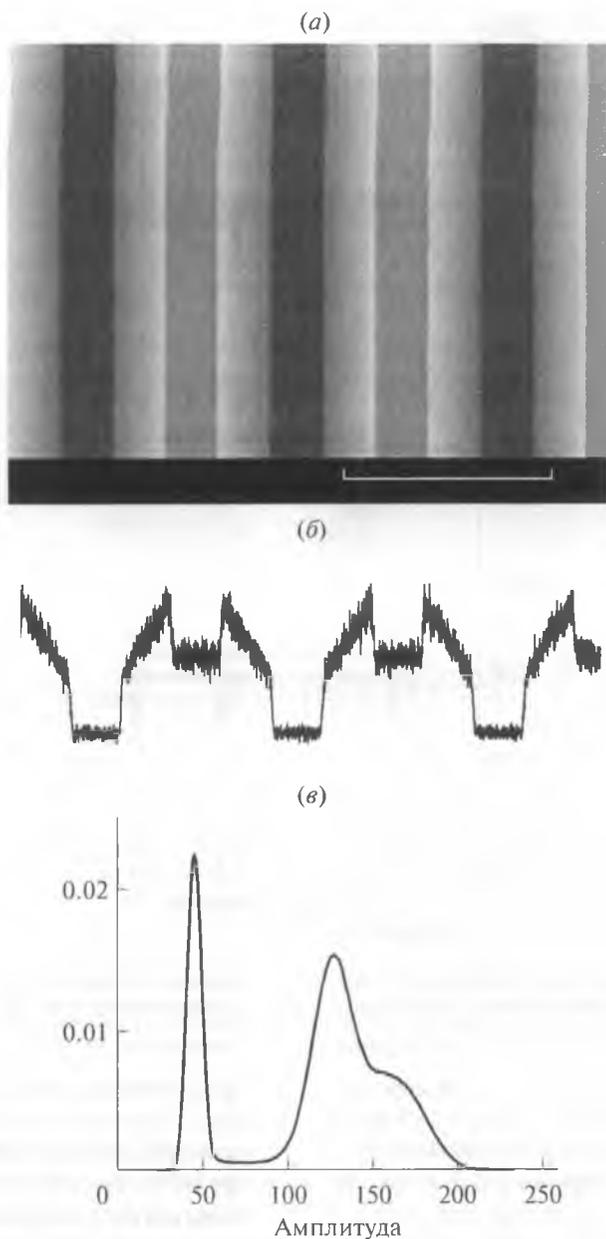


Рис. 11. Сгенерированное ВМЭ изображение (а) модельной шаговой структуры с большими углами наклона боковых стенок, форма сигнала (б) и амплитудный спектр (в) этого изображения. Размер метки на изображении 2 мкм.

и показаны на рис. 12 сплошными линиями. Штриховые линии на рисунках ограничивают интервал ошибок. Видно, что оба метода дают хорошие результаты.

Рассмотрим рис. 13. Учитывая, что на изображении двух выступов в разных методах можно определить разное количество проекций боковых наклонных стенок (аналогично шагу структуры), то на рис. 13 имеется разное количество результатов. Средние значения проекции боковой наклонной стенки, рассчитанные по этим данным, приведены в табл. 3 и показаны на рис. 13 сплош-

ными линиями. Штриховые линии на рисунках ограничивают интервал ошибок.

Отметим особенность 1 метода измерения проекции боковой наклонной стенки по сравнению со 2 методом. Разброс результатов измерений в 1 методе в несколько раз больше ошибок измерений каждого отдельного результата. При этом все результаты измерений группируются в двух областях. Это указывает, что в 1 методе при данной точности измерений проявляется некоторая некорректность задачи (см. [13]) определения проекции боковой наклонной стенки, которая



Рис. 12. Результаты определения шага t виртуальной структуры первым (а) и вторым (б) методами, полученные при обработке сгенерированного высоковольтного ВМЭ изображения, представленного на рис. 11а.

приводит к достаточно большой суммарной погрешности измерения. Наличие такого разброса результатов и незнание его сущности может оказать сильное влияние на выводы, сделанные из таких измерений.

Однако, несмотря на вышесказанное, метод 1 все-таки дает хорошие результаты – суммарная ошибка измерения проекции боковой наклонной стенки составляет всего 0.4%. Отметим, что в микро- и нанoeлектронике принято, что погрешности самого метода измерения размеров не должны превышать 1%. Метод 1 дает результат в 2.5 раза лучше. Поэтому он применим для калибровки РЭМ и измерения линейных размеров в микро- и нанoeлектронике с учетом правильности расчета суммарной ошибки измерения.

Второй метод измерения проекции боковой наклонной стенки дает гораздо лучшие результаты. У него не наблюдается никаких аномалий в поведении результатов измерений и их ошибок. Кроме того, ошибка определения размера проекции боковой наклонной стенки у второго метода

в 20 раз меньше, чем суммарная ошибка первого метода. Отметим, что именно проекция боковой наклонной стенки наиболее широко используется в разных методах калибровки РЭМ [7, 9, 23].

Результаты измерения верхних и нижних оснований выступов и канавок 1 и 2 методами приведены в табл. 3. Видно, что в пределах ошибок результаты метода 1 вполне хорошие. Однако метод 2 и здесь дает значительно лучшие результаты измерения параметров виртуального тест-объекта. Поэтому метод 2 рекомендуется для использования в процессах калибровки РЭМ и, особенно, аттестации размеров рельефных элементов структур тест-объектов. Отметим, что аттестация размеров элементов тест-объекта в низковольтном РЭМ и калибровка высоковольтного РЭМ, описанные выше, осуществлялись именно 2 методом.

3.3. Причины различия результатов первого и второго методов

Для выяснения причин различия результатов 1 и 2 методов были построены гистограммы (см.

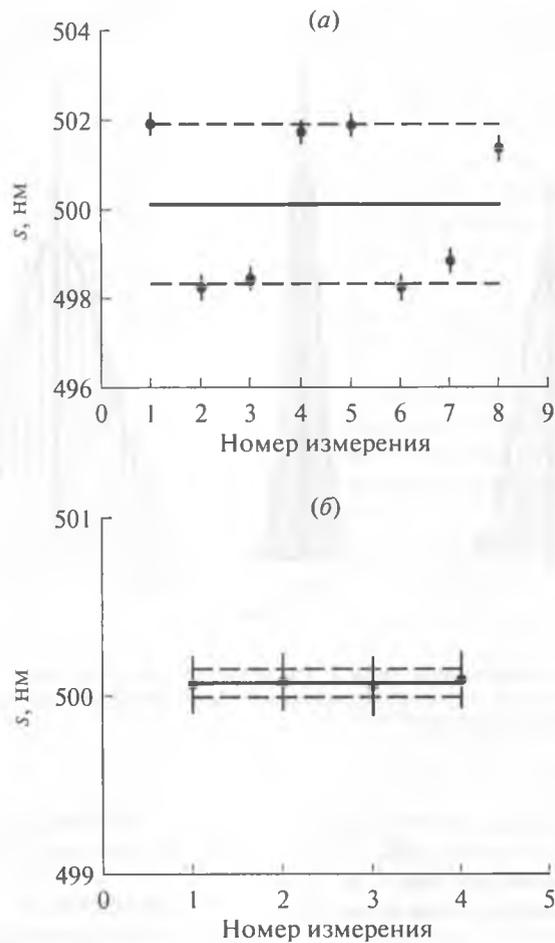


Рис. 13. Результаты определения проекции z боковой наклонной стенки виртуальной структуры первым (а) и вторым (б) методами, полученные при обработке сгенерированного высоковольтного ВМЭ изображения, представленного на рис. 11а.

рис. 14) координат контрольных точек 2 и 3 и средней точки B , полученной из координат точек 2 и 3 (см. рис. 8), для изображения левой части левого выступа виртуального объекта, показанного на рис. 11а. Гистограммы хорошо описываются гауссовскими кривыми

$$g(X, M, \sigma) = \frac{I}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(M - X)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (17)$$

с параметрами, представленными в табл. 4. Видно, что распределения точек 2 и 3 значительно шире, чем распределение средней точки B . Это объясняется следующим образом.

На рис. 15а показаны прямые линии AA' , CC' и ABC (сплошные линии), аппроксимирующие ВМЭ сигнал РЭМ от ступеньки. Пересечения этих линий формируют контрольные точки A и C и среднюю точку B . Из-за наличия шумов на дру-

Таблица 4. Параметры гауссианов, описывающих гистограммы координат точек 2, 3 и B

Точка	I	M , нм	σ , нм
2	325	983.84 ± 0.11	1.95 ± 0.07
3	325	1016.65 ± 0.18	3.28 ± 0.13
B	325	1000.24 ± 0.05	0.98 ± 0.04

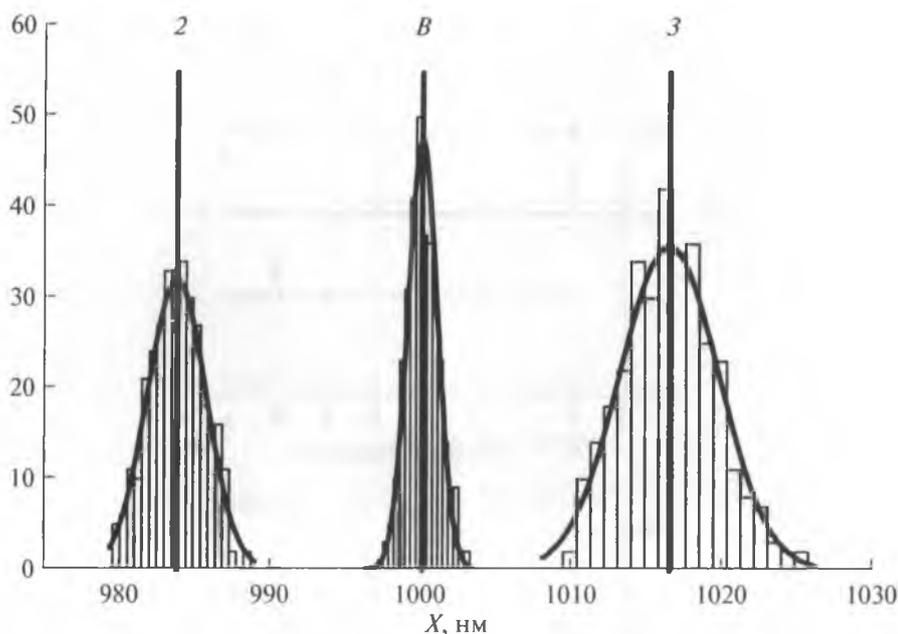


Рис. 14. Гистограммы координат контрольных точек 2, 3 и средней точки B (см. рис. 8) для изображения, представленного на рис. 11а, и их приближение гауссовскими кривыми. Вертикальные линии определяют центры гистограмм (средние значения соответствующих величин).

гом сигнале прямые линии будут расположены по-другому. Например, вместо линии ABC будет линия $A'B'C'$ (штриховая линия на рис. 15а) и, следовательно, будут новые контрольные точки A' и C' и новая средняя точка B' .

Перемещение линии ABC в положение $A'B'C'$ можно разложить на два перемещения – параллельное (рис. 15б) и наклонное (рис. 15в). При этом для параллельного перемещения условия

$$\Delta A = A - A' \neq 0 \text{ и } \Delta C = C - C' \neq 0 \quad (18)$$

приводят к

$$\Delta B = B - B' \neq 0, \quad (19)$$

в то время как для наклонного перемещения условия (18) приводят к

$$\Delta B = B - B' = 0. \quad (20)$$

Поэтому наклонное перемещение дает вклад в разброс положений контрольных точек A и C , но не дает вклада в разброс положений средней точки B . Именно это и проявляется в различиях величин σ , представленных в табл. 4, для разных контрольных точек.

Таким образом, ошибки определения положения средних точек, используемых во втором методе, значительно меньше, чем ошибки определения контрольных точек, используемых в первом

методе. Эти различия делают второй метод более точным, чем первый.

Рассмотренный пример наглядно демонстрирует, что абсолютно корректных задач не бывает. При изменении параметров задачи (например, при повышении точности результатов измерения) корректная задача может стать некорректной. Поэтому использование виртуальных измерительных приборов [13] должно быть постоянным. Иначе можно получить неправильные результаты и сделать необоснованные выводы из этих результатов даже для корректных (на первый взгляд) задач.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданный на основе симулятора виртуальный растровый электронный микроскоп позволяет генерировать изображения виртуальных структур с трапециевидным профилем рельефа в режимах, аналогичных низковольтному режиму и высоковольтному режиму при регистрации обратно рассеянных и вторичных медленных электронов. Время генерации сопоставимо со временем получения изображения на реальном РЭМ.

Приведенные сравнения результатов работы виртуального РЭМ с результатами, полученными на реальном РЭМ при аналогичных режимах работы и с аналогичными реальными тест-объектами, показали хорошее совпадение.

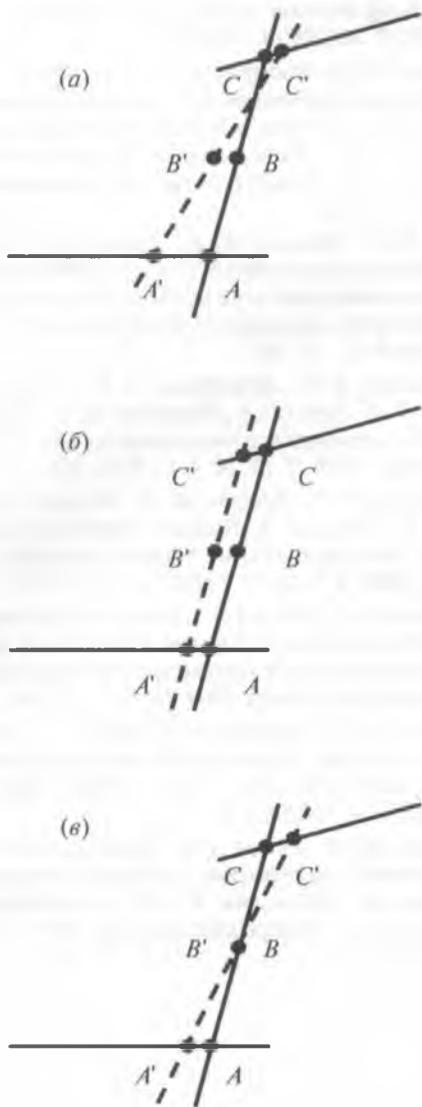


Рис. 15. Схемы формирования положений контрольных (A и C) и средней (B) точек с учетом статистических разбросов при формировании прямых линий, аппроксимирующих сигнал. Подробности в тексте.

Виртуальный РЭМ, созданный на основе симулятора, можно использовать для проведения следующих работ:

- калибровка РЭМ,
- аттестация размеров элементов тест-объектов,
- измерение линейных размеров элементов микросхем в нанoeлектронике,
- планирование экспериментов на РЭМ,
- теоретические исследования на РЭМ,
- в качестве тренажера для обучения работе на РЭМ,
- дистанционное (интернет) обучение работе на РЭМ,
- обучение студентов (лабораторные работы).

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 11-08-01217).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Technology Roadmap for Semiconductors. 2013. Edition. Metrology. 2013. 42 p. //public.itrs.net.
2. Постек М. Метрология в нанометровом диапазоне // Вестн. технич. регулирования. 2007. № 7(44). С. 8–17.
3. Postek M. T., Vadar A. E. Critical Dimension Metrology and the Scanning Electron Microscope / Handbook of Silicon Semiconductor Metrology. Ed. Diebold A. C. Marcel Dekker Inc. New York–Basel. 2001. P. 295–333.
4. Новиков Ю. А., Раков А. В. Проблемы РЭМ-измерений размеров субмикронных элементов рельефа поверхности твердого тела. 1. Технические средства и алгоритмы измерений. (Обзор) // Микроэлектроника. 1996. Т. 25. № 6. С. 417–425.
5. 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.
6. Hatsuzawa T., Toyoda K., Tanimura Y. Metrological electron microscope system for microfeature of very large scale integrated circuits // Rev. Sci. Instrum. 1990. V. 61. № 3. P. 975–979.
7. 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.
8. Novikov Yu. A., Gavrilenko V. P., Ozerin Yu. V., Rakov A. V., Todua P. A. Silicon test object of the linewidth of the nanometer range for SEM and AFM // Proc. SPIE. 2007. V. 6648. P. 66480R-1–66480R-11.
9. 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.
10. Novikov Yu. A., Gavrilenko V. P., Rakov A. V., Todua P. A. Test objects with right-angled and trapezoidal profiles of the relief elements // Proc. SPIE. 2008. V. 7042. P. 704208-1–704208-12.
11. Данилова М. А., Митюхляев В. Б., Новиков Ю. А., Озерин Ю. В., Раков А. В., Тодуа П. А. Тест-объект с шириной линии менее 10 нм для растровой электронной микроскопии // Измерительная техника. 2008. № 8. С. 20–23.
12. Gavrilenko V. P., Kalnov V. A., Novikov Yu. A., Orlikovskiy A. A., Rakov A. V., Todua P. A., Valiev K. A., Zhikharov E. N. Measurement of dimensions of resist mask elements below 100 nm with help of a scanning electron microscope // Proc. SPIE. 2009. V. 7272. P. 727227-1–727227-9.
13. Новиков Ю. А. Виртуальный растровый электронный микроскоп. 1. Цели и задачи виртуальных

- приборов // Микроэлектроника. 2013. Т. 42. № 1. С. 34–41.
14. Новиков Ю.А. Виртуальный растровый электронный микроскоп. 2. Принципы построения прибора // Микроэлектроника. 2013. Т. 42. № 4. С. 262–270.
 15. Новиков Ю.А. Виртуальный растровый электронный микроскоп. 3. Полуэмпирическая модель формирования сигнала РЭМ // Микроэлектроника. 2014. Т. 43. № 4. С. 263–274.
 16. Новиков Ю.А. Виртуальный растровый электронный микроскоп. 4. Реализация на основе симулятора // Микроэлектроника. 2014. Т. 43. № 6. С. 456–467.
 17. Новиков Ю.А., Озерин Ю.В., Плотников Ю.И., Раков А.В., Тодуа П.А. Линейная мера микрометрового и нанометрового диапазонов для растровой электронной и атомно-силовой микроскопии // Труды ИОФАН. 2006. Т. 62. С. 36–76.
 18. Frase C.G., Hassler-Grohne W., Dai G, Bosse H., Novikov Yu.A., Rakov A.V. SEM linewidth measurements of anisotropically etched silicon structures smaller than 0.1 μm // Measurement science and technology. 2007. V. 18. P. 439–447.
 19. Новиков Ю.А. Плотность распределения электронов в зонде низковольтного РЭМ // Микроэлектроника. 2014. Т. 43. № 5. С. 373–383.
 20. 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.
 21. Gavrilenko V.P., Novikov Yu.A., Rakov A.V., Todua P.A. Measurement of the parameters of the electron beam of a scanning electron microscope // Proc. SPIE. 2008. V. 7042. P. 70420C-1–70420C-12.
 22. Новиков Ю.А. Изображение тест-объекта с трапециевидным профилем и большими углами наклона боковых стенок в РЭМ в обратно рассеянных электронах // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2011. № 10. С. 5–11.
 23. Волк Ч.П., Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А. Калибровка растрового электронного микроскопа по двум координатам с использованием одного аттестованного размера // Измерительная техника. 2008. № 6. С. 18–20.
 24. Гавриленко В.П., Лесновский Е.Н., Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А., Филиппов М.Н. Первые российские стандарты в нанотехнологии // Изв. РАН. Сер. Физ. 2009. Т. 73. № 4. С. 454–462.
 25. Gavrilenko V.P., Filippov M.N., Novikov Yu.A., Rakov A.V., Todua P.A. Russian Standards for Dimensional Measurements for Nanotechnologies // Proc. SPIE. 2009. V. 7378. P. 737812-1–737812-8.
 26. Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А. Классификация тест-объектов для калибровки растровых электронных микроскопов в нанометровом диапазоне // Измерительная техника. 2009. № 2. С. 22–26.
 27. Novikov Yu.A., Gavrilenko V.P., Rakov A.V., Todua P.A. Test objects with right-angled and trapezoidal profiles of the relief elements // Proc. SPIE. 2008. V. 7042. P. 704208-1–704208-12.
 28. Новиков Ю.А., Раков А.В., Стеколин И.Ю. РЭМ-измерения параметров профиля микрорельефа элементов топологии СБИС в субмикронном диапазоне // Микроэлектроника. 1995. Т. 24. № 5. С. 367–369.