

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Московский физико-технический институт (государственный
университет)»

На правах рукописи
УДК 537.533.9:620.187

ШАРОНОВ ВИКТОР АНАТОЛЬЕВИЧ

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ И МЕХАНИЧЕСКИХ
ЗОНДОВ С РЕЛЬЕФНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ В
НАНОМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ**

01.04.04. – физическая электроника

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Долгопрудный – 2011

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Тодуа Павел Андреевич.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор Э. И. Рау;
доктор технических наук,
профессор Е. С. Горнев.

Ведущая организация: Учреждение Российской Академии наук
Институт кристаллографии им.
А.В.Шубникова

Защита диссертации состоится « » октября 2011 года в 15.00 на заседании Диссертационного совета Д 212.156.01 при Московском физико-техническом институте по адресу: 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9, 204 НК

Отзывы направлять по адресу: 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д.9, МФТИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МФТИ.

Автореферат разослан « 19 » сентября 2011 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н., доцент

А.С. Батурин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Интенсивное развитие нанотехнологий в последние десятилетия обусловило значительный интерес к измерениям линейных размеров в нанодиапазоне (1-100 нм). Наиболее универсальными приборами, в принципе позволяющими проводить такие измерения, являются растровый электронный микроскоп (РЭМ) и атомно-силовой микроскоп (АСМ). Создание специальных тест-объектов – рельефных структур с аттестованными геометрическими параметрами нанорельефа, позволяет проводить калибровку и РЭМ, и АСМ, превратив их тем самым в средства измерений линейных размеров в нанодиапазоне.

Детальные исследования метрологических характеристик линейных измерений в нанометровом диапазоне показали, что в области размеров менее 70 нм возникают существенные трудности. В этом диапазоне размеров эффективный диаметр электронного зонда РЭМ, радиус острия кантилевера АСМ становятся сопоставимыми с размерами элементов микрорельефа. Это не позволяет использовать простейшие геометрические модели формирования информативных сигналов при взаимодействии электронных и механических зондов с рельефной поверхностью. Так, в частности, на видеосигнале РЭМ становятся неразличимыми характерные изломы и горизонтальные участки, наличие которых необходимо для использования традиционных методов измерения, базирующихся на простейшей геометрической модели и ограниченных условием малости эффективного диаметра зонда по сравнению с размерами элементов нанорельефа. Кроме того, в этом диапазоне размеров становится значимым изменение со временем аттестованных геометрических параметров рельефных структур при их многократном использовании для калибровки РЭМ. Однако закономерности этого процесса, в частности в условиях так называемого «чистого вакуума» (безмасляная откачка) до

настоящего времени изучены мало. Количественные данные об этом процессе отсутствуют.

Альтернативный метод измерения линейных размеров – АСМ в диапазоне размеров менее 70 нм также ограничен отсутствием данных о реальном (в данном эксперименте) размере острия кантилевера. Предварительное измерение этого параметра АСМ не решает проблемы, поскольку в этом диапазоне значимым является изменение формы острия кантилевера в ходе эксперимента.

Для расширения диапазона измерений РЭМ и АСМ в область малых размеров необходимо дополнительное исследование специфики взаимодействия электронных и механических зондов в условиях сопоставимости эффективного диаметра электронного зонда и радиуса острия кантилевера с размерами элементов рельефа исследуемых структур.

Цель диссертационной работы

Целью работы являлось изучение специфики взаимодействия электронных и механических зондов с нанорельефом поверхности твердого тела и разработка адекватных методов измерения геометрических параметров элементов рельефа с размерами менее 70 нм с использованием РЭМ и АСМ.

Для достижения этой цели должны быть решены следующие задачи:

- исследованы закономерности электронно-стимулированного формирования углеводородной пленки на поверхности рельефных структур с размерами элементов в нанометровом диапазоне, в частности в условиях безмасляной откачки, применяемой в современных РЭМ высокого разрешения;

- изучены информативные возможности видеосигнала РЭМ в условиях сопоставимости эффективного диаметра электронного зонда с размерами элементов рельефных структур, разработан метод измерений этих размеров и установлены действительные значения неопределенности результатов таких измерений;

- изучены информативные возможности сигнала АСМ в условиях сопоставимости радиуса острия кантилевера с размерами элементов рельефных структур, разработан метод измерений этих размеров и установлены действительные значения неопределенности результатов таких измерений.

Новизна результатов

Научная новизна работы заключается в следующем:

- впервые установлены закономерности электронно-стимулированного образования углеводородной пленки на поверхности элементов рельефных структур с нанометровыми размерами элементов в условиях «чистого вакуума» (безмасляная откачка) РЭМ. Показано, что толщина и латеральные размеры пленки в условиях «чистого вакуума» определяются кинетикой электронного облучения, а не интегральной дозой, как считалось ранее;

- разработан новый метод измерения геометрических параметров рельефных структур с помощью РЭМ, диапазон измерений этого метода снизу ограничен только эффективным диаметром электронного зонда;

- разработан новый метод измерения верхних оснований выступов рельефных структур с помощью АСМ, основанный на измерении расстояний между точками излома зависимости первой производной от координаты, позволяющий в одном эксперименте определять как радиус острия кантилевера, так и размер верхнего основания симметричного выступа рельефной структуры.

Научные положения, выносимые на защиту

1. В условиях «чистого вакуума» (безмасляная откачка) толщина и латеральные размеры углеводородной пленки, формирующейся под действием электронного облучения РЭМ на поверхности рельефной структуры с нанометровыми размерами элементов рельефа, определяются кинетикой набора дозы облучения, а не ее интегральным значением. Это свидетельствует о доминирующей роли поверхностной диффузии молекул углеводородов от

необлученных участков к облученным как источника вещества для образования пленки.

2. Наблюдаемое изменение размера рельефных элементов эталонных мер нанометрового диапазона при их многократном использовании в РЭМ, обусловлено селективным ростом пленки углеводородных загрязнений под воздействием электронного облучения.

3. Расстояние между максимумами видеосигнала РЭМ в режиме вторичной электронной эмиссии от трапецеидального выступа рельефной структуры с размерами выступа в нанометровом диапазоне является линейной функцией эффективного диаметра электронного зонда со свободным членом, равным ширине верхнего выступа. Экстраполяция экспериментальной зависимости этого расстояния от эффективного диаметра электронного зонда к нулевому значению эффективного диаметра позволяет проводить измерения верхнего основания выступа в диапазоне, в котором невозможно применение традиционного метода с использованием контрольных отрезков - от значения эффективного диаметра сфокусированного электронного зонда РЭМ (8-15 нм) до 70 нм.

4. Расстояния между точками излома на зависимости первой производной сигнала АСМ от пространственной координаты прямо пропорциональны радиусу острия кантилевера и размеру верхнего основания трапецеидального выступа рельефной структуры. Это позволяет по данным одного измерения определить как радиус острия кантилевера, так и размер верхнего основания выступа.

Практическая значимость

В результате проведенных исследований, было выяснено, что эффект электронно-стимулированного формирования углеводородной пленки значительно изменяет размеры аттестованных тест-объектов для калибровки РЭМ даже в условиях «чистого вакуума». При этом срок службы эталонной меры определяется не общей набранной дозой облучения, а числом проведенных измерений. В частности, на примере эталонной рельефной меры МШПС 2.0К

показано, что максимальное число отдельных измерений в этих условиях составляет 360.

На основе исследования информативных возможностей видеосигналов в РЭМ и АСМ в условиях сопоставимости диаметра электронного зонда и радиуса острия кантилевера удалось снизить границу диапазона измерений с 70 нм для традиционного способа с использованием контрольных отрезков до величины 10-15 нм, лимитируемой эффективным диаметром электронного зонда или реальным радиусом острия кантилевера.

Внедрение результатов работы

Результаты диссертационной работы применены для определения срока службы эталонной меры МШПС 2.0К. Разработанный метод дефокусировки зонда в РЭМ и метод определения размера верхнего основания по зависимости производной сигнала АСМ от координаты использован для калибровки и поверки микроскопов в Научно-исследовательском центре по изучению свойств поверхности и вакуума и в Центре коллективного пользования Московского физико-технического института. Также данные по сличению и установлению действительных значений неопределенностей измерений на РЭМ и АСМ используются ведущими российскими метрологическими организациями, занимающиеся измерениями в субмикронном и нанометровом диапазонах (ВНИИМС, ВНИОФИ, НИЦПВ).

Апробация работы

Результаты диссертации опубликованы в статье в журнале, входящем в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук» ВАК Минобрнауки РФ, статье в иностранном журнале, а также доложены на следующих конференциях:

1. International conference «Micro- and nanoelectronics – 2007» (ICMNE – 2007), 2007, Moscow – Zvenigorod, Russia.
2. 50-я научная конференция МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: Часть V. Физическая и квантовая электроника, Москва-Долгопрудный, 2007.
3. Молодежная научная конференция «Физика и Прогресс» 14-16 ноября 2007г., Санкт-Петербург, 2007.
4. XXIII Российская конференция по электронной микроскопии. Черноголовка 31 мая – 4 июня 2010 г.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения и списка цитированной литературы. Работа содержит 114 страниц, 60 рисунков, 8 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность проблемы, сформулированы основные направления и задачи работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен литературный обзор, характеризующий современное состояние проблем, связанных с основными направлениями работы.

Анализ публикаций по электронно-стимулированному формированию углеводородной пленки на поверхности исследуемого в РЭМ объекта показал, что подавляющее число работ выполнено в условиях паромаслянной откачки. По этой причине основное внимание уделяли зависимости геометрических параметров пленки от интегральной дозы облучения. Исследования кинетики формирования пленки носили, в основном, качественный характер.

В работах, посвященных конкретным методам измерения геометрических параметров рельефных структур в нанометровом диапазоне, в основном,

использовали простейшие геометрические модели формирования видеосигнала. Особенностью большинства методов, основанных на таких моделях является необходимость измерения длины контрольных отрезков на видеосигнале. При этом ограничения диапазона таких измерений снизу не обусловлены фундаментальными причинами, такими, как например конечность эффективного диаметра электронного зонда, а связаны с особенностями формирования видеосигнала. В результате этого нижняя граница измерений геометрических параметров элементов нанорельефа почти на порядок выше, чем эффективный диаметр электронного зонда.

Информативные возможности сигнала АСМ используются явно не в полной мере. Большинство методик предлагают прямые измерения с использованием поправки на величину радиуса острия кантилевера. Однако этот параметр нельзя считать характеристикой прибора, поскольку во многих случаях он изменяется в процессе измерений.

На основе анализа современного состояния проблемы, в заключении обзора литературы сформулированы цели и задачи диссертации.

Во второй главе приведены результаты исследования кинетики электронно-стимулированного формирования углеводородной пленки (эффект контаминации) исследуемого образца в РЭМ и влияния этого процесса на наблюдаемые размеры рельефных структур нанометрового диапазона. В качестве объектов исследования выбраны структуры, используемые для калибровки РЭМ и АСМ, меры ширины и периода специальные МШПС-2.0К с трапецеидальным профилем элемента рельефа, разработанные в Научно-исследовательском центре по изучению свойств поверхности и вакуума. Мера сформирована в центре пластины кремния размером 10×10 мм². На площади 1×1 мм² по четырем углам квадрата и в его центре расположены 5 модулей по 3 шаговые структуры в каждом модуле. В каждой структуре имеется 11 канавок и 10 выступов, повторяющихся с заданным значением шага 2 мкм. Шаговые структуры маркированы символами I, II, III с каждой стороны и представляют собой чередующиеся элементы рельефа с трапецеидальным профилем.

Конструкция меры содержит направляющие линии, позволяющие устанавливать зонд на половине длины элемента рельефа и выбирать заданную пару элементов. Ширина направляющей линии составляет 10 мкм, около шаговых структур эта ширина уменьшается до 2 мкм.

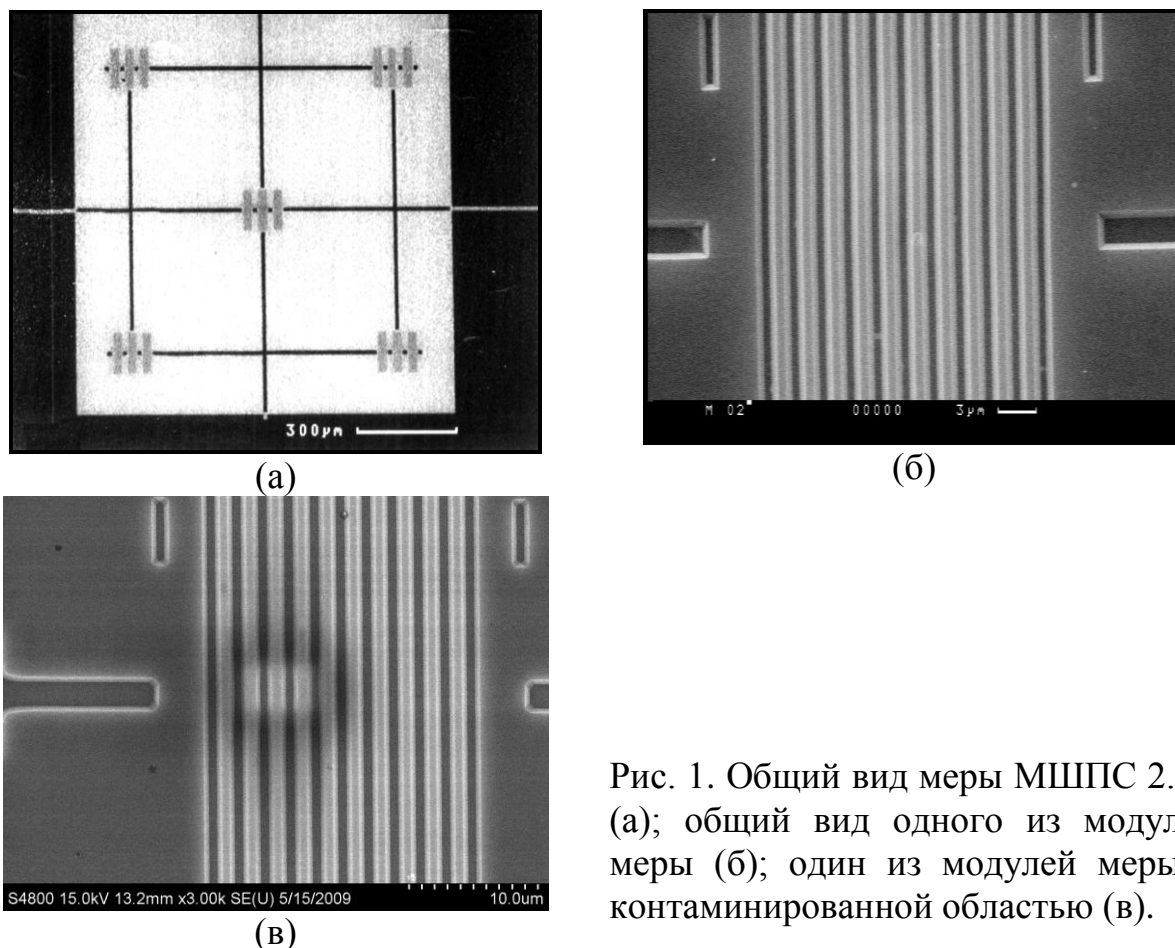


Рис. 1. Общий вид меры МШПС 2.0К (а); общий вид одного из модулей меры (б); один из модулей меры с загрязненной областью (в).

Изучение влияния электронно-стимулированного формирования углеводородной пленки (контаминации) в РЭМ на размеры элементов меры МШПС-2.0К проводили с помощью РЭМ S-4800 (фирма Hitachi) при регистрации вторичных электронов, при ускоряющем напряжении 20 кВ и 1 кВ. Следует отметить, что в камере РЭМ S-4800 так называемый «чистый вакуум», т.е. используется безмасляная откачка. Геометрические параметры профиля выступов меры определяли по полученным РЭМ-изображениям в соответствии с моделью [1]. Согласно данным [2], основную роль в электронно-стимулированном формировании углеводородной пленки играют электроны с энергией от 5 эВ до нескольких сотен электронвольт. То есть, контаминация

обусловлена медленными вторичными электронами, которые генерируются как первичным пучком, так и обратно-рассеянными электронами при их выходе на поверхность образца.

Были реализованы 2 режима облучения. В первом режиме (непрерывном) облучению подвергались выступы путем многократного непрерывного сканирования в режиме медленной развертки (40 с/кадр), причем размер раstra составлял $4,3 \times 3,2 \text{ мкм}^2$ (увеличение РЭМ $\times 30\text{К}$, ток зонда 0,2 нА). Длительность облучения составляла 30 мин. После этого корректировалось положение ручки тонкой фокусировки на участке, находящемся достаточно далеко от области облучения (более 15 мкм) и далее производилось получение РЭМ-изображения с увеличением $\times 30\text{К}$, размерность кадра составляла 2560×1920 пикселей, длительность – 40 с. Вышеуказанный цикл из облучения в течение 30 мин. и получения 2-х РЭМ-изображений последовательно повторялся несколько раз с тем, чтобы общее время облучения выступов составило 3 часа. Перед началом облучения были получены изображения двух исследуемых областей при увеличении $\times 30\text{К}$.

Во втором режиме (прерывистом) облучению подвергались выступы, которые находятся на расстоянии примерно 25 мкм от первой облучаемой группы. Облучение происходило при тех же параметрах электронного пучка, что и в предыдущем случае. Облучение структуры происходило следующим образом: производили получение РЭМ-изображения с увеличением $\times 30\text{К}$, затем выдерживалась пауза и повторяли получение изображения, каждый раз записывая его в память компьютера.

По совокупности полученных при 20 кВ результатов можно констатировать, что дозовые зависимости ширины верхнего основания и проекции боковой стенки выступов меры, обусловленные контаминацией в РЭМ, существенно зависят от способа набора дозы электронного облучения. Изменения указанных параметров в расчете на единицу дозы облучения более чем на порядок выше для прерывистого характера облучения, чем для непрерывного (рис. 2 и 3).

Результаты, полученные по облучению при ускоряющем напряжении 1 кВ, показывают, что изменение параметров меры для заданной дозы электронного облучения зависят от режима облучения (непрерывное или прерывистое облучение). Изменение ширины верхнего основания при заданной дозе облучения более значительно (почти на порядок) в прерывистом режиме, причем дозовая зависимость изменения ширины верхнего основания, а также средняя проекция боковой стенки практически не зависят от значения паузы в облучении, если это значение 3 или более минут, что приведено в таблице 1.

В условиях «чистого вакуума» (безмасляная откачка) толщина и латеральные размеры углеводородной пленки, формирующейся под действием электронного облучения РЭМ на поверхности рельефной структуры с нанометровыми размерами элементов рельефа, определяются кинетикой набора дозы облучения, а не ее интегральным значением. Это свидетельствует о доминирующей роли поверхностной диффузии молекул углеводородов как источника вещества для образования пленки. Поэтому оценки влияния контаминации, выполненные на основе непрерывного облучения меры, как это сделано, например, в [3], дают завышенные значения допустимого числа измерений в одной области.

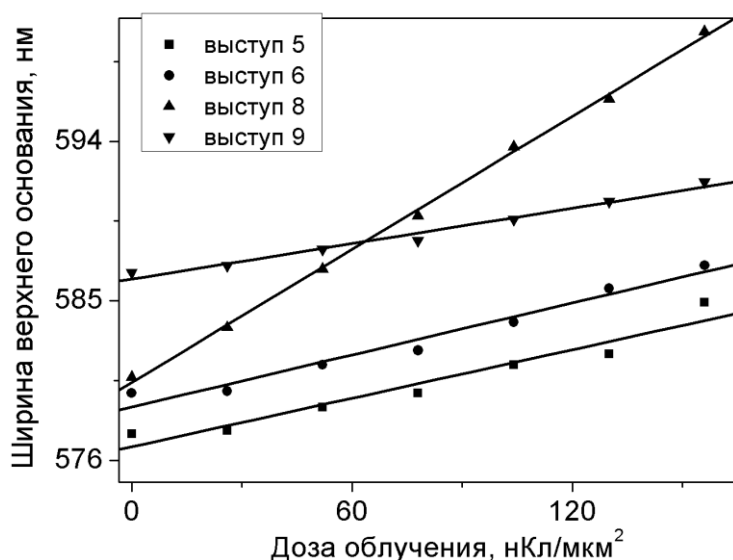


Рис. 2. Зависимость ширины верхнего основания выступов 5, 6, 8 и 9 структуры III-III от дозы электронного облучения в непрерывном режиме, ускоряющее напряжение 20 кВ.

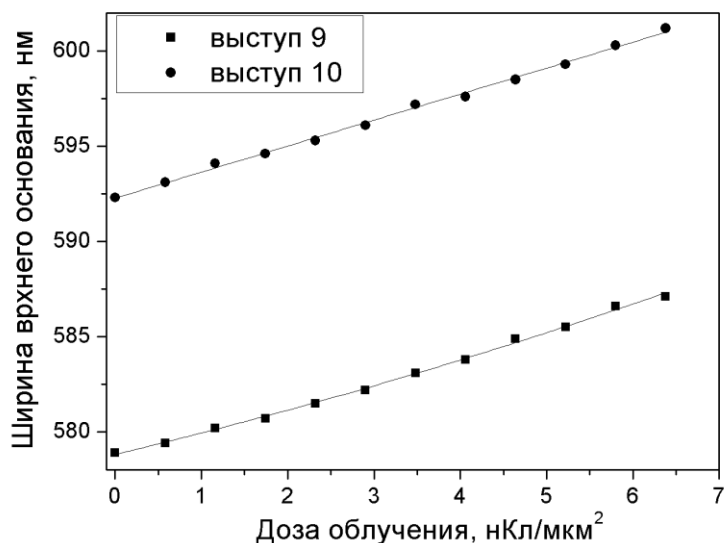


Рис. 3. Зависимость ширины верхнего основания выступов 9 и 10 структуры П-П от дозы облучения электронами с энергией 20 кэВ в прерывистом режиме.

Таблица 1

Режим облучения	Непрерывное облучение	Прерывистое облучение с паузами в 3 мин	Прерывистое облучение с паузами в 10 мин
Изменение ширины верхнего основания ΔU_p , нм	3	13	14,5

Изменение размера рельефных элементов эталонных мер нанометрового диапазона при их многократном использовании в растровой электронной микроскопии, обусловлено селективным ростом пленки углеводородных загрязнений под воздействием электронного облучения.

Третья глава посвящена разработке метода измерения ширины верхнего основания симметричного трапециевидного выступа в случае, когда ширина этого основания менее 70 нм. Выше отмечено, что традиционные методы измерений ширины выступа при таких размерах непригодны. Объектом исследований выбрана мера МШПС 2.0К, упомянутая ранее.

В настоящей главе разработан метод определения размера верхнего основания элемента рельефа (выступа) тестовой структуры (МШПС 2.0К). В случае, когда размер верхнего основания менее 70 нм, пропадают характерные

особенности видеосигнала (рис. 4). В частности, в средней части отсутствует горизонтальный участок, что делает невозможным выделение из видеосигнала контрольного отрезка.

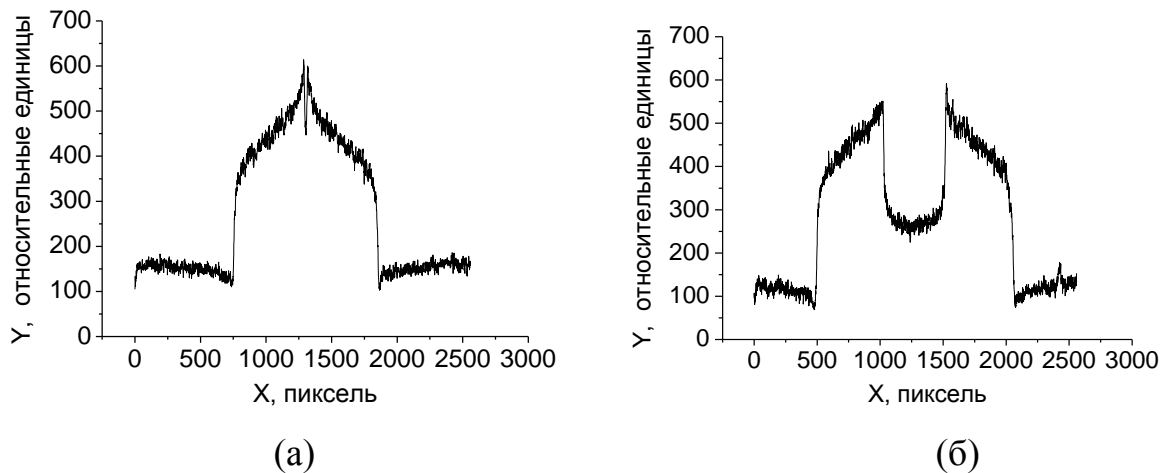


Рис. 4. Реальный видеосигнал в РЭМ, когда верхнее основание элемента рельефной структуры меньше 70 нм (а) и когда оно больше 70 нм (б).

Измерения проводили на РЭМ S-4800 (Hitachi), с энергией электронов зонда $E_0 = 30$ кэВ при рабочем отрезке 6 мм. Изучена зависимость расстояния между пиками видеосигнала от эффективного диаметра зонда. Регистрировали кривые видеосигнала при разных значениях эффективного диаметра электронного пучка: $(D_{ef.})_1$; $(D_{ef.})_2$; $(D_{ef.})_3$; $(D_{ef.})_4$; $(D_{ef.})_5$. Изменение эффективного диаметра достигали путем изменения тока в объективной линзе РЭМ.

Экспериментальную зависимость расстояния между пиками видеосигнала L_p от эффективного диаметра $D_{ef.}$ можно описать линейной функцией:

$$L_p(D_{ef.}) = A_L + B_L * (D_{ef.}). \quad (1)$$

Величина A_L не зависит от эффективного диаметра зонда. Эксперименты по дефокусировке, проведенные на структурах, верхнее основание которых более 70 нм, и, следовательно, возможно применение методики контрольных отрезков [1] показали, что в пределах погрешности величина A_L совпадает с шириной верхнего основания. Это позволяет считать, что сама величина L_p представляет собой сумму ширины верхнего основания и некоторой добавки,

прямо пропорциональной эффективному диаметру. В области размеров менее 70 нм нет оснований предполагать существенное изменение характера этой зависимости вплоть до размеров, сопоставимых с эффективным диаметром электронного зонда РЭМ (10-15 нм) по [4].

Величину $D_{ef.}$ для 5 значений фокусировки изображения одного из выступов определяли по участкам линейной аппроксимации соответствующих видеосигналов. На рис.5 представлена зависимость $L_p(D_{ef.})$ для этого выступа, построенная по методу наименьших квадратов. На рис.6 приведена зависимость $L_p(D_{ef.})$ для другого выступа этой же тестовой структуры с меньшей шириной верхнего основания. Значение масштабного коэффициента m составило 0.551 нм/пиксель. Тогда для данных на рис.5 и 6 получаем соответственно $u_p = (23.7 \pm 1.1)$ нм и (13.2 ± 2.2) нм.

Были измерены размеры верхних оснований элементов нанорельефа, имеющих профиль с формой трапеции, в диапазоне 14-24 нм. Предложенный способ был проверен на РЭМ S-4800 (Hitachi) и JSM 7001 (JEOL) с полевым катодом и на РЭМ JSM-6460LV и Quanta с термоэмиссионным катодом.

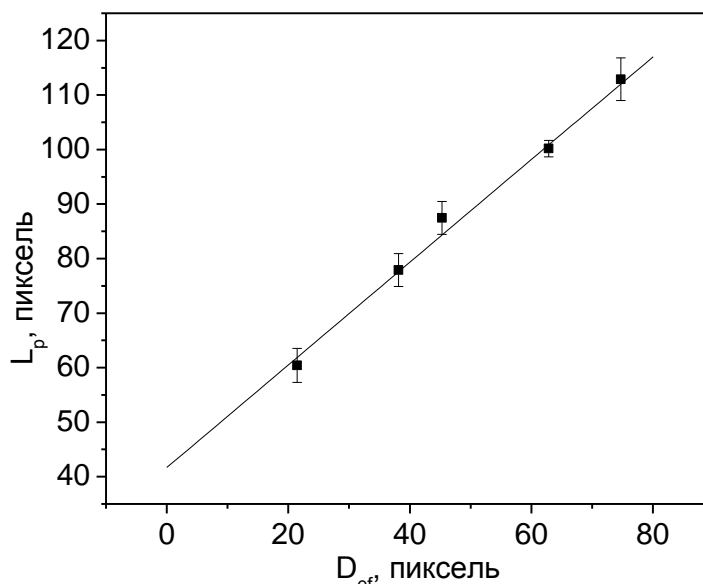


Рис. 5. Зависимость расстояния между пиками видеосигнала L_p от эффективного диаметра D_{ef} для одного из выступов: $A_L = (41.7 \pm 3.8)$ пиксель; $B_L = (0.90 \pm 0.09)$ пиксель.

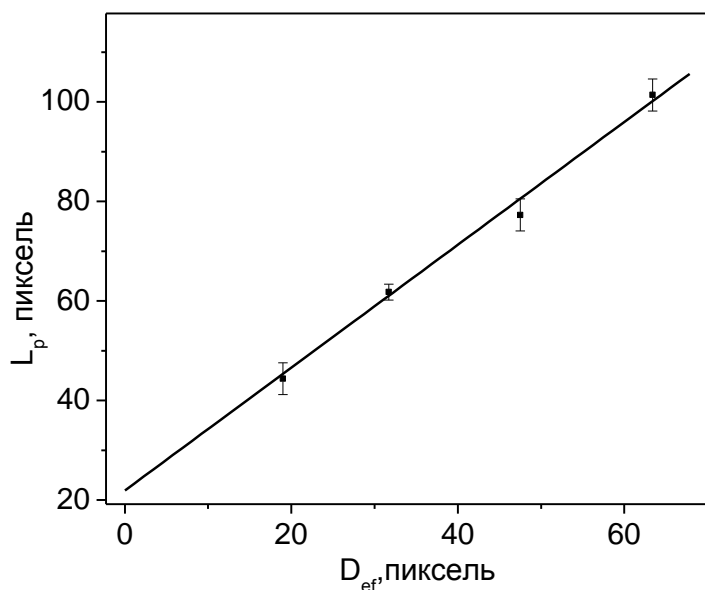


Рис. 6. Зависимость расстояния между пиками видеосигнала L_p от эффективного диаметра D_{ef} для выступа с меньшими размерами верхнего основания $L_p(0) = (21.9 \pm 3.5)$ пикселя, $u_p = (13.2 \pm 2.2)$ нм.

Эксперимент показал, что метод при реализации на приборах с термоэмиссионными катодами имеет несколько метрологических характеристики, что можно объяснить иным характером изменения плотности электронного тока при дефокусировке.

Таким образом, экспериментально установлено, что расстояние между максимумами видеосигнала РЭМ в режиме вторичной электронной эмиссии от трапецеидального выступа рельефной структуры с размерами выступа в нанометровом диапазоне является линейной функцией эффективного диаметра электронного зонда со свободным членом, равным ширине верхнего выступа. Экстраполяция зависимости этого расстояния к нулевому значению эффективного диаметра электронного зонда позволяет проводить измерения размера верхнего основания выступа в диапазоне, в котором невозможно применение традиционного метода с использованием контрольных отрезков - от значения эффективного диаметра сфокусированного электронного зонда РЭМ (8 -15 нм) до 70 нм.

Четвертая глава посвящена разработке метода измерений верхнего основания рельефной структуры с помощью АСМ. При размерах элементов микрорельефа менее 70 нм значимым является изменение реального радиуса кантилевера АСМ в ходе эксперимента. Предварительное измерение этого параметра не решает проблемы.

Наблюдаемый сигнал из-за конечности радиуса острия кантилевера оказывается несколько скругленным (см. рис. 7). На рис. 7 приведены пример модельного сигнала ($V(X)$) и его первой производной (dV/dX), а также положения контрольных точек, соответствующих особым положениям острия кантилевера. Штриховые линии на рис. 7 показывают связь контрольных точек сигнала с особенностями первой производной сигнала.

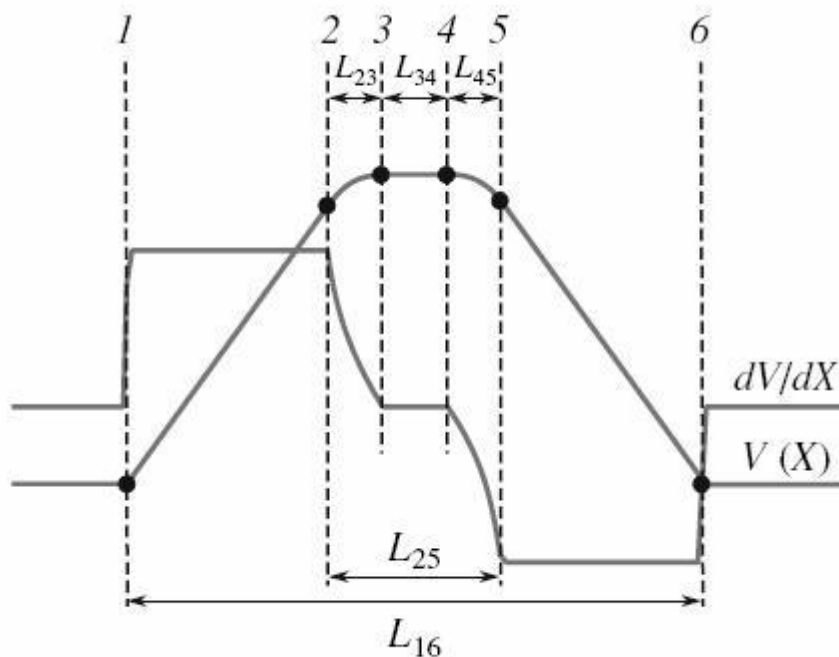


Рис. 7. Схема сигнала АСМ, его первой производной и положения контрольных точек.

Используя положения контрольных точек 1 - 6, можно записать следующие выражения:

$$L_{34} = u_p/m_x, \quad (2)$$

$$L_{25} = (u_p + 2r\cos\varphi)/m_x, \quad (3)$$

$$L_{16} = B_p = (b_p + rQ(\varphi))/m_x, \quad (4)$$

$$L_{23} = L_{45} = r \cos \varphi / m_x. \quad (5)$$

Здесь L_{ij} – расстояние между проекциями точек i и j на сигнале и его первой производной на направление сканирования, u_p – верхнее основание рельефной структуры, m_x – масштабный коэффициент микроскопа по оси x , b_p – нижнее основание рельефной структуры, r – радиус острия кантилевера. Выражение 2 указывает на то, что можно прямым методом определить на АСМ ширину верхнего основания трапециевидного выступа, а выражение 5 – на то, что можно прямым методом определить радиус острия кантилевера.

Измерения проводили с использованием атомно-силового микроскопа фирмы NT-MDT Ntegra Aura и модифицированной версией МШПС 2.0К. В качестве растрового электронного микроскопа был выбран Hitachi S-4800, упомянутый в предыдущих главах. Режим сканирования был выбран полуконтактный, т.к. при данном режиме сканирования острие зонда стирается медленнее, чем в контактном. Зонды, которыми проводилось сканирование, также произведены фирмой NT-MDT и имеют маркировку NSG 03.

Установлено, что расстояния между точками излома на зависимости первой производной сигнала АСМ от пространственной координаты прямо пропорциональны радиусу острия кантилевера и размеру верхнего основания трапецеидального выступа рельефной структуры. Это позволяет по данным одного измерения определить как радиус острия кантилевера, так и размер верхнего основания выступа.

Было проведено сравнение получаемых результатов измерений верхних оснований рельефных структур с помощью РЭМ (метод, описанный в [1]) и АСМ (предложенный метод дифференцирования видеосигнала). При сравнении с данными РЭМ наблюдается совпадение в пределах погрешностей, что подтверждает надежность метода (таблица 2).

Таблица 2

номер элемента	L1-2-6	L2-2-6
u_p АСМ, нм	405±18	188±12
u_p РЭМ, нм	419±4	201±2

Однако следует отметить, что результаты не совпадают в точности. Одной из причин значительной погрешности при измерениях на АСМ является недостаточная точность нахождения производной, так как количество точек (пикселей), приходящихся на верхнее основание, с уменьшением размера соответственно уменьшается, а максимальное разрешение (в данном случае максимальное количество точек на строку) на серийных приборах обычно ограничено количеством 1024. Таким образом, точность вычисления верхнего основания на АСМ может быть повышена с увеличением в приборе максимального количества измерений на строку. Большой вклад в погрешность измерения с помощью АСМ также вносит размер зонда микроскопа. Зонд в данном случае является твердым объектом, как правило, из кремния. В конечном итоге, положение зонда и его форма вносят свой вклад в погрешность прибора.

В целом, проведенный эксперимент показал, что данные измерений РЭМ и АСМ совпадают в пределах погрешностей. Это означает, что метод нахождения верхнего основания по производной сигнала АСМ позволяет определять верхнее основание рельефных структур в пределах погрешности микроскопа, значит и использовать АСМ для характеристики всех параметров рельефной структуры, не прибегая к РЭМ.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты, полученные автором.

Основные результаты работы

1. Установлены закономерности электронно-стимулированного формирования углеводородной контаминационной пленки на элементах

рельефной структуры в зависимости от энергии, тока электронного пучка и кинетики набора дозы облучения. Изменение ширины верхнего основания элементов рельефной меры в результате контаминации для заданной дозы электронного облучения может увеличиться более чем на порядок в случае наличия пауз в облучении.

2. Образование контаминационной пленки значительно меняет размер рельефной структуры (от 2 нм за 12 облучений) как при паромаслянной откачке РЭМ, так и при использовании турбомолекулярного (ионного и т.п.) насосов.

3. Мера МШПС-2.0К допускает до 360 циклов поверки или калибровки РЭМ с использованием аттестованного значения проекции боковой стенки.

4. Разработан и экспериментально опробован метод измерения геометрических характеристик рельефной структуры нанометрового диапазона с помощью РЭМ вплоть до величин, соизмеримых с эффективным диаметром электронного пучка (экспериментально измерено до 14 нм).

5. Разработан и экспериментально опробован метод измерения верхних оснований рельефных структур нанометрового диапазона с помощью АСМ.

6. По результатам сравнений измерений элементов рельефной структуры в РЭМ и АСМ было показано, что результаты сходятся в пределах погрешностей, что подтвердило достоверность результатов, получаемых на этих приборах.

Список цитированной литературы:

1. Novikov Yu.A., Ozerin Yu.V., Rakov A.V., Todua P.A. Method for linear measurements in the nanometre range//Meas. Sci. Technol. 2007. V.18, N2. P.367-374.
2. 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.
3. Tortonese M., Guan Y., Prochazka J. NIST-traceable calibration of CD-SEM magnification using a 100 nm pitch standard.// Proc. of SPIE. 2003. V.5038. P.711-718.

4. Ч.П. Волк, Е.С. Горнев, Ю.А. Новиков, Ю.И. Плотников, А.В. Раков, П.А. Тодуа. Проблемы измерения геометрических характеристик электронного зонда растрового электронного микроскопа//труды ИОФАН, 2006, том 62, с. 77-120.

Основные материалы диссертации содержатся в следующих работах:

1. M. N. Filippov, I. D. Lysov, Yu. A. Novikov, A. V. Rakov, V. A. Sharonov, P. A. Todua. Direct measurement of linewidth of relief element on AFM in nanometer range. Proceedings of SPIE, v. 7025, 2008, p. 702510-1 – 702510-10.

2. В. П. Гавриленко, В. Б. Митюхляев, А. В. Раков, П. А. Тодуа, М. Н. Филиппов, В. А. Шаронов. Влияние контаминации в РЭМ на профиль рельефных элементов нанометрового диапазона. Нано- и микросистемная техника, №2, 2011, с. 2-6.

3. Ларионов Ю. В., Митюхляев В. Б., Федоров С. Л., Филиппов М. Н., Шаронов В. А., Тодуа П. А. Искажения профиля элементов рельефа в процессе контаминации в РЭМ. Тезисы докл. XXIII Российской конференции по электронной микроскопии. Черноголовка 31 мая – 4 июня 2010 г. С. 111.

4. S. A. Darznek, M. N. Filippov, I. D. Lysov, Yu. A. Novikov, A. V. Rakov, V. A. Sharonov, P. A. Todua. Direct measurement of linewidth of relief element on AFM in nanometer range. International conference «Micro- and nanoelectronics – 2007» (ICMNE – 2007), 2007, Moscow – Zvenigorod, Russia.

5. В.А.Шаронов, И.Д.Лысов «Определение ширины линии элемента рельефа с формой профиля, близкой к трапеции, с помощью атомно-силового микроскопа в нанометровом диапазоне» //Труды 50-ой научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: Часть V. Физическая и квантовая электроника, Москва-Долгопрудный, 2007. с. 48

6. В.А.Шаронов «Измерение ширины линии эталонов сравнения путем дифференцирования кривой сигнала АСМ в нанометровом диапазоне» //Тезисы докладов молодежной научной конференции «Физика и Прогресс» 14-16 ноября 2007г., Санкт-Петербург, 2007. с. 107