

Роль вторичных электронов из участков наноканавки в ее РЭМ изображении

© Ю.В. Ларионов, Ю.В. Озерин

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
119991 Москва, Россия
e-mail: luv@kapella.gpi.ru

Поступило в Редакцию 22 августа 2023 г.

В окончательной редакции 26 декабря 2023 г.

Принято к публикации 1 апреля 2024 г.

Особенности рассеяния вторичных электронов в наноканавках были выявлены экспериментально по итогам их сканирования в низковольтном растровом электронном микроскопе. Значимая роль в генерации потока медленных вторичных электронов (МВЭ), создающих изображение в микроскопе, принадлежит вторичным электронам, рассеиваемым одними участками поверхности наноканавки к другим участкам („внешним“ электронам). Поток МВЭ от „внешних“ вторичных электронов добавляется к потоку МВЭ от сканируемой точки, что приводит к модификации потока МВЭ, эмитируемого только этой точкой. Это явление особенно значимо для наноканавок с крутыми боковыми стенками. Заметный вклад в рассеяние „внешних“ вторичных электронов вносит дно канавки. Вторичные электроны, рассеиваемые внутри канавки, способны покидать ее, перемещаться вдоль поверхности образца, вызывая эмиссию вторичных электронов и из соседних участков рельефной структуры. Это приводит к зависимости изображения наноканавки от расположения соседних канавок. „Внешние“ вторичные электроны влияют на эмиссию МВЭ из поверхности, модифицируя состояние ее поверхностных зарядовых ловушек.

Ключевые слова: нанометрология, низковольтный растровый электронный микроскоп, рельефная структура, поверхностные зарядовые состояния.

DOI: 10.61011/JTF.2024.06.58134.203-23

Введение

Топологические элементы наносхем являются основными объектами контроля для промышленных растровых электронных микроскопов (РЭМ). Одной из главных задач контроля, решаемых с их помощью, является измерение линейных размеров наноструктур. Измерения производятся по изображению этих структур, создаваемому с помощью низковольтных РЭМ (НВРЭМ). Изображение формируется медленными вторичными электронами (МВЭ), эмитированными из приповерхностного слоя объекта толщиной в несколько нанометров и поэтому способными отобразить его нанорельеф. РЭМ изображение наноструктуры позволяет сформировать кривую видеосигнала (ВС), т.е. профиль величины сигнала детектора МВЭ в строке развертки изображения. По расстоянию между выбранными опорными точками на склонах кривой ВС, соответствующих геометрическим краям наноструктуры, определяют ее линейный размер.

Электроны пучка проникают в подложку и рожают в ней вторичные электроны (ВЭ), часть из которых рассеивается к поверхности и достигает приповерхностного слоя (неупругоотраженные электроны (НОЭ)). Взаимодействуя с атомами этого слоя, они формируют эмиссионный поток МВЭ. НОЭ способны также взаимодействовать с зарядовыми ловушками вблизи поверхности, изменяя их состояние [1]. В результате меняется

электрический заряд участка поверхности, что влияет на эмиссию МВЭ из него. Из-за множества влияющих величин сложно оценить эмиссию МВЭ из наноканавки, особенно из ее боковых стенок (БС). Однако именно они определяют форму склонов кривой ВС, по опорным точкам на которых измеряют ширину.

Часть НОЭ, созданных в подложке, способна выйти наружу [2] и переместиться к соседним участкам поверхности канавки. Они могут рассеяться на них или изменить их зарядовое состояние, что еще больше усложняет эмиссию МВЭ из поверхности канавки.

Практически невозможно теоретически описать рассеяние электронов в канавке для сложного профиля с изменяемыми поверхностными состояниями. К счастью, в настоящее время реализовано компьютерное моделирование рассеяния ВЭ по методу Монте Карло. Оно позволяет произвести расчет треков движения пробных падающих электронов внутри образца и за его пределами. Перемещение, рассеяние и взаимодействия частиц в твердом теле описывается вероятностными законами. Но в описании рассеяния отдельных электронов учитываются конкретные ограничительные условия, как то профиль участков канавки, сведения о предполагаемых поверхностных электрических зарядах, условиях выхода ВЭ за пределы поверхности, о законах взаимодействия ВЭ с зарядовыми ловушками [1]. Моделирование отображает процесс последовательного рассеяния частицы в канавке, подобно тому, как это происходит реально.

Расчеты проводятся для многих падающих на поверхность модельных электронов, что позволяет получить в итоге модельное РЭМ изображение канавки и кривую ВС. Однако существует потенциальное несоответствие реальной и модельной форм нанопрофиля и состояния его поверхностных зарядовых ловушек. Это приводит к методической неопределенности значений размеров наноструктур. Отметим, что неопределенность значения размера для калибровочных метрологических наноструктур должна находиться в субнанометровом диапазоне, т. е. определяется количеством всего нескольких атомных слоев [3].

Модельные расчеты рассеяния электронов используются для уточнения представлений о процессе рассеяния электронов в нанометровых канавках. Совместные экспериментальные исследования и модельные расчеты позволяют выявить такие особенности рассеяния электронов в наноканавках, которые невозможно выявить другими методами. Однако таких исследований проведено недостаточно, а их результаты часто носят не прогностический, а констатирующий или даже иллюстративный характер [3,4].

В настоящей работе проведены экспериментальные сканирования образцов нанометровых канавок, изготовленных на одном из отечественных микроэлектронных предприятий с помощью современного промышленного НВРЭМ. Их целью было получение новой информации о картине рассеяния ВЭ в наноканавках.

1. Литературный обзор и постановка задачи

Воссоздание деталей картины рассеяния электронов в канавке с помощью моделирования по методу Монте Карло представлено в [4]. Модельная структура включала в себя несколько выступов в слое маски РММА (Polymethyl methacrylate) с прямоугольным профилем с размерами 20 nm при расстоянии между выступами 40 nm. Расчеты позволили визуализировать треки отдельных НОЭ, эмитированных наружу и рассеянных внутри канавки (внешних НОЭ (ВНОЭ)), в результате облучения ее края электронным пучком НВРЭМ. Большая часть этих треков начинается и заканчивается на участках профиля внутри канавки, но часть треков выходит за ее пределы. Криволинейность этих треков свидетельствует о движении ВЭ в электрическом поле. Оно создается электрическими зарядами, которые возникают на поверхности канавки, в том числе и на верхнем плато выступа. По объяснению авторов заряды возникли в результате предварительного модельного сканирования выступа множеством электронов пучка.

В подобном же моделировании треков ВНОЭ, эмитированных из выступа в слое SiO_2 с наклонными БС [2], также видно, что часть из них вылетает из канавки и перемещается на верхнее основание (ВО)

выступа. Форма этих треков также криволинейна. Отдельные электроны, эмитированные из канавки, преодолели расстояние до нескольких десятков нанометров вдоль поверхности ВО. Результатом проникновения ВНОЭ в БС и ВО стали наведенные на их поверхности электрические заряды. В работе [2] (Fig. 10) показано распределение наведенного модельного потенциала на БС канавки, которое оказалось асимметричным из-за расположения пучка в момент облучения на краю выступа. Результат формирования наведенных зарядов потоком ВНОЭ, направленным из одной БС на соседнюю по ходу сканирования, отличается, по мнению авторов, от соответствующего, создаваемого противоположным потоком ВНОЭ из этой соседней БС на начальную. Неравенство зарядов, наведенных на соседних БС одной канавки, приводит к различной эмиссии МВЭ из них и к асимметрии пиков кривой ВС. Методом Монте Карло было проведено моделирование формирования ВС от симметричного модельного геометрического профиля канавки и подтверждена асимметрия кривой профиля ВС. Возможность формирования асимметричной формы кривой ВС от канавки с симметричным профилем была подтверждена также и экспериментально. Это свидетельствует о правильности их объяснения роли БС в формировании асимметрии кривой ВС. Асимметрия кривых ВС от геометрически симметричного профиля может быть важным признаком, свидетельствующим о существовании потоков ВНОЭ внутри канавки.

2. Особенности эксперимента

БС являет собой участок наклонной плоскости, которая способна рассеивать падающий пучок в том числе и на соседние близкорасположенные участки. Важны особенности рассеяния потока ВНОЭ, источником которого является пучок, падающий на БС канавки. Описание особенностей рассеяния ВНОЭ в условиях, близких к соответствующим в наших экспериментах, обнаружить не удалось. Были найдены литературные данные о рассеянии электронов от плоских наклонных объектов при сканировании их пучком с большей энергией электронов [5]. Эти особенности могут проявиться и в наших условиях.

В результате наклонного падения пучка на плоскость происходит формирование потока эмитированных из нее электронов, претерпевших неупругое отражение от поверхностных слоев атомов этой плоскости [5]. Часть рассеиваемого потока распространяется вдоль линии геометрического отражения пучка от плоскости, другая часть диффузно рассеивается преимущественно в направлении движения отраженного пучка. Угловая плотность электронов в расходящемся потоке ВНОЭ максимальна в направлении, соответствующему геометрическому отражению падающего пучка [5]. Отражаемая часть потока ВНОЭ распространяется преимущественно в плоскости падения [5]. Число рассеиваемых элек-

тронов при наклонном падении пучка на поверхность увеличивается с ростом угла падения и может быть много больше числа обратно отраженных электронов, возникающих при нормальном падении пучка [5,6].

В отличие от энергии падающих электронов энергия электронов в рассеиваемом потоке ВНОЭ неодинакова. Она неравномерно распределена в диапазоне значений от энергии падающих электронов до почти нулевых значений [6]. Рассеянные электроны с большей угловой плотностью имеют большую энергию ([6], Fig. 5). Эти ВНОЭ испытывают тенденцию к геометрическому отражению от поверхности тем большую, чем выше их энергия и чем больше угол падения первичного пучка [5] (рис. 3.35).

Коэффициент эмиссии ВНОЭ B_0 для ровной поверхности кремния при нормальном падении пучка, а также относительный коэффициент эмиссии B_θ/B_0 при падении пучка под углом θ к нормали к поверхности был рассчитан нами в соответствии с выражением (2) в [6]. Зависимость B_0 от энергии электронов в пучке представлена на рис. 1, *a*, зависимость B_θ/B_0 от θ — на рис. 1, *b*.

Наша канавка сканируется пучком электронов с энергией 0.8 keV, а БС наклонена к ее основанию под углом θ около 7° . Из рис. 1, *b* видно, что в этих условиях интенсивность отраженного потока ВНОЭ более чем в 2 раза превышает соответствующую интенсивность при нормальном падении и только вдвое меньше интенсивности падающего пучка. Кривые получены из формулы, выведенной на основе эмпирических данных. Она может быть использована при энергии электронов более 0.5 keV.

Однако при низкой энергии электронов и на участках поверхности с нанометровыми размерами закономерности рассеяния могут существенно отличаться от соответствующих закономерностей для участков протяженной, наклонной и гладкой поверхностей при падении на них пучка с высокой энергией электронов. Ожидается, что в условиях наших экспериментов будет увеличиваться доля диффузного рассеяния и уменьшаться доля условно отражаемых ВЭ.

Подтверждение возможности рассеяния потока НОЭ наклонными БС (подобно их рассеянию от наклонной плоскости) при низкой энергии падающего пучка мы увидели в результатах модельного эксперимента в [7] (Fig. 26). Там была рассчитана эмиссия МВЭ из трапециевидного выступа в кремнии (по методу Монте Карло), на который падал пучок с диаметром 5 nm. Высота выступа изменялась от 50 до 200 nm при неизменном основании БС размером ~ 9 nm (с изменением угла наклона БС от 10 до 2.5°). При малой высоте выступа кривая ВС на участке НП вблизи подножия БС представляет собой узкий минимум в форме „пичка“ [7] (Fig. 26). С ростом высоты выступа пичок постепенно расширяется, распространяясь на расстояние более 30 nm, что заметно превышает диаметр сканирующего

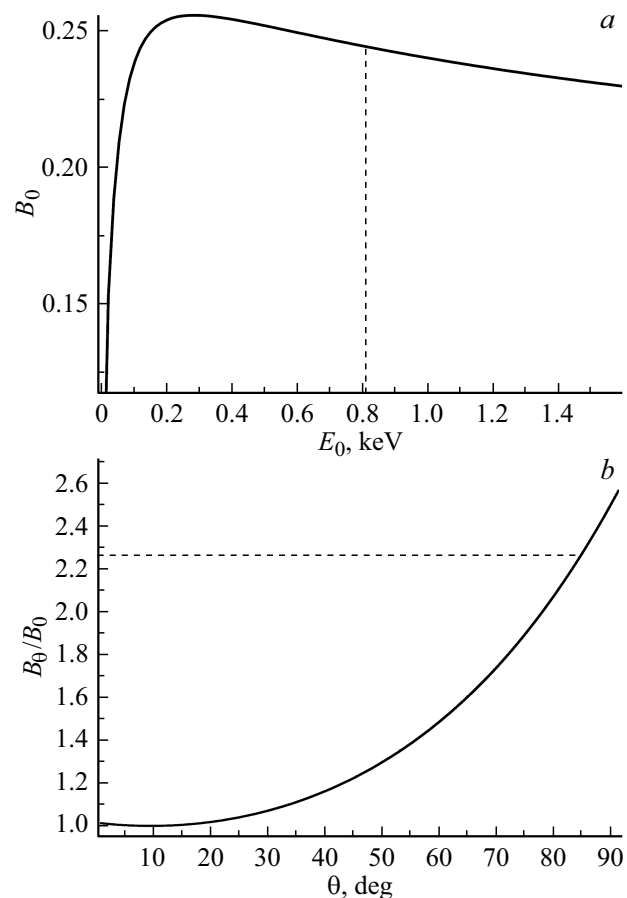


Рис. 1. Зависимость коэффициента эмиссии неупругоотраженных электронов B_0 (ВНОЭ) от энергии электронов в пучке при нормальном его падении на ровную поверхность кремния (*a*), зависимость относительного коэффициента эмиссии $B_\theta/B_0(\theta)$ при падении пучка на эту поверхность под углом θ (*b*). Штриховые прямые обозначают энергию электронов пучка (*a*) и угол падения 83° , соответствующие наклону БС (*b*) к ВО.

пучка. Мы предположили, что образование пичка объясняется отражением потока ВНОЭ от нижнего участка БС, который изменяет эмиссию МВЭ у подножия БС. Отразившись от верхних участков БС, этот поток расширяется и отклоняется на большее расстояние, облучая больший участок НП. Пичок при этом расширяется, уменьшая эмиссию МВЭ по всей длине НП. В таком случае появление пичков на кривой ВС можно было бы считать признаком существования ВНОЭ внутри канавки (подобно асимметрии кривой ВС).

Еще одним признаком отражательного рассеяния пучка внутри канавки и формирования потока ВНОЭ может быть свидетельство его влияния на эмиссию из смежных участков поверхности канавки. Из-за потенциально наклонного падения потоков ВНОЭ на смежные участки их рассеяние может происходить многократно, а интенсивность этих потоков должна быть выше, чем при нормальном падении электронов на них. Поскольку эмиссия МВЭ из сканируемого и из смежных с ним участков

будет регистрироваться детектором МВЭ совместно, то ВС для сканируемой в данный момент времени точки будет больше. Поэтому форма кривой ВС должна зависеть от того является ли выступ одиночным (где нет многократных отражений ВНОЭ) или групповым.

Отличия условий наших экспериментов от соответствующих в других работах связаны с особенностью наведения поверхностных зарядов. В литературном обзоре приведены свидетельства наведения зарядов на поверхности участков рельефных структур, сформированных в диэлектрических материалах. Наши структуры сформированы в кремнии и покрыты лишь тонким слоем естественного окисла. Важным является вопрос о возможности наведения и длительного существования зарядов в этом слое и их влияния на эмиссию МВЭ из поверхностных участков рельефной структуры. Экспериментальное подтверждение такой возможности представлено в [8]. Продолжительное сканирование рельефных структур в НВРЭМ приводило к монотонному изменению формы кривой ВС (и соответственно к постепенному изменению размеров выступов). После прекращения сканирования и выдержке образцов на воздухе размеры выступов частично восстанавливались к исходным значениям. Было сделано предположение, что наведенные заряды существуют и располагаются в слое естественного окисла на поверхности кремния.

Противоположный вывод сделан в [8], хотя рельефные структуры и условия их сканирования практически совпадают с нашими. В этой работе были сопоставлены результаты сканирования таких структур до и после травления естественного окисла, а также оценено изменение эмиссии МВЭ их поверхности кремния, на которой происходит постепенный рост окисной пленки. На наш взгляд, вывод об отсутствии наведения зарядов в естественном окисле на поверхности рельефных структур в кремнии является итогом неверного истолкования части полученных результатов.

При малой энергии падающих электронов в наших экспериментах влияние приповерхностных слоев образца на рассеиваемый поток ВЭ потенциально должно возрасти. При воздействии пучка электронов с энергией 0.8 keV на подложку они способны проникнуть в глубину всего на ~ 20 nm при нормальном их падении [9]. В этой приповерхностной области будут сформированы два зарядовых слоя. Вблизи предельной глубины будет располагаться отрицательный зарядовый слой [10]. Если средняя энергии потока ВНОЭ ~ 0.4 keV, то глубина их проникновения в кремний при нормальном падении пучка на поверхность должна уменьшиться до 5 nm [9]. Из-за наклонного падения этого потока глубина будет составлять несколько единиц нанометра. У самой поверхности формируется положительный зарядовый слой. При таких малых глубинах проникновения электронов в подложку слоистая зарядовая структура может частично накладываться на неоднородную физическую структуру, так как поверхность покрыта слоем естественного окисла толщиной 1.5–2 nm. На ловушках этого слоя могут

образоваться и длительно сохраняться положительные заряды, способные продолжительно влиять на эмиссию МВЭ [11]. Влияние способно реализоваться через изменение работы выхода для эмитируемых МВЭ [5]. Толщина окисного слоя, плотность зарядовых ловушек в нем и условия облучения на разных участках профиля рельефной структуры не одинаковы. В результате и эмиссионные свойства этих участков должны различаться.

3. Эксперимент

Принимая во внимание литературные данные, мы предполагали, что важнейшим признаком существования рассеиваемых внутри канавки потоков ВНОЭ является асимметрия кривой ВС. Необходимо было надежно фиксировать минимальные отклонения от симметричной формы кривой. Для получения РЭМ изображений мы использовали промышленный НВРЭМ при энергии пучка 0.8 keV и токе 8 pA. Скан (изображение выступа, с использованием которого формировались кривые ВС) создавался усреднением изображений 32 кадров в результате последовательных сканирований одного участка поверхности. Кривая ВС формировалась из строк развертки одного скана. Значение ВС в каждой точке кривой получалось в результате усреднения значений сигнала в соответствующих точках всех строк скана. Для исключения высокочастотного шума на кривой ВС амплитуда в каждой ее точке определялась усреднением значений ВС в нескольких соседних точках („бегущим“ цифровым фильтром). Все это должно было устранить влияние невоспроизводимости условий сканирования на форму кривых и на положение опорных точек на них.

Объектами исследований служили канавки с наклонными БС. Их формировали на кремниевой пластине плазмохимическим травлением. Часть выступов располагалась одиночно, часть — в составе периодической решетки (групповые выступы). Профиль выступов имел сложную форму. На относительно широком „пьедестале“ располагалось узкое трапециевидальное возвышение с плоским ВО (см. профиль канавки между выступами на рис. 2). Ширина плоского участка ВО выступов была около 300 nm, нижнего плато (НП) ~ 200 nm, ширина проекции БС всей ~ 50 nm. При полной глубине канавки ~ 355 nm угол наклона БС к НП для трапециевидального участка верхней части БС составил $\sim 7^\circ$. Поверхность всех выступов и канавок покрыта слоем естественного окисла кремния.

По нашей оценке, размер пучка, падающего на БС, был несколько меньше проекции БС на плоскость образца. В случае, если отраженный — рассеянный поток ВНОЭ существует, то он должен в некоторые моменты облучать участки дна канавки вблизи БС. А при сканировании этих участков дна боковые лепестки потока НОЭ, эмитированного из них, должны облучать прилежащие ко дну участки БС. Поэтому участки профиля канавки,

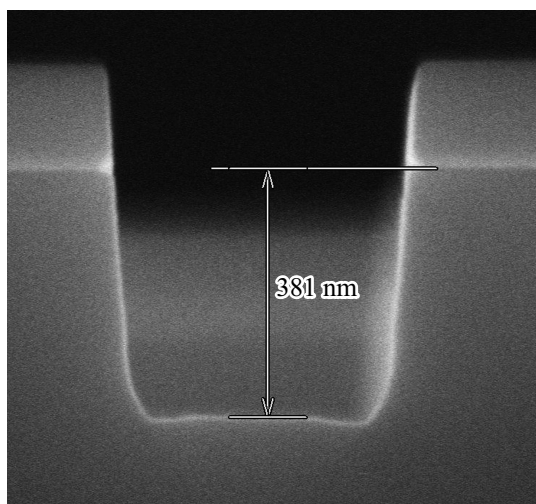


Рис. 2. Профиль канавки между двумя групповыми выступами в наносхеме.

прилегающие к его углам, должны отличаться по уровню эмиссии МВЭ от участков, отстоящих от углов. Ширина участка дна около БС с измененным уровнем эмиссии МВЭ от нее из-за „подсветки“ потоком ВНОЭ должна составлять по нашей оценке 20–30 нм.

Важно экспериментально оценить вовлеченность глубинных участков канавок в формирование нижних участков кривой ВС, а также в формирование асимметрии кривой. Для этого мы подавали на специальный „бустерный“ электрод положительный потенциал. Это позволяло вытягивать МВЭ, эмитированные из боковых поверхностей и из дна узких канавок, к детектору.

4. Результаты и замечания к ним

Источником асимметрии в [2] является направленность сканирования зеркально симметричных в профиле БС. Поэтому мы попытались обнаружить ее, сравнив кривые ВС для групповых и единичных выступов, где нет соседней БС. Другой способ обнаружения — смена направления сканирования групповых выступов (справа налево) с ожидаемым зеркальным изменением формы асимметрии. На рис. 3, *a* представлены кривые ВС, полученные при сканировании группового выступа пучком в двух противоположных направлениях. На рис. 4 — тоже, но для единичного выступа. В обоих вариантах сканирование производилось при отключенном бустере. Для кривых, сканированных в обратном направлении, отсчет координат точек ведется справа налево. Но при отображении ВС слева направо. При существовании асимметрии из-за направления сканирования форма кривых, полученных в результате прямого и обратного сканов, должна быть одинакова при наложении их на одно поле.

Асимметрия кривых ВС заметна и на рис. 3. Она проявляется не только в высоте и форме пиков, но и

в значениях ВС на левом и правом участках кривой, соответствующих НП участков канавок (см. кривую 1 на рис. 3, *b* относительно горизонтальной прямой). Отметим, что асимметрия высоты пиков кривой 1 на рис. 3, *b* отчасти вызвана асимметрией участков НП справа и слева от этих пиков. Как видно на рис. 3, *a*, форма асимметрии пиков изменилась зеркально при изменении направления сканирования. Одинаковый вид асимметрии в пиках на рис. 3, *b* (после компьютерного изменения направления сканирования от обратного на прямое) дополнительно свидетельствует об отсутствии зависимости асимметрии от направленности сканирования. Этот вывод подтверждают результаты сканирования одиночного выступа, представленные на рис. 4. Как видно, асимметрия кривых на рис. 4 даже более заметна, чем на рис. 3. Причем асимметрия высоты пиков почти полностью объясняется асимметрией значений ВС на нижнем плато структуры.

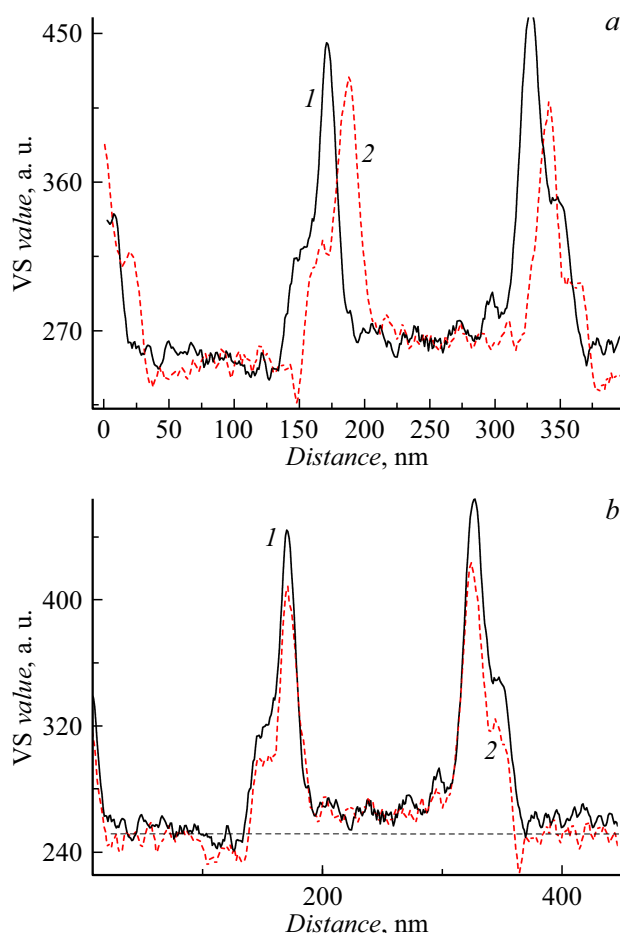


Рис. 3. Кривые ВС на фрагментах (*a, b*) получены от одного фрагмента группового выступа в результате прямого 1 и обратного 2 сканов при отключении бустера. *b* — кривая 1 — повтор 1 из (*f*), кривая 2 — зеркально развернутая кривая 2 из (*f*), наложенная на кривую 1. Штриховая горизонтальная линия зрительно подчеркивает асимметрию кривой ВС на участках нижних плато около выступа (*b*).

Важной деталью полученных кривых ВС являются пички минимумы с внешней стороны от пиков. Эта деталь формы кривых проявляется особенно заметно при энергии электронов пучка менее 1 keV для одиночных выступов [7]. И в нашем случае пички более заметны на кривых, полученных при сканировании одиночных выступов (при отключенном бустере). Ширина пиков составляет около 50 nm. Асимметрия сигнала в пиках связана с асимметрией сигналов на соответствующих участках НП.

Вовлеченность глубинных участков канавок в формирование асимметрии кривых мы проверили, подавая на „бустерный“ электрод положительный потенциал. На рис. 5 показаны кривые ВС от выступов на пластине, полученные в результате их сканирования в режиме без бустера и при его включении. Как видно, степень асимметрии пиков кривых ВС при включении бустера существенно не меняется, однако изменяются уровни ВС на участках кривой, соответствующих ВО и НП. В частности, при включении бустера исчезают пички на кривой, соответствующей одиночному выступу.

Потоки ВНОЭ внутри канавки мы попытались обнаружить сравнивая кривые ВС от групповых и одиночных выступов. Выше было сделано предположение, что добавление ВС к одиночному выступу (ВС соседнего группового выступа) способно изменить эти потоки, что может проявиться на форме кривых ВС. Типичные результаты эксперимента представлены на рис. 5.

Как видно, значение ВС на участке профиля, соответствующем дну канавки во всех режимах сканирования для группового выступа, больше, чем для одиночного. Значение ВС увеличилось также и на участках кривой, соответствующих ВО выступа. Отметим, что увеличение значения ВС для участка ВО меньше, чем для участка НП при отключенном бустере (рис. 5, *a*, кривые 1 и 2). Но при включении бустера ситуация заметно меняется: увеличение ВС на ВО для группового выступа

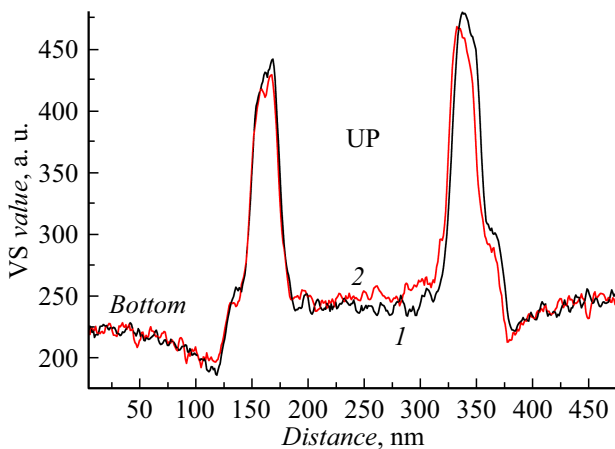


Рис. 4. Кривые ВС, полученные при сканировании одиночного выступа при отключении бустера: 1 — в прямом, 2 — в обратном направлениях. *Bottom* соответствует дну канавки, *UP* (*upper plato*) — верхнему основанию.

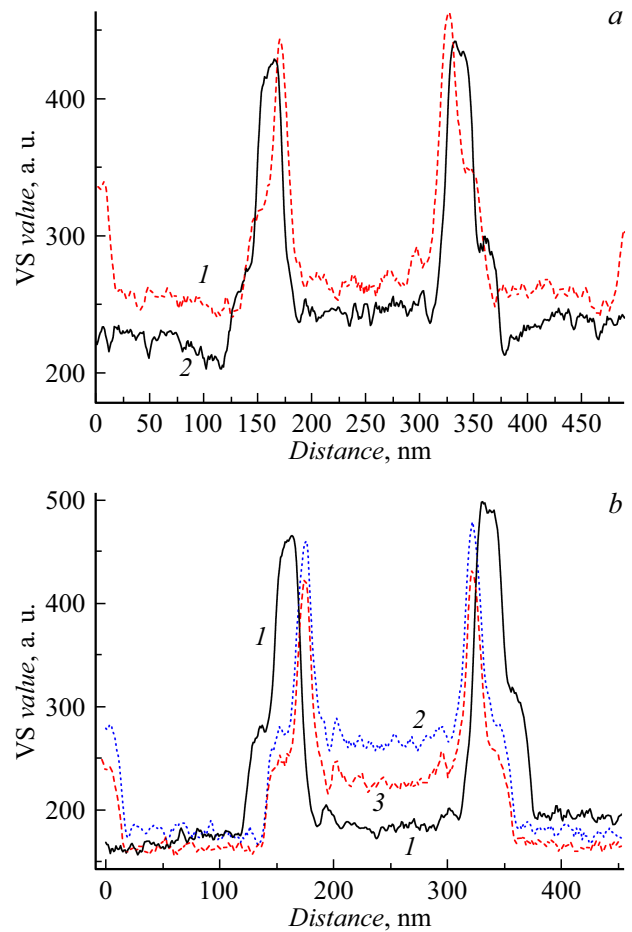


Рис. 5. Кривые ВС, полученные при сканировании одиночного и группового выступов при отключенном и включенном бустере: *a* — в режиме без бустера (1 — для одиночного выступа, 2 — для группового); *b* — сканирование с бустером (1 — для одиночного выступа, 2 — для группового, 3 — то же, но при сканах вдоль ВС).

становится в несколько раз больше, чем для единичного (кривые 1 и 2 на рис. 5, *b*). Похоже, что ВО группового выступа „ощущает“ присутствие соседа.

5. Обсуждение результатов

5.1. Особенности рассеяния ВНОЭ в канавке

О существовании потоков ВНОЭ внутри канавки мы судили по вариациям формы кривых ВС, которые возникают в результате смены условий эксперимента. Из рис. 5, *a* видно, что размещение рядом с одиночным выступом ВС от соседнего выступа групповой структуры увеличило значения ВС на НП и ВО. Это свидетельствует о том, что добавленная ВС „перехватывает“ часть потока НОЭ из сканируемого дна (ранее рассеиваемого в вакуум), вызывая дополнительную эмиссию МВЭ. Примечательно, что в результате добавления ВС к одиночному выступу происходит также рост обоих пиков

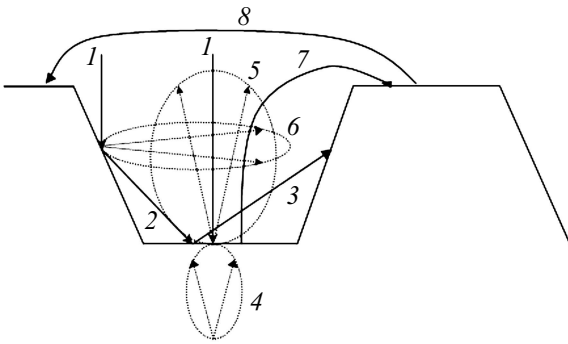


Рис. 6. Схема рассеяния потоков электронов в канавке. 1 — падающий пучок, 2 — ВНОЭ отраженно-рассеянный от БС, 3 — вторичный ВНОЭ отраженно-рассеянный от дна, 4 — НОЭ из подложки, 5 — ВНОЭ рассеянный от дна, 6 — ВНОЭ рассеянный от БС, 7 — поток ВНОЭ из сканируемого НП на ВО выступа, 8 — поток ВНОЭ из сканируемого ВО на соседнее ВО.

кривой ВС. Это свидетельствует о рассеянии потока ВНОЭ от сканируемой БС выступа ко дну, а от дна — к добавленной БС. Возможен также поток от сканируемой БС непосредственно к добавленной БС (рис. 6).

Увеличение ВС зафиксировано и на участке ВО при отключенном бустере (рис. 5, *a*, кривые 1 и 2). Его можно объяснить потоком ВНОЭ, рассеянным от сканируемого ВО к ВО соседних выступов, из которых возникают дополнительные МВЭ (рис. 6, кривая 8). При расстоянии между соседними выступами вдоль рельефной поверхности более 400 нм такое объяснение требует дополнительных подтверждений. Сложнее объяснить этим способом резкое увеличение эмиссии МВЭ из ВО выступа в результате добавления БС при включенном бустере (кривые 1 и 2 на рис. 5, *b* для единичного и группового выступов соответственно). В этом случае ВНОЭ, рассеянные из сканируемого ВО, должны уводиться от соседних ВО полем бустера. Можно предположить, что резкое увеличение ВС на ВО вызвано потоком ВНОЭ, создаваемым внутри канавки, но извлекаемым из нее только бустерным потенциалом. Далее этот поток ВНОЭ частично переносится на ВО, подлежащий сканированию (рис. 6, кривая 7). Однако перенесение извлекаемых из канавки ВНОЭ на ВО и сканирование этого ВО происходят в разные моменты времени и поэтому перенос ВНОЭ из канавки может быть лишь условием для увеличения эмиссии МВЭ из ВО.

Мы предположили, что увеличение эмиссии МВЭ из ВО реализуется двухэтапным процессом. На первом этапе ВНОЭ, рожденные внутри канавки в предшествующий момент времени, перемещаются под действием бустера на ВО, подлежащий сканированию. Осажденные на нем ВНОЭ изменяют состояние его зарядовых ловушек, что приводит к уменьшению работы выхода МВЭ поверхности ВО. При сканировании ее пучком

в последующий момент времени эмиссия МВЭ из ВО увеличивается.

Отметим, что появление в канавке вытягивающего поля не увеличивает, а уменьшает эмиссию МВЭ от ее дна (значение ВС на рис. 5, *a* без бустера ~ 250 а.у., с бустером на рис. 5, *b* — менее 200 а.у.), но при этом увеличивает высоту пиков. Можно предположить, что НОЭ, эмитированные из дна канавки, формируют поток МВЭ из участков дна и БС, слабо влияя на поток ВНОЭ из верхних участков рельефной структуры. Включение бустера перенаправляет эти ВНОЭ от дна к верхней части канавки.

Гипотеза о формировании МВЭ в ходе двухэтапного облучения участков рельефной структуры подтверждается при необычном режиме ее сканирования. В этом режиме канавка сканировалась перемещением пучка вдоль БС, а не поперек ее как обычно. Отметим, что середины смежных участков профиля канавки отделены расстоянием в ~ 150 нм (при диаметре пучка менее 15 нм). При поперечном сканировании поток ВНОЭ, рассеянный первой по ходу сканирования БС, облучает смежные участки канавки вдоль строки сканирования, которые будут далее просканированы пучком через время около десятка микросекунд. При „продольных“ сканах электроны пучка просканируют смежные участки канавки после облучения их потоком ВНОЭ через промежуток времени, больший примерно в несколько сот раз. Повидимому, разные временные промежутки между рассеянным потоком ВНОЭ от соседнего участка и падающим пучком, облучающими один участок профиля канавки, приводят к разной эмиссии МВЭ из них. Результат влияния разных условий сканирования на кривую ВС показан для группового выступа при включенном бустере на рис. 5, *b* (кривая 3 для продольного скана и кривая 2 для поперечного). Видно, что при продольном сканировании значение ВС от дна канавки является наименьшим, при этом уменьшается и значение ВС от ВО, а также высота пиков на участках БС (по сравнению с вариантом поперечного сканирования штрихов).

Результаты этого эксперимента позволили предположить дополнительные детали протекания двухэтапного процесса формирования эмиссии МВЭ. Ранее была представлена гипотеза, что ВНОЭ, рассеянные из участков канавки при поперечном ее сканировании, перемещаются на ВО ближайшего выступа и сенсбилизируют там зарядовые центры. Мы предполагаем, что ВНОЭ, рассеянные БС к НП канавке, также сенсбилизируют зарядовые центры, но на ее дне. Сенсбилизация сохраняется на время более десятка микросекунд, что достаточно для перемещения пучка от БС ко дну канавке. В результате при сканировании дна падающим пучком возникает увеличенная эмиссия МВЭ. Но при продольном сканировании канавки пучок перемещается от БС до дна с временной задержкой в несколько миллисекунд. Из-за этого сенсбилизированные зарядовые центры на дне успевают возвратиться к исходному состоянию, в результате чего эмиссия МВЭ из НП приобретает

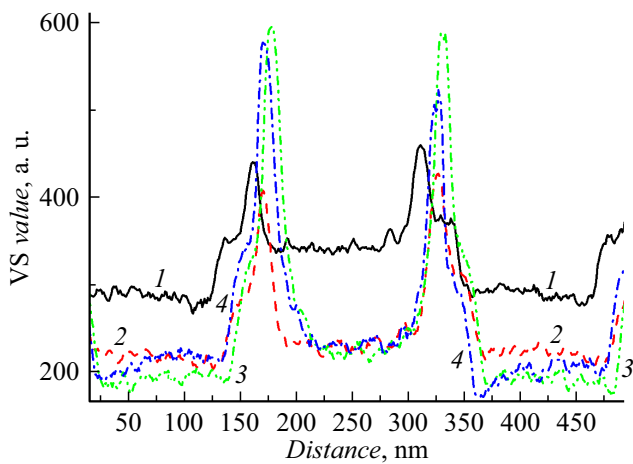


Рис. 7. Кривые ВС, полученные при разной энергии пучка: 1–3 при 0.3, 0.8 и 1.6 keV соответственно (без бустера), 4 — при 1.6 keV и с бустером.

значение, сравнимое с эмиссией от одиночного выступа (кривые 1 и 3 на участках ВО (UB-upper base) и НП (bottom) на рис. 5, b). Как видно, при продольном сканировании эмиссия МВЭ из ВО тоже возрастает по сравнению с эмиссией от одиночного выступа, но заметно меньше, чем при поперечном сканировании (кривые 3 и 1 на участке ВО на рис. 5, b). Это означает, что сенсibilизированное состояние зарядовых центров на поверхности участков канавки из-за их предоблучения должно продолжаться от десятков микросекунд до единиц миллисекунд.

Особенности двухэтапного процесса поднимают важный вопрос: почему поток ВНОЭ и сканирующий пучок, приводя совместно к увеличению эмиссии МВЭ, поразному воздействуют на поверхность кремния. Различие в воздействии этих групп электронов мы связали с их энергией. В [1] представлены результаты эксперимента по формированию изображений рельефной структуры на кремниевой подложке при сканировании ее пучками электронов с разной энергией. Оказалось, что при увеличении энергии электронов пучка от 0.3 до 2 keV эмиссия МВЭ из одних и тех же участков заметно уменьшается. Подобную зависимость между этими величинами мы подтвердили при сканировании наших канавок. На рис. 7 представлены кривые ВС, полученные при разных значениях энергии пучка, падающего на поверхность канавки. Видно, что ВС от НП канавки уменьшается при увеличении энергии электронов в пучке.

Поскольку ВНОЭ рождаются с энергиями в широком спектре значений [5], то должны появляться и такие, энергия которых меньше, чем у электронов пучка. Падая на дно канавки, они способны модифицировать состояние зарядовых центров, которые располагаются, вероятно, у самой поверхности слоя окиси кремния. На этапе сканирования дна пучком его электроны проскакивают эти центры, не меняя их состояние. Но для МВЭ,

генерируемых НОЭ из глубины подложки, уменьшается работа выхода.

Ситуация меняется при продольном сканировании. Рассеянные ВНОЭ облучают НП до прихода туда падающего пучка на несколько миллисекунд раньше. Поскольку зарядовые центры сохраняют свое модифицированное состояние меньше время, то через указанный промежуток времени электроны пучка с большей энергией „протыкают“ слой этих зарядовых центров, не изменяя их состояния. Поток эмитированных МВЭ, созданный обратно рассеянными НОЭ из подложки, уже не способен преодолеть потенциальный барьер, создаваемый зарядовыми центрами, вернувшись в свое исходное состояние. В результате эмиссия таких МВЭ уменьшается.

5.2. Асимметрия кривой ВС

Источником асимметрии пиков на кривых ВС является, предположительно, неортогональность пучка НВР-ЭМ к сканируемой поверхности. Действительно, оказалось, что вид и степень асимметрии пиков даже качественно не отражают возможное геометрическое различие соседних БС. Действительно, из кривых 1 и 2 на рис. 7 (полученных при 0.3 и 0.8 keV соответственно) видно, что левые пики меньше правых, а для кривых 3 и 4, полученных при энергии пучка 1.6 keV, — правые пики меньше левых. Для кривых 3 и 4, полученных при разных состояниях бустера, степень асимметрии также различается. Таким образом, асимметрия пиков кривых существенно зависит от условий сканирования и от того, являются ли выступы единичными или групповыми. Другое важное наблюдение — асимметрия в пиках кривых в значительной степени (а для одиночного выступа почти полностью) определяется асимметрией значений ВС на НП (рис. 4). Асимметрия ВС на этих участках кривых возникает, предположительно, из-за разного рассеяния ВНОЭ от асимметричных БС. Более крутая БС (с большим углом падения на нее пучка) формирует рассеянный поток ВНОЭ, направленный к подножию БС, причем с несколько большей энергией, чем подобный поток от соседней БС (как в [6]). Эти потоки рождают пички-минимумы на кривой ВС с внешней стороны от ее пиков. Менее крутая БС рождает меньший по глубине пичок (рис. 4), рассеивая ВНОЭ с несколько меньшей энергией и вызывая поэтому большую эмиссию МВЭ. Это приводит к асимметрии значений ВС на участках кривых, соответствующих левому и правому НП, способствуя соответствующей асимметрии пиков кривой. Наибольшая степень асимметрии кривой ВС выявлена на участках НП для одиночного выступа при выключенном бустере (рис. 4, 5, a). Наименьшая степень асимметрии зафиксирована для групповых выступов на кривых 2, 3 (рис. 5, b).

Мы объяснили это следующим образом. В результате сканирования поверхность НП канавки должна заряжаться также положительно, как и ВО ([2] Fig. 10). По

этой причине часть эмитированного потока НОЭ будет рассеиваться вдоль его поверхности. Частицы этого потока, хаотично перемещаемые вдоль поверхности по разным направлениям, равномерно распределяются по всем участкам дна. В результате взаимодействия НОЭ с поверхностными ловушками происходит выравнивание потенциально неравномерного распределения зарядов на НП вблизи основания БС из-за воздействия потоков ВНОЭ от БС. Кроме выравнивания плотности зарядов на протяженных участках НП исчезают и пикки на кривой ВС (кривые 1 на рис. 5, а и все остальные на рис. 5, а, б).

5.3. Итоги обсуждения

Обнаружены признаки того, что закономерности рассеяния пучка наклонной плоскостью (для электронов с высокой энергией) воспроизводятся для объекта в виде боковой стенки (БС) канавки в кремнии при падении на нее пучка с энергией электронов 0.8 keV. Эксперимент со сравнением ВС от единичного и групповых выступов (при „добавлении“ БС от группового выступа к одиночному) свидетельствует об „отражении“ части рассеиваемых внутри канавки „внешних“ обратно отраженных электронов (ВНОЭ) от одних участков канавки к другим. Вероятно многократное рассеяние ВНОЭ внутри канавки, в котором важная роль принадлежит ее дну. Каждый из участков канавки, облученный ВНОЭ, вносит вклад в формирование всех участков кривой ВС (включая изменение значения ВС на ВО выступа). Из-за „отражения“ ВНОЭ от БС появляется неравномерность облучения дна канавки, что приводит к неравномерности эмиссии МВЭ из него. Это предположение объясняет формирование пиков-минимумов на кривой ВС с внешней стороны от ее пиков.

Особенно заметным явлением оказалось увеличение эмиссии МВЭ из ВО, обнаруженное при сравнении кривых ВС от одиночных и групповых выступов. Вероятно, это происходит из-за переноса ВНОЭ от облучаемого участка ВО к соседним вдоль поверхности образца. Возможность такого переноса выявлена при моделировании рассеяния ВНОЭ методом Монте Карло в [2]. Обнаруженное явление проявляется особенно заметно при включенном бустере. В этом случае „донные“ ВНОЭ, возникших внутри канавки, направляются к выходу из ее апертуры. Часть из них вероятно попадает на ВО соседнего выступа, что и приводит к изменению эмиссии МВЭ из него. Однако „донные“ ВНОЭ создаются пучком раньше сканирования ВО и поэтому делать это непосредственно не могут.

Мы предположили, что рост эмиссии МВЭ из ВО обусловлен двухэтапным процессом, в котором важную роль играют поверхностные заряды. На первом этапе часть „донных“ ВНОЭ сенсibiliзирует зарядовые ловушки на поверхности ближайшего ВО. При последующем его сканировании НОЭ, эмитированные из поверхности ВО, вызывают эмиссию МВЭ, которые выходят из сенсibiliзированной поверхности. Предположение о

двухэтапной реализации процесса увеличения эмиссии МВЭ из ВО подтверждается сравнением результатов сканирования канавки в продольном и поперечном направлениях. При продольном сканировании смежные участки рельефа сканируются не в ходе одной развертки падающего пучка, а через некоторое время. Это видимо и приводит к исчезновению обсуждаемого увеличения эмиссии из ВО.

Поскольку зарядовые ловушки на смежном участке канавки располагаются в тонком слое окисной пленки, то могут изменять свое состояние лишь при определенной энергии падающих на них электронов. По этой причине падающий пучок с энергией электронов, несоответствующей уровню энергии ловушки, не способен модифицировать их состояние. Однако энергия ВНОЭ может варьироваться в широком диапазоне значений, так же как это происходит для ВНОЭ, рассеянных наклонной плоскостью в [5]. Поэтому в потоке ВНОЭ должны существовать в числе прочих электроны с относительно малой энергией, способной изменить состояние ловушек на поверхности ВО или НП. Возможность увеличения эмиссии МВЭ из поверхности, которая облучается пучком с малой энергией электронов, подтверждена результатом проведенного нами эксперимента (рис. 7), а также литературными данными.

Обсуждаемое увеличение эмиссии МВЭ из участков рельефа, которые в следующий момент подвергается сканированию пучком, можно объяснить следующим образом. На предварительном этапе из облучаемых пучком участков рельефа формируется поток ВНОЭ, облучающий участок, подлежащий сканированию в следующий момент времени. Этот поток с относительно небольшой энергией электронов сенсibiliзирует смежный участок канавки или соседнюю поверхность рельефа за ее пределами на короткое время. Следующий за потоком ВНОЭ падающий пучок вызывает поток НОЭ из кремниевой подложки. Он эмитирует МВЭ с уменьшенной работой выхода из поверхности.

Заключение

Подтвердилось, что существенную роль в формировании МВЭ из участков поверхности наноканавки (создающих ее РЭМ изображение) играют потоки неупругоотраженных вторичных электронов, рассеиваемых внутрь наноканавки — ВНОЭ. Они рождаются падающим пучком с энергией электронов 0.8 keV и рассеиваются боковыми стенками не только (как предполагалось) диффузно, но и отражательно. Отражательное рассеяние может быть многократным, определяющий вклад в него вносит дно канавки. Потоки ВНОЭ, рассеянные к соседним участкам канавки, рождают дополнительные МВЭ, которые суммируются с потоком МВЭ от сканируемой точки. Это изменяет ВС от сканируемой точки и изменяет РЭМ изображение канавки, которое получилось бы в отсутствие ВНОЭ.

Подтверждены результаты модельных расчетов по способности ВНОЭ выходить за пределы канавки и рассеиваться вдоль поверхности образца на расстояние, превышающее размер канавки. Это позволяет объяснить экспериментально зафиксированное влияние сканируемого участка профиля рельефа на эмиссию МВЭ из следующего по ходу сканирования участка.

Роль поверхности участков канавки не сводится лишь к формированию потоков ВНОЭ (как представлено в [8]). Подтверждено, что ВНОЭ воздействуют на состояние поверхности соседних участков. Вероятно, они модифицируют зарядовые ловушки на их поверхности на время, сравнимое с временем развертки строки изображения.

Для широкой канавки с небольшой глубиной и полостями ВС влияние потоков ВНОЭ на форму кривой ВС должно уменьшаться. В этом случае формирование РЭМ изображения может происходить преимущественно посредством генерации эмитированных МВЭ, создаваемых потоком НОЭ из подложки без их рассеяния в канавке. Такая концепция генерации МВЭ легла в основу метода измерения размеров наноструктур в [12]. Эти представления позволяют оправдать методическое упрощение формы краевых участков кривых ВС с исключением из них пиков и пичков. Кривые ВС с упрощенной формой используются далее для определения по ним линейных размеров наноструктур. Однако именно на этих краевых участках кривых расположены опорные точки, соответствующие границам областей профиля, положение которых должно быть указано максимально точно.

Результаты работы могут помочь в усовершенствовании представления о рассеянии вторичных электронов в наноразмерных канавках. В практическом плане они позволят создать более совершенную методику линейных измерений наноструктур по кривой ВС, что даст возможность точнее отображать на ней положение геометрических границ этих наноструктур.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Z.J. Ding, C. Li, B. Da, J. Liu. *Sci. Technol. Adv. Mater.*, **22** (1), 932 (2021). DOI: 10.1080/14686996.2021.197659
- [2] L. Grella, G. Lorusso, D.L. Adler. *Scanning*, **25**, 300 (2003). DOI: 10.1002/sca.4950250606
- [3] R. Dixon, H. Bosse. *Recommendations of CCL/WG-N on: Realization of SI Metre Using Silicon Lattice and Transmission Electron Microscopy for Dimensional Nanometrology* (Version 1CCL-GD-MeP-2 30/04/2019), documents/20126/41489670/CCL
- [4] J. Villarubia. *NIST Simulation of E-beam Inspection and CD-SEM in-line Metrology, Final Report* (December 10th (2010), (Accessed August 17, 2023), <http://ismi.sematech.org>
- [5] И.М. Бронштейн, Б.С. Фрайман. *Вторичная электронная эмиссия* (Наука, М., 1969), 407 с.
- [6] P-F. Staub. *J. Phys. D*, **27**, 1533 (1994). DOI: 10.1007/s12043-007-0054
- [7] Y.G. Li, S.F. Mao, Z.J. Ding. *Monte Carlo Simulation of SEM and SAM Images*. In: *Applications of Monte Carlo Method in Science and Engineering* (2011), 231 p. DOI: 10.5772/1617
- [8] M. Kadowaki, A. Hamaguchi, H. Abe, Y. Yamazaki, S. Borisov, A. Ivanchikov, S. Babin. *Proc. SPIE*, **7272** (727231), 1 (2009). DOI: 10.1117/12.814036
- [9] K. Kanaya, S. Okayama. *J. Phys. D*, **5** (1), 43 (1972). DOI: 10.1088/0022-3727/5/1/308
- [10] Э.И. Рау, А.А. Татаринцев, Е.Ю. Зыкова, И.П. Иваненко, С.Ю. Купреенко, К.Ф. Миннебаев, А.А. Хайдаров. *ФТТ*, **59** (8), 1504 (2017). DOI: 10.21883/FTT.2017.08.44749.460
- [11] Ю.В. Ларионов, Ю.В. Озерин. *ФТТ*, **62** (6), 947 (2020). DOI: 10.21883/FTT.2020.06.49356.608
- [12] Ю.А. Новиков, А.В. Раков. *Труды ИОФРАН. Механизмы вторичной электронной эмиссии рельефной поверхности* (Наука, М., 2006), с. 143.