13

Анализ данных о распределении зарядов в канавках, сканированных в растровом электронном микроскопе

© Ю.В. Ларионов

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

Поступило в Редакцию 4 августа 2025 г.
В окончательной редакции 22 мая 2026 г.
Принято к публикации 20 июля 2026 г.

Важнейшей причиной неопределенности результатов измерений линейных размеров при их контроле в растровом электронном микроскопе является вариация зарядов, наводимых электронным пучком на краевых участках сканируемого элемента. Неопределенность значений особенно высока для канавок с нанометровыми размерами. Проведен анализ литературных данных о наведенных поверхностных зарядах внутри наноканавок. Данные были получены в результате компьютерного моделирования процессов рассеяния вторичных электронов в канавках по методу Монте-Карло. Результаты анализа позволили выявить закономерности в картине распределения этих зарядов и объяснить их особенностями процессов их наведения. Проанализированы также литературные данные о вариациях формы кривых видеосигнала в растровом электронном микроскопе, которые приводят к неопределенности значений линейных размеров канавок. Вариации формы кривых видеосигнала, возникающие при изменении условий сканирования канавок, объяснены изменением характера наведения поверхностных зарядов на краях нанорельефа. Характер наведения зарядов был выявлен с помощью модельных расчетов.

Ключевые слова: ширина наноканавки, зарядовый рельеф поверхности, расчеты методом Монте-Карло, рассеяние электронов поверхностью, кривые видеосигнала в РЭМ.

DOI: 10.61011/JTF.2026.12.64072.211-25

Введение

Создание трехмерных транзисторных структур открывает новые перспективы развития наноэлектроники. Одной из самых известных трехмерных структур является, возможно, полевой транзистор с вертикально расположенными на подложке выступами, подобными плавникам рыб — FinFET-структуры. Их высота составляет несколько сотен нанометров при ширине — несколько десятков. Они часто располагаются рядом, формируя на подложке периодическую структуру — решетку (M-FinFET). Важной характеристикой таких структур, покрытых обычно тонким слоем диэлектрика, является распределение электрических зарядов, располагающихся на их боковых стенках (БС) [1]. Заряды влияют на работу такого „плавника“, однако их плотность и распределение по площади БС практически невозможно контролировать прямыми методами контроля (например, с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ). Поэтому для такого контроля используются косвенные методы измерений [2].

Пучок РЭМ как источник наведенных зарядов и проблем измерения размеров. Одним из основных методов контроля наноструктур (не только типа FinFET) на этапе их изготовления является растровая электронная микроскопия (РЭМ). Наиболее важным параметром, который определяется с его помощью, считается ширина (линейный размер) сформированной структуры. Оказалось, что значение ширины может меняться при смене условий сканирования в РЭМ.

Важнейшей причиной этого может быть вариация электрических зарядов, наводимых пучком РЭМ [3] на краевых участках сканируемого элемента [4]. Вариация зарядов происходит из-за воздействия сканирующего пучка электронов на его поверхность, что приводит к эмиссии из нее вторичных электронов (ВЭ). Часть этих ВЭ рассеивается по участкам поверхности сканируемой структуры вокруг точки падения пучка, высаживается около ее краев и изменяет заряд на их поверхностных ловушках [5]. Наведенные заряды изменяют значение работы выхода медленных вторичных электронов (МВЭ), которые будут эмитироваться из этих участков поверхности и формировать их РЭМ-изображение.

Характер эмиссии МВЭ от краев элементов усложняется, если облучаемая поверхность представляет собой участок структуры с глубоким рельефом, так как наведенные заряды возникают и на ее БС [5]. БС будут особенно влиятельными источниками ВЭ в узких нанометровых канавках, где эмитированные ВЭ способны наводить заряды на соседних БС. Часть этих ВЭ будет выходить из наноканавки, рассеиваться вокруг нее и высаживаться на зарядовые ловушки вблизи ее границ. В результате заряды, наведенные на БС и на участках около них, будут совместно влиять на эмиссию МВЭ из этих областей при последующих сканах.

Практически важным следствием возникновения наведенных зарядов на поверхности БС и около них является искажение ими РЭМ-изображения сканируемого элемента, приводящее к вариации значений линейных размеров, измеряемых по кривойвидеосигнала (ВС). Кривая обычно содержит пики, которые примерно соответствуют геометрическим границам выступа или канавки. Из-за наведения зарядов на БС форма и расположение пиков на кривой ВС изменяются. Поскольку ширина элементов определяется по расстоянию между точками, выделенными на соседних пиках, то такая вариация зарядов приведет к неопределенности в значениях этой величины.

Наведение зарядов на поверхности соседних наноструктур определяется особенностями рассеяния ВЭ в узких нанометровых канавках, которые довольно скупо отражены в литературе. Из-за отсутствия понимания того, как протекают процессы рассеяния в них, алгоритмы программ измерения размеров обычно основываются на эмпирическом подходе. Программа осуществляет подгонку формы зафиксированной кривой ВС к наиболее близкой из имеющихся в наборе форм, ранее уже зафиксированных. Это ограничивает возможность выявления величин, влияющих на результат измерений.

Целью настоящей работы является анализ информации из доступных публикаций для выявления новых явлений, связанных с рассеянием ВЭ и наведением зарядов в наноканавках, а также формирование цельной картины происходящих там процессов.

1. Результаты модельных расчетов рассеяния ВЭ и их анализ

Наиболее значимым результатом исследования является картина трехмерного распределения электрических зарядов по поверхности участков нанорельефа, который располагается на площади, заметно превышающей площадь сканируемых элементов топологии [4]. Модельная картина получена следующим образом.

Для каждого модельного электрона, падающего на точку, расположенную на линии сканирования, был произведен расчет вероятности его рассеяния атомами подложки с образованием ВЭ. Далее было смоделировано перемещение и рассеяние каждого возникшего ВЭ, который направлялся к поверхности. Затем отслеживалась эмиссия таких ВЭ из поверхности в вакуум, их перемещение в вакууме до столкновения с соседними участками поверхности канавки. Потом было промоделировано проникновение ВЭ из вакуума в приповерхностный слой, захват их зарядовыми ловушками под поверхностью этих участков. Это дало возможность рассчитать электрическое поле в канавках около зарядовых ловушек. Затем в ходе финишного сканирования нанорельефа были визуализированы треки ВЭ в канавках, измененные наведенными зарядами. Процедура производилась многократно и продолжалась до достижения

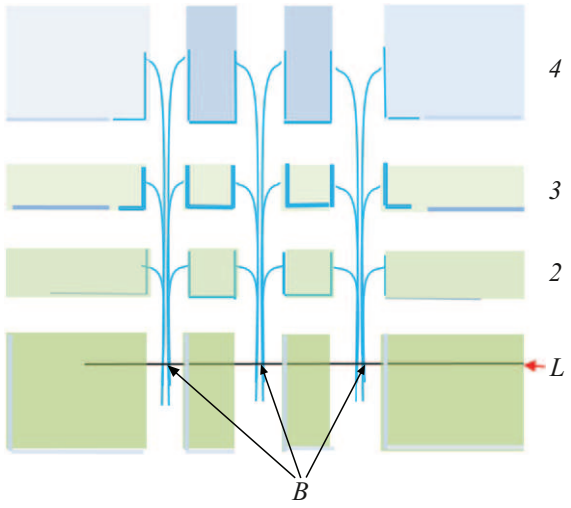


Рис. 1. Схема расположения выступов и канавок (основана на изображении выступов на рис. 6 в [4]). Расстояние между соседними рядами около 500 nm.

устойчивых значений плотности зарядовых центров на участках поверхности. Модель поверхности отображала собой участок топологии наносхемы.

1.1. Описание модельного объекта 1

Сканируемые участки структуры в [4] представляли собой последовательность выступов и канавок, расположенную вдоль прямой линии. Модельные выступы являлись аналогом выступов, сформированных в слое резистивной маски, расположенной на кремниевой подложке и имели вертикальные БС. Двухмерная схема их расположения в виде набора прямоугольников представлена на рис. 1. Модельное облучение этих структур падающими электронами проводилось в отдельных точках, расположенных вдоль линии сканирования (линия L на рис. 1). Соседние не сканируемые элементы структуры в виде нескольких таких же последовательностей участков располагались рядами вдоль сканируемой последовательности (ряды *2–4* на рис. 1). Совместно со сканируемой последовательностью выступов они составили матрицу на площади $2 \times 2\,\mu\mathrm{m}^2$.

Вариация цвета на участках верхнего основания (ВО) выступов от зеленого до бледно-синего отображает знак наведенных на них зарядов. Отрезки прямых, окаймляющих прямоугольники выступов, обозначают наведенные заряды на БС выступов.

Зеленый цвет ВО выступов указывает на положительные или нейтральные заряды, синий — на отрицательные. Отрезки прямых линий, окаймляющие выступы, обозначают проекции БС. Их синий цвет указывает на отрицательный знак зарядов на них, их ширина отражает плотность наведенных зарядов. Синими линиями между выступами показаны вероятные траектории распростра-

нения ВЭ в канавках. L — линия сканирования, B — участки дна, просканированные пучком.

1.1.1. Анализ полученной картины распределения зарядов

Отметим особенности распределения, оставленные без внимания авторами публикации.

Из рис. 1 видно, что наведенные отрицательные заряды располагаются на участках поверхности выступов, расположенных не рядом со сканируемой линией, а на участках выступов удаленных от нее, находящихся в верхней части рисунка. Видно, что плотность отрицательных зарядов растет с удалением от линии сканирования. Наиболее высокая плотность зарядов обнаружилась на БС выступов, которые были расположены вдоль трех канавок, отходящих перпендикулярно от линии сканировании. Наибольшая плотность отрицательных зарядов на БС, расположенных вдоль этих канавок, оказалась в ряду выступов *3*. Заряды на БС обнаружились даже в четвертом ряду выступов, еще более удаленных от линии сканирования. Меньшая плотность зарядов выявилась на БС выступов, расположенных вдоль всех рядов параллельно линии сканирования (она показана бледно зелеными и голубыми отрезками прямых разной толщины на рис. 1). Еще меньшая плотность зарядов оказалась на БС выступов из второго ряда, которые расположены напротив БС сканированных выступов. Наименьшая плотность отрицательных зарядов оказалась на БС самих сканированных выступов.

Эти наблюдения указывают на то, что основные источники ВЭ, заряжающие БС выступов, находятся внутри перпендикулярных канавок. Этими источниками могут быть участки дна канавок, на которые указывают стрелки на рисунке.

1.2. Описание объекта 2

Рассмотрим теперь распределение наведенных зарядов по участкам БС, расположенных вдоль „перпендикулярных“ канавок. Наведенные заряды на всех этих БС распределены неравномерно вдоль вертикальной оси выступов (рис. 2). Знак зарядов на них изменяется от положительного или нейтрального на участках, расположенных вблизи ВО, до резко отрицательного в средней части БС. У основания всех БС плотность отрицательных зарядов уменьшается. Особенно сильные вариации плотности зарядов обнаружились на БС, которые находятся на выступах третьего ряда, расположенных вдоль „перпендикулярных“ канавок.

1.2.1. Анализ полученной картины, продолжение

Детали картины распределения зарядов на БС на рис. 1 формируют представление, что эти заряды не могут быть наведены ВЭ, эмитированными из участков БС просканированных выступов (расположенных

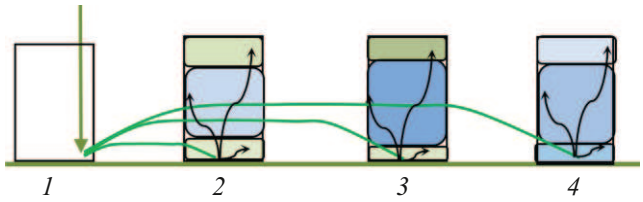


Рис. 2. Схема распределения зарядов на БС, расположенных вдоль перпендикулярных канавок (основана на fig. 6 [3]). *1* — обозначает БС сканируемого выступа (стрелка на нем указывает направление движения электронов пучка), *2* — БС выступа, соседнего со сканированным, *3*, *4* — БС выступов из последующих рядов. Оттенки цвета на участках БС указывают на знак и плотность зарядов. Синий цвет обозначает отрицательный заряд, зеленый — нейтральный заряд. Жирная прямая вдоль оснований выступов — проекция дна „перпендикулярной“ канавки. Зеленые кривые от участка дна около БС *1* до участков дна около выступов *2*–*4* предполагаемые треки ВЭ от первичного источника ВЭ до промежуточных источников ВЭ на дне канавки вблизи БС соседних рядов. Черные кривые со стрелками от промежуточных источников ВЭ на дне к близлежащим участкам БС обозначают треки дополнительных ВЭ (см. в тексте).

вдоль прямой L на рис. 1). Действительно, наведенные заряды на БС „перпендикулярных“ выступов обнаруживаются около дна канавки на глубине до 500 nm. Отметим, что наибольшая глубина проникновения электронов пучка с энергией 600 eV в выступ и, следовательно, глубина, с которой могут быть эмитированы ВЭ из сканированных выступов, достигают только несколько десятков нанометров. Это означает, что источником ВЭ, наводящих заряды на БС у дна канавки, могут быть участки ее дна. Их источник находится, вероятно, на участках B, сканированных пучком (указаны стрелками на рис. 1). Треки этих ВЭ обозначены синими линиями на рис. 1 и зелеными линиями на рис. 2. Отметим, что наведенные заряды практически отсутствуют на БС самих сканируемых выступов, также расположенных вдоль перпендикулярных канавок (см. бесцветную БС выступа *1* на рис. 2). Это вызывается, возможно, более свободной диффузией ВЭ в канавку между первым и вторым рядами выступов на рис. 1.

Поток ВЭ, эмитированный из дна около выступа *1*, далее продвигается вдоль перпендикулярной канавки, „поджимаемый“ с боков полем отрицательных зарядов, наведенных на участках БС. Они перемещаются вблизи не заряжаемого дна канавки на значительное расстояние (до нескольких микрометров), слабо рассеиваясь по пути и наводя отрицательные заряды на попутных БС. Этот путь для них оказывается более предпочтительным, чем более короткий путь вверх к выходу из апертуры канавки. Перемещаясь вдоль него, ВЭ взаимодействуют с незаряженным дном канавки, вызывая эмиссию новых ВЭ из его поверхности. Эти ВЭ захватываются ловушками на ближайших БС и заряжают их, формируя отрицательный заряды на верхних участках этих БС

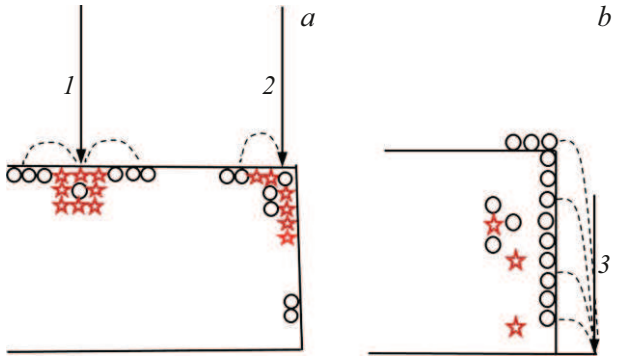


Рис. 3. Формирование зарядов на участках поверхности ступеньки при падении на них пучка на позициях: *1* — ВО, *2* — край ВО, *3* — НП. Звездочки отображают положительные зарядовые центры, кружки — отрицательные. Штриховые линии — треки ВЭ, эмитированные из участков падения пучка к соседним участкам поверхности. Фрагмент *a* — при облучении ВО, *b* — при облучении НП.

(см. треки этих ВЭ в виде черных кривых со стрелками на рис. 2).

Таким образом, поток ВЭ, эмитированный из локальных участков дна *B* (на рис. 1), приобретает характер пучка, в котором рассеивание ВЭ ограничено и по вертикали, и по горизонтали. По пути распространения пучка вдоль канавки все больше ВЭ в нем отклоняются от оси канавок. Достигая удаленных БС, расположенных вдоль этих канавок, ВЭ модифицируют их зарядовые центры по всей площади БС более равномерно (рис. 2). Часть ВЭ из этого потока осаждается на участки дна вблизи между соседними БС канавки в рядах *2* и *3* (зеленые линии на рис. 2). Там они вызывают дополнительную эмиссию ВЭ из дна канавки (черные кривые со стрелками на рис. 2). Эти дополнительные ВЭ также создают отрицательные заряды на ближайших к ним БС.

Подтверждение такому способу наведения зарядов на БС выступа представлено в [5]. Там также проведено моделирование эмиссии ВЭ из участков поверхности рельефа с использованием метода Монте-Карло, но для ступеньки, сформированной в слое окиси кремния на кремниевой подложке. Данные расчетов подтвердили, что и в этом случае на участках БС появляются отрицательные заряды. Это происходит в результате воздействия на БС тех ВЭ, которые эмитировали из ближайшего к участку дна при облучении его падающим пучком ([5], fig. 3, *c*, и рис. 3, *b*, пучок *3*). Эти данные подтверждают вывод, сделанный выше относительно того, что источником ВЭ, наводящим заряды, является дно или нижнее плато (НП) рельефной структуры (как это показано на рис. 3, *b*).

В [5] представлены также результаты наведения зарядов на участке ВО, расположенного в стороне от ступеньки (рис. 3, *a*, поз. *1*). В этом случае поверхность круга с радиусом ~ 50 nm вокруг точки падения заряжается положительно ([5], fig. 5, *a*). В кольцевой области, вокруг „положительного“ круга на поверхности ВО, возникают отрицательные заряды. Из изображения треков в [5] видно, что наведение отрицательных зарядов на ВО вызвано падением на его поверхность тех ВЭ, которые эмитировали из точки падения пучка и рассеялись по всем направлениям к кольцевой области (рис. 3, *a*, пучок *1*). При сканировании пучком отдельной точки на ВО, заряд локальных ловушек вблизи от нее будет изменяться от отрицательного к положительному и вновь к отрицательному. Итоговый заряд в этой точке после прохождения пучка может отсутствовать.

Однако ВЭ, которые вблизи края ВО направились от облучаемого участка к БС, оставили после себя, как видно, положительные заряды на самых верхних ее участках ([5], fig. 3, *b* и рис. 3, *a*, поз. *2*). Условие компенсации этих зарядов электронами, эмитированными из дна канавки, остаются неизвестными. В итоге, на краю ВО вблизи канавки может появиться некомпенсированный заряд.

Картина распределения наведенных зарядов на БС ступеньки дополняется в [5] изображениями треков ВЭ, эмитированных из участков поверхности, соседствующих со ступенькой (fig. 5 в [5] и на рис. 3, *b*, штриховые линии). Из fig. 5 в [5] видно, что проекции отдельных треков ВЭ на плоскость рисунка, которые исходно отклонялись от точки падения пучка на НП по направлению к БС, развернулись вдоль нее (не показано на рис. 3, *b*). Заметная часть таких треков, которая исходно направлялась вверх, отклонилась в сторону от БС. Если бы они были рассеянны в канавке, то смогли бы достичь не только верхних участков соседней БС, но и участков ВО на соседних выступах (рис. 1, 2, выступ в ряду *4*), наводя и там отрицательные заряды. Как видно, заряженные БС способны управлять движением ВЭ, рожденных на НП.

Это подтверждает предположение, что и те БС, которые на рис. 1 уже приобрели отрицательный заряд, также способны направлять движение ВЭ вдоль канавок. Самые энергичные из них минуют ближайшую пару БС с высокой плотностью зарядов (рис. 2, БС *3*) и подвергаются рассеянию только вблизи следующей пары БС. В результате их воздействие на БС становится заметным лишь на выступах, расположенных в четвертом ряду.

2. Электрическое поле в канавке и его влияние на заряды на БС

В [6] на основе модельного расчета было показано, что дополнительное поле, создаваемой бустерным потенциалом, вытягивающим МВЭ электроны к аноду (1 kV/mm), почти не проникает в канавку с шириной 300 nm, а поэтому не может изменять движение ВЭ в ней. Результат подкреплен расчетом формы модельной кривой ВС, которая не менялась при вариации состоянии бустера. Иной вывод о влиянии бустерного потенциала на движение ВЭ в канавке можно сделать из данных, представленных в [7]. Результаты расчетов

свидетельствуют, что внешнее электрическое поле с напряженностью в 100 kV/mm проникает в трапецеидальную канавку глубиной 500 nm и шириной около 50 nm до ее дна.

Подтверждение тому, что поле бустера проникает внутрь канавки, представлено в [8]. Оказалось, что амплитуда сигнала на кривой ВС при включении бустера может не только увеличиваться, но даже уменьшаться (причем, по-разному для ВО и НП) в зависимости от условий сканирования. Это означает, что внешнее поле не только проникает в канавку глубиной почти 400 nm с шириной около 200 nm, но и сложным образом влияет на рассеяние ВЭ в канавке.

Неожиданный феномен уменьшения ВС из НП при включении бустера можно объяснить взаимодействием ВЭ от дна канавки с ее БС. Сканирование дна рождает ВЭ, рассеиваемые затем и к БС. Часть ВЭ с малой энергией захватывается на поверхностные ловушки, формируя отрицательные поверхностные заряды. Это уменьшает работу выхода для МВЭ, эмитируемых из поверхности. Это приводит к более активному рассеиванию ВЭ, направленных к БС. Энергичные ВЭ могут проникать через заряженную поверхность БС в ее приповерхностный слой, рождая дополнительный поток МВЭ. Оба потока суммарно определят значение ВС от сканируемой точки дна. Но при включении бустера число ВЭ из дна канавки, которые ранее рассеивались к БС, уменьшится. Это уменьшит эмиссию МВЭ из БС, в результате чего на детектор попадут только „донные“ ВЭ и значение ВС от сканируемой точки дна уменьшится [8]. Такое объяснение подтверждается иллюстрацией в [7], на которой представлены две модельные кривые ВС, полученные при сканировании узкого контактного окна, вытравленного в слое диэлектрика. На основе вариации формы кривой при изменении положения бустера можно сделать вывод, что эмиссия МВЭ из дна канавки уменьшается при включении бустера [7, results 2#, the imaging phase]. Это наблюдение, однако, не акцентировано автором.

Мы предполагаем, что при включении бустера большая часть донных ВЭ достигает верхних участков БС, наводя уже на них отрицательные заряды. Рассеяние донных ВЭ на верхних участках БС приведет к их эмиссии за пределы канавки. Часть рассеянных ВЭ может попасть на ВО ближайших выступов, сформировав и там отрицательно заряженные ловушки. Такое наведение зарядов невозможно, если сканируется единичный выступ. По этой причине эмиссия МВЭ из сканируемого ВО будет увеличена при включении бустера только при присутствии соседней БС [8].

Если бустер включен при сканировании единичного выступа, то ВЭ, эмитированные из дна, попадают лишь на самый край ВО выступа, наводя только там отрицательные заряды. Это видно и из рис. 3, *b* (и из [5]), где показано распределение отрицательных зарядов на самом краю ВО при облучении пучком НП. Эти локально

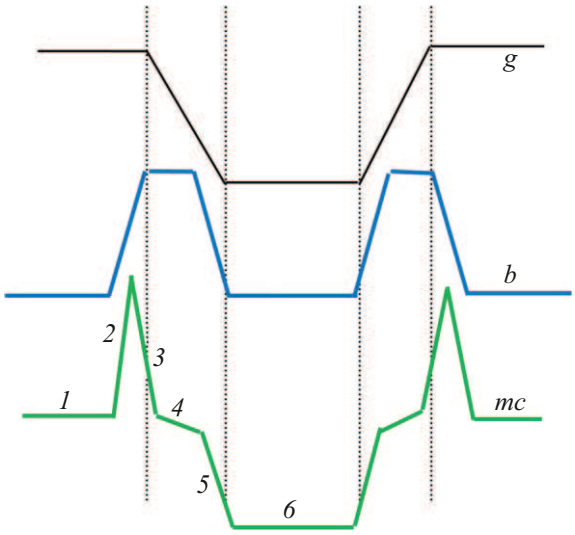


Рис. 4. Схемы участков модельных кривых ВС *mc* и *b*, совмещенных с участками модели профиля канавки *g*. Штриховые вертикальные линии приводят в соответствие характерные точки кривых и профиля. Кривая *b* отображает участки кривой при сканировании канавки *g* в соответствие с упрощенной моделью рассеяния ВЭ в [9]. В соответствие с формой кривых в [6] участок кривой *mc 1* отображает сканирование ВО, участки *2* и *3* соответствуют краю ВО и фрагменту БС. Участок *4* кривой соответствует фрагменту БС, облучаемого полным пучком. Фрагмент БС, облучаемый неполным пучком, отображен участком *5*, фрагмент профиля НП отображен участком *6*.

расположенные заряды способны породить пик на кривой ВС при последующем сканировании этого выступа.

3. Визуализация наведенных зарядов косвенным методом

Поскольку наведенные заряды изменяют эмиссию МВЭ из сканируемой поверхности, то существует потенциальная возможность регистрации зарядового рельефа по кривым ВС в том числе и на БС.

В [9] представлен вид кривой ВС от модельной топологической структуры с пологими БС, который может возникнуть при ее сканировании в низковольтном РЭМ. Форма фрагментов кривой ВС, соответствующих разным участкам профиля структуры, объяснена на основе упрощенного представления о формировании потока МВЭ из этих участков. В частности, подразумевается, что вариация потока МВЭ в ходе сканирования обусловлена лишь изменением наклона участков профиля к плоскости пластины (его модель *g* показана на рис. 4). На угловых участках амплитуда ВС определяется суммой потоков МВЭ из горизонтальных и наклонных фрагментов участков, доли которых в общем потоке МВЭ изменяются в ходе их сканирования. Форма пиков кривой ВС в виде трапеции *b* на рис. 4 объясня-

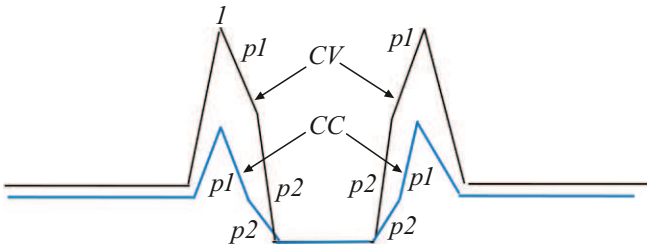


Рис. 5. Кусочно-линейные аппроксимации кривых ВС из [6, fig. 6]. Кривая *CV* — соответствует канавке со слоем окисла, *CC* — канавке без слоя окисла. Обозначение *p1* участков кривых ВС соответствует верхнему участку БС, участки *p2* соответствуют нижнему участку БС.

ется этапами перемещения пучка по БС. Наклонные фрагменты трапеции кривой ВС соответствуют этапам надвига пятна сканирующего пучка на БС в начале ее сканирования и смещения с нее в конце сканирования. Горизонтальный фрагмент соответствует перемещению пучка по среднему участку БС в стороне от краев БС.

Реальная кривая ВС от трапецеидального профиля канавки представлена в [6]. Она сопоставлена с кривыми, построенными для модельных профилей канавки в форме трапеции и в форме, близкой к виду реального профиля. Моделирование рассеяния электронов на участках модельных профилей было проведено методом Монте-Карло. Кусочно-линейное преобразование кривой ВС, полученной по расчетам рассеяния электронов от трапецеидального профиля в [6, fig. 4], показано на рис. 4 кривой *mc*. Видно, что часть горизонтального фрагмента трапецеидального „пика‘ на кривой *b* на этом рисунке предстает на кривой *mc* наклонным отрезком прямой *4*. Левый склон трапеции „пика“ кривой *b*, соответствующий моменту надвига пучка на БС, отобразился на кривой *mc* пиком из фрагментов *2* и *3*. Расположение этого пика кривой ВС соответствует, по нашей оценке, самому краю ВО.

Наклонный отрезок, подобный *4* на рис. 4 хорошо заметен в [3] на fig. 19. Там показано изменение формы модельных кривых ВС от трапецеидального профиля выступа при изменении соотношения ширины основания БС и диаметра пучка. Видно, как при увеличении ширины по сравнению с диаметром растет и размер полочки на кривой ВС.

Формирование пиков на кривой ВС обычно связывают с увеличенным выходом МВЭ из углов выступов при облучении их пучком. Однако оно может также определяться и расположением отрицательных зарядов на горизонтальной поверхности вблизи края ВО. У края БС возможно накопление и положительно, и отрицательно заряженных ловушек (рис. 3, поз. *2*, *3*). Положительные ловушки будут уменьшать эмиссию МВЭ, отрицательные увеличивать. Резкие пики кривой ВС от краев рельефной структуры можно объяснить накоплением отрицательных зарядов на краях ВО (см. пики из фрагментов *2* и *3* кривой *mc* на рис. 4). Накопление локальных положительных зарядов может объяснить возникновение пичков-минимумов, которые соответствуют участку профиля НП, расположенного у самого основания БС [6, fig. 4, simulation (trapezoid)]. Примеры вариации формы пиков и пичков, также полученных в результате расчетов рассеяния ВЭ методом Монте-Карло, представлены в [10, fig. 17–22]. Пички — минимумы обнаружены экспериментально и в [8], но лишь при определенных условиях сканирования (кривая *2* на рис. 5, *a*).

Расположение пика кривой ВС на краю ВО подтверждено и в [11] даже для выступа с трапецеидальным профилем. Там сопоставлена ширина выступов, определенная по их изображению в просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) и с помощью высоковольтного РЭМ. Оказалось, что ПЭМ-ширина выступов, измеренная по их физическим границам, статистически больше, чем РЭМ-ширина, определенная по расстоянию между опорными точками на пиках кривой ВС (в соответствие с методикой ее измерения в [12]). Это подтверждает, что участки повышенной эмиссии МВЭ расположены на краю ВО.

Кайма, сформированная из отрицательных зарядов около края ВО рельефной структуры с вертикальными БС, зафиксирована на рис. 3, *b*. Ее образуют ВЭ, эмитированные из края НП вблизи БС и осажденные не только на всей поверхности БС, но даже, как видно, на самом краю ВО. Она способна объяснить формирование пика на кривой ВС, если край ВО будет просканирован.

Можно объяснить и наведение положительных зарядов у самого края НП возле БС. Действительно, при падении пучка около края НП вокруг него образуется положительный круг, как на рис. 3, *a*, поз. *1* на участке ВО. Отрицательные заряды, которые на ВО наводились вокруг положительного круга с центром в точке падения пучка (рис. 3, *a*, поз. *1*) и компенсировали при движении пучка положительные заряды, в данном случае будут отсутствовать. При облучении края НП они будут наводиться на нижнем фрагменте БС. Наведенные там отрицательные заряды будут рассеивать те ВЭ, которые смогли бы компенсировать положительные заряды, наводимые пучком у самого края НП. В результате, участок дна вблизи угла так и останется заряженным положительно. Эмиссия МВЭ из него будет уменьшена, а соответствующий фрагмент кривой ВС отобразится локальным пичком-минимумом.

4. Вариация формы пиков при изменении условий сканирования

В цитированных выше публикациях по компьютерному наведению зарядов выводы делались для модельных структур с вертикальными БС, сформированными в толстых диэлектрических пленках. В публикациях, посвященных влиянию наведенных зарядов на форму

кривых ВС, объектом исследований являлись рельефные полупроводниковые структуры, покрытые слоем тонкого естественного окисла. Наведенные заряды в них не должны сохраняться длительное время. Однако в [13] на основе экспериментальных данных был сделан вывод, что наведенные заряды могут сохраняться в зарядовых ловушках в дефектном слое на границе окисел–кремний. Поэтому удаление такого окисла должно привести к потере способности накапливать и сохранять поверхностные заряды, а в результате этого и к исчезновению пиков и пичков на кривой ВС.

Эксперимент, позволивший проверить влияние наводимых поверхностных зарядов на кривую ВС, был проведен в [6]. Там на Fig. 6 представлены кривые ВС, полученные при сканировании выступа, покрытого пленкой естественного окисла и такого же выступа без пленки. Эти кривые ВС из [6] можно увидеть на рис. 5 в аппроксимированном виде. Наибольшие отличия заметны в форме пиков, которые особенно чувствительны к вариации зарядов на БС. Видно, что пики от окисленной канавки (кривая *1*), заметно выше пиков на кривой *2*, соответствующих канавке к кремнию. Разница в форме кривых отмечена и в [6], однако объяснение этому явлению не дано.

Отметим, что полочки на этих кривых ВС отсутствуют, а фрагменты *p1* и *p2* на пиках кривых *CV* и *CC* на рис. 5 соответствуют верхним и нижним участкам БС. Видно, что высота участков *p2* на кривой *CV* больше, чем соответствующая высота на кривой *CC*. Для фрагментов *p1* разница в высоте на этих кривых почти отсутствует. Эти отличия формируют разную форму кривых *CV* и *CC* на участках, соответствующих БС. В [6] форма участков кривой *CV* названа выпуклой (*convex*), участка *CC* — вогнутой (*concave*). (Соответствующие указатели в виде аббревиатур *CV* или *CC* показаны стрелками на рис. 5).

Увеличение высоты ВС на участках *p2* для кривой *CV* (полученной от канавки с окисной пленкой) может быть объяснено увеличением плотности отрицательных зарядов на нижних участках БС канавки, что и привело к росту эмиссии МВЭ из них в ходе сканирования. Плотность зарядов на верхних участках БС осталась при этом неизменной.

Существование пика на кривой *CC* от БС без окисной пленки на рис. 5 свидетельствует о том, что поверхностные заряды наводятся и сохраняются также и на кремниевой поверхности БС. Они могут располагаться в тонком слое аморфного кремния между кремнием кристаллическим и удаленным (или почти удаленным) слоем окисла, представляя собой трехкоординированные атомы кремния. Такие дефекты способны заряжаться и положительно, и отрицательно [14].

Наведенные заряды на БС могут изменяться при вариации и других параметров сканирования. В [8] выявилось, что наведенный заряд в окисном слое на ВО выступа вблизи БС способен меняться в зависимости от

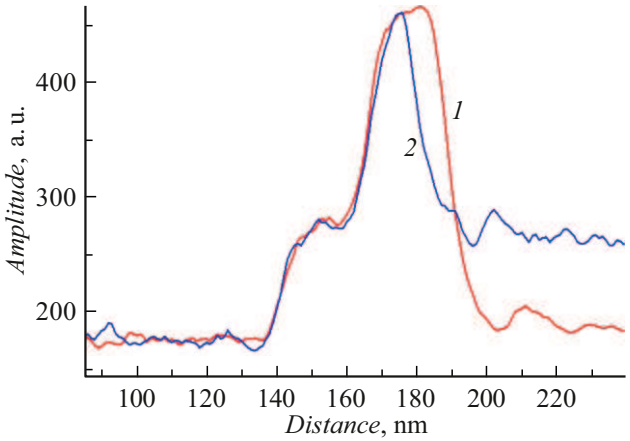


Рис. 6. Совмещенные на одном поле участки кривых ВС, соответствующие левой БС и прилегающим к ней участкам профиля выступа. Кривая *1* — для одиночного выступа, *2* — для выступа в составе решетки. Рисунок создан из преобразованных кривых на рис. 5, *b* в [8].

близости расположения соседнего выступа. Рис. 6 демонстрирует два участка кривых ВС, полученные при сканировании одного фрагмента профиля вблизи левой БС, но на разных выступах: кривая *1* для одиночного и *2* для группового выступа в составе решетки. На них заметны такие же пики кривой ВС и полочки, как и на схеме участков кривой ВС на рис. 4, которые отображают распределение отрицательных зарядов на краях ВО.

Кривые на рис. 6 получены при включенном бустерном потенциале, вытягивающем создаваемые ВЭ к детектору. Разница в форме кривых визуализирует различие в распределении зарядов на ВО выступов. Ширина пика на кривой *2* меньше, а максимальный сигнал на участке, соответствующем ВО, заметно выше, чем для кривой *1*. Это означает, что на групповом выступе отрицательные заряды распределены более узкой полосой вдоль края ВО. Хотя на горизонтальном участке этого ВО их плотность меньше. На краю одиночного выступа зарядовая полоса более широкая, однако на всем участке ВО наведенные отрицательные заряды отсутствуют.

Причина разного распределения зарядов на ВО одиночного и группового выступов видится в разных путях поступления ВЭ из ранее сканированных близлежащих участков. Для одиночного выступа ВЭ поступает, видимо, из НП (как на рис. 3, позиция *3*). Это дает им возможно осесть только на краю ВО, не распространяясь по всей поверхности этого ВО. Для ВО группового выступа ВЭ поступают, мы полагаем, из верхних участков соседней БС. ВЭ осаждаются в этом случае не только на краю ВО, но и равномерно по всей его поверхности. Отметим, что форма левых участков пиков обеих кривых ВС на рис. 6 одинакова, что тоже может свидетельствовать об одинаковом распределении зарядов на БС одиночного и группового выступов. Поэтому

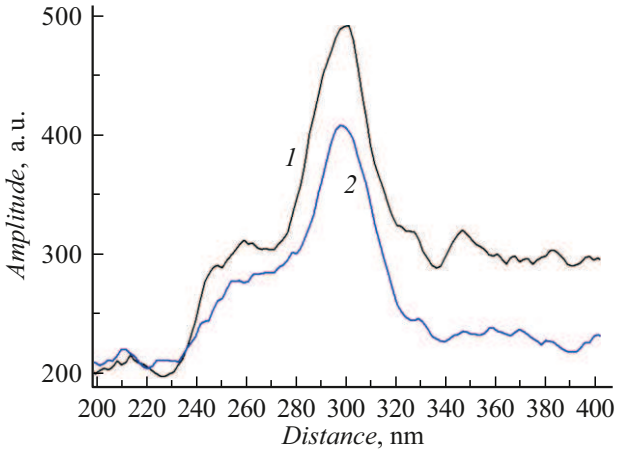


Рис. 7. Совмещенные на одном поле участки кривых ВС, соответствующие левой БС и прилегающим к ней участкам профиля группового выступа. Кривая *1* — при включении бустера, *2* — при его отсутствии. Рисунок создан из преобразованных кривых из рис. 5, *b* в [8].

эти участки пиков удобнее использовать для измерения ширины выступа.

Любопытная вариация зарядов на БС происходит при включении бустера. На рис. 7 показаны кривые ВС от левой БС выступа при отсутствии бустерного потенциала на кривой *2* и при его включении на кривой *1*.

Видно, что включение бустера привело к увеличению амплитуды сигнала на всех участках кривой *1* по сравнению с соответствующими участками на кривой *2*. Заметно, что рост амплитуды сигнала ВС на участке до формирования пика при отключенном бустере (кривая *2*) происходит плавно, тогда как на кривой *1* более резко с формированием подобия полочки. Это может указывать на то, что поток ВЭ от БС при включенном бустере уже, чем при отключенном бустере. При отключении бустера происходит расширение этого потока из-за роста отрицательных зарядов на обеих БС, которые рассеивают поток ВЭ от дна к ВО.

Заключение

Несмотря на важность понимания законов формирования электрических зарядов на участках нанорельефа [1,2], сканируемого с помощью РЭМ, выявлено ограниченное число работ по этому направлению исследований. Отсутствуют обзоры и аналитические статьи, в которых сопоставляются результаты, полученные в разных работах, где выявляются противоречия и делаются обобщения.

Основным способом выявления распределения зарядов на участках поверхности наноканавок является моделирования рассеяния ВЭ методом Монте-Карло. Обнаружено лишь несколько публикаций с модельными результатами рассеяния ВЭ в наноканавках и наведения в них зарядов. Поскольку представленные результаты не подвергались аналитическому рассмотрению, был проведен их анализ и сделано несколько предположений о характере процессов наведения зарядов внутри наноканавок. Подтверждено представление в [8], что эти процессы происходят и на плоских участках верхних плато рельефных структур, и на их БС. Наведенные заряды оказались заряженными отрицательно. Они способны образовываться не только на сканируемых элементах топологии, но и на соседних. Заряды наводятся ВЭ, эмитированными из облучаемых участков дна канавок. Заряжаемые БС создают условия, при которых эти ВЭ мигрируют внутри канавок на расстояние до нескольких микрометров (внутри выступов — лишь на несколько десятков нанометров). Этому способствует неоднородность зарядового рельефа (распределения зарядов по площади участков) на БС. Зарядовый рельеф не воспроизводится для разных канавок, так как зависит от их расположения по отношению к сканируемым участкам дна. Сделана попытка объяснить это явление.

Наведенные заряды, распределенные по большой площади нанорельефа, способны исказить РЭМ-изображение его структур при последующем их сканировании. Для контроля линейных размеров особенно важно, что зарядовый рельеф влияет на форму пиков ВС в профиле изображения структуры, который якобы отображает только ее геометрический профиль. В действительности, форма пиков ВС определяется также и зарядовым профилем у БС. Выявлена изменчивость пиков при вариации условий сканирования и типа сканируемых элементов топологии. Это приводит к неопределенности значений в результатах измерения линейных размеров в РЭМ при смене условий сканирования. Вместе с тем, изменчивость пиков дает возможность выявления зарядов на БС и потенциально определения профиля зарядового рельефа на них косвенным способом.

Изменение формы кривой ВС при вариации условий сканирования невозможно объяснить с помощью модели формирования эмиссии МВЭ, которая не учитывает наведение поверхностных зарядов на участках рельефа в [9].

Благодарности

Моя глубокая благодарность Ю.В. Озерину за обсуждение подготовленного к публикации материала и критические замечания текста рукописи.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] R.R. Das, A. Chowdhury, A. Chakroborty, S. Maity. Research Square, 1-17 August 6th (2021). DOI: 10.21203/rs.3.rs-586139/v

[2] X. Wang, C. Luo, S. Reeves, I. Soto. J. Micro/Nanopattern. Mater. Metrol., **22** (2), 021003-1 (2023). DOI: 10.1117/1.JMM.22.2.021003
[3] Z.J. Ding, Ch. Li, Bo Da, J. Liu. Sci. Technol. Adv. Mater., **22** (1), 932 (2021). DOI: 10.1080/14686996.2021.1976597
[4] L. Grella, G. Lorussu, D.L. Adler. SCANNING, **25**, 300 (2003).
[5] K. Ohya, H. Kuwada. e-J. Surf. Sci. Nanotech., **9**, 112 (2011). DOI: 10.1380/ejssnt.2011.112
[6] M. Kadowaki, A. Hamaguchi, H. Abe, Y. Yamazaki, S. Borisov, A. Ivanchikov, S. Babin. Proc. SPIE, **727**, 72723I (2009). DOI: 10.1117/12.814036
[7] J.S. Villarrubia. *Modeling Scanning Electron Microscope Measurements with Charging. Frontiers of Characterization and Metrology for Nanoelectronics* (Gaithersburg, MD), [online], https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=912857 (Accessed February 18, 2025)
[8] Ю.В. Ларионов, Ю.В. Озерин. ЖТФ, **94** (6), 934 (2024). DOI: 10.61011/JTF.2024.06.58134.203-23
[9] V.P. Gavrilenko, M.N. Filippov, Yu.A. Novikov, A.V. Rakov, P.A. Todua. Proc. SPIE, **6648**, 66480T (2007). DOI: 10.1117/12.733566
[10] Y.G. Li, S.F. Mao, Z.J. Ding. Scanning, **35** (2), 127 (2011). DOI: 10.1002/sca.21042
[11] Ю.В. Ларионов. Нано- и микросистемная техника, **21** (11), 643 (2011). DOI: 10.17587/nmst.21.643-651
[12] Ю.А. Новиков, А.В. Раков. Труды ИОФ РАН. *Механизмы вторичной электронной эмиссии рельефной поверхности* (Наука, М., 2006), с. 143.
[13] Ю.В. Ларионов, Ю.В. Озерин. ФТТ, **62** (6), 947 (2020). DOI: 10.21883/FTT.2020.06.49356.608
[14] Ю.В. Иванков, М.Н. Левин, В.Р. Гитлин, С.Г. Кадменский. *Моделирование радиационных дефектов в структурах металл–диэлектрик–полупроводник* (Мин. обр. и науки РФ, ВГУ, 2003), с. 43.