

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТОНКИХ СТРУКТУР – СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

ЧАСТЬ 2

А.Ляпин, к.г.-м.н. Andrey.Lyapin@ostec-group.ru

В первой части статьи, опубликованной в предыдущем номере журнала, рассказывалось о различных видах микроскопии, используемых для визуального контроля тонких структурных элементов электронных изделий. Сегодня речь пойдет о растровой электронной микроскопии.

Развитие растровой электронной микроскопии началось через несколько лет после изобретения в 1931 году Эрнстом Руски просвечивающего электронного микроскопа. Однако примерно 30 лет потребовалось для того, чтобы приступить к коммерческому производству растровых электронных микроскопов (РЭМ). Совершенствование РЭМ связано с именами Макса Кнолля (Германия), Манфреда фон Ардене (Германия), Владимира Зворыкина (США), Чарльза Отли (Великобритания), Мака Маллана (Великобритания). Первые производства электронных микроскопов были созданы в 1965 году в Великобритании (Cambridge Scientific Instrument) и Японии (JEOL). В последующие четыре десятилетия было собрано несколько десятков тысяч растровых электронных микроскопов.

Современные РЭМ значительно превосходят первые модели по разрешению и функциональности и продолжают постоянно совершенствоваться, превращаясь во все более точные и сложные инструменты. Сегодня используется множество типов РЭМ, характеристики и функциональные возможности

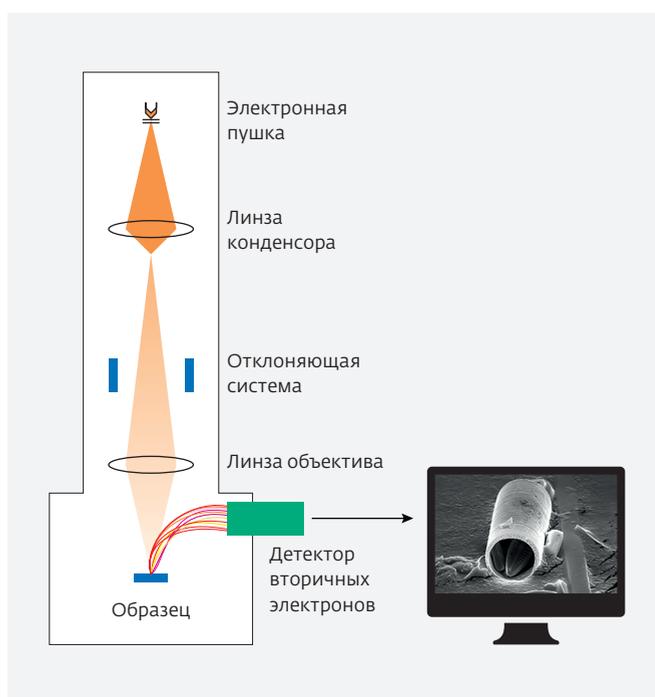


Рис.9. Устройство РЭМ

которых значительно различаются. Чтобы эффективно использовать РЭМ, необходимо понимать, как он функционирует, а также знать причины возникновения контраста растровых изображений, формируемых электронами.

УСТРОЙСТВО РЭМ

Конструкция микроскопа

Простейший растровый электронный микроскоп состоит из системы электронной оптики, формирующей электронный пучок, столика образцов, детектора для регистрации вторичных электронов, дисплея для вывода изображения и управляющей программы (рис.9). Система электронной оптики включает в себя электронную пушку, линзы конденсора и объектива, отклоняющую катушку для сканирования электронным пучком и другие компоненты. Все это, как и исследуемый образец, находится в вакууме (внутри колонны микроскопа).

Электронная пушка

Электронная пушка генерирует пучок электронов. Рассмотрим устройство пушки термоэмиссионного типа (рис.10). При нагревании до температуры примерно 2800 К катода, сделанного из вольфрамовой проволоки диаметром около 0,1 мм, возникает эмиссия электронов с его поверхности. Термоэлектроны собираются в электронный пучок и движутся по направлению к аноду под

воздействием приложенного к нему высокого положительного напряжения, обычно от 1 до 30 кВ. В центре анода есть отверстие, через которое проходит пучок электронов. Между катодом и анодом размещают электрод, называемый электродом Венельта, на который подают отрицательное напряжение, регулируя величину тока электронного пучка. Воздействуя таким образом на электрод Венельта, можно выполнять тонкую фокусировку пучка электронов. Место, где электронный пучок имеет минимальный диаметр поперечного сечения, называется кроссовером и его принято рассматривать в качестве фактического источника электронов. Диаметр кроссовера составляет обычно 15–20 мкм. В растровой электронной микроскопии наиболее часто используются пушки термоэмиссионного типа с катодом из вольфрама. Такие пушки получили широкое распространение вследствие относительно невысокой стоимости владения прибором. Помимо вольфрама в качестве материала катода можно использовать гексаборид лантана (LaB_6) или гексаборид церия (CeB_6). Срок службы таких катодов выше, и они позволяют получать более контрастные изображения. Однако для работы катодов из LaB_6 или CeB_6 требуется более глубокий вакуум вследствие высокой эмиссионной активности этих материалов. Другие типы электронных пушек – пушка с полевой эмиссией и пушка с эмиссией Шотки.

Линзы объектива и конденсора

Для работы РЭМ необходим тонкий электронный пучок (зонд). Можно варьировать диаметр электронного пучка, если поместить на выходе электронной пушки регулируемое магнитное поле, создаваемое элементами электронной оптики. Поток электронов из электронной пушки регулируется двухкаскадной электромагнитной системой, включающей линзы конденсора и объектива.

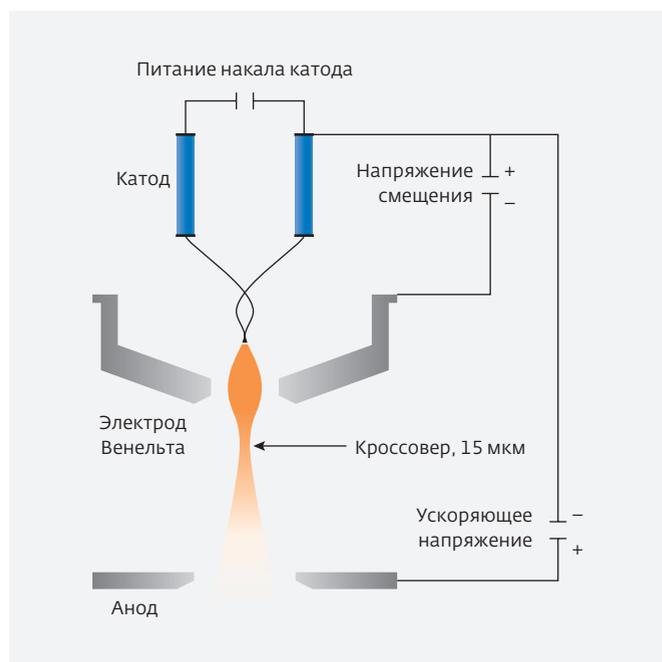


Рис.10. Устройство электронной пушки термоэмиссионного типа

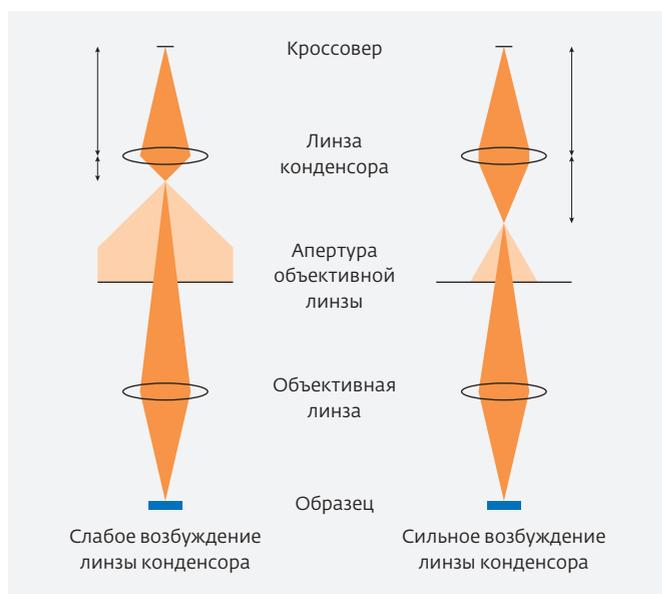


Рис.11. Формирование зонда электронными линзами

В результате на поверхности образца фокусируется тонкий электронный зонд (рис.11).

Усиление или ослабление возбуждения линзы конденсора (значения магнитной индукции в ней) позволяет изменять толщину электронного пучка. Если использовать всю открытую область объективной линзы, невозможно получить тонкий электронный зонд из-за сферических aberrаций. Чтобы снизить их влияние, между линзой конденсора и линзой объектива размещается тонкая металлическая пластина с небольшим отверстием – апертура. Через нее должна проходить только та часть электронного луча, которая следует через центр объективной линзы. Смещение апертуры относительно центра объективной линзы приводит к значительному увеличению aberrаций, и формирование тонкого электронного зонда становится невозможным. Поэтому центр апертуры объективной линзы должен располагаться строго на оптической оси.

При увеличении возбуждения линзы конденсора электронный пучок, падающий на апертуру, значительно расширяется, поэтому число электронов (величина тока зонда), достигающих линзы объектива, уменьшается. И, наоборот, при уменьшении возбуждения пучок электронов расширяется не столь значительно и большая доля электронов, проходя через апертуру, достигает линзы объектива. Таким образом, настраивая уровень возбуждения линзы конденсора, можно изменять диаметр электронного зонда и его ток. Однако повышение уровня возбуждения линзы конденсора до бесконечности не приведет к тому, что

диаметр электронного зонда станет бесконечно малым. Объективная линза используется для фокусировки, именно она формирует окончательный диаметр электронного зонда. Если рабочие характеристики линзы объектива недостаточно хороши, то практически невозможно получить электронный зонд оптимального диаметра, несмотря на все усилия по регулировке пучка перед линзой объектива. Таким образом, качество и характеристики объективной линзы – один из ключевых факторов в работе электронного микроскопа.

Столик образцов

В электронном микроскопе образцы исследуют при большом увеличении, поэтому важно обеспечить точность их перемещения; чтобы образец не "улетел" в вакуум, его необходимо закрепить. Для этих целей используют специальный предметный столик, позволяющий надежно зафиксировать образец и обеспечивающий механизм плавного перемещения. Предметный столик для существующих РЭМ можно оснастить механизмами для перемещения по горизонтали (X, Y) и вертикали (Z), наклона (T) и вращения (R).

Перемещения по X и Y используются для выбора поля зрения. В результате перемещения по Z изменяют разрешение изображения и глубину фокуса. Наклон столика требуется при исследованиях образцов с кристаллической фазой. В некоторых РЭМ используется эвцентрический столик – сложное электронное устройство с точной механикой. Благодаря такому столику не смещается ось наблюдения при наклоне образца и не происходит расфокусировка при перемещении наклоненного образца.

В последние годы в дополнение к столикам с ручным управлением все чаще применяют столики с моторизованным приводом, в том числе управляемые компьютером. С помощью такого управления можно перемещать столик в выбранную точку мышкой, возвращать его в желаемое место наблюдения, использовать более тонкие и специфичные эвцентрические функции.

Система вакуума

Для работы электронно-оптической системы в колонне микроскопа, как и в камере образцов, нужно поддерживать вакуум с давлением от 10^{-3} до 10^{-4} Па. Обычно воздух из этих отсеков откачивают диффузионным насосом. Когда требуется безмасляная среда, используют турбомолекулярный насос. Если в РЭМ установлена пушка с полевой эмиссией, необходимый для ее работы вакуум



Рис.12. Эмиссия электронов и электромагнитных волн из образца

порядка 10^{-6} – 10^{-8} Па создается при помощи электро-разрядного насоса.

Для смены образца требуется восстанавливать давление в камере до атмосферного. В существующей аппаратуре используют два варианта смены образцов. В первом камера с образцом вентилируется полностью, во втором – девакумируют только предварительную камеру (воздушный шлюз), а в основной камере поддерживается высокий вакуум. Замена образца по первому варианту требует временных затрат на откачку воздуха из камеры, в зависимости от модели промышленного микроскопа она занимает от 2–3 мин до нескольких часов. Во втором варианте время откачки составляет около минуты, однако использование шлюза – дорогостоящее решение, обычно такими камерами оснащаются микроскопы высокого класса. Применение шлюзовой камеры предпочтительно при значительном объеме исследований и актуально для микроскопов, оснащенных большими камерами для образцов.

ФОРМИРОВАНИЕ РЭМ-ИЗОБРАЖЕНИЯ

Когда РЭМ-изображение выглядит так, как мы привыкли видеть его невооруженным глазом, не возникает затруднений в понимании и оценке свойств образца. Однако на РЭМ-изображении часто можно увидеть непривычный и трудно объяснимый контраст. Чтобы правильно интерпретировать морфологические свойства поверхностных структур при наличии подобного контраста,



Рис.13. Распределение энергии электронов, эмитированных из образца

необходимо понимать принцип формирования РЭМ-изображения.

Взаимодействие электронов с образцом

Падающие электроны электронного зонда, внедряясь в образец, рассеиваются внутри него, постепенно теряют энергию и поглощаются. Область рассеяния зависит от энергии электронов, атомного номера элементов и плотности упаковки атомов. Чем выше энергия падающих электронов, тем больше диапазон рассеяния; чем выше атомный номер и плотность образца, тем область рассеяния меньше. При облучении образца электронным пучком эмитируются различные сигналы (рис.12). С их помощью можно не только получать информацию о морфологии поверхности (точнее, подповерхностного слоя), но и выполнять элементный и структурный анализ образца. В растровой

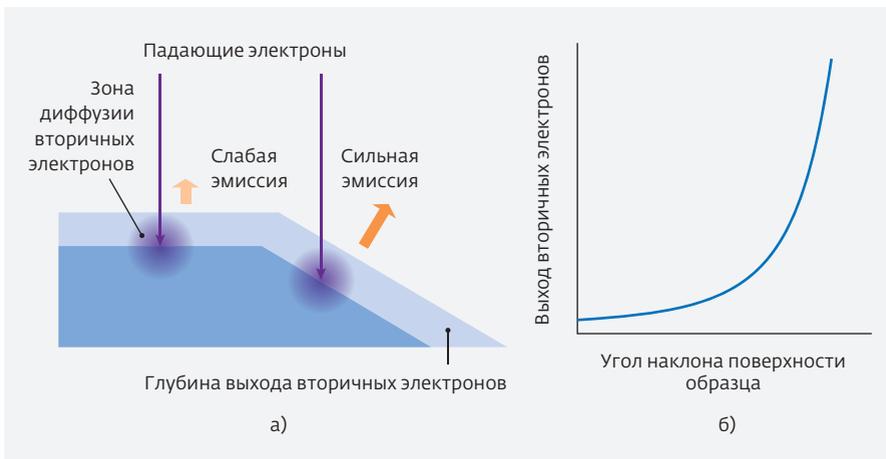


Рис.14. Выход вторичных электронов при различных углах облучения: а – схема, б – зависимость от наклона поверхности образца

электронной микроскопии для формирования изображения используют вторичные и обратно-рассеянные электроны. Как правило, энергия вторичных электронов ограничивается значением 50 эВ и менее, в то время как спектр энергий обратно-рассеянных электронов очень широк (рис.13) и варьирует от значений, эквивалентных энергии падающих электронов, до низких значений порядка 50 эВ. Небольшие пики в спектре обратно-рассеянных электронов на рис.13 соответствуют электронам Оже.

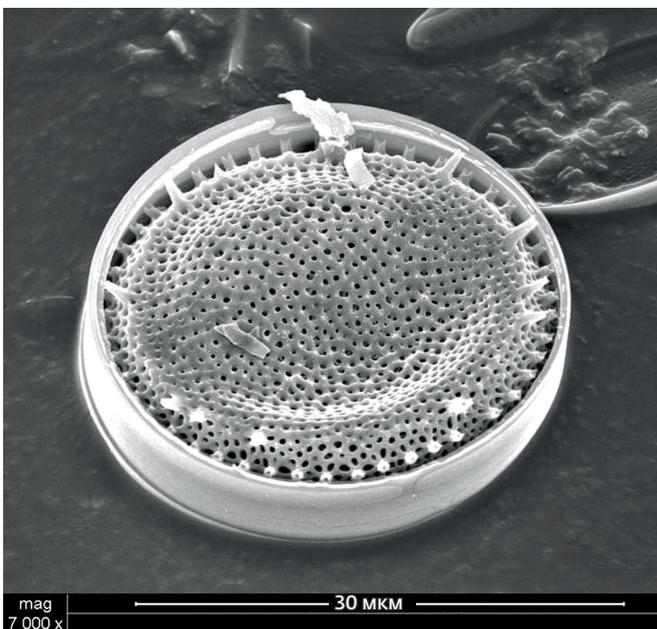


Рис.15. Различия в яркости, связанные с углом выхода вторичных электронов (автор фотографии Frans Holthuysen)

Вторичные электроны

При внедрении падающего электронного пучка в образец возникает эмиссия вторичных электронов, происходящих из свободных валентных электронов атомов образца. Так как энергия вторичных электронов очень мала, те, которые генерируются в глубоких слоях, быстро поглощаются образцом. С поверхности образца вылетают только электроны, которые генерируются вблизи его поверхности или на ней. Это означает, что эмиссия вторичных электронов очень чувствительна к морфологии поверхности. Причем эмиссия

выше, когда падающие электроны достигают образца под углом, а не перпендикулярно поверхности (рис.14).

Например, на изображении раковины диатомеи во вторичных электронах (рис.15) различия в яркости поверхности связаны с разными углами падения электронов. Таким образом, вторичные электроны прекрасно отражают морфологию поверхности и используются для ее изучения. Поскольку вторичные электроны обладают малой энергией, процесс их выхода подвержен влиянию

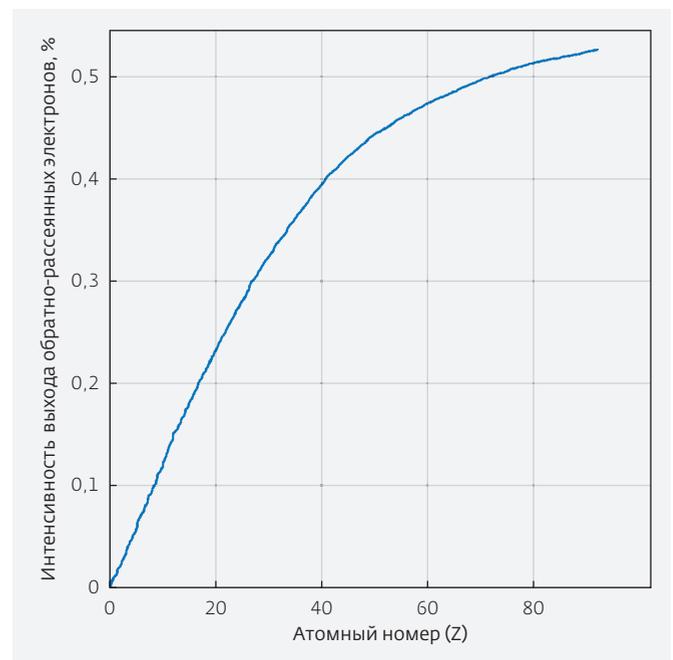


Рис.16. Зависимость интенсивности выхода обратно-рассеянных электронов от атомного номера

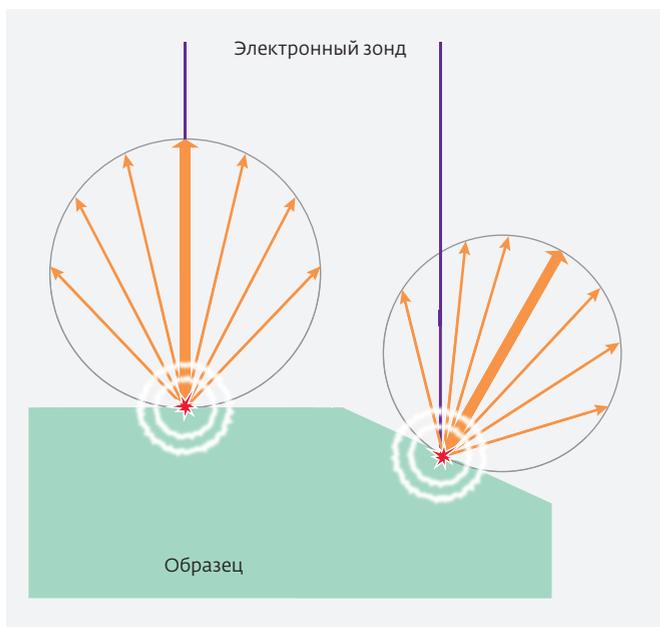


Рис.17. Соотношение между углом падения электронного зонда и интенсивностью потока обратно-рассеянных электронов

электрического потенциала вблизи поверхности. Когда образец электрически заряжается, наблюдается аномальный контраст, а вторичные электроны можно использовать для измерения тока, наведенного электронным пучком в полупроводниковых приборах.

Обратно-рассеянные электроны

Обратно-рассеянные электроны – это упруго отраженные первичные электроны, излучаемые обратно образцом при его бомбардировке электронным зондом. Иногда их называют отраженными электронами. Обратно-рассеянные электроны несут информацию об относительно глубоких зонах, так как обладают намного более высокой энергией, чем вторичные электроны. Обратно-рассеянные электроны чувствительны к элементному составу образца. Интенсивность их выхода пропорциональна атомному номеру атомов, составляющих образец (рис.16). Поэтому на изображении в обратно-рассеянных электронах участок, состоящий из тяжелых элементов, выглядит ярче. Такой контраст часто называют композиционным. Его можно использовать для визуализации различий в элементном составе образца. Интенсивность обратного отражения электронов выше в зеркальном (перпендикулярном потоку падающих электронов) направлении (рис.17). Это свойство применяется для изучения морфологии поверхности

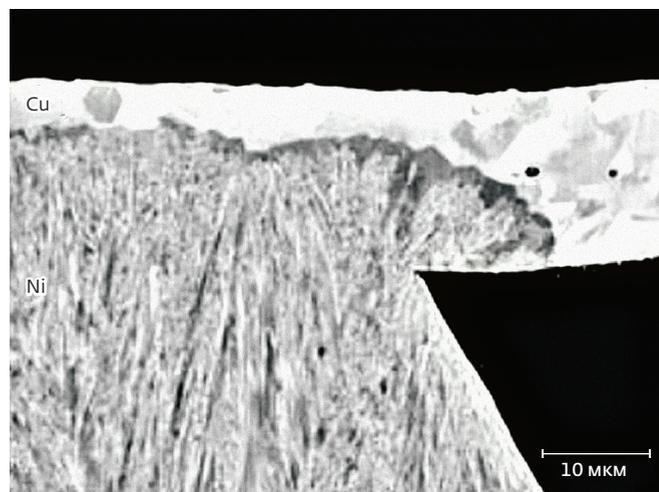


Рис.18. Контраст от каналирования электронов

образцов, поскольку позволяет наблюдать топографический контраст в обратно-рассеянных электронах. Если электронный луч входит в кристаллический образец однородного элементного состава, изменения интенсивности обратно-рассеянных электронов отражают ориентацию кристаллов (рис.18). Подобный контраст называют контрастом от каналирования электронов (electron channeling contrast, ECC). К изменению контраста этого вида приводит даже легкий наклон кристаллического образца.

Краевой эффект

Если на поверхности образца имеются тонкие чешуйки, ступеньки или выступы (рис.19), их края выглядят как яркие участки несколько большей ширины, чем в действительности. Это явление называется краевым эффектом. Когда электронный зонд облучает участок вблизи края неровности, вторичные электроны, сгенерированные в зоне

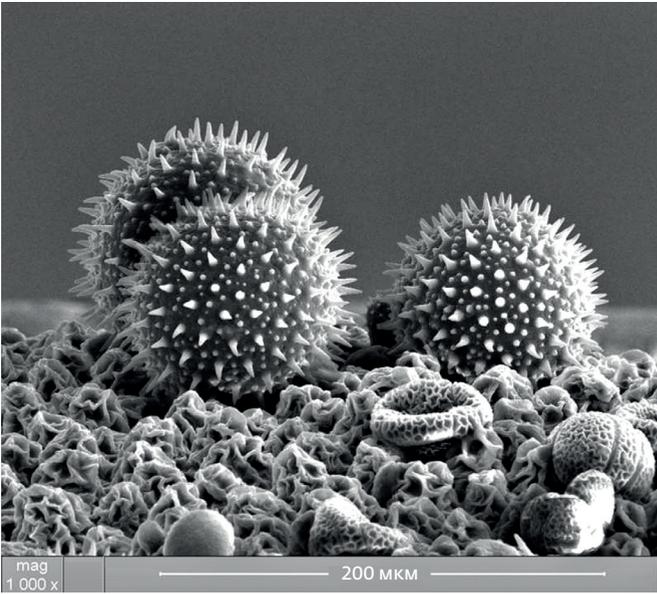


Рис.19. Проявление краевого эффекта (автор фотографии Frans Holthuysen)

диффузии первичных электронов, более интенсивно излучаются из области, которая находится ближе к границе раздела сред (рис.20).

РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЭМ
Увеличение

В процессе сканирования образца электронным зондом по двум осям на экран монитора выводится РЭМ-изображение. И если ширина зоны сканирования меняется, то меняется и увеличение выводимого РЭМ-изображения. Поскольку размер экрана монитора остается неизменным, то уменьшение

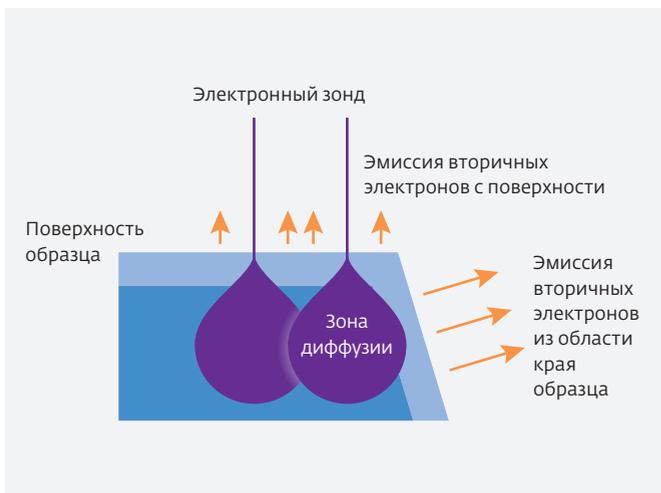


Рис.20. Диффузия первичных электронов и результирующий краевой эффект

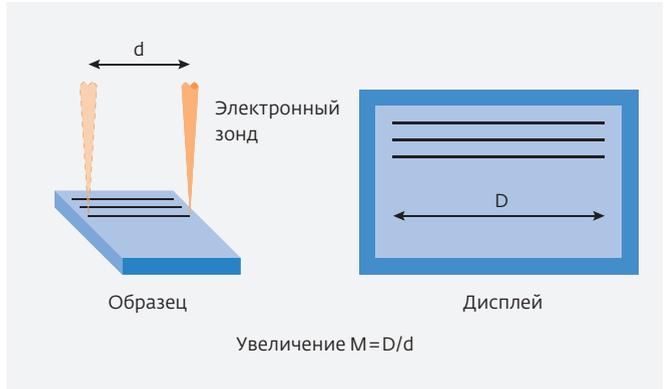


Рис.21. Принцип формирования увеличения РЭМ

ширины зоны сканирования приводит к повышению разрешения и наоборот (рис.21).

Например, если размер экрана монитора 10 см, то при ширине сканирования 1 мм мы имеем увеличение в 100 раз, если ширина сканирования 10 мкм, увеличение составит 10 000 крат. Исторически сложилось так, что увеличение микроскопа рассчитывают для экрана, принятого за стандартный – 12 см по горизонтали и 10 см по вертикали (у разных производителей РЭМ эти размеры немного различаются). Если используется дисплей большего, чем стандартный, размера, увеличение выводимого

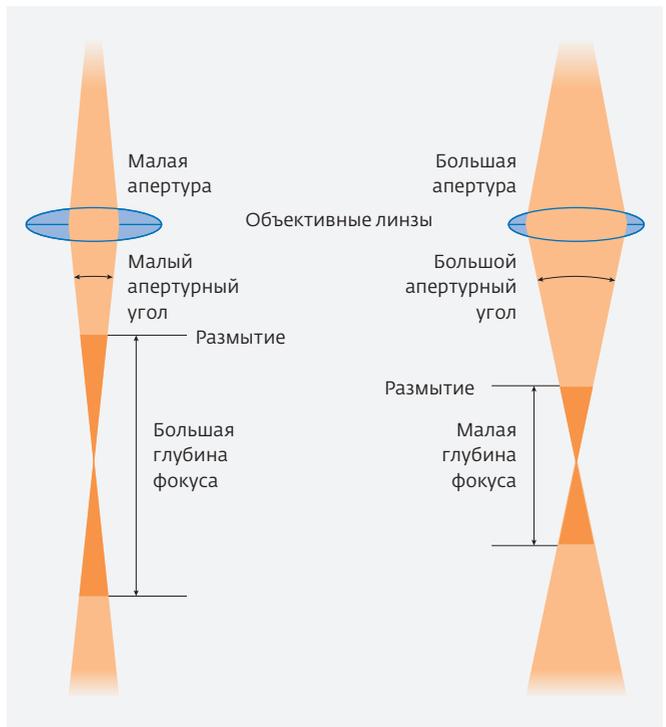


Рис.22. Соотношение между угловой апертурой электронного зонда и глубиной фокуса

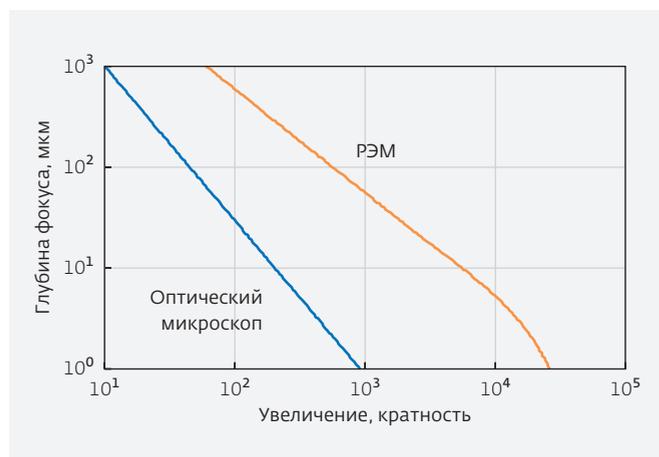


Рис.23. Различия между электронным и оптическим микроскопами по глубине фокуса

РЭМ-изображения больше. В таком случае увеличение и размер объекта рассчитывают, используя в качестве базы отсчета выводимую на экран стандартную шкалу.

Глубина фокуса

Когда в обычном микроскопе исследуют образец, имеющий глубокий рельеф, то при фокусировании

на его верхнем участке нижний участок может выглядеть расфокусированным. Если диапазон четкого изображения между верхним и нижним положениями значительный, говорят, что "глубина фокуса большая". Если диапазон сфокусированного пространства между верхом и низом небольшой, говорят, что "глубина фокуса маленькая". Когда электронный пучок близок к параллельному (угловая апертура мала), изображение остается в фокусе даже при значительном изменении фокусировки (рис.22). Если электронный зонд сильно расходится (угловая апертура большая), изображение теряет фокус даже при его незначительном изменении. То же характерно и для оптического микроскопа: при уменьшении апертурного угла глубина фокуса становится большой, а при его увеличении – малой.

Глубина фокуса обратно пропорциональна увеличению (рис.23). При низком увеличении размытость изображения может быть незаметной, однако по мере его повышения она становится все более значительной.

С помощью РЭМ можно получить глубину фокуса на порядок больше, чем у обычного оптического микроскопа. Это связано с тем, что угловая апертура электронного зонда РЭМ много меньше, чем

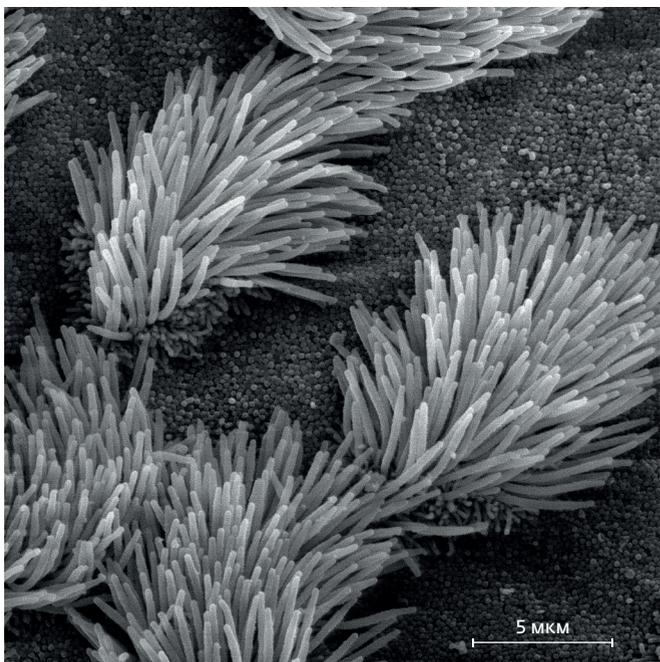


Рис.24. Глубина фокуса на РЭМ-изображении при увеличении 5000×

у объективов оптического микроскопа. Глубину фокуса РЭМ-изображения можно оценить по фотографии, сделанной при увеличении 5000× (рис.24). Прямое сравнение глубины фокуса на оптическом и электронном микроскопах можно продемонстрировать на фотографии разлома винта (рис.25). Участки изображения со значительными перепадами высот в оптическом микроскопе выглядят расфокусированными. И наоборот, на РЭМ-изображении вся поверхность сфокусирована из-за большой глубины фокуса.

Влияние ускоряющего напряжения

При изменении ускоряющего напряжения изменяется глубина проникновения первичных электронов – чем оно выше, тем глубже проникновение. Внутри образца электронный зонд расширяется,

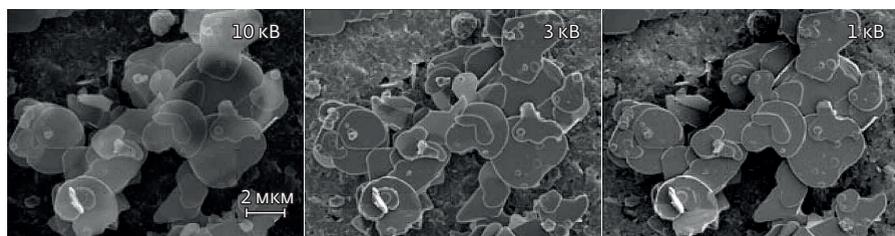


Рис.26. Контраст изображений во вторичных электронах при различных ускоряющих напряжениях. Образец: пластинчатые кристаллы нитрида бора

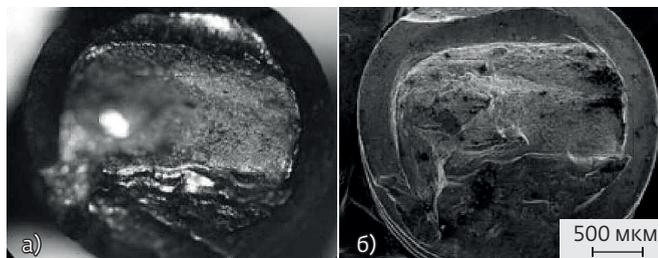


Рис.25. Изображения в оптическом (а) и электронном (б) микроскопах одного и того же объекта

вызывая эмиссию электронов из подповерхностной области. При увеличении ускоряющего напряжения излучение из глубины образца создает фон, ухудшающий контраст изображения поверхности. Если образец внутри структурирован, высокое ускоряющее напряжение приводит к наложению изображения внутренней структуры на изображение поверхности, и результирующее изображение становится нечетким. Кроме того, чем выше ускоряющее напряжение, тем значительнее проявляется краевой эффект. Таким образом, для того чтобы получить четкое изображение структуры поверхности, лучше использовать низкое ускоряющее напряжение.

Рассмотрим изображения пластинчатых кристаллов нитрида бора, полученные при трех разных ускоряющих напряжениях (рис.26). Тонкие кристаллы соли этих элементов, имеющих малый атомный номер, перекрывают друг друга. При высоком ускоряющем напряжении (10 кВ) начинают "просвечивать" кристаллы, лежащие под поверхностью. На изображении кристаллов, которые как бы "плавают" над нижележащими слоями материала, можно видеть яркие и темные участки. Контраст ярких участков сформирован детектированием вторичных электронов, эмитированных с нижней поверхности "плавающих" кристаллов. Темные же участки наблюдаются там, где кристаллы, расположенные под "плавающими", непосредственно прилегают к их нижней поверхности, препятствуя эмиссии вторичных электронов. При уменьшении ускоряющего напряжения до 1 кВ ступенчатые структуры кристаллов становятся четкими и видны с хорошим контрастом.

В следующей части статьи расскажем о типах электронных пушек.

Продолжение следует.