

# ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТОНКИХ СТРУКТУР – СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

## ЧАСТЬ 3

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

В первой и второй частях статьи, опубликованных в предыдущих номерах журнала, рассказывалось о различных видах микроскопии, используемых для визуального контроля тонких структурных элементов электронных изделий. Сегодня речь пойдет об электронных пушках, используемых в растровой электронной микроскопии.

**С**уществуют три типа электронных пушек: с температурной эмиссией (ТЕ), с полевой эмиссией (FE) и с катодом Шотки (SE). Устройство пушки термоэмиссионного (TE) типа было описано в предыдущей части статьи. Теперь рассмотрим пушки с полевой эмиссией и с катодом Шотки.

### ЭЛЕКТРОННАЯ ПУШКА С ПОЛЕВОЙ ЭМИССИЕЙ

В растровых электронных микроскопах высокого разрешения обычно применяется электронная пушка с полевой эмиссией. Другие ее названия – автоэмиссионная пушка или пушка с холодным катодом. Пушка работает, используя явление полевой эмиссии, возникающее в проводниках при помещении их в электрическое поле высокого напряжения (рис.27). Катод пушки изготовлен из тонкой вольфрамовой проволоки, к которой приварен единичный кристалл вольфрама. Радиус закругления наконечника кристалла, выполняющего роль эмиттера, составляет примерно 100 нм.

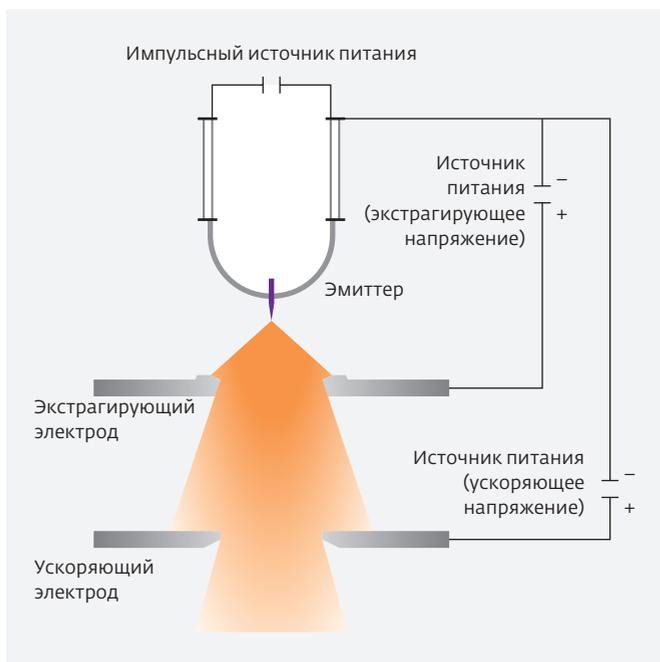
Когда к металлической пластине (экстрагирующий электрод) прикладывается положительное напряжение (несколько киловатт), возникает туннельный эффект, и эмиттер начинает излучать электроны. Если в центре электрода имеется отверстие, эмитированные электроны вылетают через него, формируя электронный пучок. За экстрагирующим электродом на пути

электронов находится ускоряющий электрод (с приложенным к нему высоким напряжением), позволяющий получить пучок электронов с заданной энергией. Для того чтобы обеспечить полевую эмиссию, наконечнику эмиттера нужны особо чистые условия. Поэтому пушку FE-типа помещают в сверхвысокий вакуум (порядка  $10^{-8}$  Па).

Излучаемый эмиттером электронный пучок, имеет высокую локальность, его можно рассматривать как источник излучения диаметром 5–10 нм. Для сравнения: в термоэмиссионной пушке диаметр источника электронов составляет 10–20 мкм. Поскольку источник электронов в пушке с полевой эмиссией очень мал, она используется в растровых электронных микроскопах высокого разрешения. Другое преимущество FE-пушки – малый разброс энергий электронов в пучке, поскольку для эмиссии электронов не нужно нагревать эмиттер. В исследованиях при низких ускоряющих напряжениях этот разброс энергий (хроматические aberrации) определяет разрешение, поэтому данное преимущество очень важно.

### ЭЛЕКТРОННАЯ ПУШКА С КАТОДОМ ШОТКИ

В пушке с катодом Шотки (рис.28) используется явление температурной эмиссии Шотки (испарение электронов в вакуум), возникающее при помещении нагретых



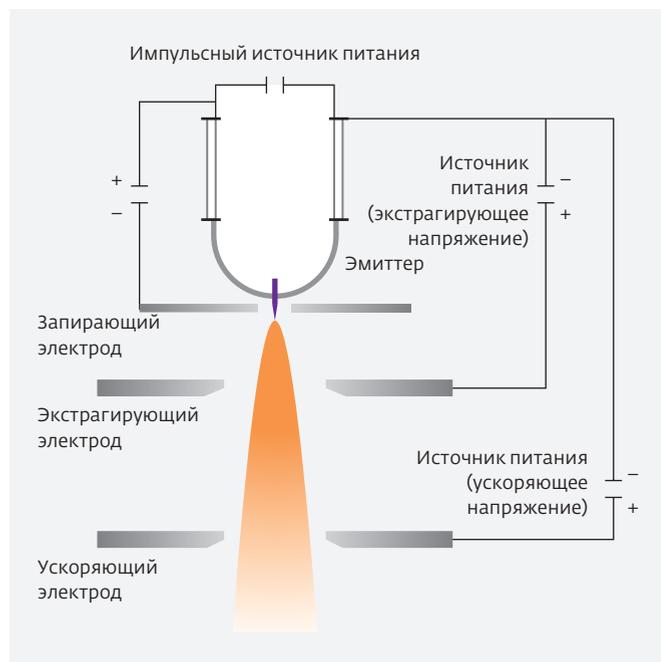
**Рис.27.** Устройство автоэмиссионной электронной пушки с холодным катодом

проводников в электрическое поле высокого напряжения. Катодом является эмиттер из ZrO/W – единственный кристалл вольфрама, покрытый слоем оксида циркония (ZrO), имеющий наконечник с радиусом кривизны в несколько сотен нанометров. Покрытие ZrO значительно снижает работу выхода электрона, поэтому, при относительно низкой температуре катода (около 1800 К), можно получить большой ток эмиссии. Для того чтобы экранировать термоэлектроны, исходящие от эмиттера, к электроду, называемому запирающим, приложено отрицательное напряжение. Преимущество SE-пушки заключается в стабильности тока электронного пучка, поскольку эмиттер, помещенный в условия сверхвысокого вакуума с давлением  $10^{-7}$  Па, нагревается до высокой температуры без поглощения газа.

По сравнению с FE-пушкой спектр энергий электронов в пучке SE-пушки несколько шире, однако она генерирует больший ток зонда, что очень эффективно для выполнения микроанализа вместе с исследованием морфологии. Пушку этого типа часто называют FE-пушкой с термокатодом или для удобства – пушкой с термополевой эмиссией.

**СРАВНЕНИЕ ПУШЕК РАЗНОГО ТИПА**

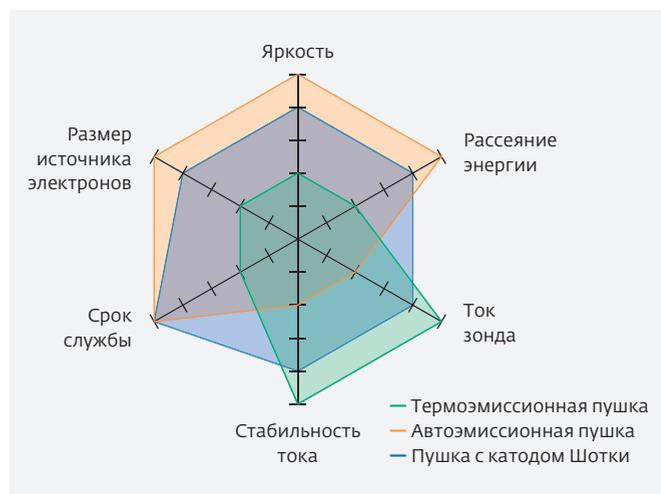
Как показывает сравнение параметров электронных пушек различного типа (рис.29, см. таблицу), у пушки FE-типа заметные преимущества перед остальными по размеру электронного источника, яркости (количественный параметр, характеризующий плотность тока



**Рис.28.** Устройство электронной пушки SE-типа

и параллельность электронного пучка), сроку службы и рассеянию энергии (ширине энергетического спектра) электронного пучка. Пушка TE имеет самые лучшие характеристики тока зонда, но проигрывает по всем другим параметрам.

Принимая во внимание данные характеристики, можно констатировать, что FE-пушка больше подходит для изучения морфологии на больших увеличениях, пушка TE-типа удобна для универсальных приложений, таких как микроанализ, не требующий большого увеличения. Пушка с катодом Шотки (SE) занимает промежуточное положение между этими двумя электронными



**Рис.29.** Сравнение электронных пушек трех типов

Технические характеристики различных электронных пушек

	ТЕ-пушка		FE-пушка	SE-пушка
	Вольфрам	LaB <sub>6</sub>		
Размер источника электронов	15-20 мкм	10 мкм	5-10 нм	15-20 нм
Яркость* (А·см <sup>-2</sup> ·рад <sup>-2</sup> )	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>8</sup>	10 <sup>8</sup>
Рассеяние энергии, эВ	3-4	2-3	0,3	0,7-1
Срок службы	50 ч	500 ч	Несколько лет	1-2 года
Температура катода, К	2800	1900	300	1800
Флуктуации тока (за 1 ч), %	<1	<2	>10	<1

\* Значение яркости получено при ускоряющем напряжении 20 кВ

пушками, а область ее применений варьируется от визуальных исследований при большом увеличении до разных видов микроанализа.

**ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЕ РАЗРЕШЕНИЕ РЭМ**

Действительное разрешение растрового электронного микроскопа (РЭМ) любого типа зависит от ускоряющего напряжения (рис.30). В общем случае для любого РЭМ характерно правило: чем больше ускоряющее напряжение, тем выше разрешение. Если ускоряющее напряжение составляет несколько киловольт, разрешение значительно ухудшается. Разрешение при низких ускоряющих

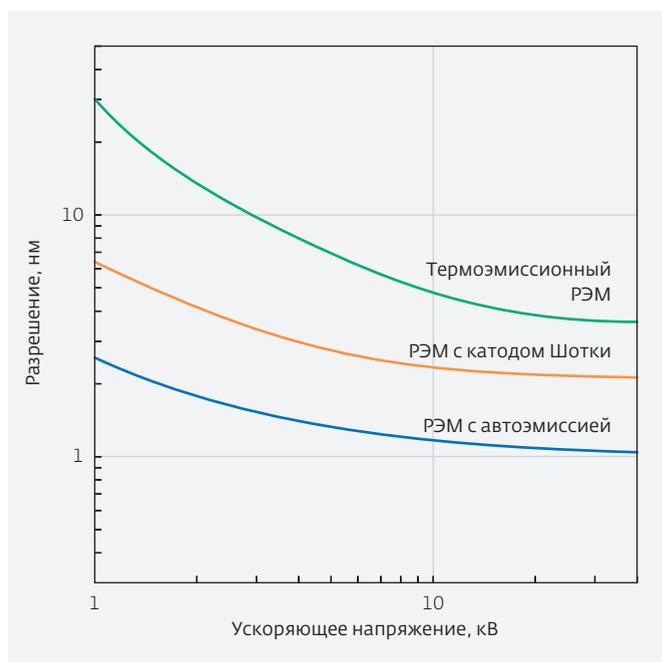


Рис.30. Соотношение между ускоряющим напряжением и разрешением

напряжениях снижается в результате влияния хроматических aberrаций. Любопытно, что формы кривых разрешения для РЭМ с катодом Шотки и с автоэмиссионной пушкой похожи и характеризуются плавной зависимостью между параметрами. Для микроскопа с термоэмиссионной пушкой влияние ускоряющего напряжения на разрешение проявляется сильнее.

Интересно также рассмотреть зависимость диаметра зонда от тока зонда (рис.31). Для РЭМ с термоэмиссионной пушкой повышение тока приводит к относительно плавному увеличению диаметра зонда. С другой стороны, для РЭМ с автоэмиссионной пушкой увеличение тока зонда до определенного предела мало влияет на его диаметр. Однако по достижении током величины около 1 нА диаметр начинает резко

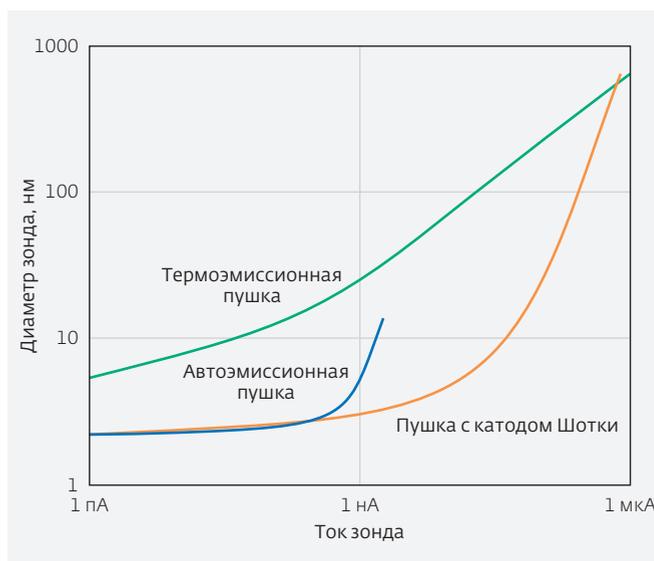
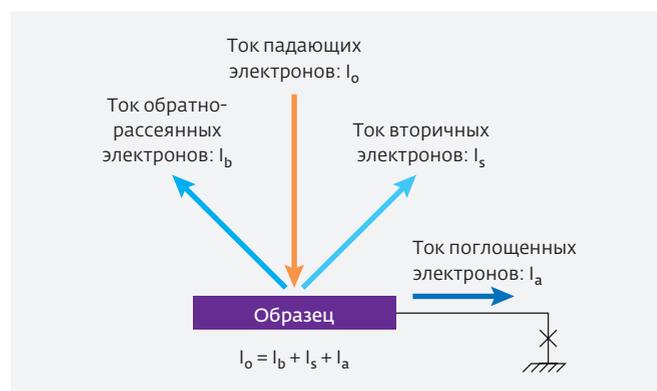


Рис.31. Соотношение между током зонда и диаметром зонда. Ускоряющее напряжение 20 кВ

возрастать. Пушка FE-типа не может генерировать высокий ток зонда, его величина ограничена несколькими нА. В РЭМ с катодом Шотки можно получить намного больший ток, при этом диаметр зонда увеличивается не так резко, как в автоэмиссионной пушке с холодным катодом. Поэтому пушка с катодом Шотки хорошо подходит для аналитических задач, требующих высокой энергии пучка.

### НАКОПЛЕНИЕ ЗАРЯДА И ЕГО ВЛИЯНИЕ

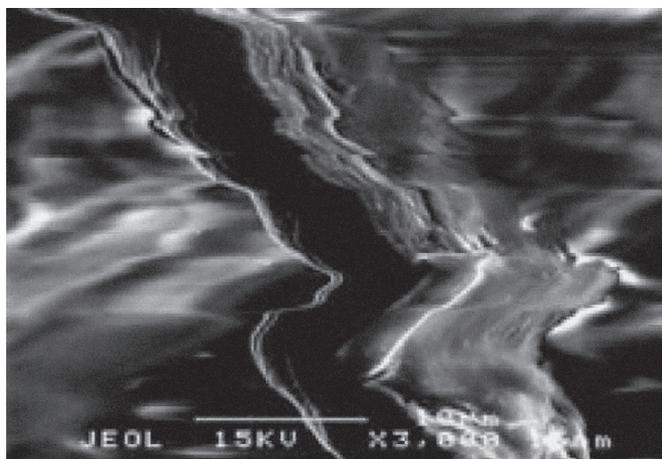
Как отмечалось в предыдущей части статьи, падающие электроны, проникая в образец, теряют энергию и поглощаются. Если образец проводит электрический ток, то электроны стекают через предметный столик; если же образец не обладает проводимостью, электроны "застревают" в нем, приводя к накоплению заряда (рис.32). Если продолжать облучение непроводящего образца электронным пучком, высокий отрицательный потенциал в зоне облучения будет нарастать. Однако при достижении определенного потенциала произойдет разрядка, и потенциал вернется к первоначальному значению. С другой стороны, если по каким-либо причинам число электронов, выходящих из образца, больше числа проникающих в образец – накапливается положительный заряд.



**Рис.32.** Электрический ток в непроводящем образце

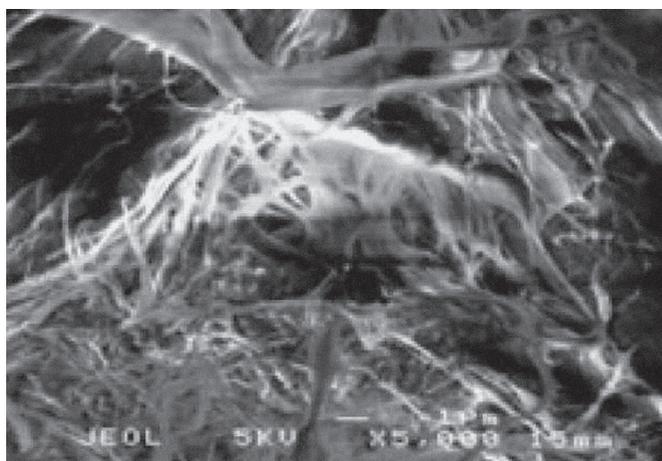
### ВЛИЯНИЕ ЗАРЯДА НА РЭМ-ИЗОБРАЖЕНИЕ

При накоплении образцом заряда на электронный зонд, сканирующий поверхность, начинают действовать силы отталкивания. В результате зонд сдвигается, что приводит к искажению изображения. Если в процессе сканирования происходит разрядка, электронный зонд на короткое время возвращается в первоначальное положение, при этом РЭМ-изображение выглядит разломанным (рис.33).



**Рис.33.** Искривление изображения, вызванное зарядкой

В случае незначительной зарядки, которая не оказывает влияния на сканирующий электронный зонд, вторичные электроны с малой энергией подвергаются воздействию локальных заряженных участков. Этим обусловлены различия в эффективности детектирования вторичных электронов или нарушения траектории движения вторичных электронов, попадающих в детектор. Различия в эффективности детектирования вызывают так называемый вольтовой контраст. То есть, если образец заряжен отрицательно, напряжение между детектором вторичных электронов и образцом становится выше, в детектор попадает больше вторичных электронов, что приводит к засвечиванию локально заряженных участков (высокая эффективность детектирования). Если же образец заряжен положительно, эффективность детектирования падает и происходит затемнение заряженных участков.



**Рис.34.** Аномальный контраст, вызванный накоплением заряда

В ряде случаев, в результате накопления заряда на локальных участках, вокруг них формируется сильное электрическое поле. Когда потенциал локального поля выше, чем поля, сформированного детектором вторичных электронов, то излучаемые образцом вторичные электроны экранируются локальным полем и вследствие нарушения траектории их полета не достигают детектора. Заряженные участки в этом случае выглядят темными (рис.34).

## МЕТОДЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ЗАРЯДКИ

### Напыление

Наиболее распространенный метод предотвращения зарядки – создание на поверхности образца проводящего покрытия. Для этого на непроводящий образец наносят тонкую пленку хорошо проводящего металла. В методе используется процесс ионного испарения и напыления в среде вакуума. Как правило, образец покрывают тонкой пленкой благородных металлов (например, Au, Pt, Au-Pd, Pt-Pd) толщиной от нескольких до 10 нм. Такие металлы обеспечивают высокий и стабильный уровень выхода вторичных электронов.

Для того чтобы правильно отобразить истинную поверхность образца, необходимо нанести как можно более тонкую пленку. Однако если поверхность имеет сложную морфологию, слишком тонкое покрытие может приводить к зарядке из-за потери непрерывности покрывающего слоя. Поэтому используются установки напыления с точно настраиваемыми параметрами, позволяющие контролировать процесс напыления.

### Исследования при низком ускоряющем напряжении

Когда образец заряжен отрицательно, число проникающих в него электронов больше числа выходящих. При снижении ускоряющего напряжения до значения примерно 1 кВ увеличивается выход вторичных электронов (рис.35) и по мере его уменьшения количество излучаемых вторичных электронов становится больше количества падающих. При дальнейшем снижении ускоряющего напряжения процесс инвертируется и в определенный момент (при напряжении E1 на рис.35) число электронов, входящих в образец, становится равным числу выходящих из него. В этот момент образец не имеет заряда.

Таким образом, подобрав соответствующее значение ускоряющего напряжения, можно получить изображение непроводящего образца без его зарядки. На изображении непроводящего образца керамики (рис.36) можно видеть, что при ускоряющем напряжении 10 кВ отображается мало топографической информации и наблюдается аномальное размытие изображения. Однако при ускоряющем напряжении 1 кВ отображается значимая

# Е•Х•Р•О ELECTRONICA



UFI  
Approved  
Event

**19-я Международная выставка**  
электронных компонентов,  
модулей и комплектующих



15–17 марта

**2016**

Москва, Крокус Экспо

**ВСЕ ЦВЕТ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Совместно  
с выставкой

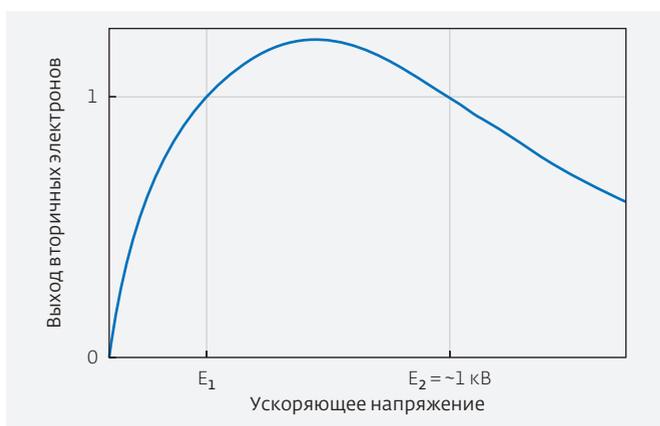


Организаторы:



+7 (812) 380 6003/07/00  
electron@primexpo.ru

**Забронируйте стенд на сайте: [expoelectronica.ru](http://expoelectronica.ru)**



**Рис.35.** Соотношение между ускоряющим напряжением и выходом вторичных электронов

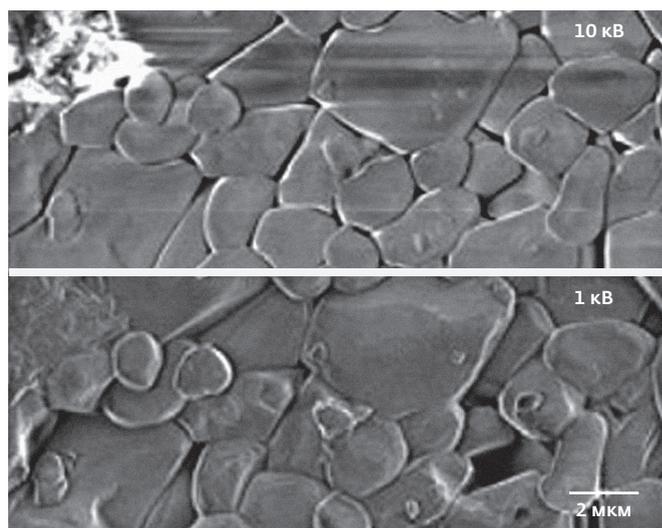
морфологическая информация и при этом изображение не размывается.

### Исследование под углом

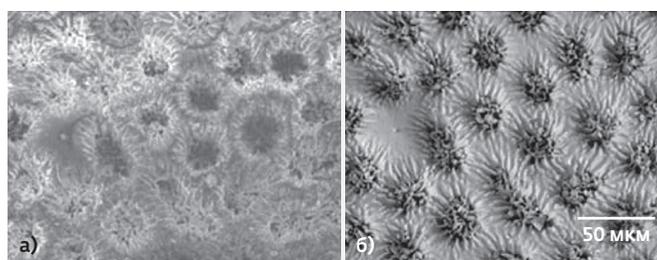
Когда электронный пучок попадает на образец под углом, количество испускаемых вторичных электронов увеличивается. Использование этого явления в некоторых случаях также позволяет исследовать непроводящие образцы без накопления ими заряда. Подобная методика наиболее эффективна для изучения образцов с малой расчлененностью поверхности.

### Исследования в режиме низкого вакуума

Непроводящие образцы без предварительного напыления можно изучать с помощью микроскопов, оснащенных



**Рис.36.** Изображение керамики во вторичных электронах при разных ускоряющих напряжениях (без напыления)



**Рис.37.** Пример изображений непроводящего образца, полученных в низковакуумном РЭМ (без напыления): а – режим высокого вакуума, б – режим низкого вакуума. Образец: раковина фораминиферы

режимом низкого вакуума (low vacuum scanning electron microscopy, LVSEM). При снижении вакуума в камере образцов остается значительное количество молекул воздуха. Множество молекул при бомбардировке их эмитированными электронами ионизируется и приобретает положительный заряд. При столкновении положительных ионов с образцом они нейтрализуют заряд поверхности, и становится возможным изучение непроводящих образцов. Для того чтобы количество сгенерированных положительно заряженных ионов было достаточным для нейтрализации заряда, устанавливают давление в камере образцов от нескольких десятков до 100 Па (величина давления может варьироваться в зависимости от образца).

В низком вакууме для получения изображения используется детектор обратно-рассеянных электронов, поскольку они обладают более высокой энергией и лучше подходят для морфологического анализа в данном режиме. Рассмотрим два изображения образца без покрытия, полученные в низковакуумном РЭМ (рис.37). Аномальный контраст на рис.37а вызван эффектом зарядки в режиме высокого вакуума. Однако при переходе в режим низкого вакуума этот контраст исчезает (рис.37б). Поскольку изображение на рис.37б получено в обратно-рассеянных электронах, виден сильный теневой контраст.

\*\*\*

В заключение можно отметить, что с учетом многообразия методов микроскопии специалисту на производстве не всегда просто выбрать подходящую аппаратуру для визуального контроля или анализа дефектов, особенно при переходе к новым видам изделий и использованию новых материалов. В таких случаях рекомендуется привлекать к решению задач, где требуется получить увеличенное изображение, специалистов по микроскопии и совместно с ними искать оптимальное решение. ●