

Темы лекции

- 1. Понятие контраста в растровом электронном микроскопе.*
- 2. Определение предельного разрешения РЭМ.*
- 3. Формирование топографического контраста в РЭМ.*

Для того чтобы на экране ЭЛТ можно было наблюдать картину отображения образца, необходимо, чтобы интенсивность свечения соседних пикселей была различной. Для того чтобы количественно описать это требование необходимо ввести понятие контрастности изображения.

Если в двух пикселях экрана 1 и 2 (для глаза это соответственно точки) величина одного и того же вторичного излучения, в котором формируется изображение образца, различна по величине и, соответственно различен сигнал  $S$ , модулирующий яркость ЭЛТ, то принимается, что существует контрастность изображения между этими точками и мерой контраста является величина

$$C = \frac{|S_1 - S_2|}{S_{cp}} = \frac{\Delta S}{S_{cp}}$$

где  $S_1$  и  $S_2$  – сигнал от элементов изображения 1 и 2,  $S_{cp}$  – усредненный по всем элементам уровень сигнала.

Так как картинка на экране ЭЛТ предназначена для человеческого глаза, то применим критерий Рэля: точки разрешаются (т.е. воспринимаются отдельно), если минимальная интенсивность в промежутке не больше  $\frac{3}{4}$  максимальной интенсивности, т.е.  $\Delta S$  должно быть  $> \frac{1}{4} S_{\max}$ .

Отсюда следует,

**два соседних пикселя на ЭЛТ будут восприниматься отдельно, если их контрастность  $C$  не меньше 0,25.**

При сканировании электронного зонда по одному и тому же участку образца величина будет меняться, так как коэффициент отражения и коэффициент вторичной электронной эмиссии являются статистическими величинами.

Необходимо четко понимать:

**РЭМ – считывающее устройство дискретных событий.**

Для дискретных событий всегда существуют флуктуации в счете. Если  $n$  – среднее число отсчетов, то отклонение от среднего есть  $\sqrt{n}$ . Подобное случайное изменение полезных сигналов называется шумом. Мера качества сигнала – отношение величины сигнала к шуму. Для рассматриваемого случая сигнал есть  $n$  – среднее число электронов с элемента изображения, а шум –  $\sqrt{n}$ . Поэтому

$$dS \geq 5 \sqrt{n}$$

**для того чтобы контраст  $C$  имел место необходимо условие**

$$C = \frac{dS}{S} \geq \frac{5}{\sqrt{n}}$$

и, следовательно,  $n \geq 25 / C^2$

Величина  $n$  определяет минимальное значение среднего числа электронов, которые должны попасть за время  $t_0$  на каждый элемент изображения, при условии, что  **$\sigma = 1$  и все вышедшие из образца электроны попали в детектор, для того чтобы наблюдался заданный контраст.**

Считая, что отношение сигнал/шум не меняется на этапах усиления сигнала и воспроизведения на экране ЭЛТ, можно оценить минимально необходимый ток электронного зонда.

Время нахождения зонда на элементе изображения  $t_0 = t_k / 10^6$ , где  $t_k$  – время сканирования зонда по всему растру. Отсюда, считая, что образец обеспечивает контраст 0,25, минимальный ток зонда

$$I_{\min} = \frac{ne}{t_0} = \frac{25}{C^2} 1,6 \cdot 10^{-19} \frac{10^6}{t_k} = 6,4 \cdot 10^{-11} \frac{1}{t_k},$$

где  $I_{\min}$  – в А,  $t_k$  – в секундах.

Яркость электронных пушек  $\beta = 4I / \pi^2 d^2 \alpha^2$  в настоящее время  $\sim 10^5$  А/см<sup>2</sup>ср. Отсюда можно оценить диаметр пучка, т.е. размер элемента изображения. Для угла расходимости  $\alpha = 5 \cdot 10^{-3}$  радиан,  $t_k = 100$  с (больше сделать затруднительно из-за временной нестабильности тока зонда), получаем  $d = 30$  Å.

Такому размеру элемента изображения отвечает увеличение  $M = 30\,000$ .

Еще раз отметим, что приведенная оценка базировалась на следующих основных предположениях:

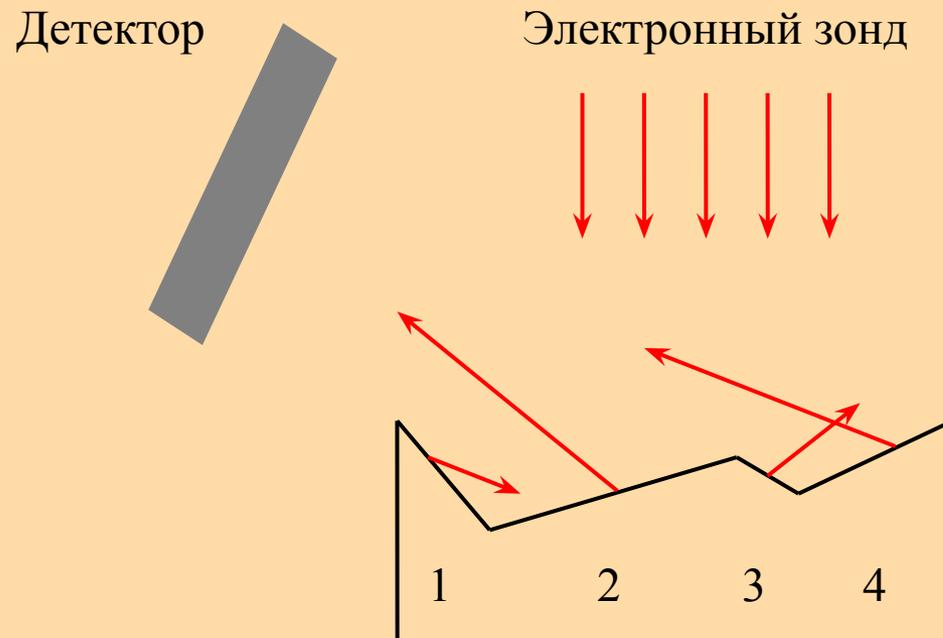
**1. Образец способен создать контраст 0,25.**

**2. Коэффициент электрон-электронной эмиссии = 1 и эффективность сбора электронов = 1.**

Если любое из них не выполняется, то необходим больший ток электронного зонда, что автоматически приводит к большим размерам элемента изображения, т.е. к худшей разрешающей способности РЭМ. Уменьшение  $d$  возможно при увеличении яркости. Именно по этому пути эволюционируют растровые электронные микроскопы. Использование автоэмиссионных катодов, имеющих большие значения яркости, выигрыша не дает из-за их временной нестабильности (маленькие  $t_k$ ).

Формирование топографического контраста в РЭМ обусловлено угловыми характеристиками отраженных и вторичных электронов.

## Формирование контраста в отраженных электронах.

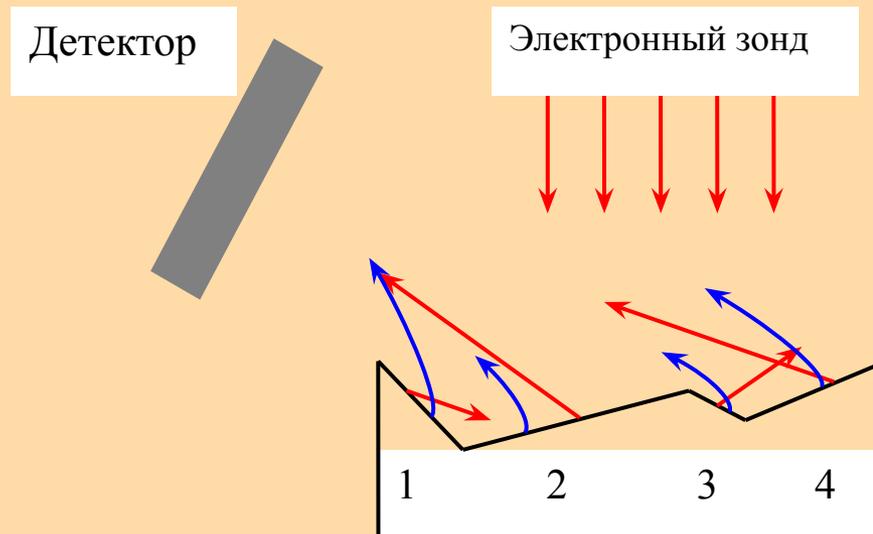


**Для того чтобы исключить попадание в детектор вторичных электронов на его экран подается потенциал – 50 В.**

Так как максимальный выход отраженных электронов в случае наклонного падения направлен в направлении зеркального отражения, то с участков образца 1 и 3 сигнала в отраженных электронах практически не будет. С участков 2 и 4 сигнал будет максимальным при расположении детектора, показанного на рисунке. Перемещая детектор, можно добиться того, что сигнал с участков 2 и 4 практически пропадет, а с участка 3, наоборот, сделается максимальным. Величина контраста в приведенном примере определяется различием в числе электронов, отраженных различными участками образца.

**Формирование контраста во вторичных электронах**

В этом случае на экран детектора подается потенциал + 250 В, который втягивает вторичные электроны (синие стрелки) в детектор.



Контраст во вторичных электронах формируется за счет того, что коэффициент выхода вторичных электронов зависит от угла падения первичного пучка на образец  $\delta(\alpha) = \delta/\cos\alpha$ , где  $\delta$  – коэффициент выхода вторичных электронов при облучении по нормали к поверхности.

Поэтому количество вторичных электронов с участка 1 максимально, а с участков 2 и 3 примерно равны друг другу.

Следует иметь в виду, что отраженные электроны также попадут в детектор, поэтому к контрасту во вторичных электронах добавляется контраст в отраженных электронах. Поэтому максимальный сигнал с детектора даст участок 4 – большое количество как вторичных, так и отраженных электронов. Если переместить детектор, то ситуация может измениться.

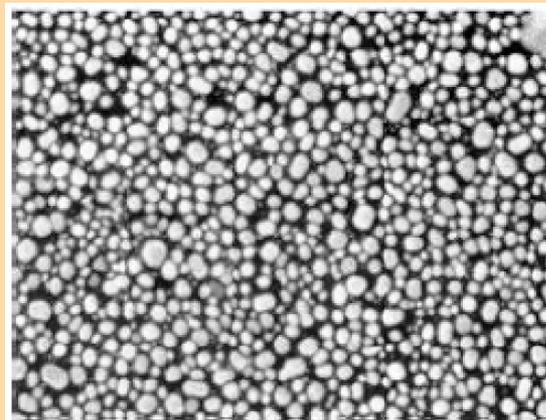
Посчитаем контраст во вторичных электронах для двух участков образца, наклоненных относительно нормали к поверхности под углами  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . В этом случае контраст

$$C = \frac{i_{\text{ВЭ}}(\alpha_1) - i_{\text{ВЭ}}(\alpha_2)}{[i_{\text{ВЭ}}(\alpha_1) + i_{\text{ВЭ}}(\alpha_2)]/2} = 2 \frac{\frac{1}{\cos \alpha_1} - \frac{1}{\cos \alpha_2}}{\frac{1}{\cos \alpha_1} + \frac{1}{\cos \alpha_2}} = 2 \operatorname{tg} \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \operatorname{tg} \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}$$

При  $\alpha_1 = 30^\circ$  и  $\alpha_2 = 60^\circ$  получается величина контраста  $C = 0,54$ . Даже при близких углах, например,  $\alpha_1 = 60^\circ$  и  $\alpha_2 = 65^\circ$   $C = 0,17$ .

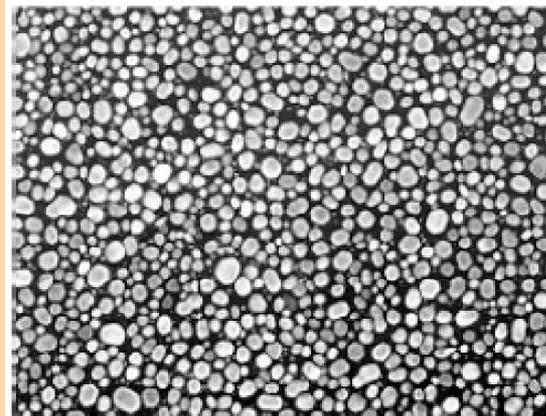
**Вторичные электроны способны создать очень большой топографический контраст**

Фотографии одного и того же участка напыленной золотой пленки, снятые при одинаковом увеличении  $M = 36\,000$  **при различных ускоряющих напряжениях**



(a) 5 kV

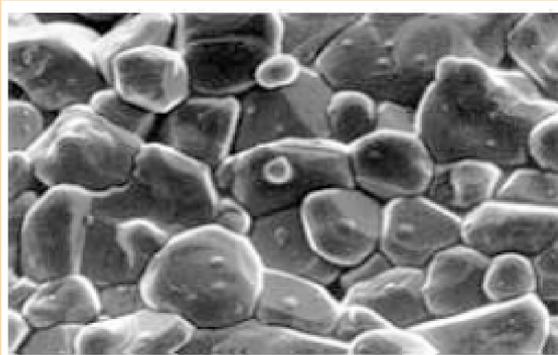
x 36,000



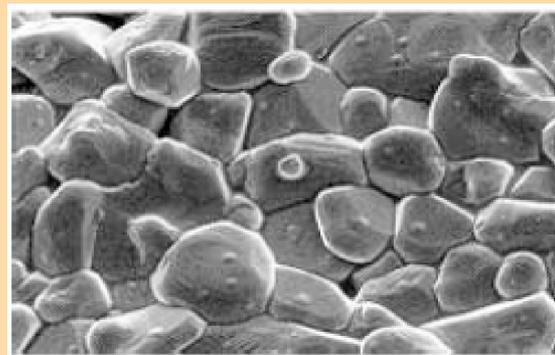
(b) 25 kV

x 36,000

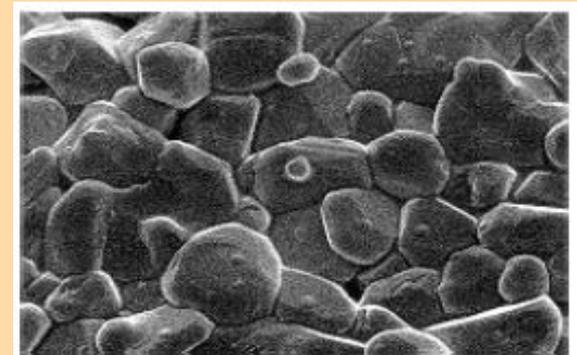
Фотографии одного и того же участка керамического образца, снятые при одинаковом увеличении  $M = 5400$  и ускоряющем напряжении 10 кВ **при различных значениях  $I_z$**



(a) 1 nA



(b) 0.1 nA



(c) 10 pA

## Влияние расположения детектора

Снят один и тот же участок поверхности асбестовой нити при увеличении  $M = 2\ 200$ , ускоряющем напряжении 7 кВ при различных ориентациях детектора.

