

# Приемы деликатного сканирования

(если у вас прямые руки)

# Некоторые особенности



Разница между перемещением столика образцов и изменением параметров электронного зонда

Различные действия	Одинаковый результат в окне сканирования
Изменение WD	Фокусировка/расфокусировка объекта
Z-перемещение столика образцов	
Вращение зонда	Вращение объекта
Вращение столика образцов	
Сдвиг области сканирования	Перемещение объекта
X-Y перемещения столика образцов	

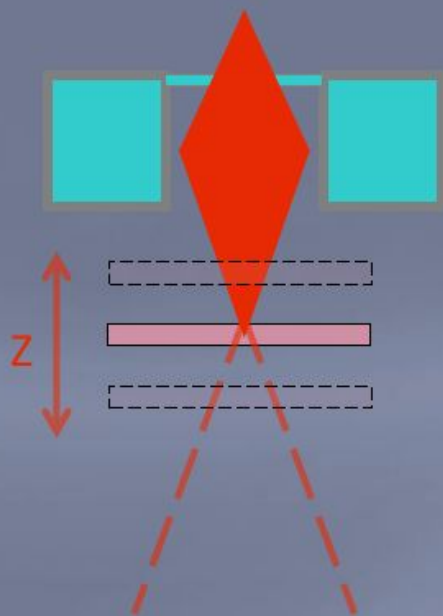
# Некоторые особенности

## Фокусировка



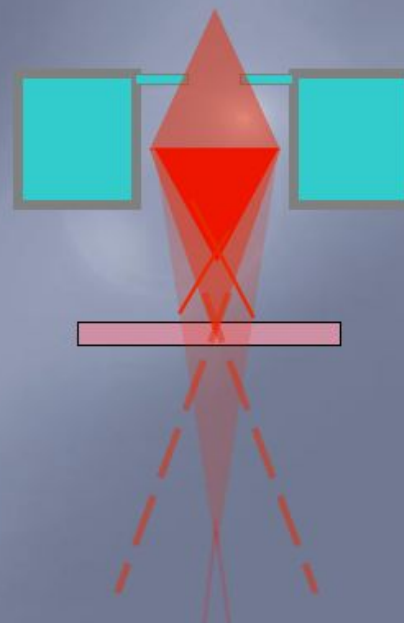
Сценарий 1: Z

Z-перемещение столика образцов



Сценарий 2: WD

Изменение параметров электронного зонда



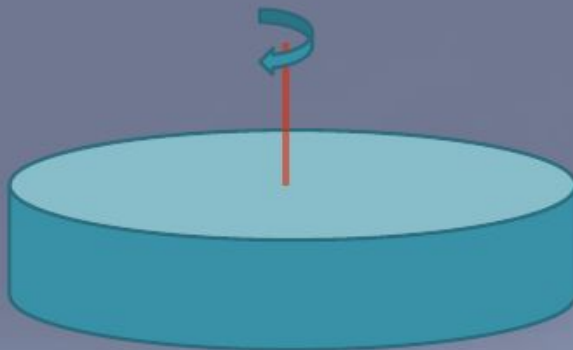
# Некоторые особенности



## Вращение

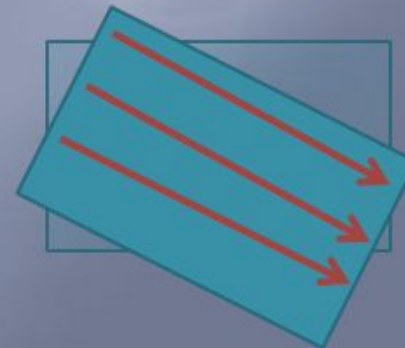
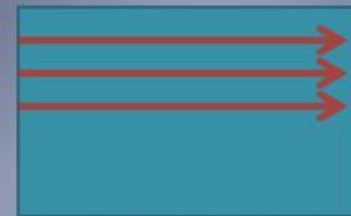
Сценарий 1: stage rotation

Вращение столика образцов



Сценарий 2: scan rotation

Поворот направления сканирования

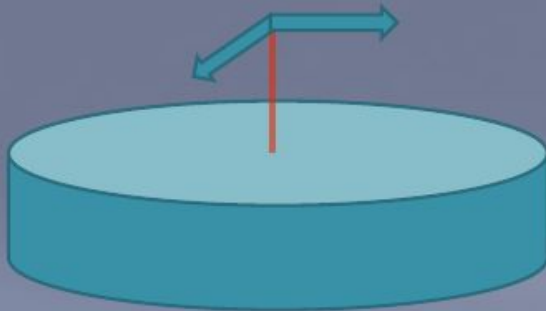


# Некоторые особенности

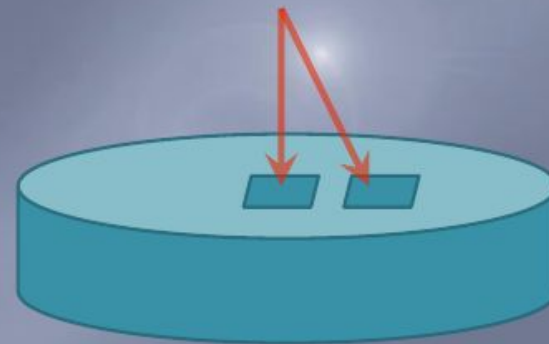


## Перемещение

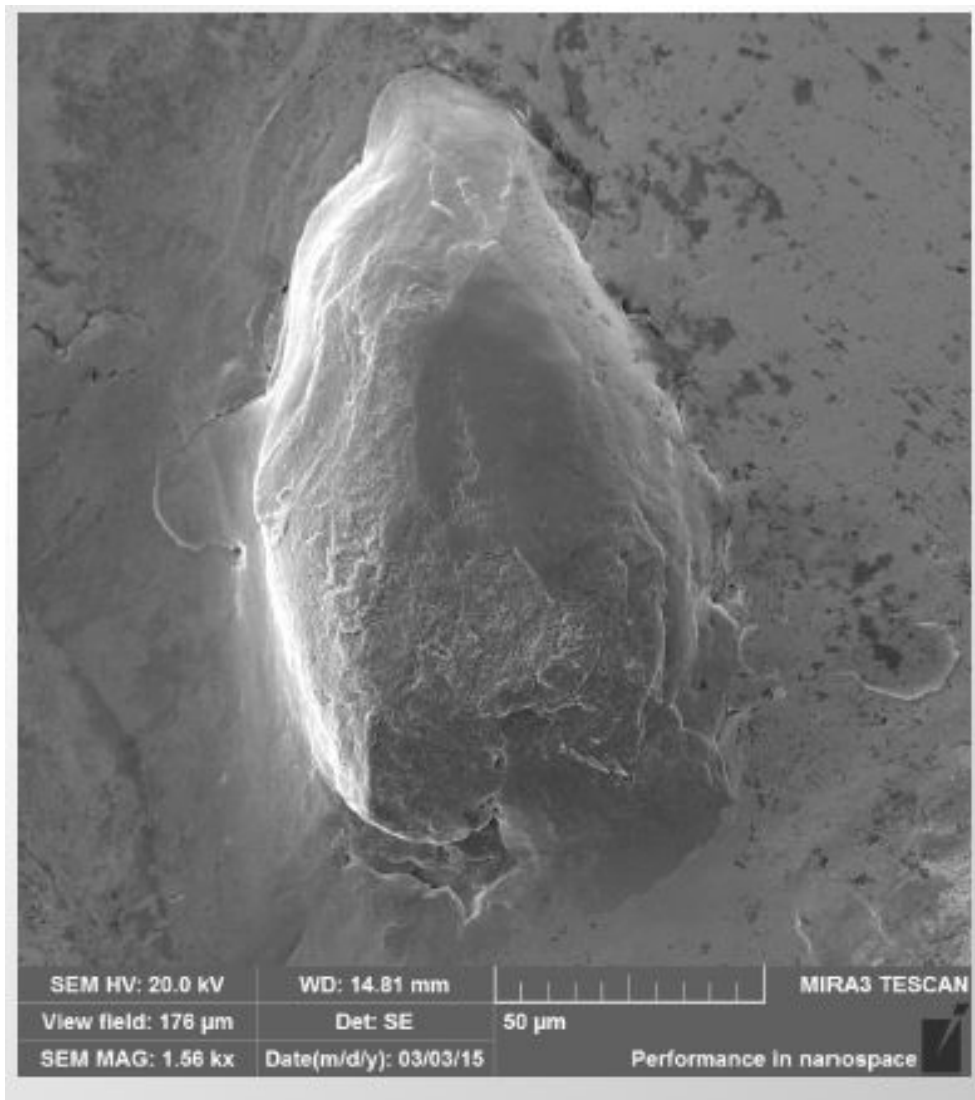
Сценарий 1: stage movements  
X-Y перемещения столика образцов



Сценарий 2: image shift  
Смещение области сканирования

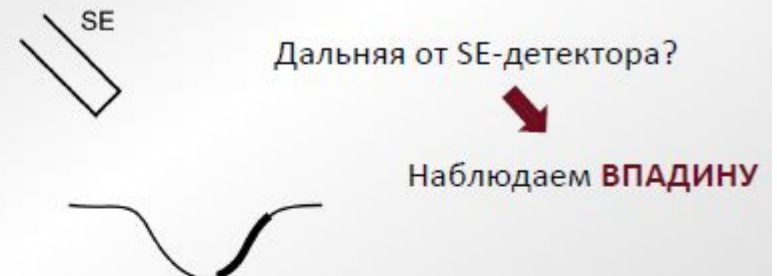
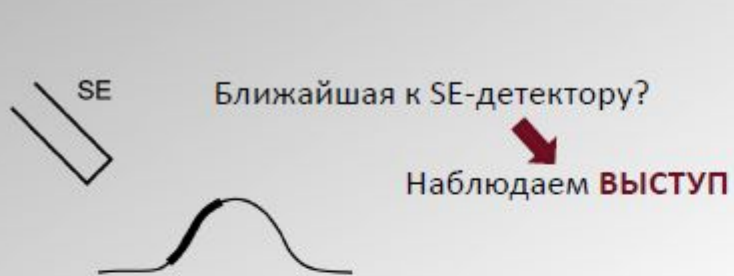


# Реальный объем образца

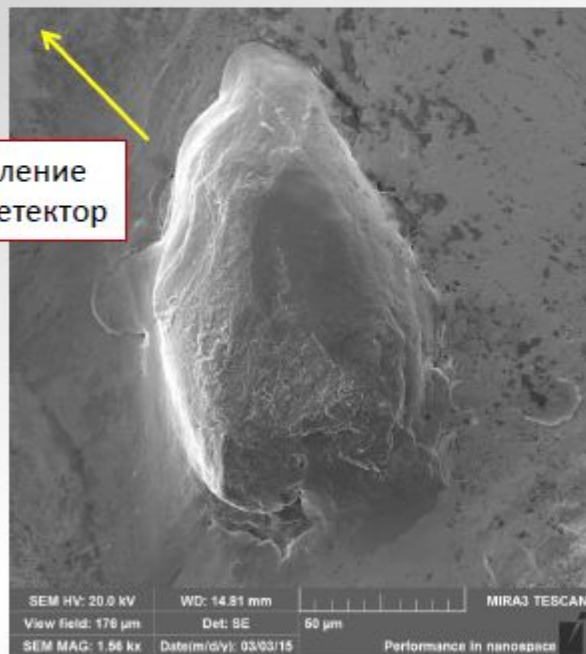


# Реальный объем образца

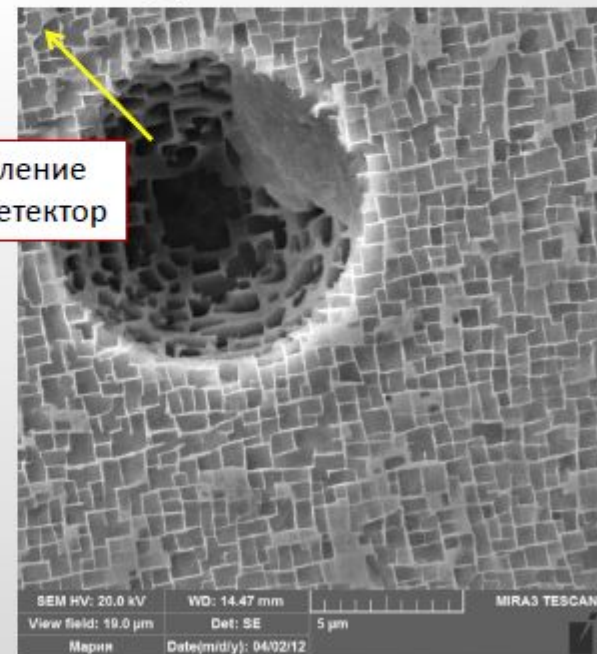
Какая часть объекта более яркая на SE-изображении?



Направление  
на SE-детектор

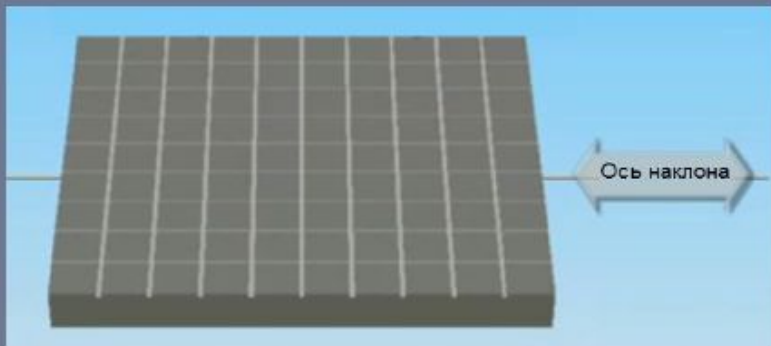


Направление  
на SE-детектор



# Наклон образца

Сжатие вертикальных размеров на изображении при наклоне



шаг электронного зонда  $\Delta x_{\text{зонд}}$



Ось наклона

шаг электронного зонда  $\Delta y_{\text{зонд}}$



Ось наклона

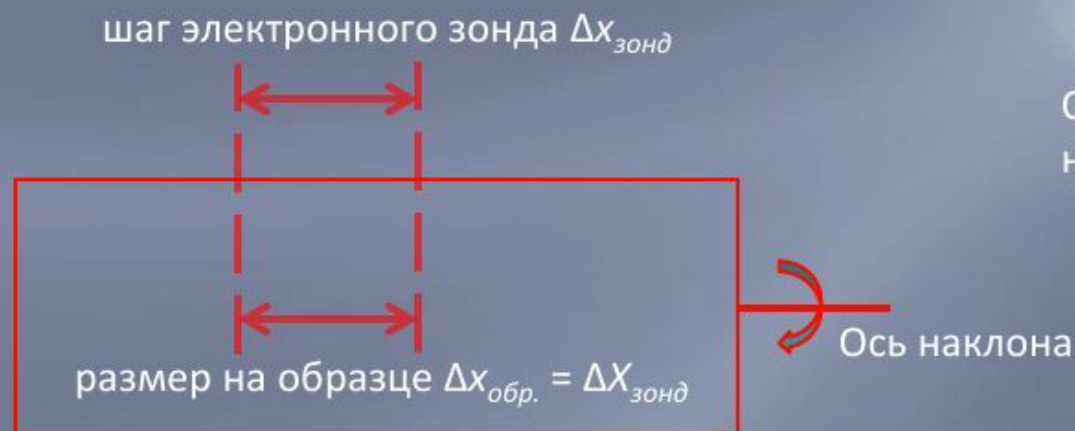


# Наклон образца

## Коррекция наклона

СЭМ → Геометрические преобразования → Корр. наклона

Уменьшение вертикального шага электронного зонда  $\Delta y_{\text{зонд}}$  так, чтобы  $\Delta y_{\text{обр.}} = \Delta x_{\text{обр.}}$ . Для использования функции «Коррекция наклона» требуется знать угол наклона и указать его при активации этой функции.



шаг электронного зонда  $\Delta y_{\text{зонд}}$




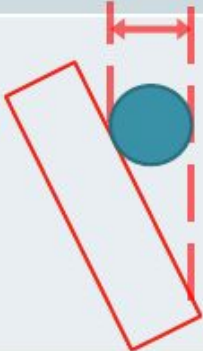
Ось наклона

размер на образце  $\Delta y_{\text{обр.}} = \Delta x_{\text{обр.}}$

The diagram shows a tilted rectangular sample. A vertical red double-headed arrow is shown to the left of the sample, labeled "шаг электронного зонда  $\Delta y_{\text{зонд}}$ ". A red double-headed arrow is drawn along the top edge of the tilted sample, labeled "размер на образце  $\Delta y_{\text{обр.}} = \Delta x_{\text{обр.}}$ ". To the left of the sample, a red curved arrow indicates a rotation around a vertical axis labeled "Ось наклона".

# Наклон образца

Искажение линейных размеров при наклоне

	Монета	Сфера
без наклона		
с наклоном		

При наклоне *плоских объектов* коррекцию наклона применять обязательно!

При наклоне *рельефных объектов* применение коррекции наклона будет грубой ошибкой!

# Наклон образца



## Наклон и измерения линейных размеров

Корректные измерения линейных размеров возможны только на горизонтально расположенных объектах либо на объектах, угол наклона которых известен.

Задача: измерить толщину вольфрамовой пленки на кремниевой подложке

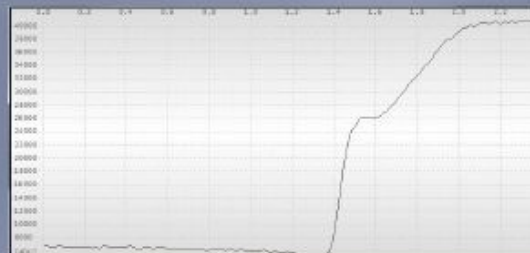
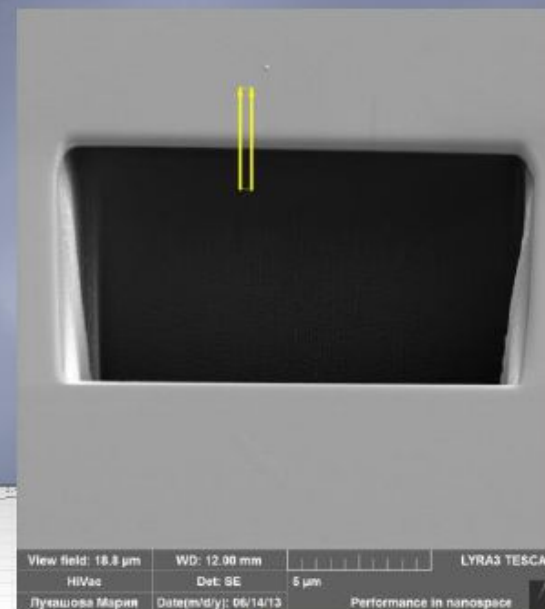
Наклон образца  $55^\circ$ , поперечное сечение перпендикулярно поверхности образца выполнено с помощью ионной колонны в СЭМ TESCAN LYRA. Анализ профиля яркости и поправка на искажение пропорций:

измеренная толщина W-пленки:

**~ 290 нм,**

реальная толщина W-пленки:

$290 \text{ нм} / \cos(35^\circ) = \sim 350 \text{ нм}$

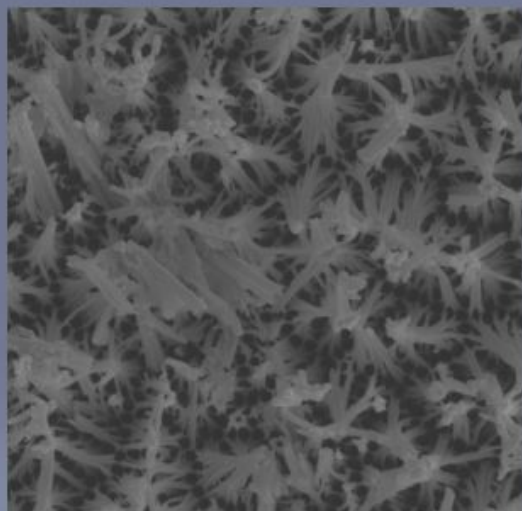


# Ручная настройка контраста

## Яркость/контраст

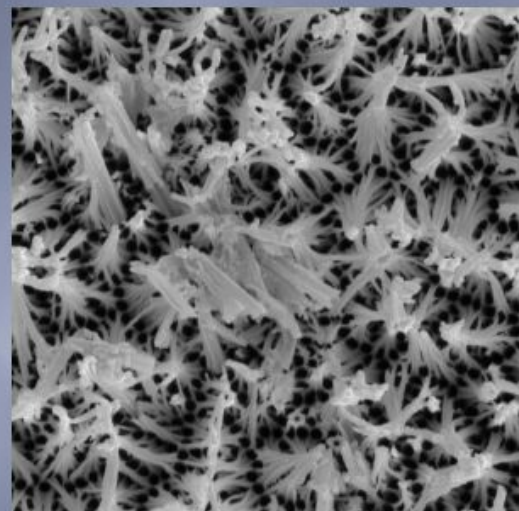


корректно, но некрасиво



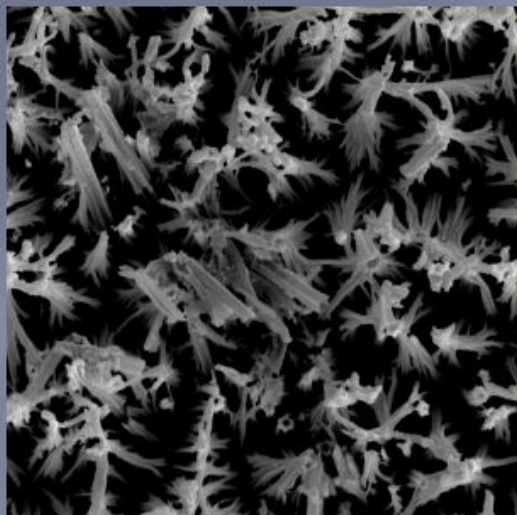
SEM HV: 5.80 kV WD: 5.000 mm MIRA\\ TESCAN  
View field: 5.343  $\mu$ m Del: SE Detector 1  $\mu$ m  
Date(m/d/y): 03/25/09 Mapira Exlon Analytic, Russia

красиво и корректно



SEM HV: 5.80 kV WD: 4.999 mm MIRA\\ TESCAN  
View field: 5.518  $\mu$ m Del: SE Detector 1  $\mu$ m  
Date(m/d/y): 03/25/09 Mapira Exlon Analytic, Russia

красиво, но некорректно



SEM HV: 5.80 kV WD: 4.999 mm MIRA\\ TESCAN  
View field: 5.518  $\mu$ m Del: SE Detector 1  $\mu$ m  
Date(m/d/y): 03/25/09 Mapira Exlon Analytic, Russia

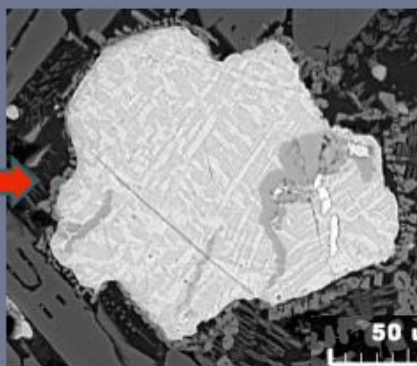
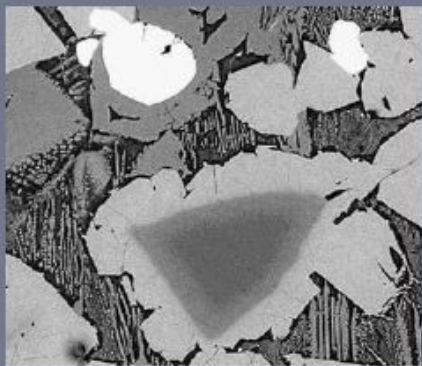
мембрана состава  $Al_2O_3$

# Ручная настройка контраста



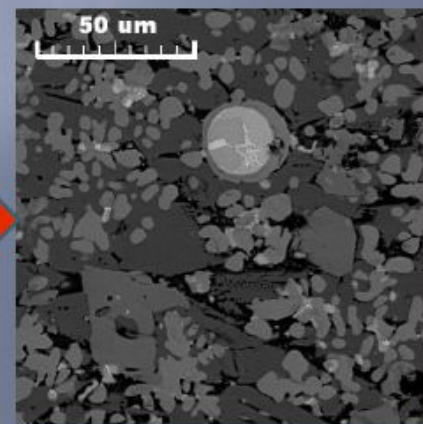
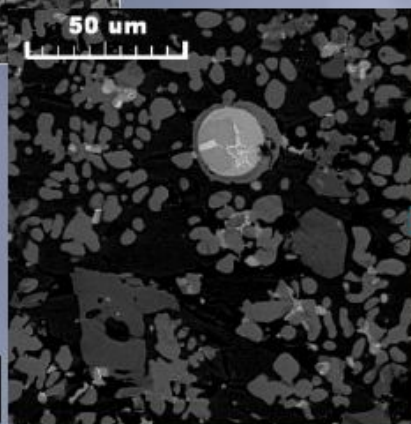
## Некорректные яркость/контраст

Слишком белые участки могут быть многофазны



огнеупорный материал, прошедший высокотемпературную обработку

Слишком черные участки могут быть многофазны



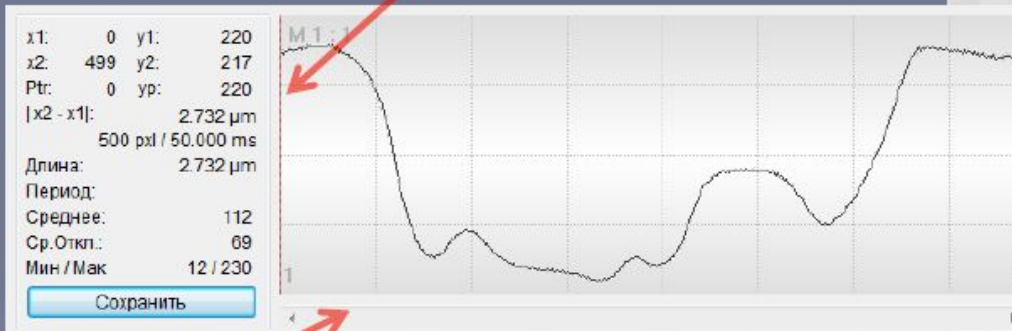
конвертерный шлак

# Ручная настройка контраста

## Профиль яркости

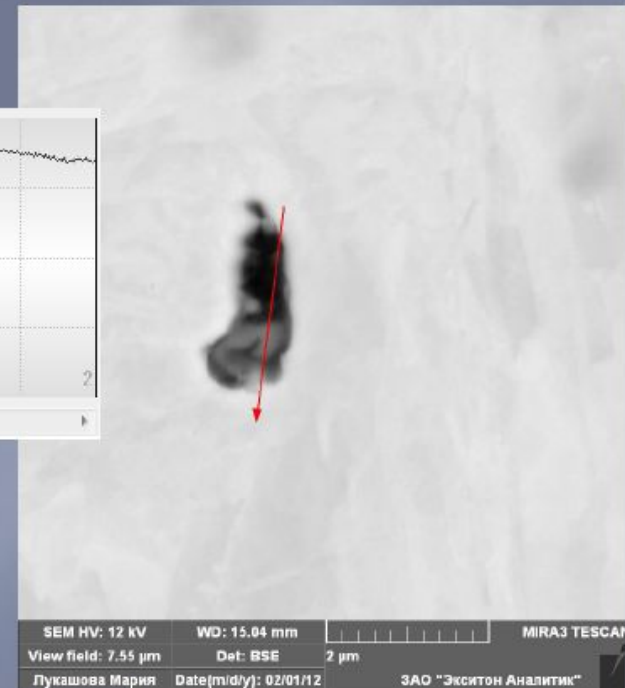


Ось  $OY$ : интенсивность сигнала  
(от 0 до 255 либо от 0 до 16 384 градаций серого,  
см. Сервис → Предпочтения → Интенсивность)



Ось  $Ox$ : расстояние вдоль линии сканирования

Не должно быть участков профиля яркости, интенсивность сигнала которых пересекает нижнюю или верхнюю границы диапазона!



неметаллическое включение в стали

# Ручная настройка контраста

Нелинейная передаточная функция детектора  
(гамма-коррекция)



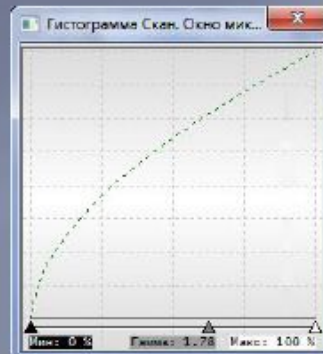
Если на одном изображении требуется различить:

несколько темных компонентов, не засвечивая при этом светлых,

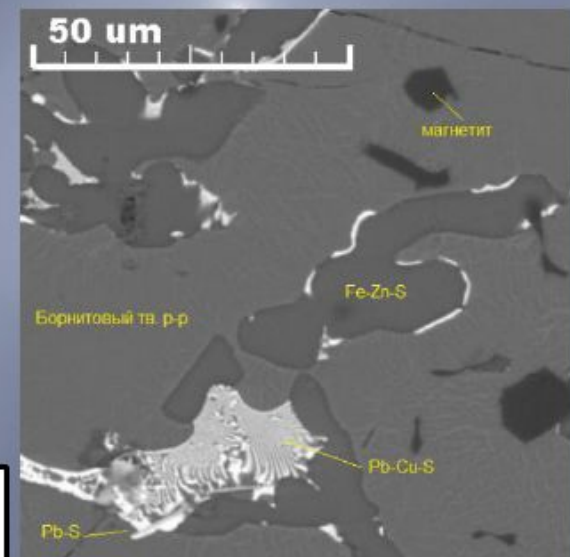
несколько светлых компонентов, не превратив при этом темные компоненты в черные,

то надо использовать функцию

«Инструменты» → «Гистограмма» →



Штейн СУМЗ печи Ванюкова (сульфиды свинца на фоне сульфидов железа и меди)



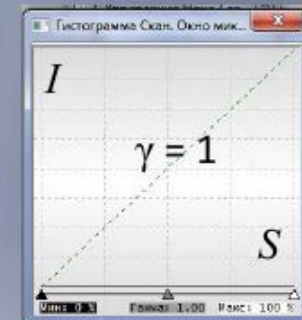
# Ручная настройка контраста

Нелинейная передаточная функция детектора (гамма-коррекция)

$S$  – сигнал, регистрируемый детектором

$I$  – уровень серого на изображении

Если передаточная функция детектора линейная, то  $I = K \cdot S$



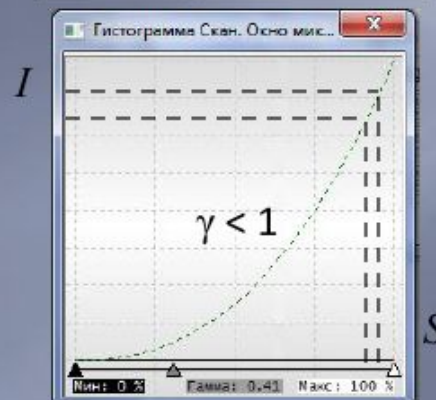
Селективное расширение диапазона контраста:

вблизи уровня черного



в темной области небольшим изменениям сигнала соответствуют большие изменения уровня серого

вблизи уровня белого



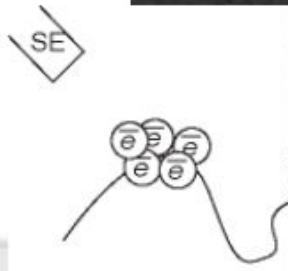
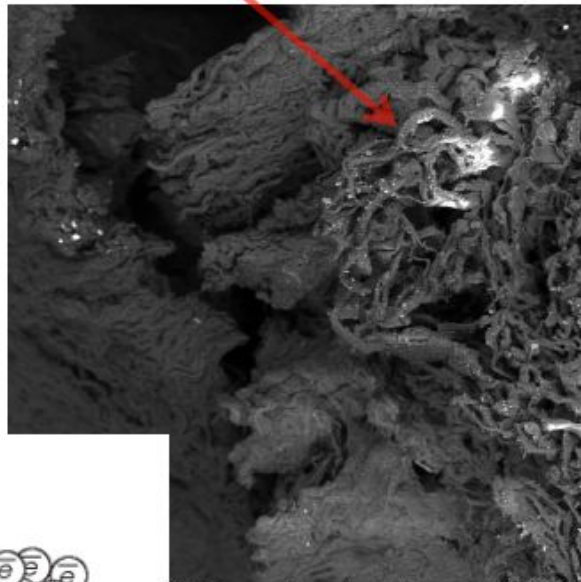
в светлой области небольшим изменениям сигнала соответствуют большие изменения уровня серого



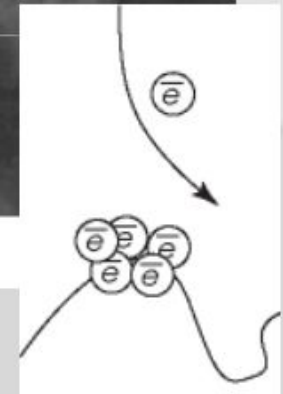
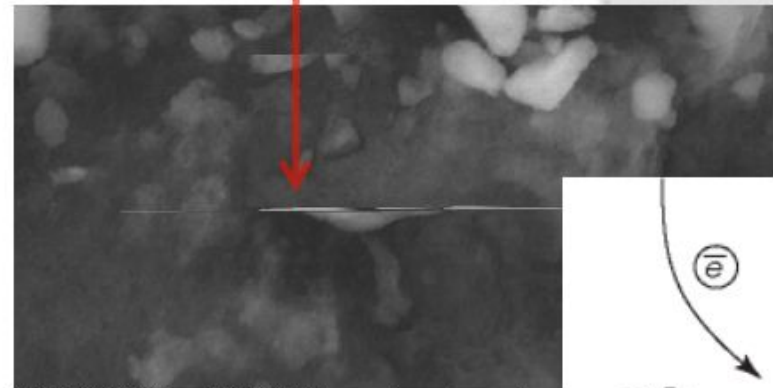
# Заряд образца

## Артефакты, связанные с недостаточной электропроводностью образцов

Накопление заряда на локальных участках образца



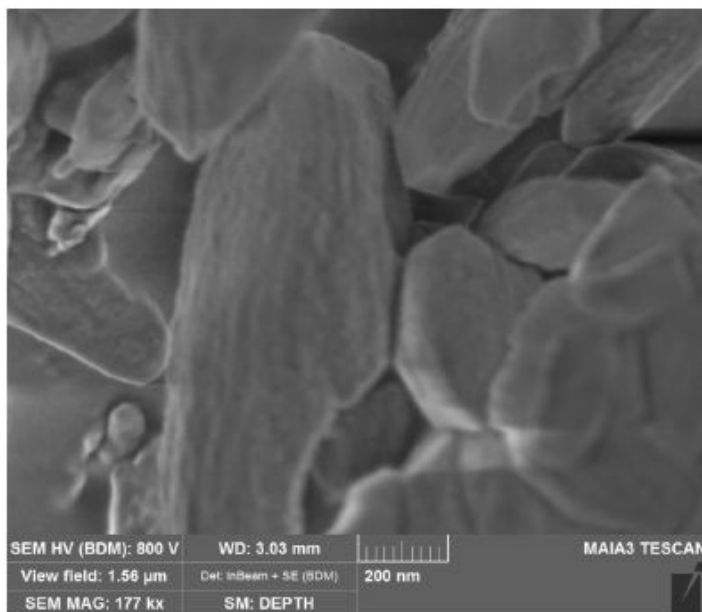
Сдвиг области сканирования из-за электростатического отталкивания между падающими электронами и электронами на образце



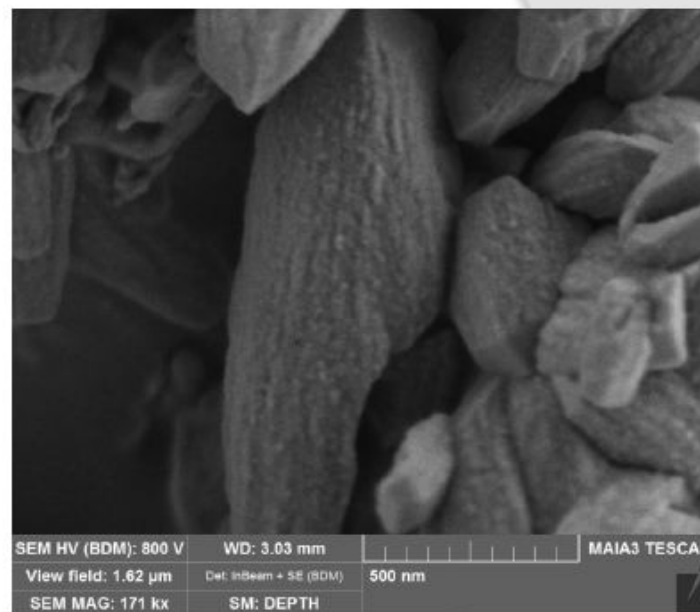
# Заряд образца

## Артефакты, связанные с недостаточной электропроводностью образцов

Ретуширование тонкой структуры поверхности образца (одна из возможных причин – электроны первичного пучка не достигают поверхности образца из-за электронного облака на образце)



Медленное сканирование,  
заряд накапливается



Быстрое сканирование с наложением кадров,  
заряд не накапливается

# Заряд образца

Поиск равновесия между количеством падающих электронов и количеством электронов, покинувших поверхность образца

коэффициент эмиссии BSE:

$$\eta = \frac{N_{\text{BSE}}}{N_{\text{зонда}}}$$

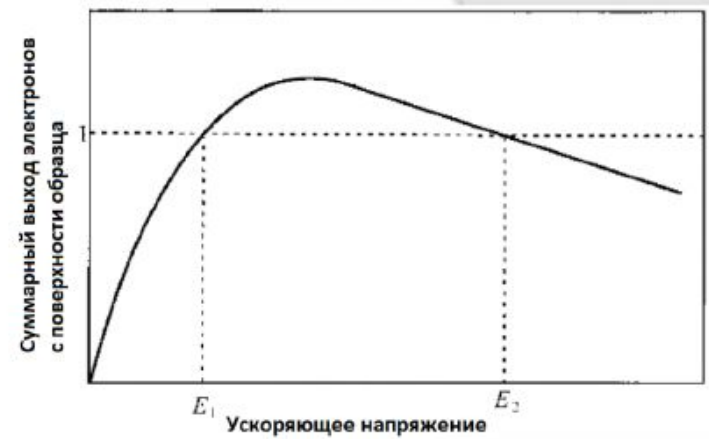
коэффициент эмиссии SE:

$$\delta = \frac{N_{\text{SE}}}{N_{\text{зонда}}}$$

Есть ускоряющие напряжения  $E_1$  и  $E_2$ , при которых скорость эмиссии электронов равна скорости поглощения электронов, т.е. непроводящий образец «ведет себя» как проводящий. Обычно  $E_2 < 5$  кэВ.

Между  $E_1$  и  $E_2$  аномальная область, в которой выходящих электронов больше, чем поглощенных.

Зависимость между ускоряющим напряжением и суммой ( $\eta + \delta$ )



$N_{\text{зонда}}$ ,  $N_{\text{SE}}$ ,  $N_{\text{BSE}}$  – количество падающих электронов, генерированных вторичных и отраженных электронов в единицу времени, соответственно

# Заряд образца

## Поиск равновесия между количеством падающих электронов и количеством электронов, покинувших поверхность образца

$E_2$  можно найти только эмпирически.

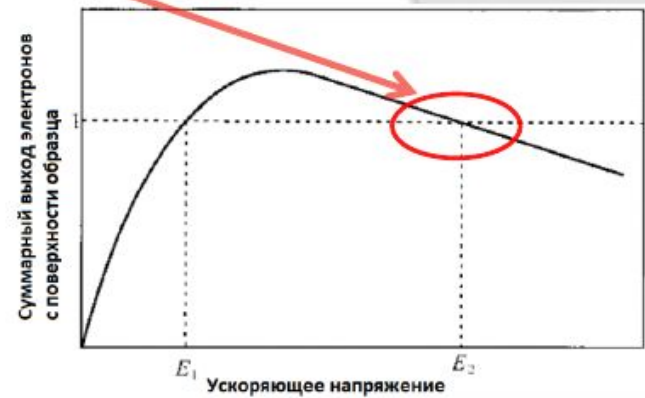
Эффекты, которые в этом помогают:

— «самонаводящаяся» система в окрестности  $E_2$ :

- при  $E < E_2$  на образце накапливается положительный потенциал, который действует на падающий электронный пучок как небольшое увеличение ускоряющего напряжения в сторону  $E_2$ ;
- при  $E > E_2$  на образце накапливается отрицательный потенциал, который действует как торможение ускоряющего напряжения в сторону  $E_2$ ;

— **наклон образца**, что увеличивает количество электронов эмиссии, а значит приближает систему к точке  $E_2$  со стороны  $E > E_2$ .

Зависимость между ускоряющим напряжением и суммой ( $\eta + \delta$ )



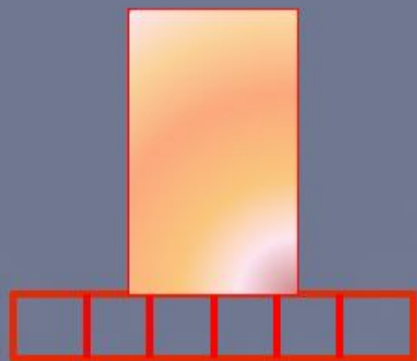
**$E_2$  для большинства материалов  $< 5$  кэВ;**  
( $E_1$  обычно не рассматривается, так как лежит в области очень малых ускоряющих напряжений)

# Режимы сканирования



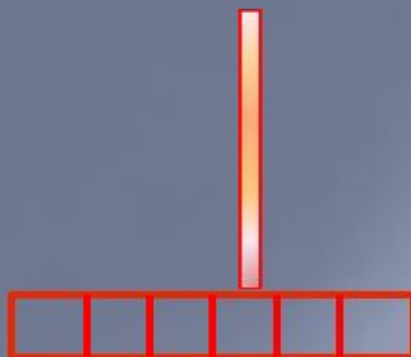
## Увеличение и размер зонда

$d_3$  – размер зонда,  $p$  – размер пикселя на образце



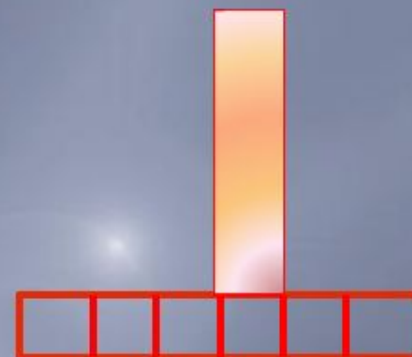
$$d_3 > p$$

Усреднение сигналов с соседних пикселей, деградация разрешения



$$d_3 \ll p$$

Возможная нехватка полезного сигнала при том же разрешении изображения. Допустимо, если ток зонда и время экспозиции позволяют получить качественное отношение сигнал/шум с каждого пикселя



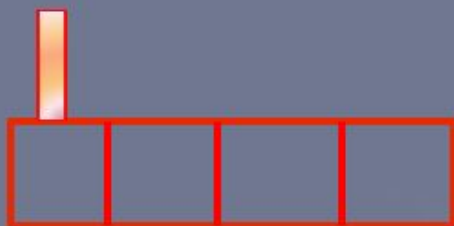
$$d_3 \approx p$$

Оптимально. На VEGA автоматически настраивается по правой кнопке на живом изображении, **Авто VI OptiMag**.

# Режимы сканирования



Зачастую выгоднее увеличить количество пикселей и снизить скорость сканирования!  
(Особенно для деликатных образцов)

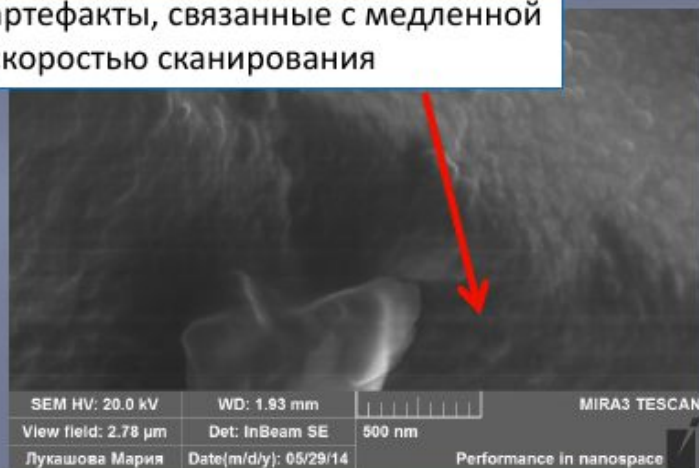


768 x 768 пикселей, скорость «6», 32 сек./кадр

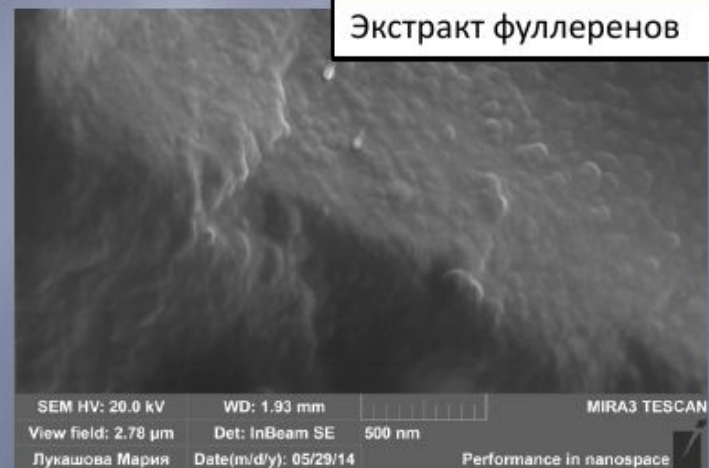


2048 x 2048 пикселей, скорость «4», 15 сек./кадр

артефакты, связанные с медленной скоростью сканирования



Экстракт фуллеренов



# Режимы сканирования

## «СЭМ» → «Параметры картинки»

Параметры картинки СЭМ

Окна  
Живое: 1 : 1 768 x 768  
Запись: 1 : 1 8192 x 8192

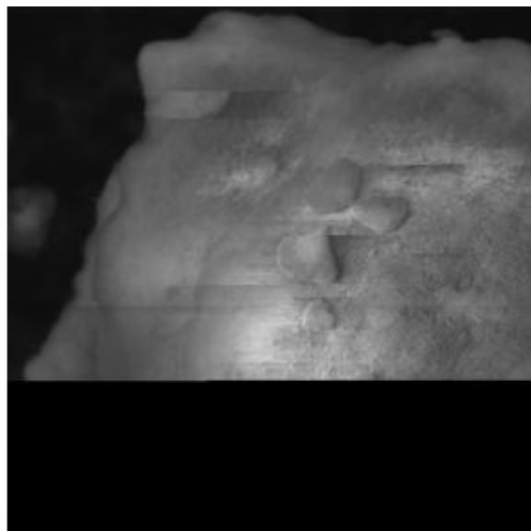
Усреднение:  
Использовать накопление ка: Включить  
Накопление живой картинки: 2  
Сохранить накопление картинки: 100

Накопление  
Acquisition time: 12 min 27 s  
Сохранить текущую скорость  
Сохранить видим. поле / увелич. печати

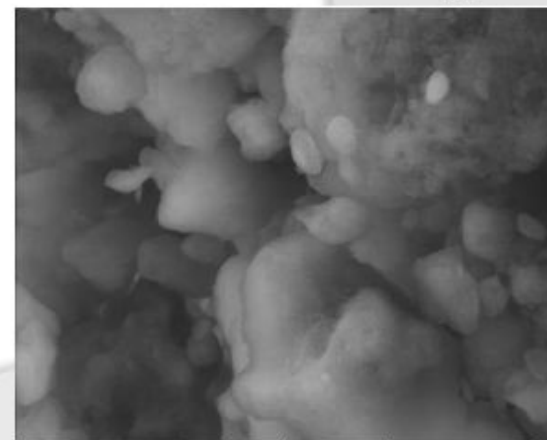
Тексты ИнфоСтроки  
 Показать ИнфоСтроку  
HV WD  
Видимое поле Детектор  
Имя пользовател Дата  
 Внедрить текст Заметки и Подписи  
Применить

Быстрое сканирование с наложением кадров  
либо с наложением данных вдоль линии:  
для заряжающихся или деликатных объектов

Медленное сканирование  
без наложения кадров



Быстрое сканирование  
с наложением кадров



нано-корунд

SEM HV: 10.00 kV WD: 2.970 mm MIRA0, TESCAN  
View field: 9.477 µm Det: LVSTD 2 µm  
Date(m/d/y): 12/16/09 Мария Exilon Analytic, Russia

SEM HV: 10.00 kV WD: 5.547 mm MIRA0, TESCAN  
View field: 11.40 µm Det: LVSTD 2 µm  
Date(m/d/y): 12/17/09 Мария Exilon Analytic, Russia

# Деликатное сканирование

- Быстрое сканирование с наложением кадров.
- Быстрое сканирование с наложением данных вдоль линии.
- Быстрое сканирование с увеличенным количеством пикселей на кадр (при этом электронный зонд проходит большее количество шагов, но на каждый шаг тратит меньше времени; в целом это уменьшает радиационные повреждения образца при том же качестве картинки; недостаток — «тяжелые» файлы изображений).
- Настройка фокуса и стигматоров на одном участке, а итоговое сканирование соседнего участка с помощью опции «сдвиг зонда».