

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	

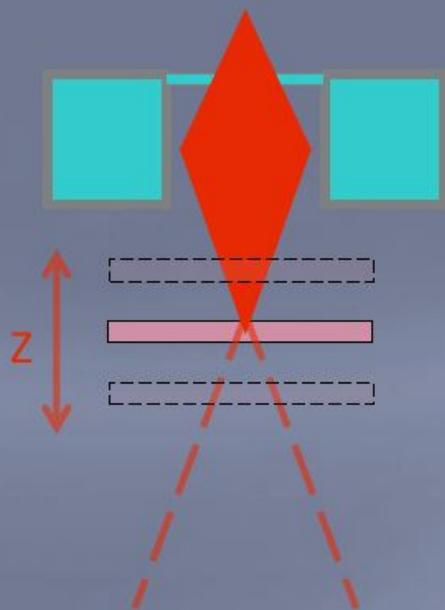
Некоторые особенности

Фокусировка



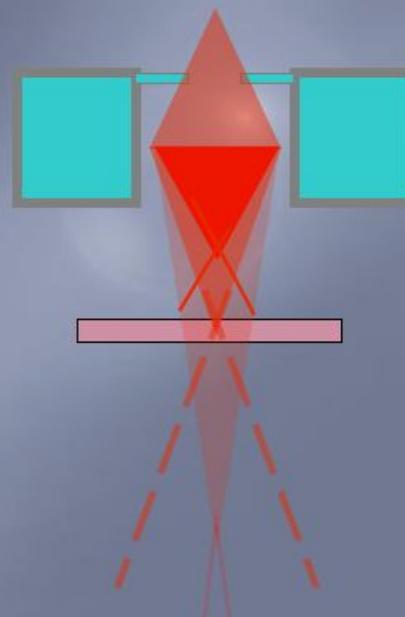
Сценарий 1: Z

Z-перемещение столика образцов



Сценарий 2: WD

Изменение параметров электронного зонда



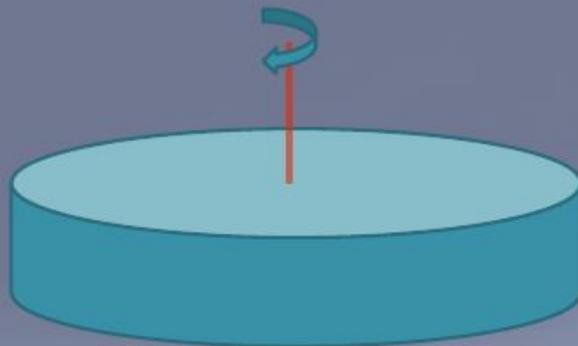
Некоторые особенности



Вращение

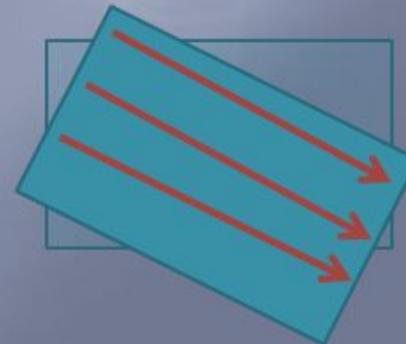
Сценарий 1: stage rotation

Вращение столика образцов



Сценарий 2: scan rotation

Поворот направления сканирования



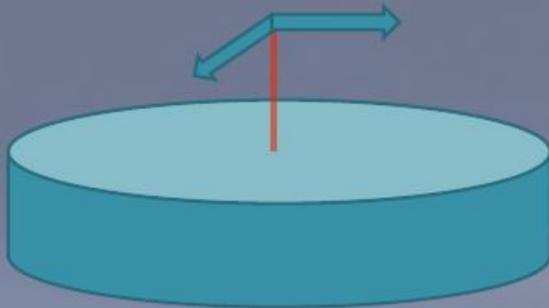
Некоторые особенности



Перемещение

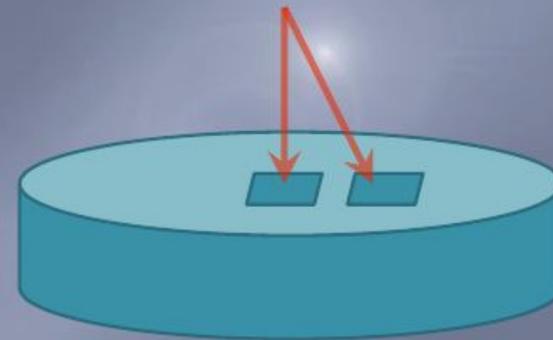
Сценарий 1: stage movements

X-Y перемещения столика образцов

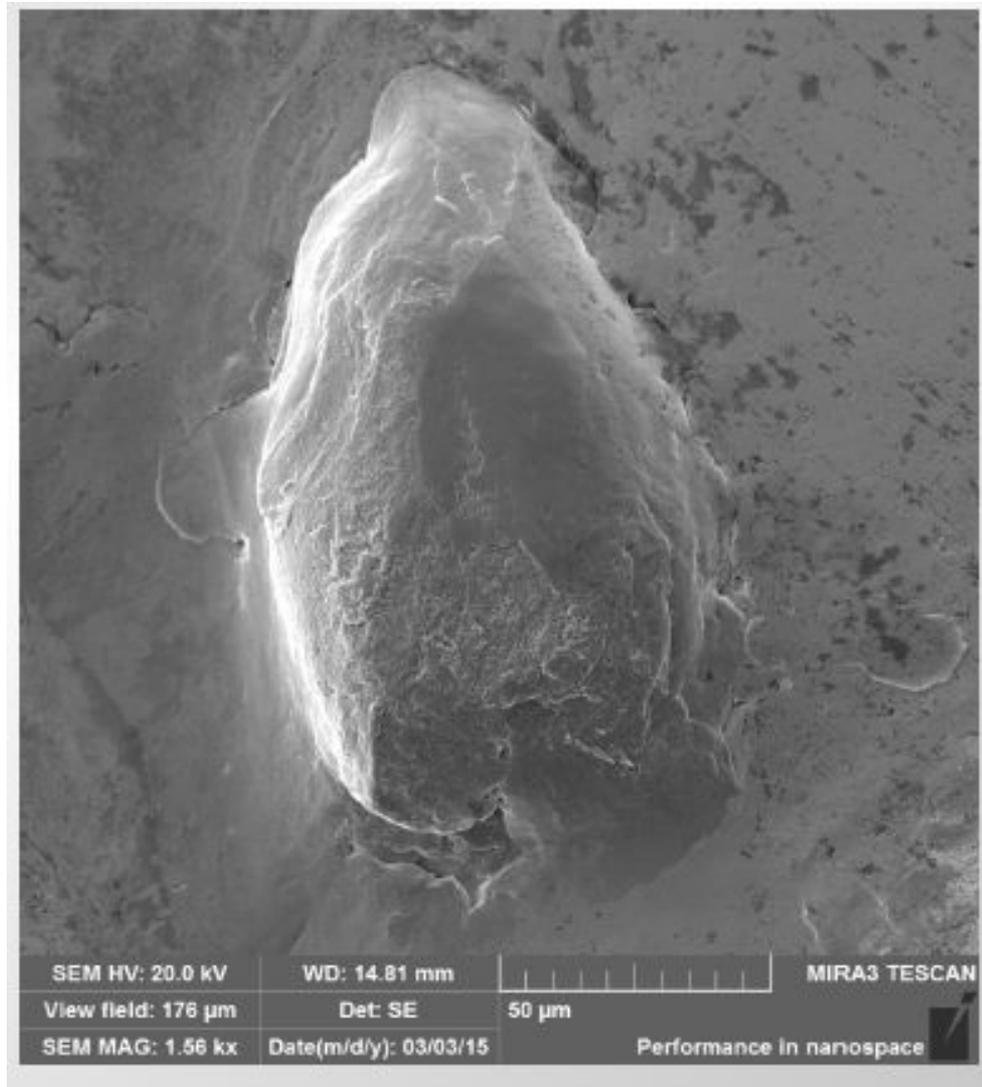


Сценарий 2: image shift

Смещение области сканирования

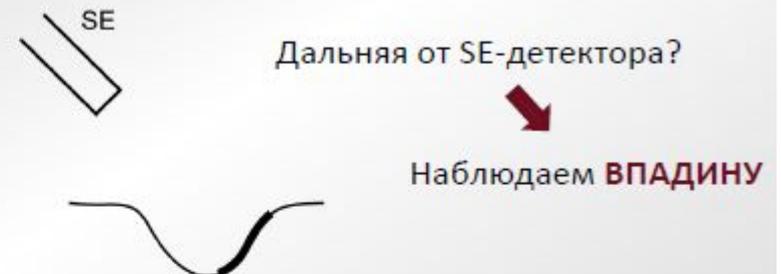
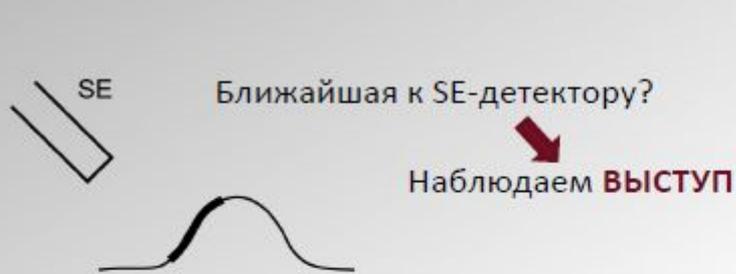


Реальный объем образца

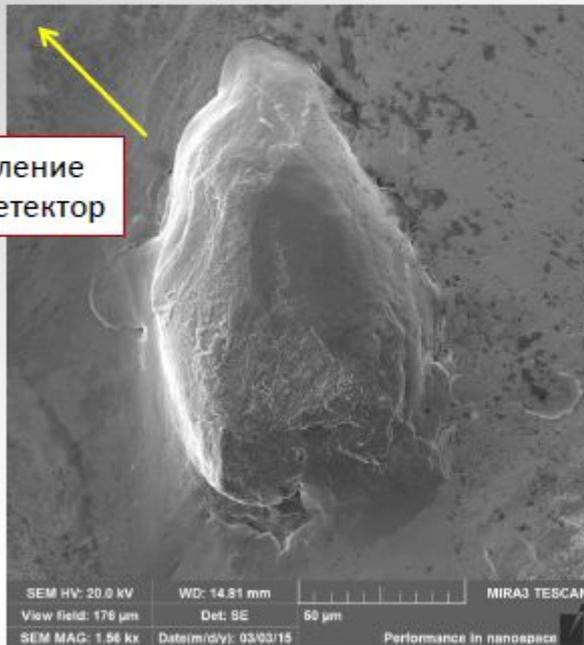


Реальный объем образца

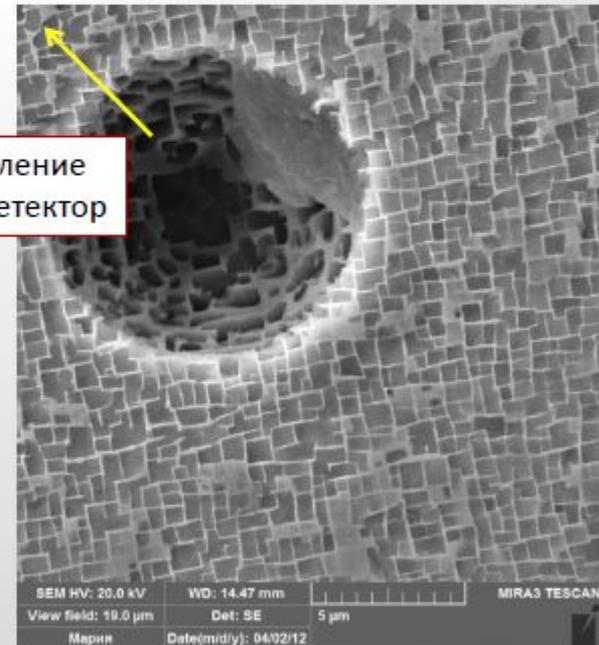
Какая часть объекта более яркая на SE-изображении?



Направление
на SE-детектор

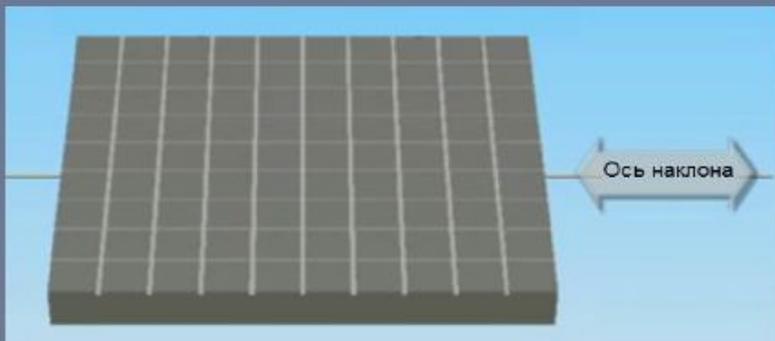


Направление
на SE-детектор



Наклон образца

Сжатие вертикальных размеров на изображении при наклоне



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



Ось наклона

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



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 $\Delta y_{\text{зонд}}$

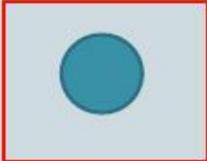
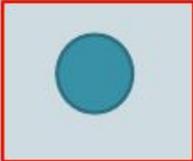
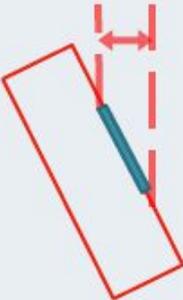
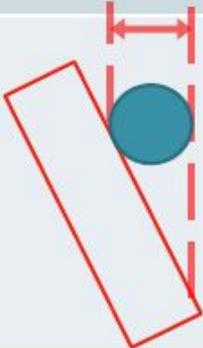
Ось наклона

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

The diagram shows a tilted rectangular sample. A red double-headed arrow indicates the probe step $\Delta y_{\text{зонд}}$ perpendicular to the sample's surface. A red arrow along the sample's surface indicates the probe step $\Delta y_{\text{обр.}} = \Delta x_{\text{обр.}}$. A red circle with a blue dot in the center is 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

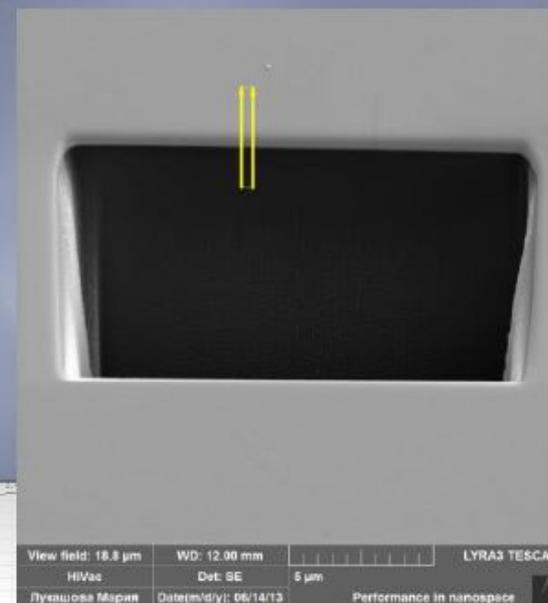
Наклон образца 55° , поперечное сечение перпендикулярно поверхности образца выполнено с помощью ионной колонны в СЭМ TESCAN LYRA. Анализ профиля яркости и поправка на искажение пропорций:

измеренная толщина W-пленки:

~ 290 нм,

реальная толщина W-пленки:

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

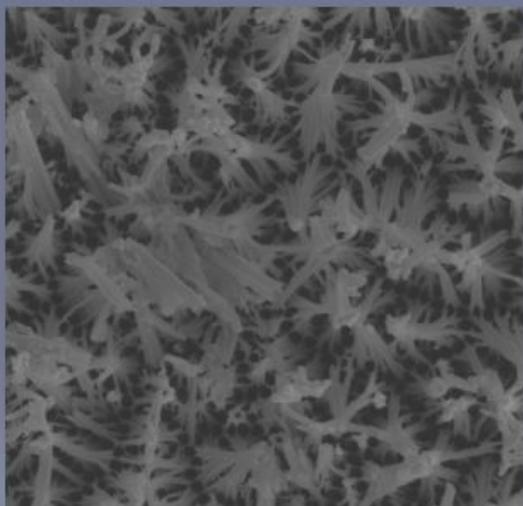


Ручная настройка контраста



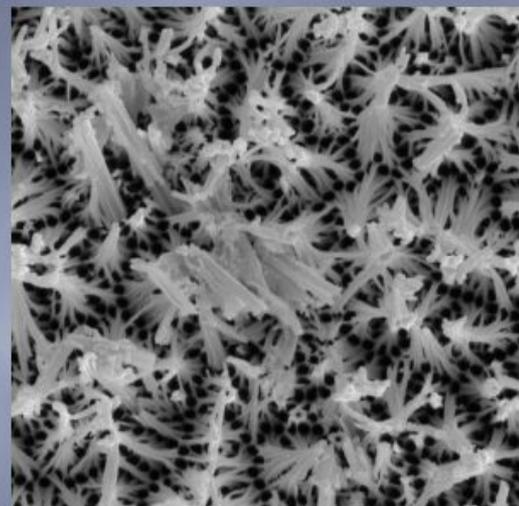
Яркость/контраст

корректно, но некрасиво



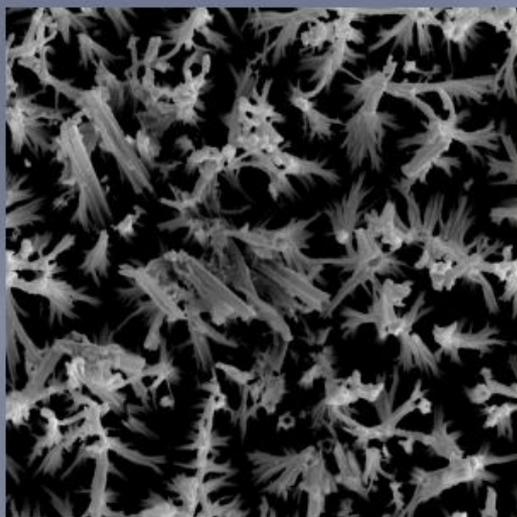
SEM HV: 5.80 kV WD: 5.000 mm MIRA\\ TESCAN
View field: 5.343 μ m Del: SE Detector 1 μ m
Date(m/d/y): 03/25/09 Mapira Exlon Analytic, Russia

красиво и корректно



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

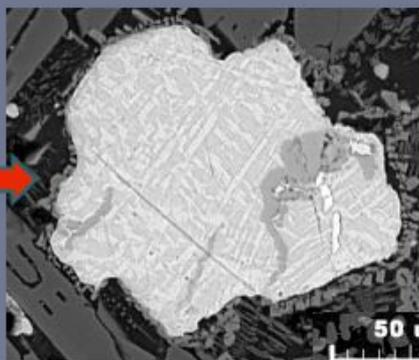
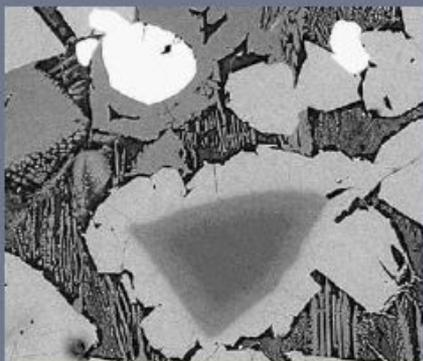
мембрана состава Al_2O_3

Ручная настройка контраста



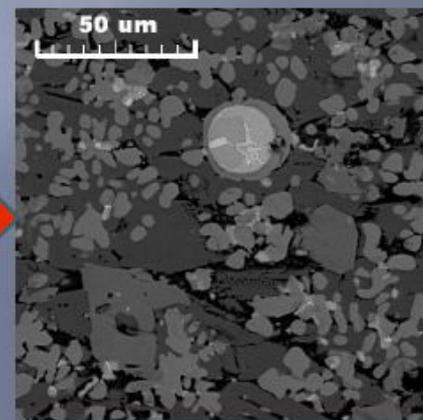
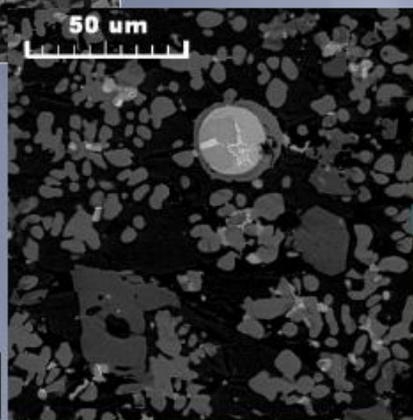
Некорректные яркость/контраст

Слишком белые участки могут быть многофазны



огнеупорный материал, прошедший высокотемпературную обработку

Слишком черные участки могут быть многофазны



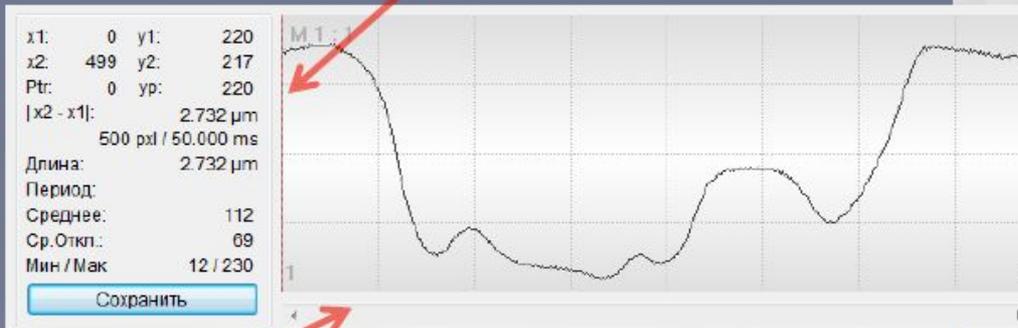
конвертерный шлак

Ручная настройка контраста

Профиль яркости

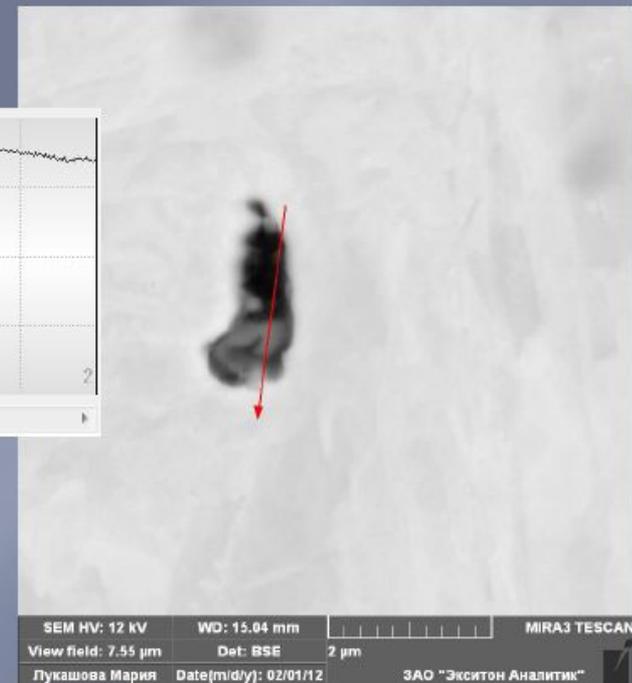


Ось OY : интенсивность сигнала
(от 0 до 255 либо от 0 до 16 384 градаций серого,
см. Сервис → Предпочтения → Интенсивность)



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)



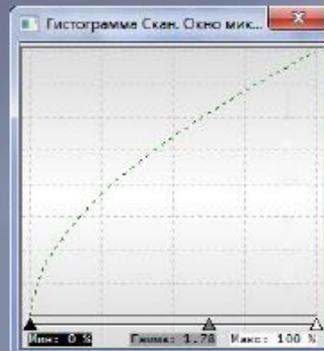
Если на одном изображении требуется различить:

несколько темных компонентов, не засвечивая при этом светлых,

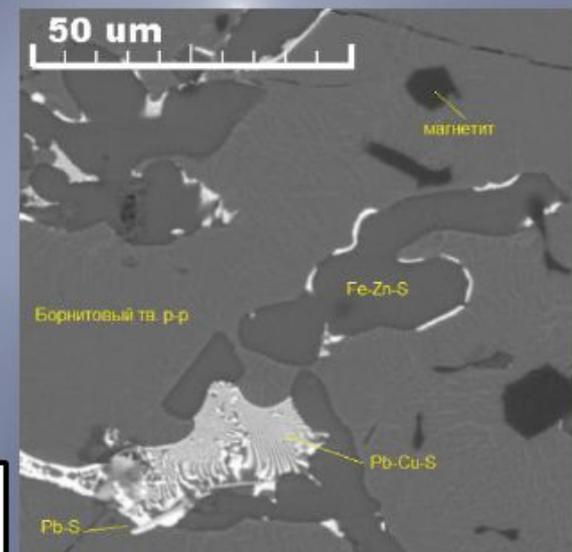
несколько светлых компонентов, не превратив при этом темные компоненты в черные,

то надо использовать функцию

«Инструменты» → «Гистограмма» →



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



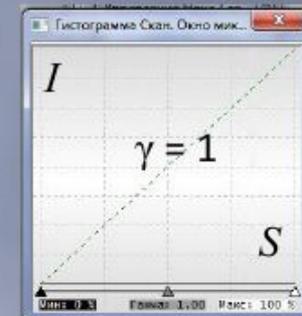
Ручная настройка контраста

Нелинейная передаточная функция детектора (гамма-коррекция)

S – сигнал, регистрируемый детектором

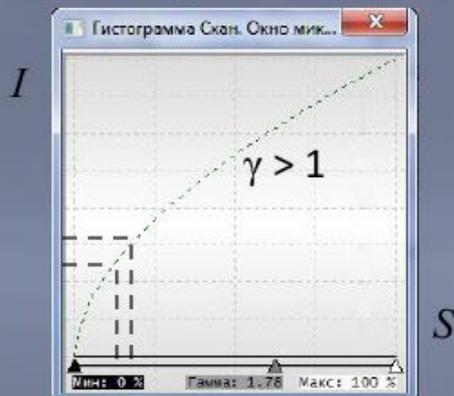
I – уровень серого на изображении

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



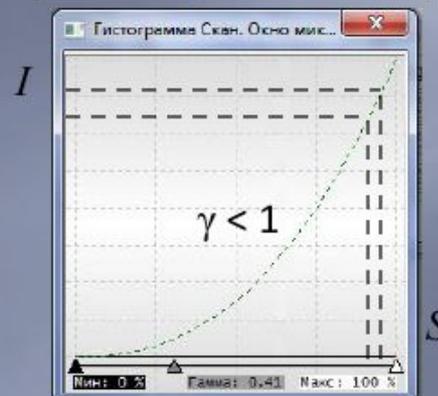
Селективное расширение диапазона контраста:

вблизи уровня черного



в темной области небольшим изменениям сигнала соответствуют большие изменения уровня серого

вблизи уровня белого

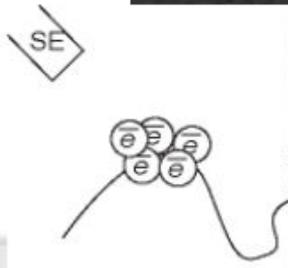
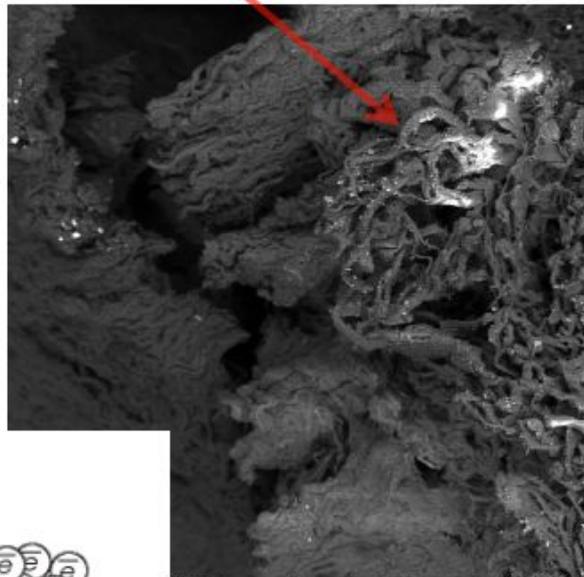


в светлой области небольшим изменениям сигнала соответствуют большие изменения уровня серого

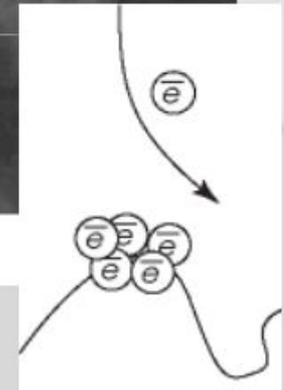
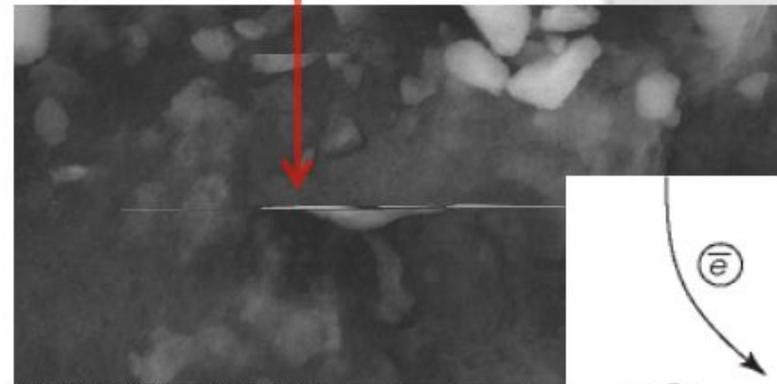
Заряд образца

Артефакты, связанные с недостаточной электропроводностью образцов

Накопление заряда на локальных участках образца



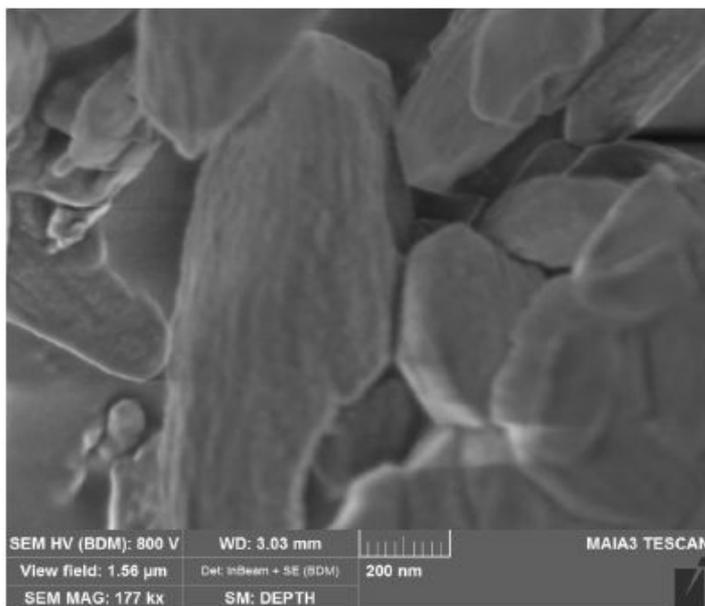
Сдвиг области сканирования из-за электростатического отталкивания между падающими электронами и электронами на образце



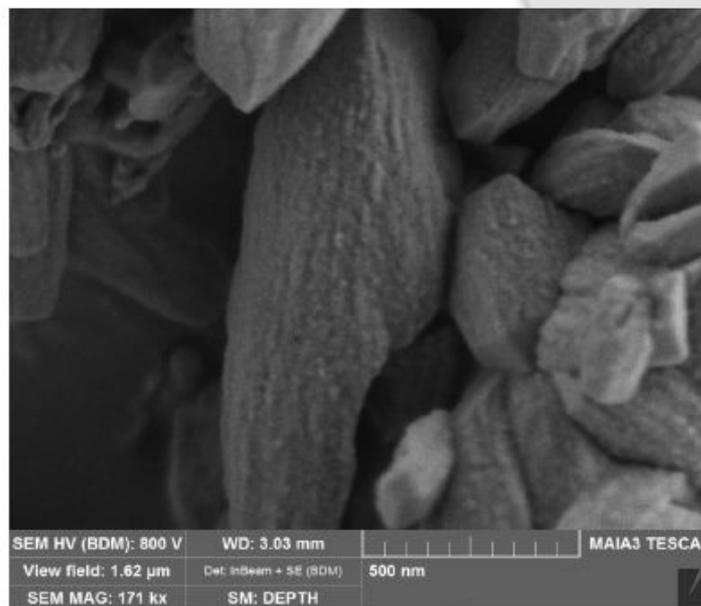
Заряд образца

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:

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

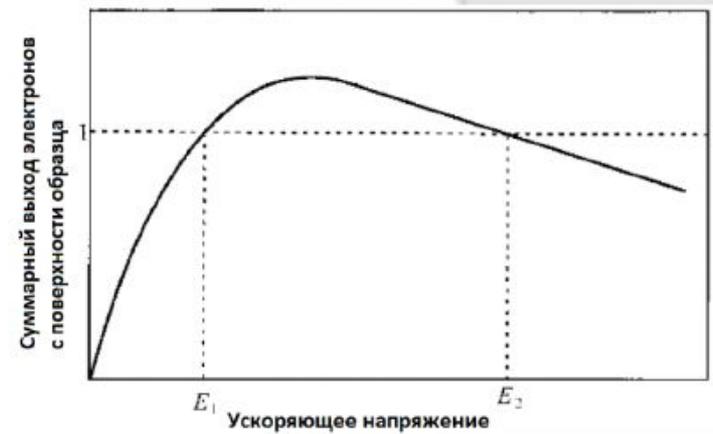
коэффициент эмиссии SE:

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

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_{SE} , N_{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.

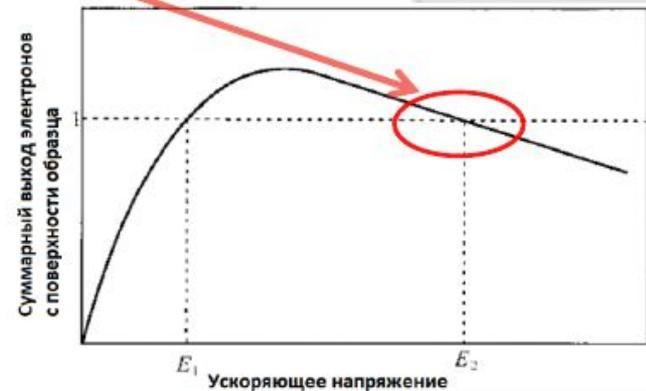
Эффекты, которые в этом помогают:

— «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 ($\eta + \delta$)



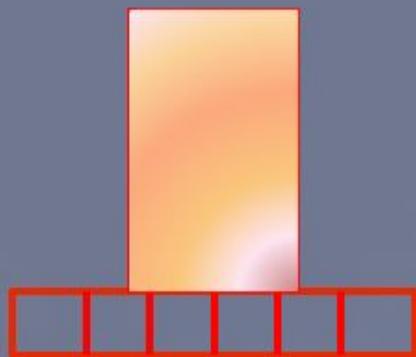
E_2 для большинства материалов < 5 кэВ;
(E_1 обычно не рассматривается, так как лежит в области очень малых ускоряющих напряжений)

Режимы сканирования



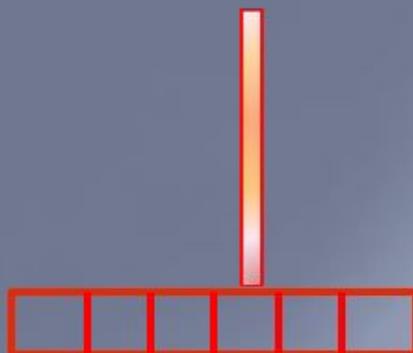
Увеличение и размер зонда

d_3 – размер зонда, p – размер пикселя на образце



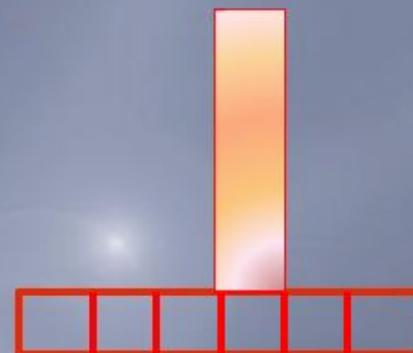
$$d_3 > p$$

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



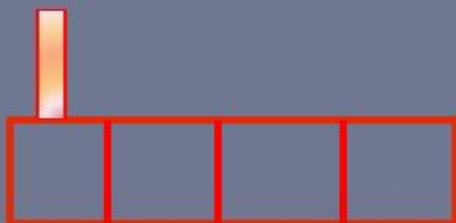
$$d_3 \approx p$$

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

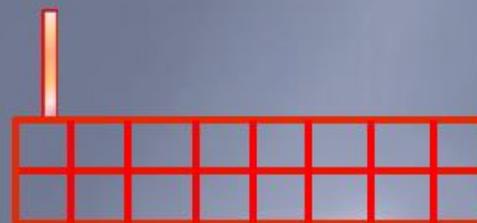
Режимы сканирования



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



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

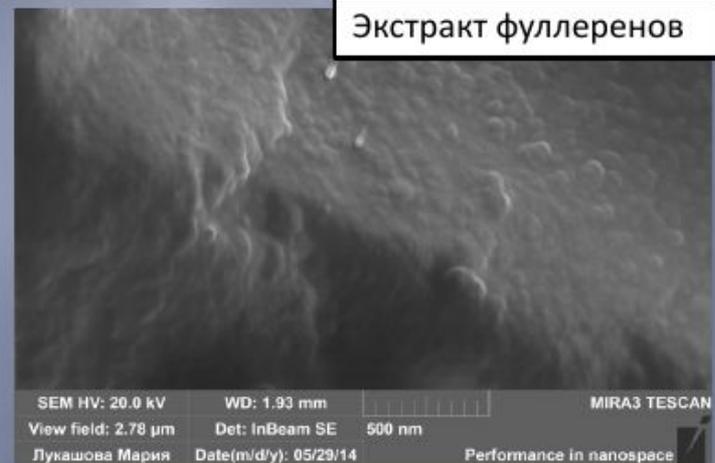


2048 x 2048 пикселей, скорость «4», 15 сек./кадр

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

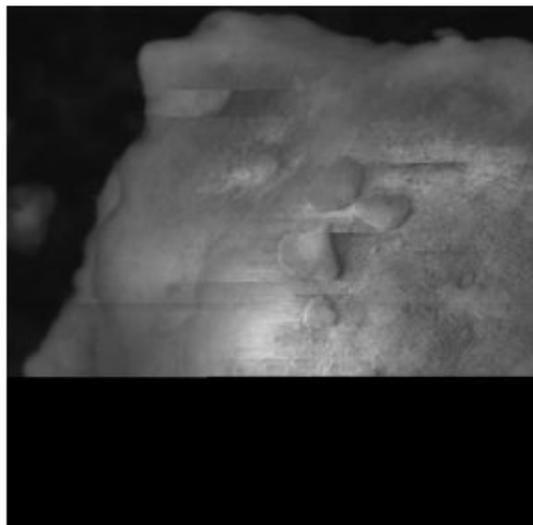
Усреднение:
Использовать накопление ка: Включить
Накопление живой картинки: 2
Сохранить накопление картинки: 100

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

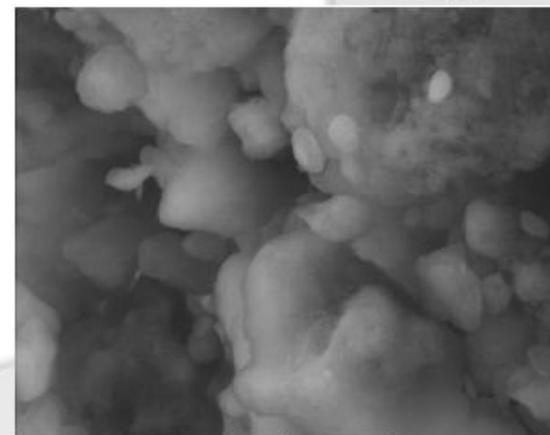
Тексты ИнфоСтроки
 Показать ИнфоСтроку
HV WD
Видимое поле Детектор
Имя пользовател Дата
 Внедрить текст Заметки и Подписи
Применить

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».