

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ПО ВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Растровый электронный микроскоп

выполнил студент Б04-852 группы ФЭФМ
Яромир Водзяновский

Долгопрудный, 2020

1 Цель работы

1. Изучить физические принципы функционирования и основные методики измерений РЭМ
2. Получить изображения различных образцов в следующих режимах работы РЭМ:
 - режим сбора истинно вторичных электронов
 - режим сбора упруго-отражённых электронов

2 Физические основы растровой электронной микроскопии

Принцип растровой электронной микроскопии состоит в сканировании исследуемой поверхности тонким электронным лучом по типу телевизионной развёртки. Выбитые электронным лучом вторичные электроны регистрируются детектором электронов. Интенсивность полученного с детектора сигнала определяет яркость точки раstra на итоговом изображении. Так как коэффициент вторичной эмиссии зависит от угла падения первичных электронов, на экране монитора возникает изображение, определяемое рельефом исследуемой поверхности.

2.1 Вторичная электронная эмиссия

Вторичная электронная эмиссия - испускание электронов из твёрдого тела при бомбардировке пучком первичных электронов. Это явление представляет собой сложное наложение нескольких взаимосвязанных процессов: упругое и неупругое рассеяние первичных электронов, возбуждение внутренних, истинно вторичных электронов, их движения к поверхности и выхода в вакуум. Сложный характер явления вторичной электронной эмиссии проявляется в энергетическом спектре вторичных электронов (рис. 1)

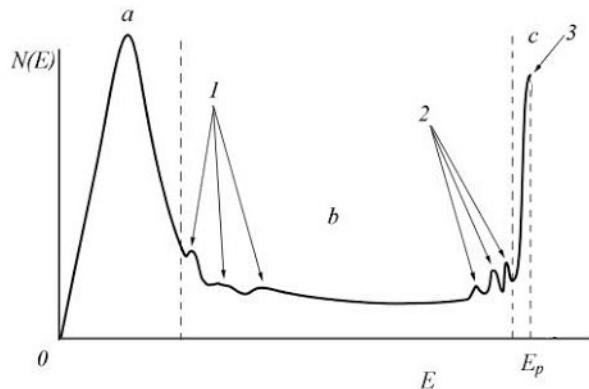


Рис. 1: Качественный рисунок энергетического спектра вторичных электронов

- первая область (< 50 eV) - медленные истинно вторичные электроны).
- вторая область (50 – 2000 eV) - оже-электроны среди неупруго- и упруго-отражённых электронов
- При энергии, близкой к энергии первичных электронов E_0 , наблюдается узкий пик, соответствующий упруго отраженным электронам

Спектр **истинно вторичных электронов** имеет вид кривой с максимумом при некотором значении $E = E_m$. У металлов и полупроводников $E_m = 1.5 - 3$ эВ, полуширина спектра $\Delta E = 3 - 10$ эВ; у диэлектриков $E_m \approx 1$ эВ, полуширина спектра $\Delta E \approx 1.5 - 3$ эВ. Вторичная электронная эмиссия характеризуется коэффициентом вторичной эмиссии δ , зависящим от элементного состава вещества и от угла падения пучка, то есть от рельефа поверхности. В частности, области на поверхности образца, на которые сканирующий пучок будет попадать под острыми углами, будут на изображении в РЭМ более светлыми. На рис. 2 изображена зависимость коэффициента вторичной эмиссии от энергии пучка.

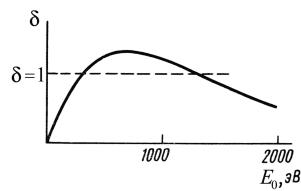


Рис. 2: Зависимость коэффициента вторичной эмиссии от энергии пучка.

Общий вид зависимости представлен на рис. выше. Вначале δ растёт вместе с E из-за увеличения числа вторичных электронов, затем с ростом глубины проникновения в вещество, δ начинает уменьшаться. Коэффициент вторичной эмиссии зависит не только от вещества, но и от угла падения пучка $\delta(\varphi) = \frac{\delta(0)}{\cos \varphi}$, т.е. рельефа поверхности. Максимальный коэффициент будет в случае, если первичный пучок падает на пучок практически параллельно поверхности.

В РЭМ также анализируются **отражённые электроны**. Коэффициент отражения - сложная функция E_0 и атомного номера Z вещества. Если для малых энергий $E_0 = 0.6 - 3$ эВ для всех элементов максимум функции распределения соответствует упругоотражённым электронам, то для энергий $E_0 = 10 - 30$ кэВ максимум с ростом Z растёт по величине и смещается в сторону E_0 . При нормальном падении первичного пучка для всех элементов с ростом угла отражения уменьшается число отраженных электронов и сама величина максимума распределения.

2.2 Контраст в растровом электронном микроскопе

Информативными являются как отражённые, так и вторичные электроны.

Если образец однороден по составу и имеет выраженный рельеф, то изображение в **отражённых электронах** будет иметь такой же вид, как если бы мы смотрели на поверхность со стороны падения первичного пучка. Изображение также лишено полутонов и имеет чётко выраженные тёмные и светлые области. Для анализа образца, неоднородного по рельефу и составу, может использоваться парный детектор, на рис. 3 изображен сигнал в зависимости от рельефа.

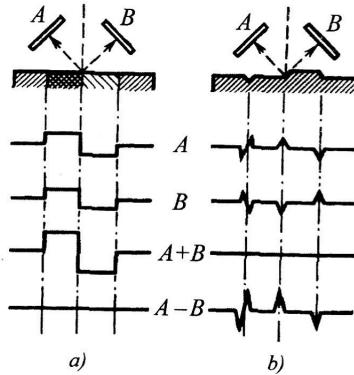


Рис. 3: Принцип работы парного детектора при отраженных электронах

В отличие от отражённых электронов, изображение в **истинно вторичных электронах** содержит полутонов и имеет гораздо больше деталей, следовательно является более привычным для человеческого глаза. Большая глубина фокуса в РЭМ обусловлена тем, что между объектом и детектором вторичных электронов нет линзы с осесимметричным полем (в оптическом микроскопе линза между объектом и глазом присутствует). На рис. 4 приведен пример изменения сигнала от рельефа.

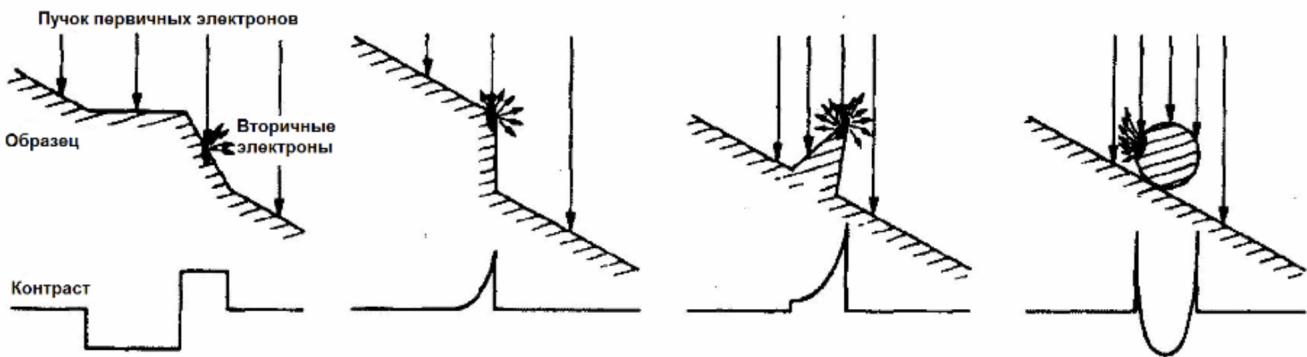


Рис. 4: Изменение сигнала ВЭ из-за рельефа

2.3 Рентгеновский микроанализ

Рентгеновский микроанализ в РЭМ осуществляется на основе следующих физических закономерностей и явления:

- *Закон Мозли* - зависимость энергии характеристического излучения от квадрата атомного числа элемента

$$E = R_1(Z - \sigma)^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

- *Явление электронного удара* - электрон пучка с энергией несколько кэВ выбивает из атома К-электрон (или переводит его на один из высоких свободных уровней), образуя вакансию. На образовавшуюся незанятую оболочку переходит один из L- или M-электронов, испуская рентгеновский фотон. На рис. 5 изображена схема переходов.

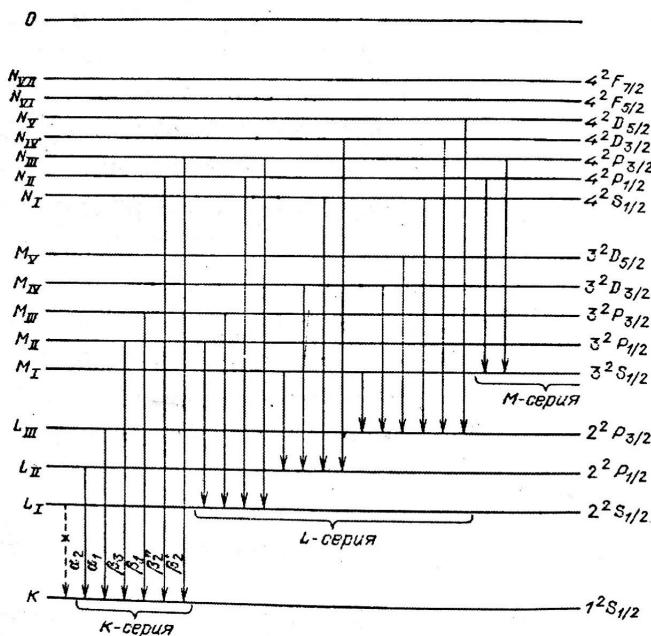


Рис. 5: Схема переходов излучения характеристического рентгена.

Эффективность такого возбуждения крайне низкая - 1 к 1000 (число нужных фотонов к числу бомбардирующих электронов). Это происходит по след. причинам:

- Электроны обычно взаимодействуют с поверхностными оболочками
- не всякая вакансия на K-оболочке приводит кэмисии рентген излучения.
- При взаимодействии электрона с ядром происходит торможение первого и излучается непрерывный фон рентгеновского излучения - тормозного, который описывается приближенной формулой Крамера:

$$N(E) = \frac{aZ(E_0 - E)}{E}$$

Она показывает число электронов в 1 сек. на единичный интервал энергий и на один падающий электрон с энергией E_0 . На рис. 6 показан этот спектр.

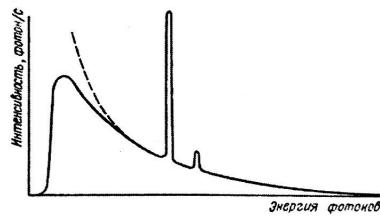


Рис. 6: Непрерывный спектр тормозного излучения и пик характеристической К-линии.

3 Устройство и работа электронного растрового электронного микроскопа

Структурная схема растрового электронного микроскопа представлена на рис. 7. Ускорение и фокусировка пучка происходит в колонне, вверху которой находится электронная пушка, выпускающая электроны. Далее следует система электронной оптики, которая формирует узкий зонд, а также позволяет отклонять его в сторону, направляя в определенные точки образца. Во внутренних областях колонны поддерживается вакуум, чтобы избежать рассеяния электронов и окисления вольфрамовой нити, являющейся источником электронов. Образец, крепящийся в специальном держателе, окружен детектирующей аппаратурой - детектором отражённых электронов, детектором вторичных электронов, рентгеновским спектрометром.

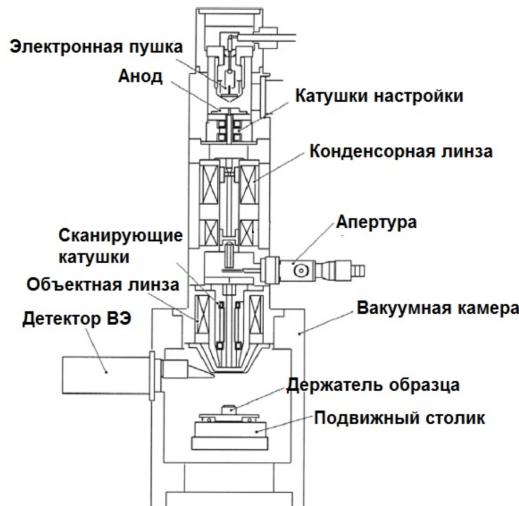


Рис. 7: Устройство РЭМ

- эмиссия электронов в приборе осуществляется *термоэлектронным катодом* из вольфрамовой проволоки
- далее электроны разгоняются до энергий до 30 кэВ с помощью системы из анода и катода
- пройдя через отверстие в анодной пластине, электроны попадают в *систему электромагнитных линз*, с помощью которых формируется узкий зонд. Система представляет собой цилиндрически симметричный электромагнит с очень острыми кольцевыми наконечниками полюсов, создающими сильное неоднородное магнитное поле, фокусирующее электроны
- С помощью системы *отклоняющих электромагнитных катушек* происходит сканирование пучка по поверхности образца
- *детектор вторичных электронов* представляет собой сцинцилляторный счётчик. Вторичные электроны собираются у детектора с помощью клетки Фарадея. Падающие на напылённый фосфором слой электроны вызывают испускание ультрафиолетовых фотонов, которые по световоду попадают в фотоумножитель
- для детектирования *отражённых электронов* используется твердотельный детектор, который представляет собой кольцо, окружающее первичный пучек электронов.

- для проведения рентгеновского микроанализа образца используются *волновые или дисперсионные детекторы* рентгеновского излучения
 - Волновой детектор** с помощью монохроматора (кристалл-детектор) выделяет из полного потока излучения лишь определенный длины волн из условия Брэгга-Бульфа, как известно, максимум для рентгеновского излучения будет достигаться при определенном угле:

$$\lambda n = 2d \sin \theta$$

- Дисперсионный детектор** преобразует энергию каждого фотона в пропорциональный жнергии сигнал напряжения. Падающий рентген ионизирует атомы в кристалле-детекторе, в результате образуются неравновесные электроны и дырки. Затем с помощью предусилителя на полевом транзисторе неравновесный заряд преобразуется в сигнал напряжения.

- Для выбора времени сканирования пользуются соотношением сигнал шум:

$$S/N = \frac{n}{\sqrt{(n)}} = \sqrt{(n)}$$

Из полученной оценки на число электронов, падающих на поверхность и значения тока зонда находят время сканирования одной точки. n - число первичных электронов.

4 Ход работы

- Получим изображение таблетки смеси двух металлов - меди и хрома в режиме детектирование истинно вторичных электронов. рис. 8.

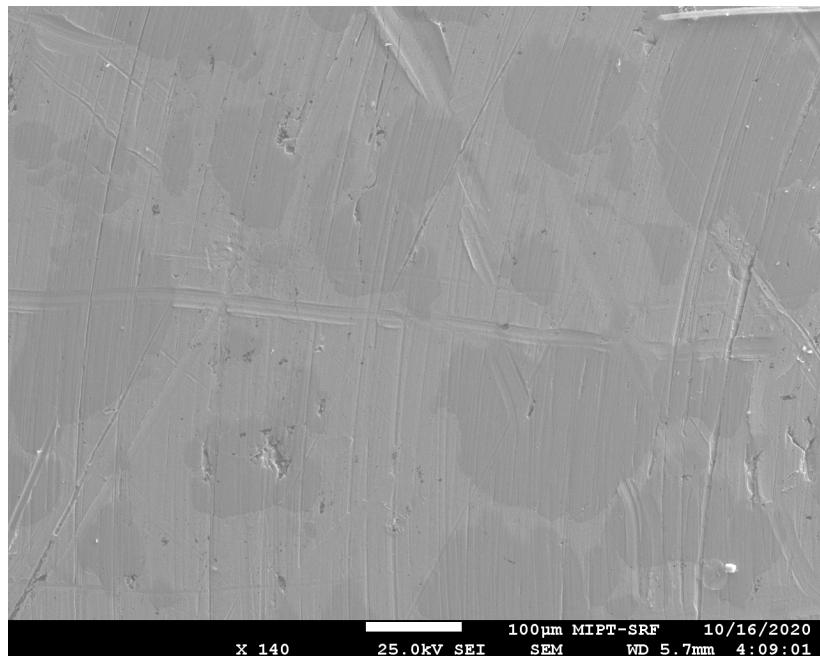


Рис. 8: Таблетка медь/хром

Мы наблюдаем как микрорельеф, так и контраст обусловленный разным составом таблетки, это возможно, т.к есть зависимость коэффициента истинно вторичных электронов от атомного номера.

- В режиме сбора истинно вторичных электронов получим изображения края бабочки с разным временем сканирования и разным увеличением.

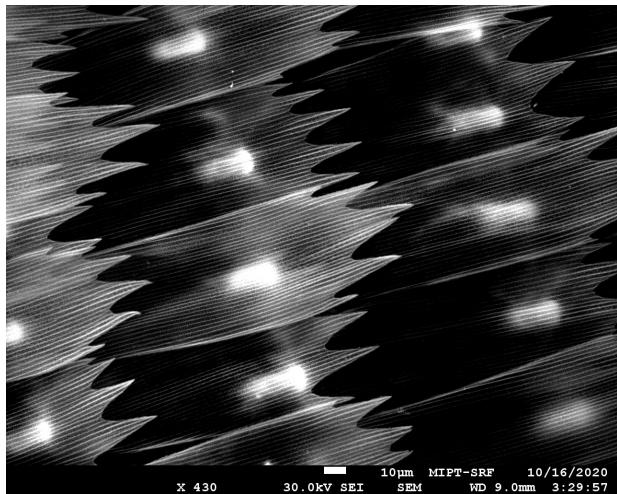


Рис. 9

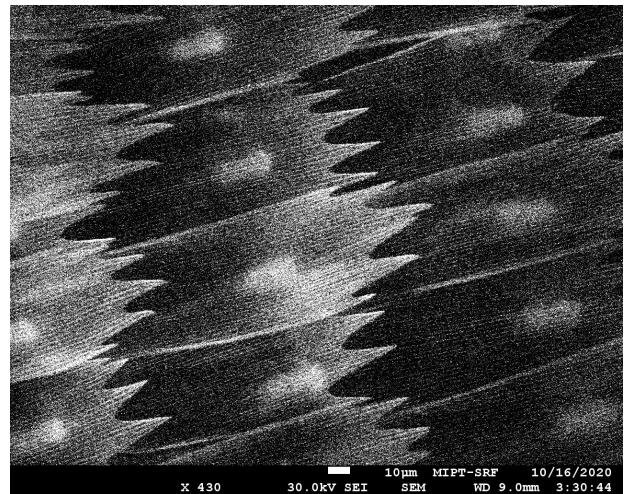


Рис. 10

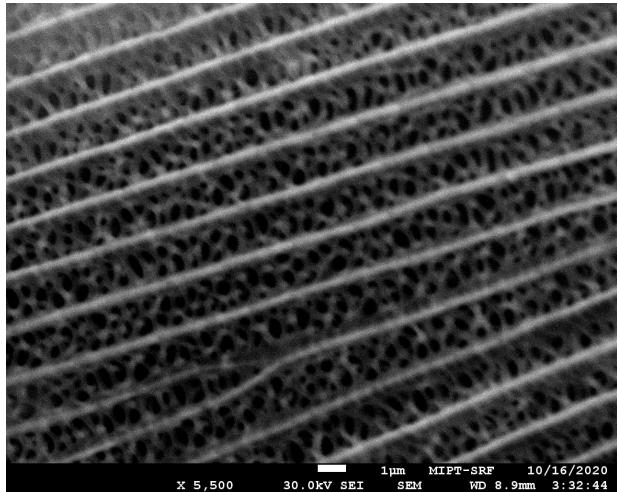


Рис. 11

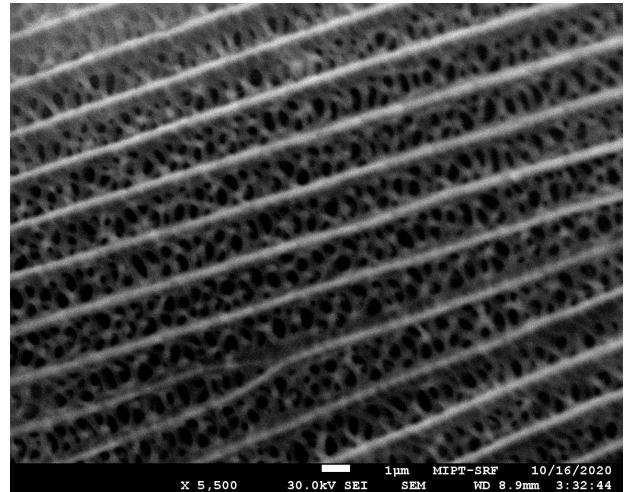


Рис. 12

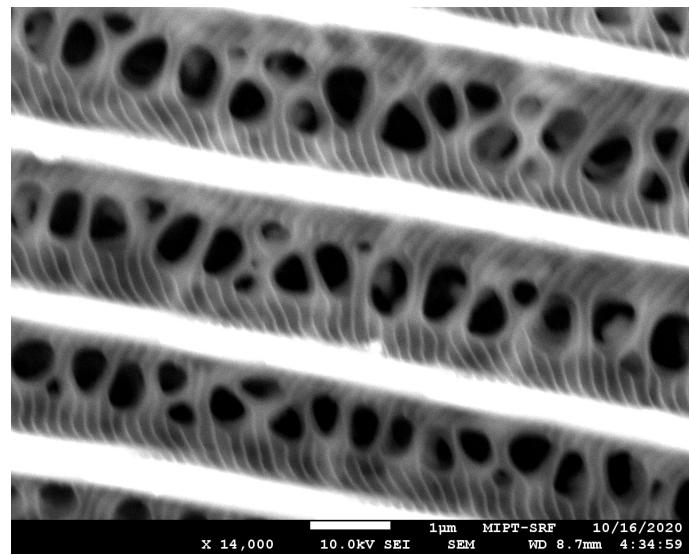


Рис. 13

3. Получим изображение кусочка пенопласта, который является диэлектриком, соответственно при бомбардировке

дировке электронами, он начнет заряжаться (момент во время зарядки на рис. 14), после того как он достаточно зарядится, почти все бомбардирующие жлкетроны будут отражаться от пенопласта и стенок камеры и попадать на детекторы, и мы увидим изображение камеры со стороны образцов рис. 15



Рис. 14

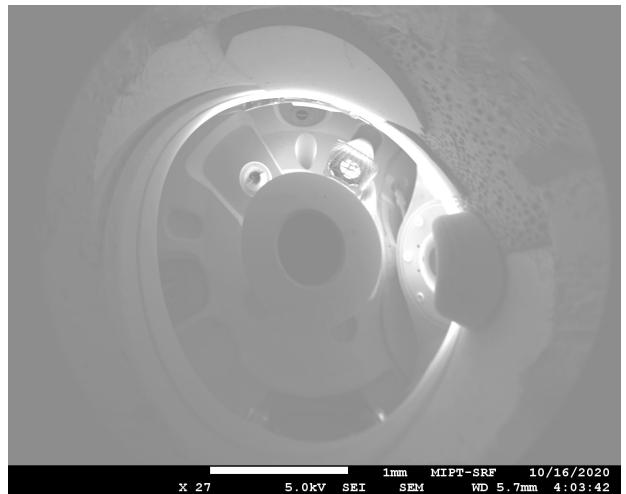


Рис. 15

4. В режиме сбора обратно рассеянных электронов получим изображение кристаллической решетки SiO_2 на рис. 16 и рис. 17.

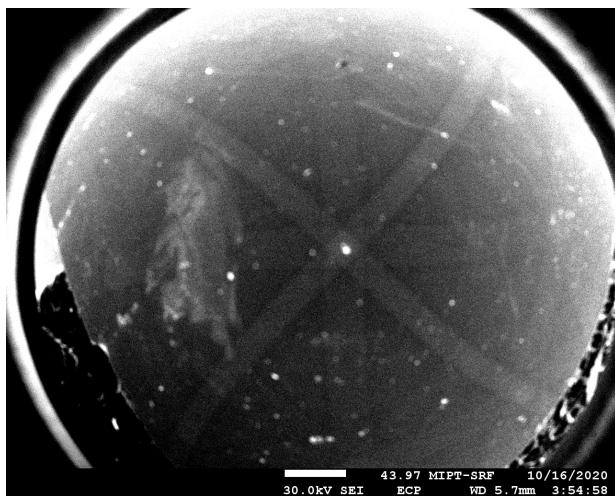


Рис. 16

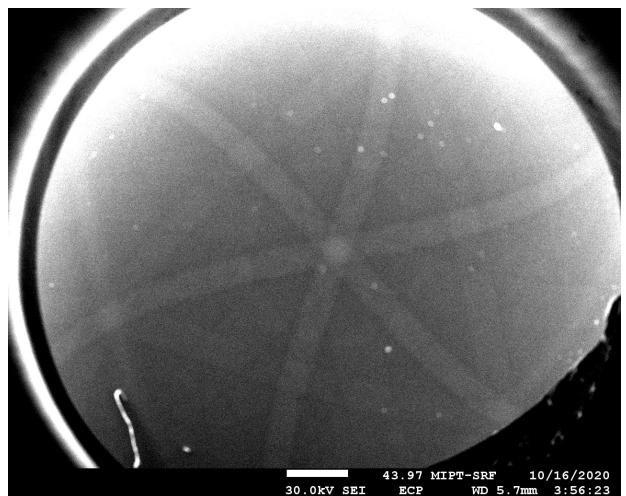


Рис. 17

Это аномальная способность изменять коэффициент отражения при определенных ориентациях монокристалла относительно первичного пучка. Это связано с эффектом канализации первичных электронов. То есть электроны движутся по каналам, образованным параллельными друг другу рядами атомов.

5 Вывод

В ходе работы были изучены физические принципы работы растрового электронного микроскопа, а также его устройство. Были исследованы образцы сплава медь-хром, кусочек пенопласта, получено изображение кристаллической решетки монокристалла SiO_2 , а также крыло бабочки в режиме сбора истинно вторичных электронов, а также в режиме сбора обратно рассеянных электронов.