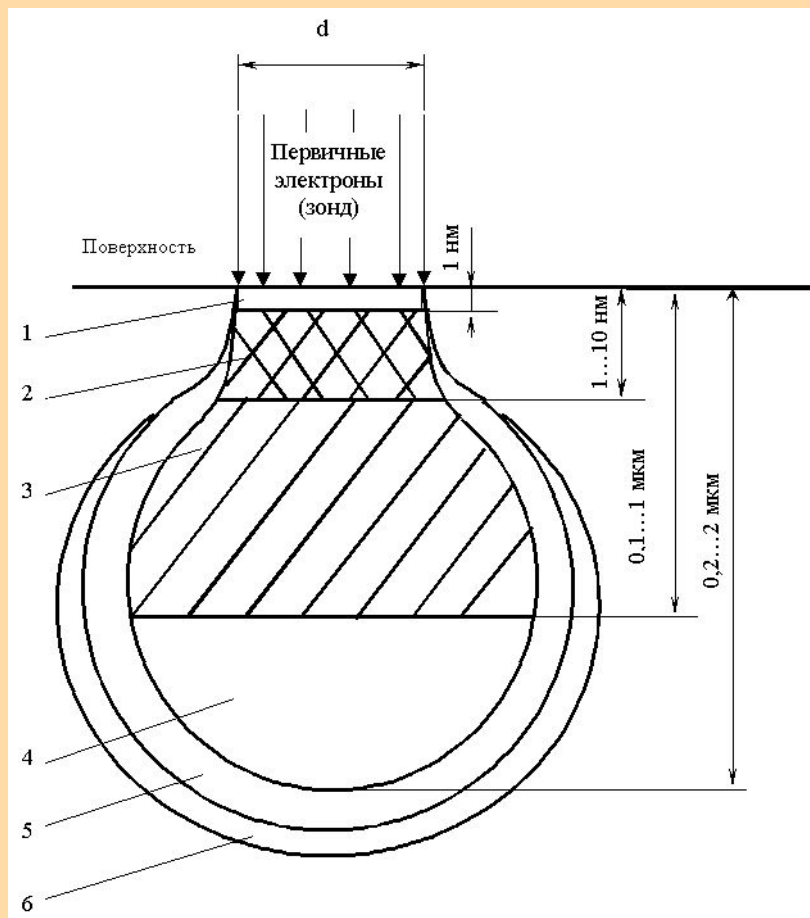


Темы лекции

- 1. Принцип действия растрового электронного микроскопа.*
- 2. Схема РЭМ.*
- 3. Понятие увеличения в РЭМ.*
- 4. Детектор электронов.*

Принцип действия растрового электронного микроскопа основан на взаимодействии пучка электронов (зонда) с энергией десятки кэВ с исследуемым образцом. При таком взаимодействии генерируются различные вторичные излучения, области генерации которых показаны на рисунке



Оже-электроны – 1,

Вторичные электроны – 2,

Отраженные электроны – 3,

Характеристическое

рентгеновское излучение – 4,

Тормозное

рентгеновское излучение – 5,

Флуоресценция – 6.

Основные из них, представляющие интерес с точки зрения функционирования РЭМ, следующие:

- **отраженные электроны;**
- **вторичные электроны;**
- **характеристическое рентгеновское излучение;**
- **поглощенные образцом электроны (формально не являющиеся вторичным излучением).**

Для получения изображения поверхности образца используются вторичные, отраженные и поглощённые электроны. Характеристическое рентгеновское излучение непосредственно в РЭМ не используется, но в комбинированных установках, как будет показано в дальнейшем, является источником важной информации.

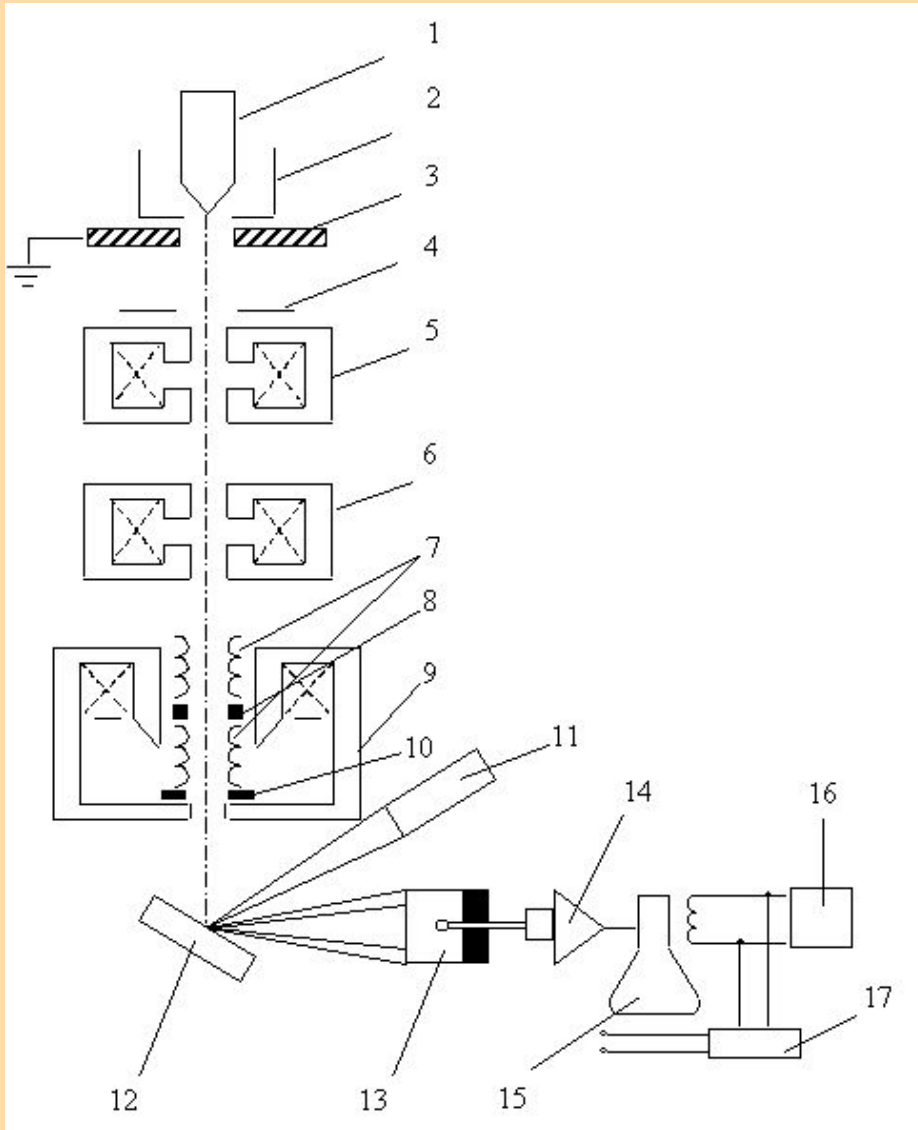
Отраженные электроны. Они образуются при рассеивании первичных электронов на большие (до 90°) углы в результате однократного упругого рассеивания или в результате многократного рассеивания на малые углы. Размеры области генерации отраженных электронов значительны и зависят от длины пробега электронов в материале образца. Протяженность области возрастает с увеличением ускоряющего первичные электроны напряжения и уменьшения среднего атомного номера Z элементов, входящих в состав образца. Ее размеры могут меняться от 0,1 до 1 мкм.

Вторичные электроны. Первичные электроны, проникающие в образец, взаимодействуют с электронами внешних оболочек атомов объекта, передавая им часть своей энергии. Происходит ионизация атомов образца, а высвобождающиеся в этом случае электроны могут покинуть образец и быть выявлены в виде вторичных электронов. Они характеризуются малой энергией ≤ 50 эВ и поэтому выходят из участков образца очень близких к поверхности. Глубина слоя, дающего вторичные электроны, составляет 1-10 нм. В пределах этого слоя рассеивание электронов пренебрежимо мало, и поэтому при получении изображений во вторичных электронах разрешающая способность определяется, прежде всего, диаметром первичного зонда.

Поглощенные электроны. При воздействии зонда часть генерируемых электронов остается в объеме образца. Так, при энергиях первичного пучка 10-20 кэВ примерно 50% от общего числа образующихся вторичных и отраженных электронов достигают поверхности образца и покидают ее. Оставшиеся электроны образуют ток поглощенных электронов. Его величина равна разности между током зонда и токами отраженных и вторичных электронов. Эта разность является сигналом для получения изображения.

Поглощенные электроны генерируются в большом объеме. Разрешающая способность при получении изображений в этом случае имеет такой же порядок, как и для отраженных электронов. Данный метод получения изображений используется редко из-за малой разрешающей способности.

Схема растрового электронного микроскопа



Основные узлы:

электронная пушка 1-3,

электроннооптическая система 4-10,
формирующая электронный зонд и
обеспечивающая его сканирование
по поверхности образца 12;

система, формирующая
изображение 11-17.

РЭМ также имеет вакуумную камеру, которая служит для создания необходимого разряжения ($\sim 10^{-4}$ Па) в рабочем объеме электронной пушки и электронно-оптической системы. Составными частями микроскопа также являются механические узлы (шлюзы, гониометрический стол и т.д.), обеспечивающие установку и перемещение образца.

Пучок электронов от пушки проходит через три электромагнитные линзы 5, 6, 9. Фокусировка потока электронов осуществляется магнитным полем, имеющим осевую симметрию. Оно создается электромагнитной линзой, которая представляет собой соленоид. Магнитное поле возникает при пропускании электрического тока через обмотку соленоида, концентрируется с помощью полюсного наконечника и воздействует на проходящий через линзу поток электронов.

Фокусное расстояние линзы можно плавно регулировать путем изменения силы тока в обмотке соленоида.

Несовершенства электронной оптики оказывают влияние на разрешающую способность микроскопа. К несовершенствам оптики относятся хроматическая, сферическая аберрации и астигматизм.

Хроматическая абберация возникает из-за различной скорости (т.е. длины волны) электронов и изменение ее со временем, что приводит к непостоянству фокусных расстояний линз. Хроматическую абберацию уменьшают путем стабилизации ускоряющего электроны напряжения и электрического тока в линзах.

Сферическая абберация возникает вследствие того, что электроны летят под разными углами к оптической оси линзы и поэтому фокусируются по разному. Сферическую абберацию уменьшают наложением строгих ограничений на геометрию полюсных наконечников линз, увеличением ускоряющего напряжения и уменьшением диафрагмы. В этом случае поток формируется электронами, в меньшей степени отклоненными от оптической оси линзы.

Возникновение астигматизма связано с нарушением магнитной или геометрической симметрии линзы. Устранение асимметрии достигается обеспечением высокой геометрической точности изготовления полюсного наконечника линзы и введением специальной системы, называемой стигматором 8, который корректирует магнитное поле линзы, восстанавливая его симметрию.

Стигматор расположен в объективной линзе 9. Внутри нее также находятся две пары электромагнитных отклоняющих катушек 7, каждая из которых служит для отклонения зонда соответственно в x и y направлениях в плоскости перпендикулярной оси пучка электронов. Катушки соединены с генератором 16, обеспечивающим синхронность передвижения электронного зонда по образцу – развертку раstra и электронного луча по экрану электронно-лучевой трубки 15. Сигнал отраженных или вторичных электронов, попавших в детектор 13, после усилителя 14 подается на ЭЛТ и модулирует яркость экрана.

Таким образом, каждому **элементу изображения – площади поверхности образца, накрываемой электронным зондом**, ставится во взаимное соответствие **элемент отображения – пиксель на экране электронно-лучевой трубки**.

В РЭМ используется высококачественная ЭЛТ обычно размером 100x100 мм, развертка которой обеспечивает наблюдение 1000 отчетливых строк, каждая из которых содержит 1000 точек.

Таким образом, **каждый из 10^6 пикселей имеет размер 0,1x0,1 мм**, что соответствует пределу разрешения человеческого глаза.

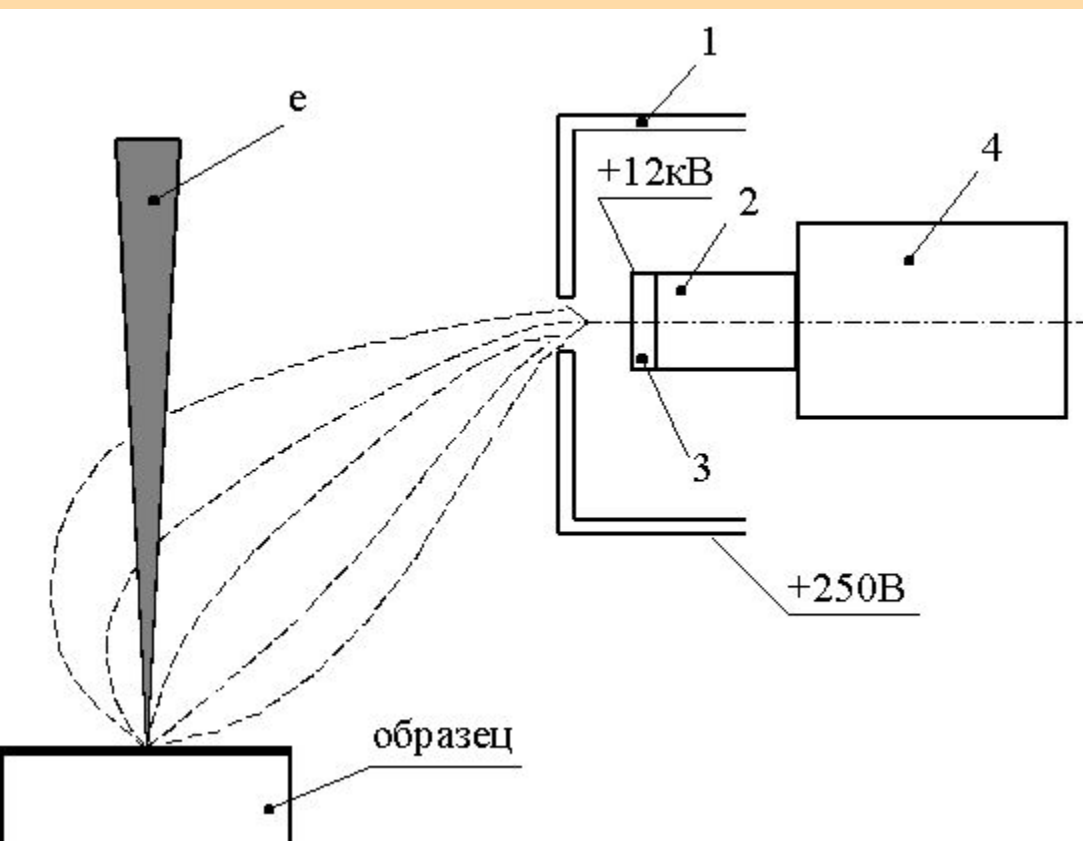
Увеличение РЭМ определяется как отношение линейного размера элемента изображения к линейному размеру элемента отображения (пикселю). Поэтому, **чем больше увеличение РЭМ, тем меньше размер растра электронного зонда по поверхности образца.**

При указанном выше размере ЭЛТ **увеличению $M = 1000$ соответствует размер растра на образце $0,1 \times 0,1$ мм, а элемент изображения имеет линейный размер $0,1$ мкм.** При этом и диаметр электронного зонда должен иметь тот же размер.

Размер зонда нецелесообразно делать меньше величины элемента изображения, так как при этом часть области сканирования не облучается электронным пучком и величина тока отраженных и вторичных электронов меньше, чем могла бы быть. Если размер зонда больше элемента изображения, то положение электронного пучка на образце неоднозначно связано с элементом отображения на экране ЭЛТ, так как информация усредняется по нескольким элементам изображения.

Детектором электронов в РЭМ служит **сцинтилляционный детектор**

Эверхарда-Торнли



На коллекторе 1 $\sim +250$ В, поэтому траектории вторичных электронов искривляются и они попадают в коллектор. На отраженные электроны этот потенциал существенного влияния не оказывает.

Внутри коллектора электроны ускоряются. Для этого на сцинтиллятор 3 подается напряжение порядка 12 кВ.

Его влияние на электронный зонд экранируется корпусом коллектора.

Вследствие ускорения вторичные электроны получают достаточную энергию, чтобы вызвать световое излучение материала сцинтиллятора, которое по световоду 2 попадает на фотоумножитель 4, где преобразуется в электрический сигнал.

Подобная конструкция позволяет перемещать детектор в процессе измерения и не меняет его чувствительности после вскрытия вакуумной камеры на атмосферу для замены образца.