

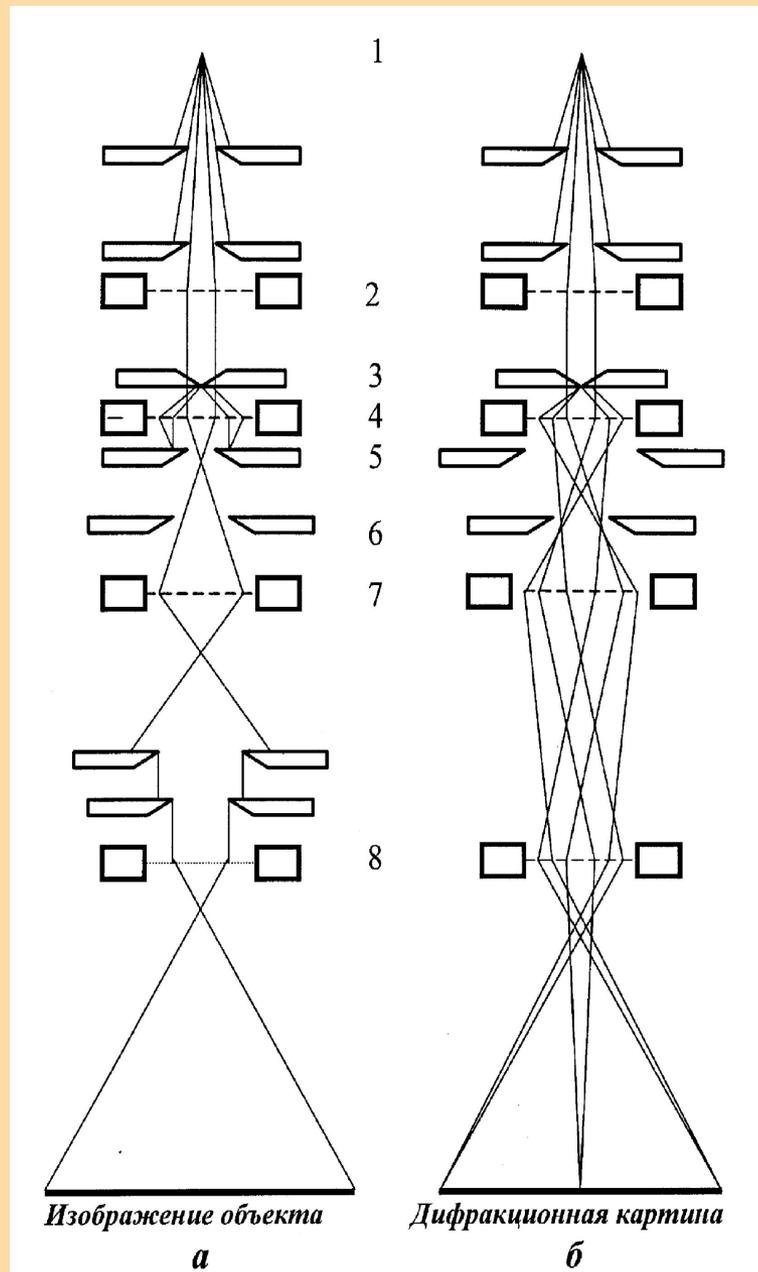
Темы лекции

- 1. Принцип действия просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ).*
- 2. Схема ПЭМ.*

Принцип действия просвечивающего электронного микроскопа основан на взаимодействии пучка электронов (зонда) с энергией 20-200 кэВ с исследуемым образцом.

Так как в просвечивающей электронной микроскопии изображение формируется электронами, прошедшими через образец, то его толщина должна быть меньше длины пробега электронов в материале образца.

Для получения подобных толщин исследуемые образцы, как правило, имеющие много большую толщину, предварительно утоняются с помощью электрохимического или ионного травления.



Все **ПЭМ** могут работать в двух режимах:

**в режиме изображения**  
**в режиме дифракции.**

Ход лучей в этих режимах:

*а* – режим изображения;

*б* – режим микродифракции.

Электронный пучок формируется **в ускорительной колонне 1**, состоящей из

- **электронной пушки,**
- **секционной ускорительной трубки (обычно 6 секций)**
- **системы отклонения.**

Энергия электронов на выходе ускорительной колонны, определяется величиной ускоряющего напряжения на электронной пушке и в различных типах ПЭМ может меняться в пределах 20-200 кэВ. Чем больше энергия электронов, тем меньше длина волны, тем больше проникающая способность электронов.

После ускорительной колонны установлена **система конденсорных линз 2**, назначение которой получить электронный пучок с минимальным угловым расхождением.

Ускорительная колонна совместно с системой конденсорных линз позволяет получать электронные пучки разного диаметра. Минимальный диаметр электронного пучка в ПЭМ может составлять несколько нанометров, что позволяет получать дифракцию от локальной области такого же диаметра в режиме микроручевой дифракции.

При работе **в режиме изображений при помощи системы конденсорных линз получают параллельный пучок электронов.**

Система отклонения предназначена для электронного наклона пучка в режиме изображения и дифракции.

**Ускорительная колонна и система конденсорных линз образуют осветитель.**

За системой конденсорных линз расположена **объективная линза**.

Держатель с образцом 3 устанавливается в зазор полюсного наконечника объективной линзы, так чтобы образец находился в предполье объективной линзы.

Гониометрическая головка позволяет осуществлять поворот образца относительно электронного пучка на угол  $\pm 12^\circ$ .

Так как **в просвечивающей электронной микроскопии изображение формируется электронами, прошедшими через образец, то его толщина должна быть много меньше длины пробега электронов в материале образца.**

Пройдя через образец, электроны попадают в **объективную линзу** 4.

Данная короткофокусная (несколько мм) линза, имеющая небольшое увеличение ( $\sim 50$ ), является ключевой в дальнейшем формировании изображения, поэтому она снабжена **корректором астигматизма** – **стигматором**.

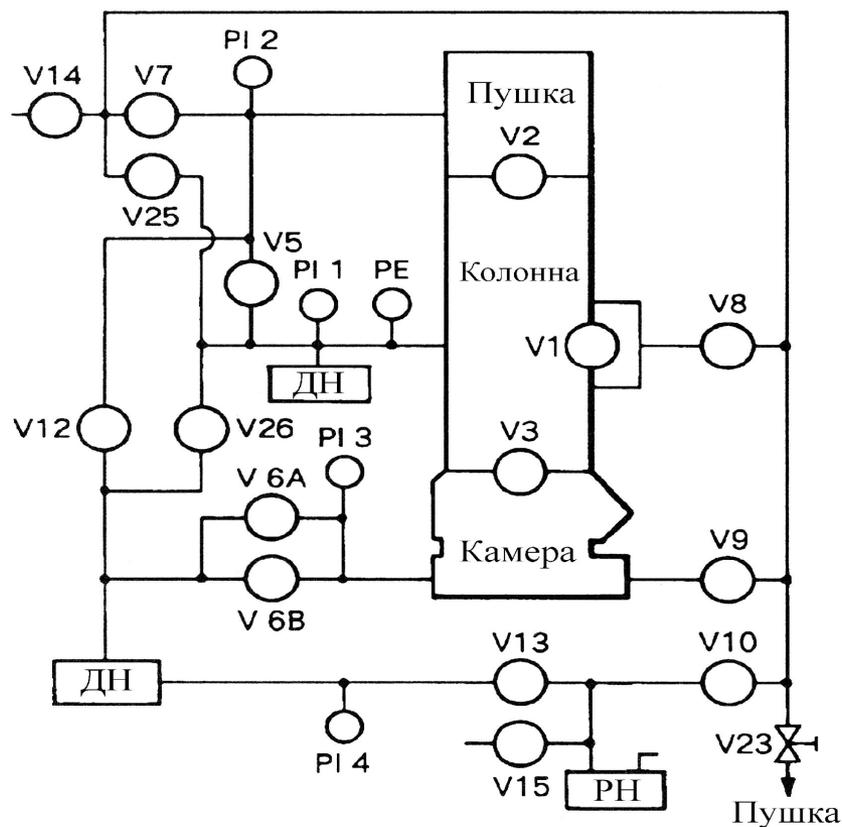
Диафрагма объективной линзы расположена на задней фокальной плоскости объективной линзы. В последних моделях микроскопов изображения выводятся на монитор компьютера при помощи цифровых ПЗС камер.

В ПЭМ используются **электромагнитные линзы**, которые состоят из обмотки, магнитопровода и полюсного наконечника. Полюсный наконечник является концентратором магнитного поля и имеет форму круговой симметрии. В центре имеется отверстие с некоторым радиусом и зазор между полюсами.

В результате такой конструкции полюсного наконечника, магнитный поток сжимается в зазоре.

Электроны, проходя через объективную линзу, под действием магнитного поля отклоняются в направлении оптической оси и фокусируются в определенной точке оптической оси (в фокусе линзы).

## Стандартная вакуумная система ПЭМ



Вакуум создается форвакуумным насосом роторного типа (РН) диффузионными насосами (ДН).

Давление контролируется тепловыми датчиками низкого вакуума (P1-P4) и ионизационным датчиком высокого вакуума (PE).

В вакуумной системе применены электромагнитные и пневматические клапана (обозначены V).

**Вакуумная система должна обеспечить давление в колонне микроскопа не хуже  $10^{-6}$  Тор.**

Формирование электронно-микро-скопического изображения коротко можно описать следующим образом.

Электронный пучок, сформированный осветительной системой, падает на объект и рассеивается.

Далее, рассеянная волна объективной линзой преобразуется в изображение.

Образованное объективной линзой изображение увеличивается промежуточными линзами и проецируется проекционной линзой либо на экран для наблюдения, либо на фотопластины или выводится на дисплей монитора.

Проходя через образец,  $\Psi_0$  взаимодействует с потенциалом  $\phi$  объекта.

Электронная волна на нижней поверхности образца имеет вид  $q\Psi_0$ , где  $q$ - функция прохождения.

Рассеяние, дифракция волны  $q\Psi_0$  описывается действием оператора Фурье  $F$ .

Следовательно, на задней фокальной плоскости объективной линзы электронная волна имеет вид  $Fq\Psi_0$ , которая модифицируется передаточной функцией  $T$  объективной линзы.

Преобразование рассеянной волны в волновую функцию изображения описывается оператором обратного преобразования Фурье  $F^{-1}$ .

Тогда распределение интенсивности электронов на экране будет равняться  $I = \Psi_i \Psi_i^*$ .

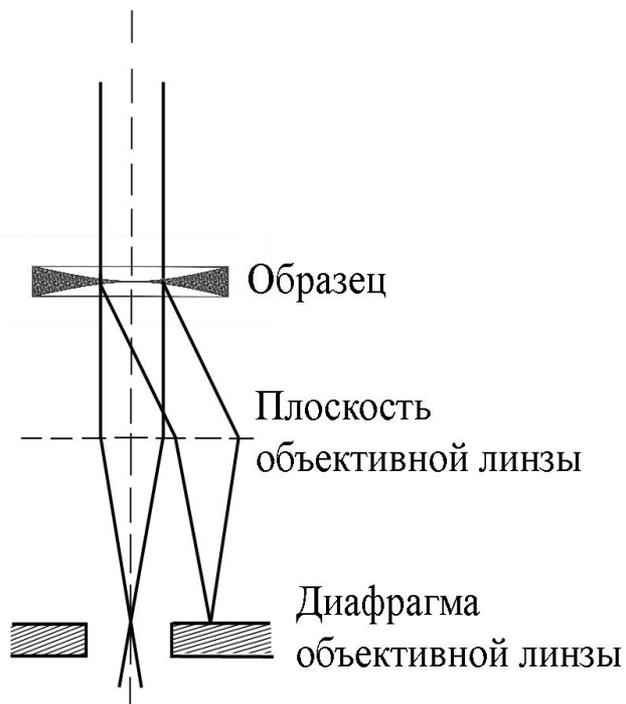
**Механизм формирования контраста** в электронной линзе такой же, как при

формировании контраста  
в геометрической оптике  
с оптическими линзами.

Диафрагма объективной линзы  
установлена так, что она  
пропускает только центральный пучок,  
а отраженные электроны не достигают  
конечного изображения.

Изображение будет сформировано  
из центрального пучка и электронов,  
неупруго рассеянных под малыми углами.

Изображение является однолучевым и в  
этом случае называется **светлопольным**.



**Полученный контраст обусловлен распределением интенсивности электронов, отраженных по закону Вульфа-Брэгга и поэтому получил название дифракционный контраст.**

При пропускании через диафрагму двух и более пучков (в том числе и центральный пучок), получаем многолучевое **светлопольное изображение**.

На таких изображениях преобладает фазовый контраст.

Изображения можно получить, пропуская через диафрагму объективной линзы только дифрагированные пучки. Тогда полученные изображения называются **темнопольными** и они так же бывают однолучевыми и многолучевыми.

На просвечивающие электронные микроскопы могут устанавливаться различные приставки-анализаторы. В этом случае электронный микроскоп называют аналитическим, и он обладает такими же возможностями, что и другие аналитические устройства.

Установка на ПЭМ рентгеновского энергодисперсионного анализатора позволяет определить элементный состав, а в сочетании со сканирующей приставкой – элементное картирование по площади с привязкой к структуре образца. Другим устройством для определения элементного состава, устанавливаемым на микроскопах, является анализатор потери энергии электронов.