

## Лекция 2. Устройство электронных микроскопов.

Основываясь на базовых знаниях о процессах взаимодействия электронов с веществом (материал первой лекции) можно предполагать, что все виды электромагнитных излучений, возникающих в процессах такого взаимодействия, несут информацию о свойствах вещества. И, на первый взгляд, принципиальная конструкция микроскопов не сложна, а основной задачей производителей микроскопов является создание устройств для выделения и уверенной регистрации определенного вида излучения и трансформации интенсивности этого излучения (сигнала) в полезную аналитическую информацию. Однако, количество факторов «мешающих» уверенной регистрации фактически приводит к тому, что производители электронных микроскопов не в силах создать одновременно и качественные электронные микроскопы и качественные детекторы сигналов, поэтому производством детекторов сложных конструкций занимаются совершенно другие компании. Этот нюанс следует учитывать и при рассмотрении принципиальных конструкций прибора. Так, в настоящей лекции более подробно рассматриваются конструкционные особенности электронных микроскопов и схемы установки детекторов на микроскоп, а описание конструкций детекторов будет рассмотрено более детально при описании методов анализа в следующих лекциях.

Вначале рассмотрим схему просвечивающего электронного микроскопа, которое функционально аналогично оптическому микроскопу, работающему в проходящем свете (Рис. 2.1.): осветительная система, состоящая из электронной пушки<sup>1</sup> и конденсора, формирующего форму падающего на образец пучка; исследуемый образец; объективная линза, формирующая изображение; система из промежуточных и проекционной линз, обеспечивающих требуемое увеличение и проецирующих изображения на флуоресцентный экран для наблюдения или на фотопленку (или матрицу цифровой фотокамеры) для регистрации. Схема растрового микроскопа заметно более проста и может быть описана как урезанная до образца схема просвечивающего микроскопа. Только пушка просвечивающего электронного микроскопа, в режиме работы, подходящем для исследования, разгоняет электроны до энергий от 80 до 200 – 400 кэВ, а для работы на растровом микроскопе такие энергии не требуются. Более того, для применения некоторых методик в растровой

---

<sup>1</sup> Следует отметить, что электронная пушка классически располагается в верхней части микроскопа, но производились также серийные просвечивающие электронные микроскопы с нижним расположением пушки. Такие микроскопы производила компания Vacuum Generator (США) в 80-х - 90-х годах прошлого века. Несмотря на очень приличные для своего времени параметры микроскопа VG HB-501 ([http://msc.engr.wisc.edu/VG\\_HB\\_501.html](http://msc.engr.wisc.edu/VG_HB_501.html)), компания обанкротилась в тех же 90-х годах. Микроскопы VG до сих пор успешно работают в некоторых университетах США, Англии и Германии.

микроскопии необходимы электроны очень малых энергий. Поэтому пушка растрового микроскопа разгоняет электроны от 5 до 30-40 кэВ.

Более подробно устройство просвечивающего микроскопа показано на рис. 2.2. В электронной пушке микроскопа установлен анод и там же, в устройстве Венельта, установлен катод. Катод является источником электронов, а анод, «разгоняет» электроны до требуемой энергии (анод разделен на несколько динодов, закрепленных в трубке ускорения электронов)<sup>2</sup>. Колонной микроскопа принято называть часть прибора от пушки до камеры.

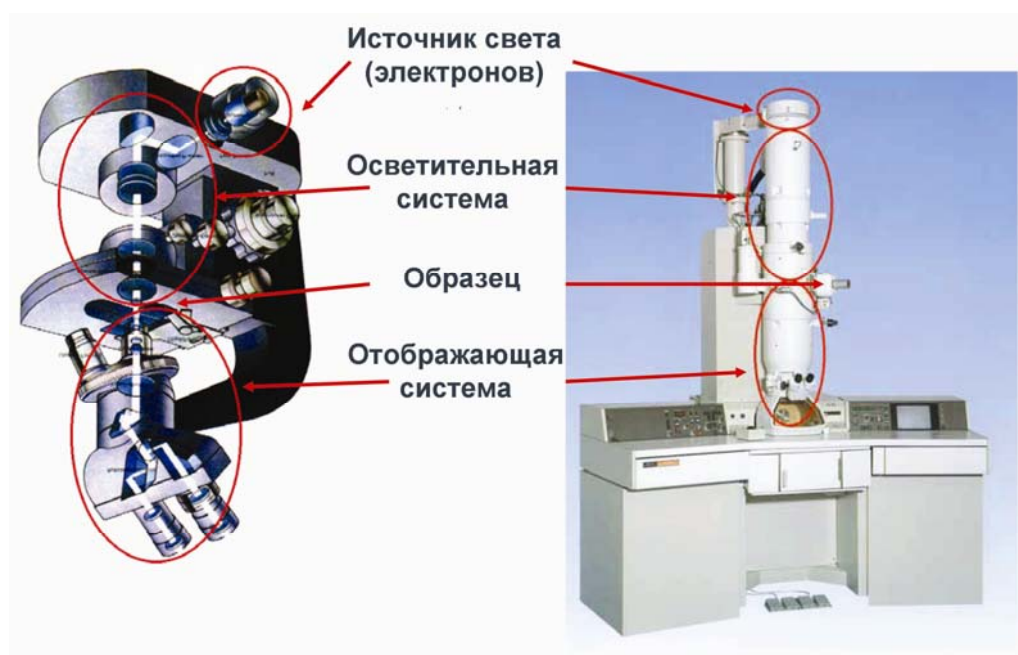


Рис. 2.1. Аналогия в схеме оптического и электронного микроскопов.

В колонне находятся несколько магнитных линз (формирующих падающий на образец пучок и изображение) и диафрагм, монтируются детекторы вторичных и обратно рассеянных электронов, детекторы микроанализа, гониометр и шлюз. Последний находится внутри гониометра и предназначен для перемещения образца из условий атмосферного давления в высоковакуумную часть электронного микроскопа. Кроме перечисленных на рисунке элементов, современный электронный микроскоп содержит магнитные системы отклонения пучка, и изменения его формы. Изменение формы пучка до достижения им круговой симметрии необходимо для получения неискаженного изображения, соответствующие устройства называются стигматорами и устанавливаются в просвечивающих электронных

<sup>2</sup> Компания JEOL выпускает единственную в своем роде серийную модель просвечивающих микроскопов, позволяющих работать с электронами очень высоких энергий — до 1000 кэВ. Количество динодов в этом микроскопе более 10. В этой модели высоковольтный трансформатор находится непосредственно над пушкой микроскопа. Высота такого микроскопа около двух этажей. Однако, вариант стыковки трансформатора с микроскопом, в последние 10-20 лет, применяется этой компанией и для более простых моделей.

микроскопах после конденсора (перед попаданием пучка на образец) и после объективной линзы.

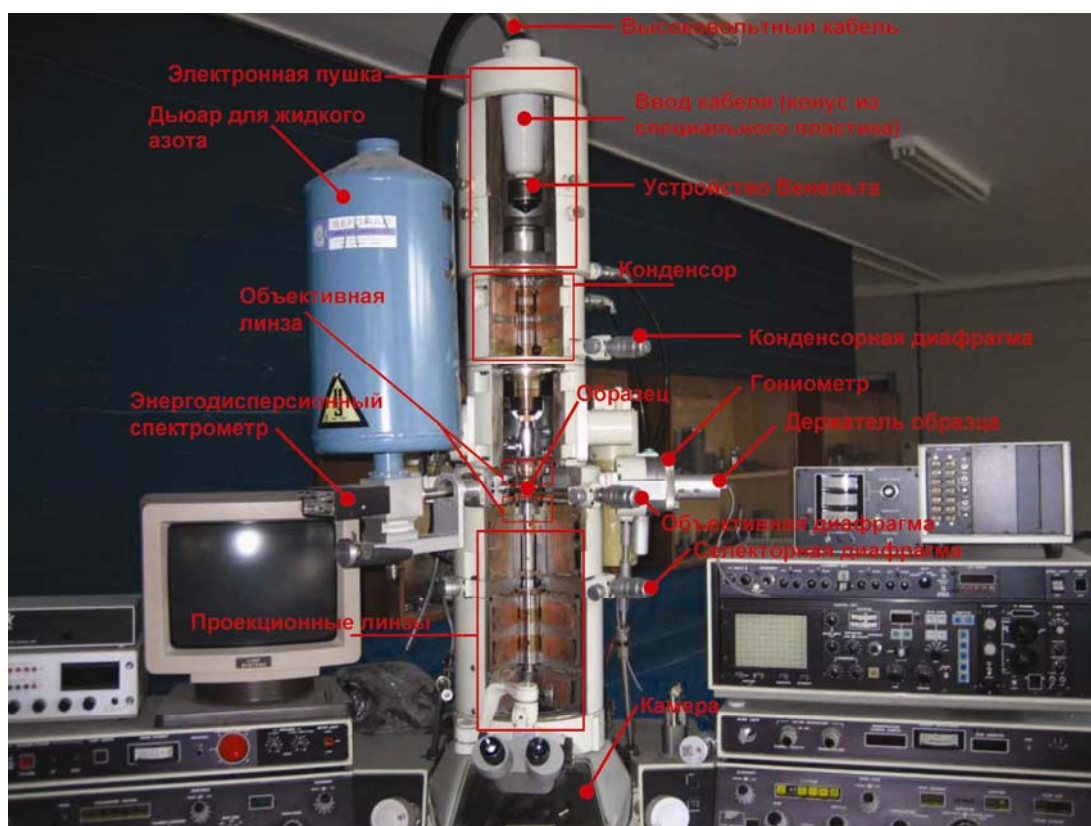


Рис. 2.2. Основные узлы просвечивающего электронного микроскопа.

Все узлы микроскопа находятся под вакуумом различной глубины. В зависимости от устройства прибора, давление в пушке поддерживается от  $10^{-7}$  до  $10^{-4}$  Па, в колонне от  $10^{-6}$  до  $10^{-3}$  Па, а в камере от  $10^{-2}$  до 0,1 Па. Относительно высокий вакуум в пушке и колонне электронного микроскопа достигается использованием последовательно установленными насосами: форвакуумный насос, каскад из диффузионных или турбомолекулярных и ионных насосов. Давление в различных частях микроскопа измеряется термопарными лампами (от атмосферного давления до 0,1 Па), магнитными датчиками давления (от  $10^{-2}$  до  $10^{-4}$  Па) и ионизационными лампами (включая сам ионный насос) - от  $10^{-4}$  до  $10^{-7}$  Па. При включении микроскопа происходит последовательное, автоматическое вакуумирование частей микроскопа. Процедура занимает от нескольких часов до 1-1,5 суток, поэтому регулярно используемые приборы постоянно поддерживаются в откачанном состоянии. В целях дегазации после длительного пребывания в выключенном состоянии иногда требуется провести отжиг колонны микроскопа, который осуществляется подачей тока на магнитные линзы микроскопа (такой режим предусмотрен всеми современными моделями микроскопов).

После краткого описания основных узлов микроскопа, более рассмотрим некоторые его узлы более подробно. Начнем с устройства катодов, основные характеристики которых представлены в таблице 2.1. Наиболее простым источником электронов в электронных микроскопах является термоэмиссионный катод из вольфрама, рабочим элементом в котором служит V-образная вольфрамовая проволока. Интенсивность потока электронов в таком источнике изменяется посредством увеличения/уменьшения тока накала катода и изменения напряжения смещения<sup>3</sup>. Этот источник наименее прихотлив к вакууму (давление в пушке должно поддерживаться не выше  $1 \cdot 10^{-3}$  Па) и его может сменить любой опытный пользователь. Однако вольфрамовый катод не долговечен, его срок работы обычно не превышает 2 месяцев и обладает недостаточной (для многих случаев) электронной яркостью (количество электронов приходящихся на единицу телесного угла).

Таблица 2.1. Сравнение характеристик различных источников электронов

Характеристика	Термоэлектронная эмиссия		Полевая эмиссия	
	W	LaB <sub>6</sub>	Термополевая эмиссия, W (100)	Холодная полевая эмиссия, W (310)
Диаметр мнимого источника	30 мкм	5-10 мкм	~ 10 нм	~ 10 нм
Яркость, измеренная при напряжении 100 кВ, А/(см <sup>2</sup> ·ср)	$5 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^6$	$10^7$ - $10^8$	$2 \cdot 10^6$
Разброс энергий электронов, эВ	2,3	1,5	0,3 – 0,8	0,3 – 0,5
Стабильность тока эмиссии	1%	1%	2%	5-10%

Более интенсивный поток электронов обеспечивается термоэмиссионным катодом из LaB<sub>6</sub>, рабочим элементом в нем является монокристалл гексаборида лантана. Электронная пушка с таким катодом должна поддерживаться при давлении не выше  $1 \cdot 10^{-4}$  Па. При квалифицированном использовании источника, замена осуществляется один раз в 2,5-3 года опытным пользователем. Схема питания термоэмиссионных катодов представлена на рис. 2.3. Третий источник электронов – катод с полевой эмиссией. Он состоит из холодной

<sup>3</sup> За изменением тока пучка можно интерактивно проследить меняя установки в симуляторе электронной пушки, представленном на сайте <http://www.matter.org.uk/tem/>, в разделе C: Electron Gun→C3: Gun Simulation.

или подогреваемой иглы, с острия которой приложенным потенциалом «стягиваются электроны» (используется эффект туннелирования электронов). Схема питания катодов с термополевой эмиссией приведена на рис. 2.4. Этот источник эксплуатируется при давлении не выше  $1 \cdot 10^{-6}$  Па, пушка микроскопа с таким катодом может откачиваться с использованием нескольких ионных насосов. Замена катода с полевой эмиссией производится только сервисным инженером, а в некоторых моделях ПЭМ она может быть произведена лишь на заводе-изготовителе. Сложности в эксплуатации катодов с полевой эмиссией компенсируются узким распределением по энергии ускоренных электронов и сроком службы – более 2-х лет. Следует отметить, что литературные данные о яркости, абсолютном токе эмиссии и стабильности эмиссии всех видов катодов сильно разнятся, и в основном, эта ситуация касается источников с полевой эмиссией. Возможно, это связано с сильной зависимостью абсолютного тока эмиссии от конструкции катодного узла. Некоторыми производителями заявляется о значительном увеличении тока эмиссии для катодов с полевой эмиссией и достижения токов 20 – 100 мкА.

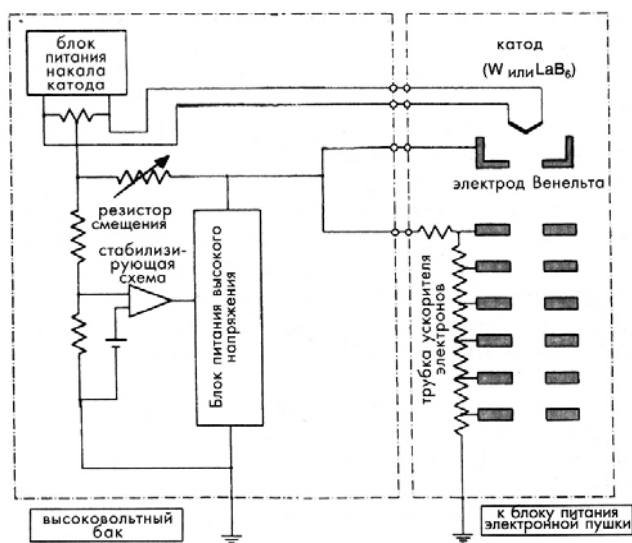


Рис. 2.3. Схема питания термоэмиссионных катодов.

Для исследователя, проводящего анализ образцов, важен совершенно другой параметр – ток зонда на образце, а он зависит от многих параметров, в том числе и свойств образца. Измерение тока зонда производится с использованием специального устройства - цилиндра Фарадея. Для примера, в растровых микроскопах с термоэлектронным источником ток зонда составляет 10-20 мкА, с термополевыми – до 20 нА, а с холодной полевой эмиссией до 2,5 нА.

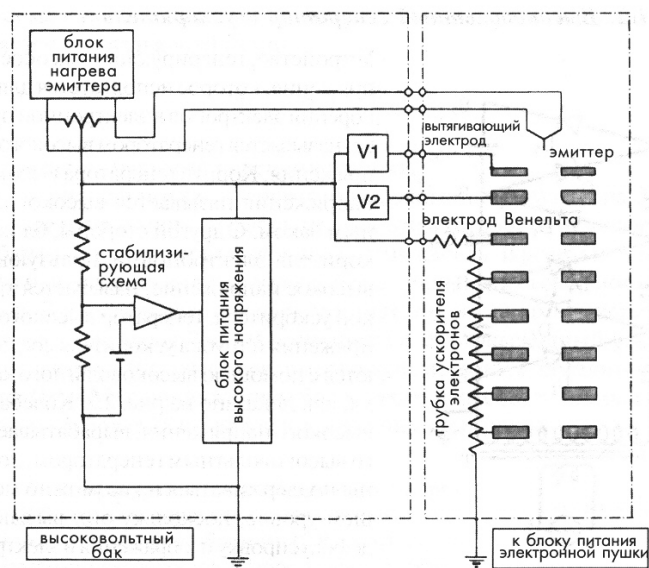


Рис. 2.4. Схема питания катодов с термополевой эмиссией.

Тип источника электронов, несомненно, очень сильно влияет на возможность достижения высокого разрешения или проведения анализа объектов. Однако, следующим не менее важным фактором, влияющим на функциональные возможности микроскопа, является качество изготовления магнитных линз. Для магнитных линз применимы те же понятия, что и для оптических. На рис. 2.5 изображена схема основных параметров толстой линзы и проиллюстрирован ход лучей, для описания которого, в идеальном случае, будет применимо уравнение Ньютона:  $y_2/y_1 = f_1/x_1 = f_2/x_2$ .  $F1$  и  $F2$  называются соответственно передним фокусом (фокус в пространстве объекта) и задним фокусом (фокус в пространстве изображения), а  $H1$  и  $H2$  – главными плоскостями в пространстве объекта и пространстве изображения.

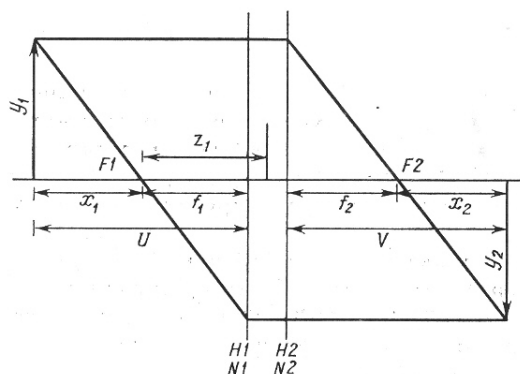


Рис. 2.4. Ход лучей в толстой линзе (иллюстрация уравнения Ньютона).  $N1, N2$  – узловые плоскости,  $H1, H2$  – главные плоскости,  $F1, F2$  – фокальные плоскости,  $f_1, f_2$  – фокальные расстояния линзы, а  $z_1$  – координата переднего фокуса.

Специфика конструкции электромагнитных линз в микроскопе позволяет применять приближение для тонких линз:  $f_1/U + f_2/V = 1$ . А так как показатели преломления в пространстве объекта и изображения равны между собой, то это уравнение можно записать в виде:  $1/U + 1/V = 1/f$ . Используя это уравнение можно выделить три случая формирования изображения: 1)  $U < f$  – изображение мнимое, прямое и увеличенное; 2)  $f < U < 2f$  – изображение действительное, перевернутое и увеличенное; 3)  $U > 2f$  – изображение действительное, перевернутое и уменьшенное. Для описания параметров оптической линзы применяются также следующие понятия: *поперечное увеличение*, *угловое увеличение*, *входной и выходной зрачок системы линз*, *опорная сфера Гаусса*, *продольное увеличение*, *глубина фокуса* (область значений фокусных расстояний), - в качестве одного из заданий для самостоятельной работы предлагается найти в литературе и сформулировать определения этих терминов.

Следует все же не забывать, что мы имеем дело не с видимым светом, а с потоком электронов. На рис. 2.6 проиллюстрировано взаимодействие магнитной линзы с ускоренными электронами.

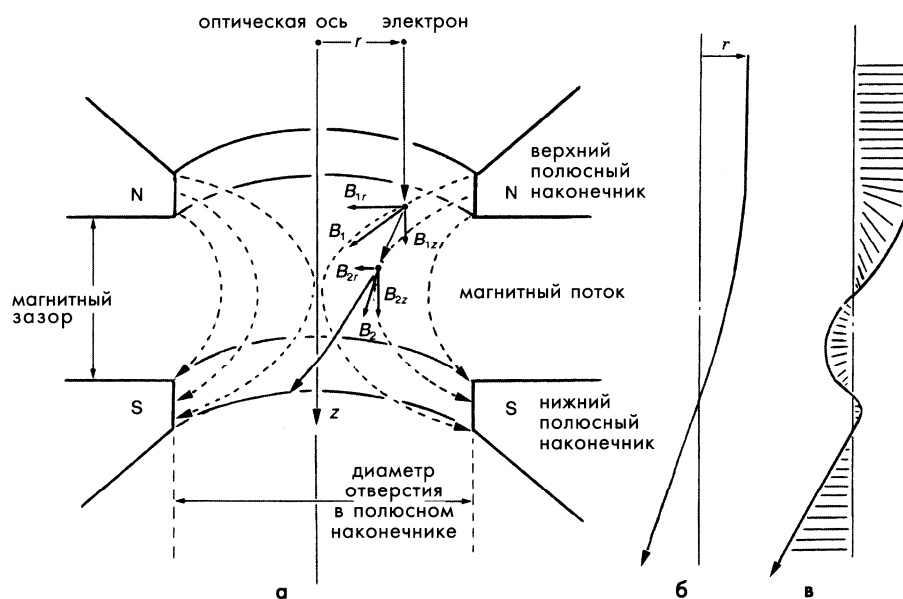


Рис. 2.6. Принцип работы магнитной линзы: а) взаимодействие электронов с магнитным полем линзы, б) идеальная траектория электронов, в) реальная траектория электронов (спираль).

В основе принципа работы магнитной линзы лежит свойство взаимодействия движущихся электронов и магнитного поля, при этом на электроны летящие параллельно оптической оси действует сила Лоренца -  $F$ :

$$F = -ev \times B = m \frac{d^2 r}{dt^2}, \quad (2.1)$$

где  $B$  – магнитное поле сконцентрированное в зазоре,  $e$  – заряд электрона,  $v$  – скорость электрона. Направление силы  $F$  задается правилом левой руки (направление тока противоположно направлению электронов), на рис. 2.6 сила направлена на читателя. Сила  $F$  обуславливает движение электрона по спирали. Однако, электроны летят не параллельно оптической оси, с ненулевой вращательной скоростью, взаимодействие которой с компонентой поля  $B_z$  приводит к возникновению силы, толкающей электрон к оптической оси, создавая тем самым фокусирующий эффект магнитной линзы. Таким образом, траектория движения электронов изменяется, и в магнитном поле линзы электронный пучок будет фокусироваться по спирали, а радиальное расстояние  $r$  от электрона до оптической оси может быть получена численным решением уравнения:

$$\frac{d^2 r}{dz^2} + \frac{e}{8mE} B_z^2(z) r = 0, \quad (2.2)$$

где  $E$  – ускоряющее напряжение с учетом релятивистской поправки. Аналогичным образом можно определить и  $\theta$  – угол поворота меридиональных лучей в пучке электронов:

$$\theta = \left( \frac{e}{8mE} \right)^{1/2} \int_{z_1}^{z_2} B_z(z) dz = 0, \quad (2.3)$$

Зависимость  $B_z(z)$  зачастую очень сложна, поэтому решение уравнений (2.2) и (2.3) возможно лишь в численном виде. Но уравнение (2.2) относительно легко решается, если применить приближение постоянного поля, при котором постулируется следующая зависимость  $B_z(z)$ :

$$B_z(z) = \begin{cases} B_s, & \text{для } -S/2 \leq z \leq S/2 \\ 0, & \text{для } z < -S/2, \text{ и } z > S/2 \end{cases}, \quad (2.4)$$

где  $B_s$  – напряженность магнитного поля в зазоре,  $S$  – величина магнитного зазора (расстояние от верхнего до нижнего полюсного наконечника), за начало координат взята точка на оптической оси отстоящая на равные расстояния от полюсных наконечников. Тогда решение уравнения (2.2) можно записать в виде:

$$r = r_0 \cos \left[ \left( \frac{e}{8mE} \right)^{1/2} B_s (z - S/2) \right], \quad (2.5)$$

Напряженность поля в линзе регулируется изменением пропускаемого через электромагниты тока, а его стабильность поддерживается посредством водяного охлаждения линз и силовой частей электропитания линз микроскопа. Значение  $B_s$  можно рассчитать зная ток  $I$  и количество витков  $N$  в электромагните:



$$B_s = \mu_0 \frac{NI}{S} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{NI}{S}, \quad (2.6)$$

где значение  $B_s$  – получается в теслах, если взять  $S$  – в метрах, а  $I$  – в амперах. Примененные нами условия (2.4) достаточно грубы, однако, используя их, мы получили вывод о зависимости траектории электрона от магнитного зазора в линзе, но в дальнейшем не сможем объяснить появление *сферических* (коэффициент  $C_s$ ) и *хроматических* (коэффициент  $C_c$ ) aberrаций в линзе.

Рассмотрим явление сферических aberrаций, которое заключается в слишком сильном преломлении лучей, выходящих из осевой точки под большим углом. Явление проиллюстрировано на рис. 2.7. Плоскость гауссова изображения – плоскость для которой выполняется уравнение  $1/U + 1/V = 1/f$ .

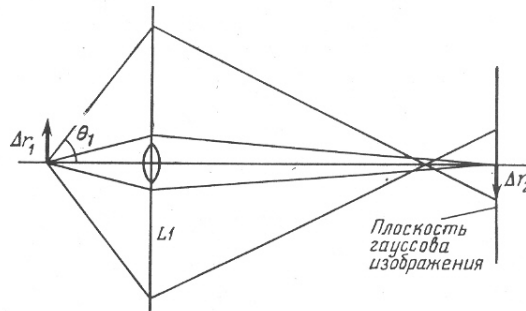


Рис. 2.7. Сферическая aberrация.

Для сильных увеличений экспериментально выявлено, что  $\Delta r_1$  пропорционально  $\theta_1^3$ , коэффициент в этой зависимости принято называть *коэффициентом сферических aberrаций*  $C_s$ :

$$\Delta r_1 = C_s \theta_1^3. \quad (2.7)$$

Строгая математическая зависимость  $C_s$  от  $B_z(z)$  выглядит достаточно сложно (в общем случае  $C_s$  будет зависеть от  $B_z^5(z)$ ), и может быть найдена исключительно численными методами. Сферическая aberrация является наиболее существенным дефектом, влияющим на качество изображений при высоком разрешении, в микроскопах без специальной коррекции она составляет от 0,5 до 2,5 мм.

Хроматическая aberrация является следствием чувствительности фокусного расстояния линзы к длине волны, а следовательно флуктуациям  $\Delta E$  энергии электронов. Для случая магнитных линз хроматические aberrации будут появляться также вследствие колебаний тока  $\Delta I$ , которые отвечают за колебания  $\Delta B$  магнитного поля линз, а в просвечивающем микроскопе возможна также потеря энергии электрона при взаимодействии

с образцом. Тогда, дифференцируя уравнение, предложенное Либманом для описания фокусирующих свойств всех «тонких» магнитных линз:

$$\frac{1}{f} = \frac{A_0(NI)^2}{E(S+D)}, \quad (2.9)$$

( $A_0$  – обычно принимают равной константе,  $D$  – диаметр отверстия полюсного наконечника) получаем зависимость  $\Delta f$  от  $\Delta E$  и  $\Delta I$ :

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta E}{E} - 2 \frac{\Delta I}{I}. \quad (2.10)$$

Коэффициент хроматической аберрации  $C_C$  определяется как  $C_C = af$ , где  $a$  – численный коэффициент близкий к единице. Тогда, уравнение (2.10) можно записать в виде:

$$\Delta f = C_C \left[ \frac{\Delta E}{E} - 2 \frac{\Delta I}{I} \right]. \quad (2.10)$$

Используя эту формулу, можно получить значение смещения  $\Delta r_1$ , для случая хроматических аберраций (Рис. 2.8):

$$\Delta r_1 = C_C \theta_1 \left( \frac{\Delta E}{E} - 2 \frac{\Delta I}{I} \right). \quad (2.10)$$

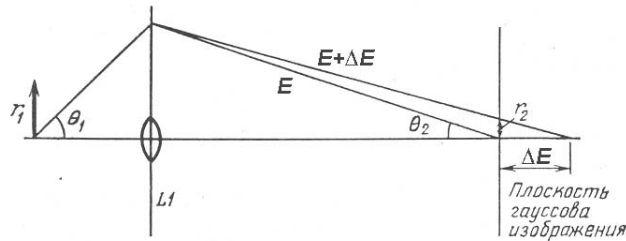


Рис. 2.8. Хроматическая аберрация.

Более быстрые электроны отклоняются слабее в поле магнитной линзы, чем медленные электроны. Таким образом, более быстрые электроны фокусируются за плоскостью гауссова изображения. Характерные значения  $C_C$  для линз – 1 – 1,5 мм. На рис. 2.9 приведены экспериментально полученные зависимости  $C_S$  и  $C_C$  от положения образца относительно вершины нижнего полюсного наконечника. Из представленных графиков видно, что существует оптимальное положение образца для достижения минимальных значений  $C_C$ , а  $C_S$  монотонно уменьшается с приближением образца к нижнему полюсному наконечнику.

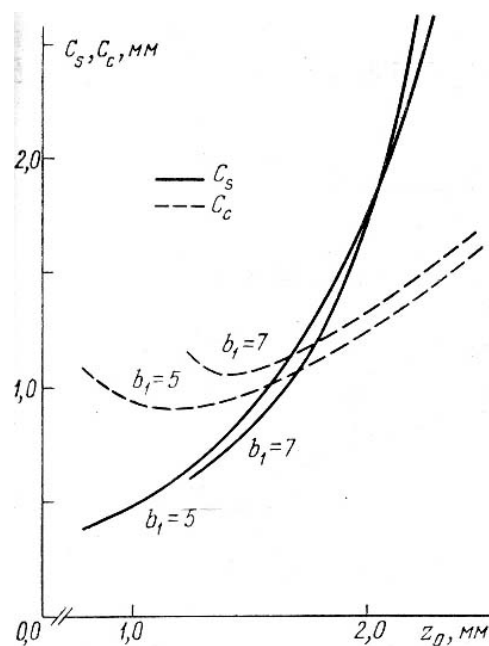


Рис. 2.9. Характерные зависимости  $C_c$  и  $C_s$  от положения образца в объективной линзе,  $b_1$  – диаметр отверстия верхнего полюсного наконечника в мм, диаметр отверстия нижнего полюсного наконечника равен 2 мм.

Следует отметить, что существует также возможность появления в линзе *астигматизма*, который связан с асимметрией магнитного поля линзы. Астигматизм характеризуется коэффициентом астигматизма  $C_a$ , который равен разности в фокусных расстояний линзы для лучей, лежащих во взаимно перпендикулярных плоскостях (Рис. 2.10.).

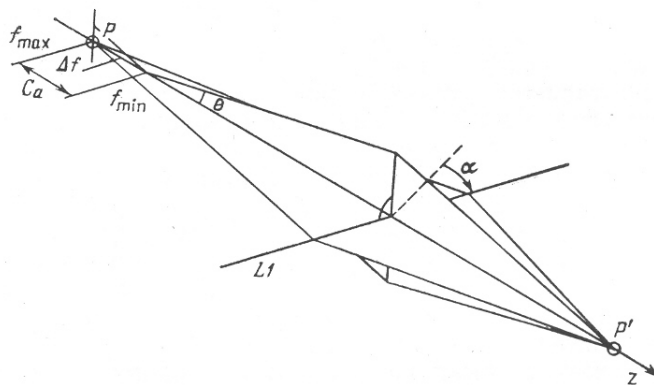


Рис. 2.10. Астигматизм магнитной линзы.

В отличие от описанных выше эффектов сферических и хроматических aberrаций, астигматизм может быть убран оператором прибора. В электронных микроскопах коррективка астигматизма осуществляется изменением тока 4-х дополнительных, слабых, цилиндрических линз. Система таких линз называется стигматором.

Описанные выше отклонения от идеальности, присущи всем магнитным линзам электронных микроскопов. Фактически можно выделить всего два типа магнитных линз в

микроскопах: *проекционные* и *объективные*. Проекционные линзы – линзы, которые проецируют изображение, созданное предыдущей линзой. Причем, фокус проекционных линз пространственно может находиться как внутри линзы, так и за ее пределами. Объективная линза – линза формирующая изображение реального объекта. Вследствие того, что угловое увеличение обратно пропорционально поперечному увеличению, увеличение изображения происходит в проекционных линзах при распространении лучей под очень малыми углами к оптической оси. Но в случае объективной линзы эти углы заметно выше, вследствие чего, aberrации этой линзы будут определяющими для достижения высоких разрешений. Для уменьшения влияния aberrаций объективной линзы, образец в просвечивающем микроскопе размещен в поле объективной линзы (такие линзы называются иммерсионными). В таком случае, положение главных плоскостей линзы и значения коэффициентов aberrаций будут зависеть от положения образца в линзе.

В последнее 10 лет активно развивается электронная оптика, применяемая для корректировки aberrаций – это так называемые корректоры сферических aberrаций и монохроматоры. По своей сути корректоры и монохроматоры являются электромагнитами специальной конструкции, устанавливаемыми в просвечивающие<sup>4</sup> микроскопы до или после объективной линзы. На рис. 2.11. проиллюстрирован принцип работы корректоров и представлен внешний вид их элементов. Корректоры aberrаций позволяют снизить сферические aberrации в микроскопах оснащенных катодами с полевой эмиссией до 1-10 мкм. Таким образом устраняется определяющее влияние значения  $C_s$  на разрешающую способность электронных микроскопов, а информационный предел улучшается до значений менее 0,1 нм. Применение монохроматоров позволяет улучшить аналитические свойства микроскопа, в частности появляется возможность определения ширины запрещенной зоны материала и степеней окисления химических элементов по спектрам характеристических потерь энергии электронов. На рис. 2.12 показан принцип работы и вид монохроматора, применяемого в микроскопах компании FEI Company.

---

<sup>4</sup> Применение корректоров и монохроматоров в растровых микроскопах лишено смысла, вследствие особенностей решаемых на этих приборах задач.

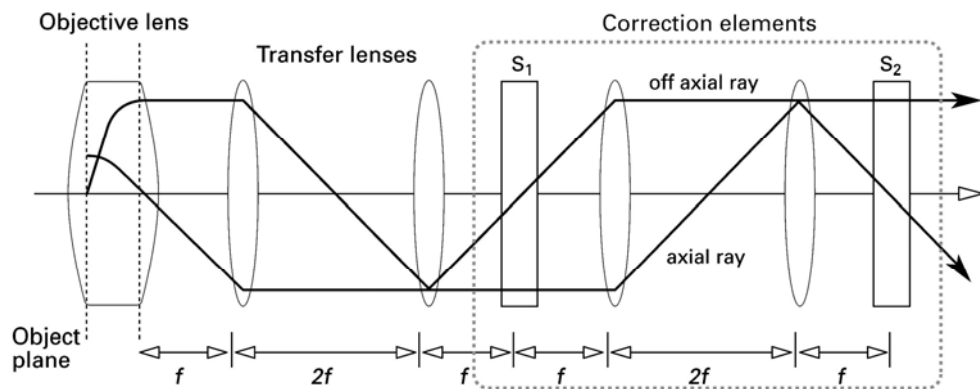
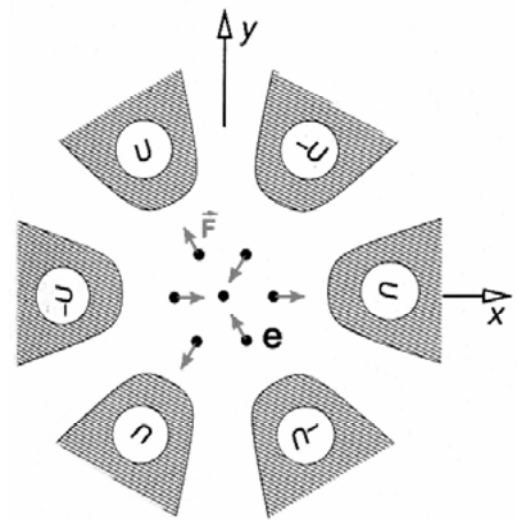
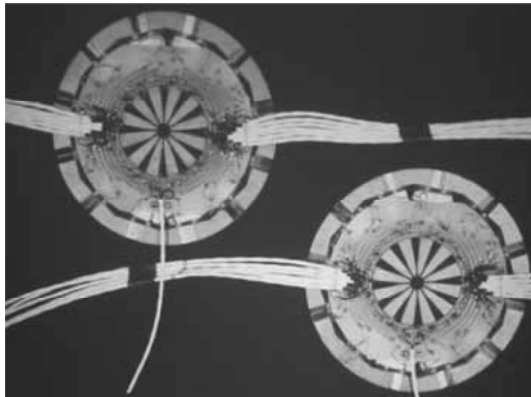


Рис. 2.11. Внешний вид двенадцатипольного магнита и принцип работы гексапольного магнита в корректоре (сверху) и схема траекторий лучей в корректоре (снизу), S1 и S2 - гексаполи.

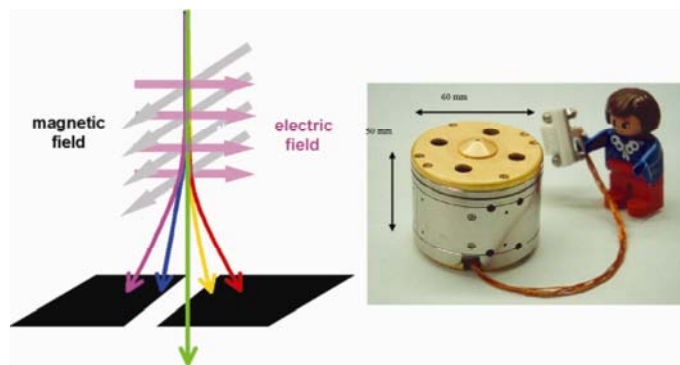


Рис. 2.12. Внешний вид и принцип работы монохроматора.

В колоннах микроскопов или после них также устанавливаются фильтры, являющиеся еще и аналитическим прибором. Как вы помните из первой лекции, взаимодействие ускоренных электронов с веществом происходит упруго (без изменения энергии) либо с изменением энергии. Современные фильтры и спектрометры предназначены для регистрации электронов прошедших через образец и имеющих энергию отличную от

первоначальной, а также регистрации вторичных электронов и характеристического рентгеновского излучения. Все они позволяют получать информацию об элементном составе образца и отличаются конструкцией и расположением в микроскопе, в настоящее время выпускаются коммерческие фильтры внутриколонного и постколонного типа (Рис. 2.13).

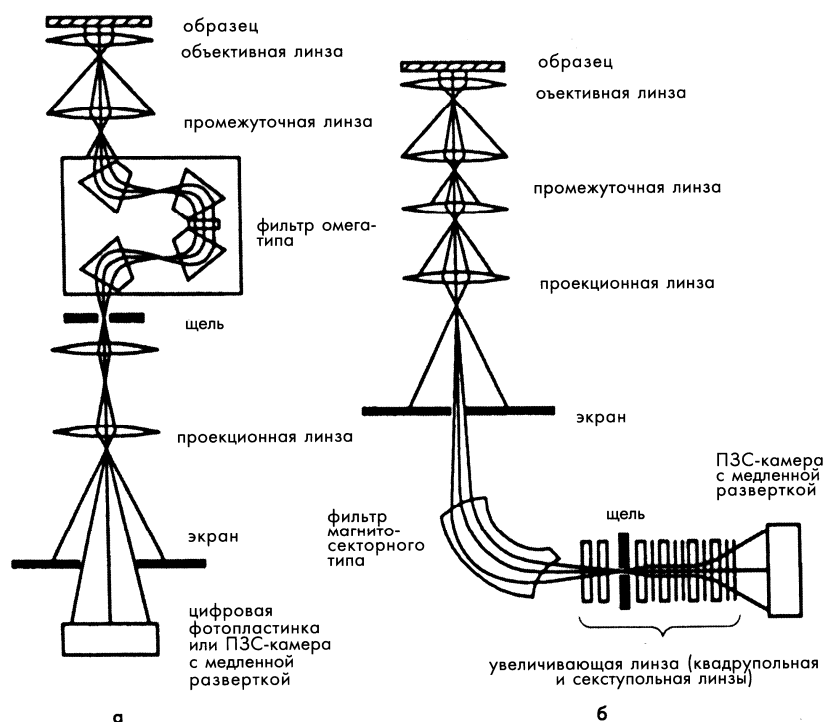


Рис. 2.13. Типы фильтров: а) внутриколонного типа<sup>5</sup>, б) постколонного типа<sup>6</sup>.

Назначения спектрометра характеристических потерь энергии электрона (EELS) – элементный анализ, определение степеней окисления элементов, теоретически возможно определение энергии Ферми в материале. Последние две функции спектрометра возможны только на самых современных микроскопах, оснащенных катодом монохроматором. Спектрометр потерь энергий электронов устанавливается под камерой микроскопа и позволяет получать зависимость количества электронов от энергии связи электрон – ион. Энергодисперсионный спектрометр для рентгеноспектрального микроанализа позволяет проводить полуколичественный анализ состава образцов методом регистрации характеристического рентгеновского излучения. Устанавливается этот спектрометр на колонну микроскопа непосредственно у образца, а для проведения анализа часто требуется повернуть образец на некоторый угол (обычно 45°), который определяется конструкциями микроскопа и спектрометра (Рис. 2.14.).

<sup>5</sup> Владелец патента на внутриколонный  $\Omega$ -фильтр является компания Carl Zeiss (Германия).

<sup>6</sup> Владелец патента на параллельный спектрометр характеристических потерь (PEELS) является компания Gatan (США).

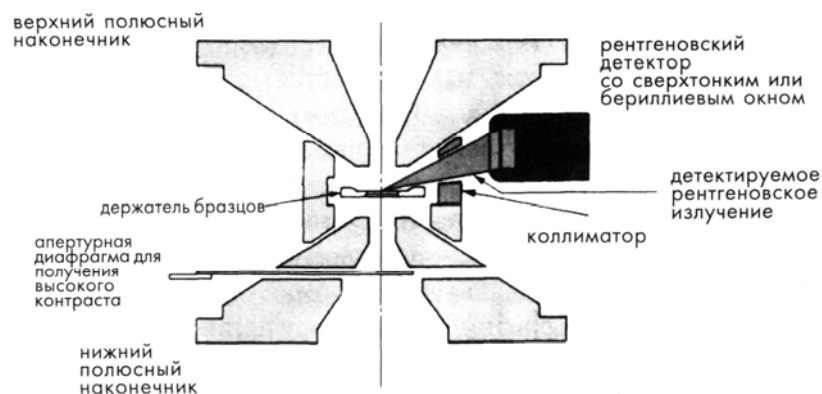


Рис. 2.14. Расположение энергодисперсионного спектрометра в ПЭМ.

Наблюдение изображений в просвечивающем микроскопе первоначально осуществляется с использованием флуоресцентного экрана, изображение на котором можно наблюдать невооруженным глазом или через оптический бинокляр. Для фиксирования изображений долгое время применялись фотопленки и фотопластинки, которые в настоящее время активно заменяются на полупроводниковые камеры и цифровые фотопластинки. Следует отметить, что камеры высокого разрешения (от 50 до 100 мкм) часто не устойчивы к воздействию ускоренных электронов и рентгеновского излучения, и защита камеры либо ухудшает разрешение либо значительно увеличивает ее стоимость. Изображения, получаемые с использованием таких камер зачастую по разрешению хуже регистрируемых на высококачественную пленку, которая обеспечивает разрешение около 10 мкм (причем, в этом случае возможно еще и дополнительное увеличение снимков при фотопечати). В то же время, регистрация изображений в электронном виде может позволить очень существенно сократить время получения конечного изображения по сравнению с методом фотографической регистрации, требующим химической обработки фотопленок. Это, в свою очередь, позволяет проводить на просвечивающем электронном микроскопе тщательные исследования на наноразмерном уровне микроструктуры материалов, склонных к превращениям под действием электронно-лучевого нагрева в условиях высокого вакуума (в колонне электронного микроскопа), таких, как значительная часть биологически активных нанокмпозитов - заменителей костной ткани, строительных материалов, содержащих связанную воду; а также объектов, способных отклонять электронный пучок в ходе исследования - материалов с высокой диэлектрической проницаемостью и ферромагнетиков. Кроме того, конструктивные особенности устанавливаемых на просвечивающие электронные микроскопы систем регистрации изображения в электронной форме часто позволяют

применять при их использовании программную коррекцию дрейфа изображения, что также исключительно важно исследования упомянутых типов образцов.

При регистрации интегральных (собираемых со всей освещенной электронами области) аналитических сигналов (например, при регистрации спектров EELS, характеристического рентгеновского излучения или при работе режиме растровой просвечивающей электронной микроскопии) в просвечивающем микроскопе применяются фотоумножители и энергодисперсионные детекторы.

Как уже отмечалось ранее, устройство растровых электронных микроскопов значительно проще и схематично конструкция растрового микроскопа схожа с конструкцией просвечивающего микроскопа до уровня образца. Основные отличия растрового электронного микроскопа от просвечивающего заключается в методе получения изображения, и детекторах, которые устанавливаются на эти микроскопы, а также в расположении этих детекторов. Следует отметить, что большинство просвечивающих микроскопов может быть оснащено приставками для работы в растровом режиме. Детекторы вторичных и обратно рассеянных электронов устанавливаются в такой просвечивающий микроскоп в районе объективной линзы.

### **Контрольные вопросы**

1. Каковы основные различия источников электронов, применяемых в электронных микроскопах?
2. По каким причинам установка монохроматора на приборы с термоэмиссионным катодом будет вредна для экспериментатора?
3. Чем вызваны сферические и хроматические aberrации магнитных линз, сформулируйте определение коэффициентов aberrаций?
4. Можно ли осуществить поворот изображения, получаемого в магнитной линзе от объекта, без поворота самого объекта? Если можно, то каким образом?

### **Задания для самостоятельной работы**

1. Нарисуйте схему формирования мнимого изображения в идеальной толстой линзе.
2. Сформулируйте понятия поперечное увеличение, угловое увеличение, входной и выходной зрачок системы линз, опорная сфера Гаусса, продольное увеличение, глубина фокуса (область значений фокусных расстояний).



3. Оцените расфокусировку изображения объекта в магнитной линзе вследствие хроматических аберраций, если:  $f = 1,5$  мм, стабильность высокого напряжения  $10^{-4}\%$ , а колебания тока линз составляют  $10^{-5}\%$ .
4. Вследствие каких причин детекторы обратно рассеянных электронов мало информативны в просвечивающей микроскопии?
5. Кольцевые детекторы высокоугловых прошедших электронов устанавливаются в верхней части камеры просвечивающих микроскопов, предположите какой полезный сигнал можно получить с использованием этого детектора.

#### **Рекомендуемая литература**

1. Дж. Спенс, Экспериментальная электронная микроскопия высокого разрешения. Перевод с английского языка / Под ред. В.Н. Рожанского. Москва. Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. Глава 2. Глава 7. стр. 35-65, стр. 217-231.
2. Д. Синдо, Т. Оикава, Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия. Перевод с английского языка / Москва. Техносфера, 2006, 256 с.
3. Transmission electron microscopy: a textbook for materials science/ Dawid B. Williams and C. Barry Carter. New York: Plenum Press, 1996. Basics, 173 p.
4. <http://www.photoweb.ru/lenswork1.htm#11>
5. <http://portal.grsu.by/portal/optics/?s=0/0>
6. <http://www.matter.org.uk/tem/>