



*Московский физико-технический институт  
(государственный университет)*

# **РАСТРОВЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ МИКРОСКОП**

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА**

МОСКВА 2003

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

# РАСТРОВЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ МИКРОСКОП

Лабораторная работа  
по курсу Вакуумная электроника

МОСКВА 2003

УДК 539.25

**Растровый электронный микроскоп:** Лабораторная работа по курсу Вакуумная электроника: / Сост.: К.Н. Никольский, А.С. Батулин, Е.А. Тишин, Е.П. Шешин, А.А. Потребич. — М.: МФТИ, 2003. — 40 с.

© Московский физико-технический институт  
(государственный университет), 2003

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ.....	5
2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСТРОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ .....	6
<b>2.1. Вторичная электронная эмиссия</b> .....	6
2.1.1. Истинно вторичные электроны .....	8
2.1.2. Отраженные электроны .....	12
<b>2.2. Контраст в растровом электронном микроскопе.</b>	13
2.2.1. Информативность отраженных электронов .....	13
2.2.2. Информативность вторичных электронов .....	15
3. УСТРОЙСТВО И РАБОТА РАСТРОВОГО ЭЛЕКТРОННОГО МИКРОСКОПА.....	17
<b>3.1. Общее устройство микроскопа</b> .....	18
<b>3.2. Электронный зонд</b> .....	19
3.2.1. Эмиссия и ускорение электронов .....	19
3.2.2. Работа электронной оптики .....	21
<b>3.3. Детекторы электронов</b> .....	28
3.3.1. Детектор вторичных электронов .....	28
3.3.2. Детектор отраженных электронов .....	28
<b>3.4. Формирование изображения в РЭМ</b> .....	29
3.4.1. Отклонение электронного зонда при сканирова- нии.....	29
3.4.2. Выбор растра и скорости сканирования .....	30
3.4.3. Стереометрические измерения в РЭМ.....	32
4. ЗАДАНИЕ.....	35
5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....	36
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	37
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	38

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Данная лабораторная работа направлена на ознакомление студентов с физическими принципами функционирования растрового электронного микроскопа (РЭМ) и основными методиками измерения.

Экспериментальная часть работы заключается в изучении растрового электронного микроскопа Jeol JSM-840, в том числе:

- получение изображения образца в различных режимах работы микроскопа:
  - ❖ в режиме сбора истинно вторичных электронов (SEI),
  - ❖ в режиме сбора упругоотраженных электронов (BE), топографический (ТОПО) и элементный (COMP) контрасты;
- получение стереоизображений образцов;
- изучение особенностей изображений, получаемых в растровом электронном микроскопе.

При выполнении настоящей лабораторной работы студент знакомится с принципом действия растрового электронного микроскопа и конструкцией прибора Jeol JSM-840, а также получает навык практической работы с ним.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Растровая электронная микроскопия — это современный мощный метод изучения поверхности твёрдых тел. Принципы растровой и просвечивающей электронной микроскопии были предложены в 30-х годах XX века, однако в связи с большими техническими трудностями реализации растровая микроскопия получила широкое распространение лишь в последние 25–30 лет. Главный недостаток просвечивающей электронной микроскопии — это необходимость изготовления тонких срезов или реплик с поверхности исследуемых образцов. В растровой микроскопии обычно не требуется никакой предварительной подготовки поверхности. Ещё одно её преимущество — большая глубина резкости, получающаяся за счёт большого фокусного расстояния последней линзы.

Принцип растровой электронной микроскопии состоит в сканировании исследуемой поверхности тонким электронным лучом по типу телевизионной развёртки. Выбитые электронным лучом вторичные электроны регистрируются детектором электронов, образуя видеосигнал, моделирующий яркость луча электронно-лучевой трубки, развёртка которой синхронна с развёрткой луча микроскопа. Так как коэффициент вторичной эмиссии зависит от угла падения первичных электронов, на экране электронно-лучевой трубки возникает изображение, определяемое рельефом исследуемой поверхности.

Техническая задача формирования тонкого электронного пучка является общей как для растровой электронной микроскопии, так и для рентгеновского микроанализа с электронным возбуждением. Поэтому часто эти методы объединяются в едином аппаратном исполнении, как это сделано, например, в приборе Jeol JSM–840.

Более детальное знакомство с принципами рентгеновского микроанализа выходит за рамки данной лабораторной работы и вынесено в отдельную лабораторную работу «Рентгеновский микроанализ».

## 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСТРОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

### 2.1. Вторичная электронная эмиссия

Испускание электронов из твердого тела при бомбардировке пучком первичных электронов называют вторичной электронной эмиссией (ВЭЭ). Это явление, открытое Л. Остином и Г. Штарке (1902), представляет собой сложное наложение нескольких взаимосвязанных процессов: упругого и неупругого рассеяния первичных электронов, возбуждения внутренних, истинно вторичных электронов, их движения к поверхности и выхода в вакуум. Сложный характер явления вторичной электронной эмиссии наглядно проявляется в энергетическом спектре  $N(E)$  вторичных электронов (рис. 1).

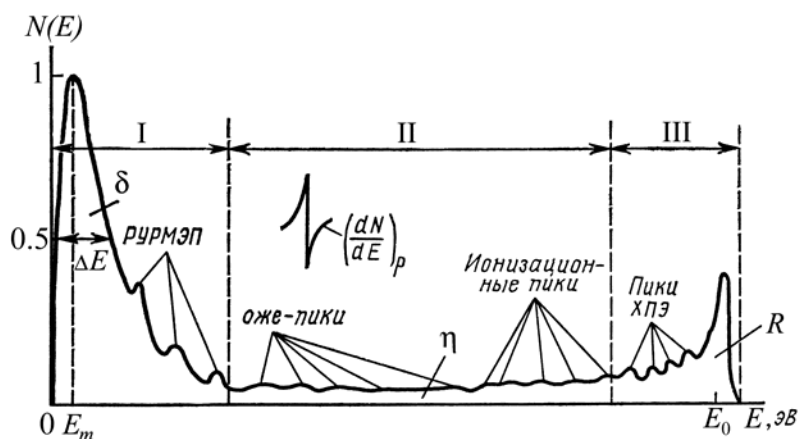


Рис. 1. Энергетический спектр вторичных электронов

Как видно из рис. 1, спектр может быть разбит на три характерные области. При средних энергиях первичных электронов ( $E_0 = 100 \text{ эВ} \div 1 \text{ кэВ}$ ) наибольшая доля в спектре приходится на медленные истинно вторичные электроны (область I). Отношение

числа этих электронов к числу первичных электронов, вызвавших эмиссию, называют коэффициентом истинно вторичной эмиссии и обозначают  $\delta$ .

Области II и III относятся к неупруго- и упругоотраженным первичным электронам. В качестве условной границы между областями I и II выбрано значение энергии вторичных электронов  $E = 50$  эВ. Электроны с энергиями  $0 < E < 50$  эВ считают истинно вторичными, а с энергиями  $50 \text{ эВ} < E < E_0$  — неупругоотраженными. Очевидно, такое разграничение имеет смысл лишь при энергии первичных электронов  $E_0 > 50$  эВ. Коэффициент неупругого отражения (КНО)  $\eta$  есть отношение числа электронов с энергией  $E \geq 50$  эВ к числу первичных электронов. КНО обычно включает в себя и коэффициент упругого отражения (КУО)  $R$  — отношение числа электронов, отраженных без потерь энергии (или с очень малой потерей энергии, например меньшей 1 эВ), к числу первичных электронов. Это допустимо, поскольку при  $E_0 > 50$  эВ КУО не превышает 10%.

Слева от пика упругоотраженных электронов, расположенного при  $E = E_0$ , имеется группа максимумов, соответствующая первичным электронам, испытавшим при взаимодействии с мишенью дискретные потери энергии, характерные для данного вещества. Это так называемые пики характеристических потерь энергии (ХПЭ). В области I часть пиков обусловлена резонансным упругим рассеянием медленных электронов у порогов неупругих каналов (РУРМЭП).

Небольшие пики в областях I и II обусловлены оже-электронами. Для того чтобы эти пики (или перегибы) на кривой  $N(E)$  были более заметными, эту кривую дифференцируют. Рассмотрим подробнее, как образуются оже-электроны. Когда первичный пучок электронов проникает в вещество, первичные электроны могут переводить электроны атомов вещества на более высокие энергетические уровни или же ионизовать атом. Так как электроны первичного пучка обладают большой энергией, то обычно эти процессы происходят на низколежащих уровнях. В результате этого атомы вещества оказываются в возбужденном



состоянии. Такие атомы могут перейти из возбужденного состояния в основное двумя способами. В первом случае возбужденный электрон возвращается на прежнюю оболочку, испуская при этом квант рентгеновского излучения. Такое излучение называется характеристическим, так как длина волны этого излучения строго зависит от атомного номера элемента. На этом явлении основан рентгеновский микроанализ. Во втором случае возбужденный электрон при переходе в прежнее состояние отдаёт свою энергию третьему электрону из той же самой или вышележащей оболочки, который затем покидает вещество. Образованные таким образом свободные электроны называются оже-электронами. Следует отметить, что для оже-процесса необходимо наличие как минимум двух электронов на возбуждённой орбите (в атоме водорода оже-процесс невозможен). Энергия оже-электронов тоже строго зависит от атомного номера элемента, поэтому они тоже могут быть использованы для определения химического состава вещества (оже-спектроскопия).

### 2.1.1. Истинно вторичные электроны

Спектр истинно вторичных электронов имеет вид кривой с максимумом при некотором значении  $E = E_m$ . Для металлов и полупроводников  $E_m = 1.5-3.5$  эВ, причем наблюдается периодическая зависимость  $E_m$  от атомного номера  $Z$ . Полуширина спектра  $\Delta E = 3-10$  эВ. Форма энергетического спектра истинно вторичных электронов  $N(E)$ , величины  $E_m$  и  $\Delta E$  у металлов практически не зависят от энергии первичных электронов при  $E_0 \geq 20$  эВ. При  $E_0 < 20$  эВ положение максимума  $E_m$  сдвигается в сторону меньших энергий. При энергии  $E_0$ , меньшей работы выхода  $e\phi$ , максимум истинно вторичных электронов исчезает, т.е. спектр состоит в основном из упругоотраженных электронов. Величину  $E_0^* \approx e\phi$  считают порогом вторичной эмиссии металлов.

У диэлектриков максимум энергетического спектра сдвинут в сторону меньших энергий (обычно  $E_m \approx 1$  эВ) и является более узким, чем у металлов ( $\Delta E \approx 1.5-3$  эВ). Таким образом, из металлов испускаются более «горячие» вторичные электроны, чем из диэлек-

триков. Порог собственной ВЭЭ из диэлектриков соответствует  $E_0^* \approx \Delta E_g$ , где  $\Delta E_g$  — ширина запрещенной зоны, т.е. он связан с возбуждением электронов из валентной зоны. При  $E_0 < \Delta E_g$  спектр состоит в основном из электронов с энергией, близкой к  $E_0$ .

Следующим характерным отличием диэлектриков от металлов является температурная зависимость  $\delta$  у диэлектриков. При изменении температуры от 100 до 600 К величина  $\delta$  уменьшается в 2–3 раза. Существенное отличие состоит также в гораздо большей глубине выхода медленных вторичных электронов у диэлектриков. Так, если у металлов средняя свободная длина пробега вторичных электронов  $10 \text{ \AA}$  и соответственно максимальная глубина выхода около  $50 \text{ \AA}$ , то у диэлектриков цифры в 5 раз больше — 50 и  $500 \text{ \AA}$ . Причина такой разницы в следующем. Вторичные электроны в металлах сильно взаимодействуют с электронами зоны проводимости, причем достаточно лишь нескольких столкновений, чтобы потерять энергию настолько, что они уже не могут преодолеть потенциальный барьер на границе металла. В диэлектриках с шириной запрещенной зоны около 10 эВ вторичный электрон с энергией менее 10 эВ не может передать свою энергию электронам вещества и теряет свою энергию только за счет взаимодействий с фононами и, таким образом, может проходить большие расстояния.

В создании вторичных электронов принимают участие не только электроны первичного пучка, но и отраженные электроны, причем их эффективность повышается за счет того, что при выходе они имеют меньшие, чем первичные электроны, скорости и движутся по наклонным к поверхности объекта траекториям. Отраженные электроны могут играть существенную роль в создании вторичных электронов. При коэффициенте отражения  $R = 0.05$  выбитые отраженными электронами вторичные электроны составляют 25% от общего числа вторичных электронов, а при величине коэффициента отражения  $R = 0.45$  — 70%.

Общий вид зависимости коэффициента вторичной эмиссии  $\delta$  от энергии первичных электронов приведен на рис. 2. Вначале  $\delta$  растет вместе с  $E_0$  из-за увеличения числа вторичных электронов в объ-

екте (растет энергия, рассеиваемая в веществе), затем с ростом глубины проникновения в вещество из-за того, что рожденные на глубине вторичные электроны не могут достигнуть поверхности,  $\delta$  при дальнейшем росте  $E_0$  начинает уменьшаться. Металлы и элементарные полупроводники характеризуются невысоким  $\delta$ :  $\delta_{\max}$  около единицы,  $E_{0\max} = 200-800$  эВ. Для изоляторов  $\delta_{\max} = 1.5-2.3$  и  $E_{0\max} = 300-1200$  эВ.

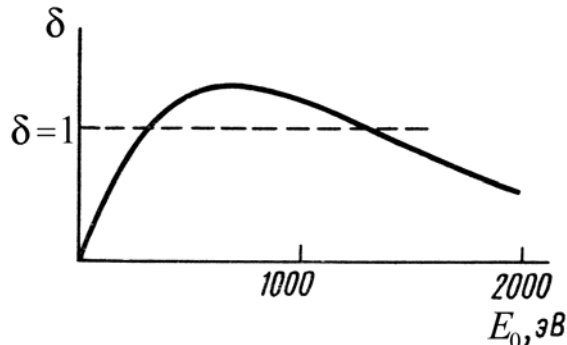


Рис. 2. Зависимость коэффициента истинной вторичной эмиссии от энергии первичных электронов

Коэффициент вторичной электронной эмиссии зависит не только от элементного состава, но и от угла падения пучка, т.е. от рельефа поверхности. Это вызвано следующим эффектом. Глубина проникновения в вещество первичных электронов с энергией 20 кэВ составляет примерно  $h_1 + h_2 = 1$  мкм (рис. 3). Однако вторичные электроны выходят из глубины  $h_1$  примерно  $10-30 \text{ \AA}$  для металлов и  $100-300 \text{ \AA}$  для диэлектриков. При перпендикулярном падении первичного пучка, как показано на рис. 3, характерный линейный размер области, из которой будут выходить вторичные электроны, примерно равен глубине  $h_1$ . Эта величина как раз и будет ограничивать разрешение метода. С другой стороны, если первичный пучок электронов падает на образец под углом, то при неизменной глубине выхода вторичных электронов, размер области на поверхности образца из которой они смогут выходить увеличится, следовательно, увеличится и число вторичных элек-

тронов. При дальнейшем уменьшении угла падения первичного пучка число вторичных электронов будет возрастать. Максимальный коэффициент вторичных электронов будет в случае, когда первичный пучок будет попадать на образец практически параллельно поверхности.

По этой причине области на поверхности образца, на которые сканирующий пучок будет попадать под острыми углами, будут на изображении в РЭМ выглядеть более светлыми. Кроме того, очень яркими будут выглядеть на изображении объекты с характерными размерами сравнимыми с глубиной выхода электронов (пиролитические усы, нанотрубки, и т.д.).

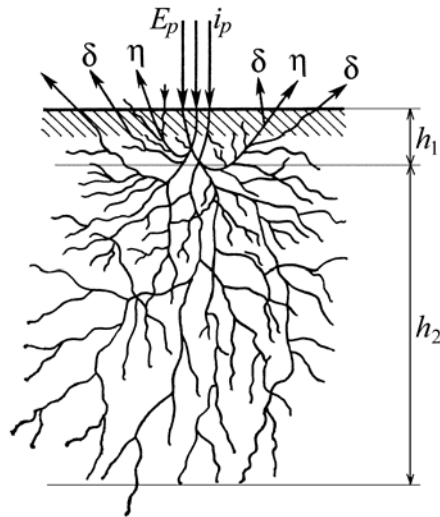


Рис. 3. Образование электронного облака в образце

### 2.1.2. Отраженные электроны

Коэффициент отражения — сложная функция  $E_0$  и атомного номера  $Z$  вещества объекта. Для  $E_0 > 1-2$  кэВ  $\eta$  слабо зависит от  $E_0$ , а зависимость  $\eta(Z)$  имеет характерный монотонный вид. Распределение по энергиям отраженных электронов характеризуется вполне определенным максимумом. Для малых энергий  $E_0 = 0.6-3$  кэВ

для всех элементов  $Z = 6-83$  и для углов отражения  $\varphi = 30-60^\circ$  максимум соответствует упругоотраженным электронам ( $E_{\max} = E_0$ ). Для  $E_0 = 10-30$  кэВ максимум распределения всегда находится ниже, и с ростом  $Z$  максимум растет по величине и смещается в сторону  $E_0$  (рис. 4). Для тяжелых элементов положение максимума не зависит от угла отражения и изменения энергии  $E_0$  от 10 до 30 кэВ. При нормальном падении первичного пучка для всех элементов с ростом угла отражения уменьшается число отраженных электронов и сама величина максимума распределения.

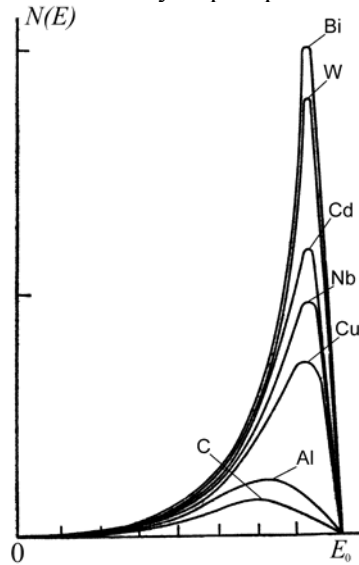


Рис. 4. Энергетический спектр отраженных электронов для разных веществ:  $E_0 = 30$  кэВ,  $\varphi = 7.5^\circ$

## 2.2. Контраст в растровом электронном микроскопе

### 2.2.1. Информативность отраженных электронов

Рассмотрим вначале отраженные электроны. Если образец однороден по составу и имеет выраженный рельеф, то изображение в отраженных электронах будет иметь такой же вид, как если бы мы смотрели на поверхность со стороны падения первичного пучка. Однако изображение окажется лишенным полутонов — оно будет содержать четко очерченные светлые и темные области в зависимости от того, отражаются ли отсюда электроны в коллектор или нет (рис. 5).

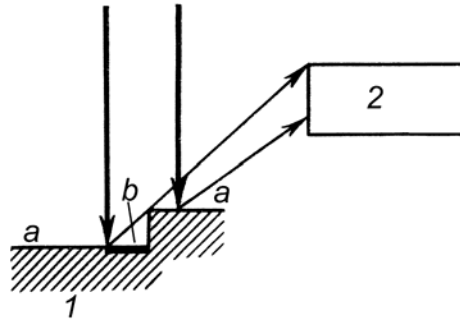


Рис. 5. Контраст изображения в отраженных электронах, области *a* на изображении светлые, область *b* — темная:  
1 — объект, 2 — коллектор

В том случае, если образец плоский, но имеет области с разным составом, из-за различия в  $\eta$  сигнал от области с большим  $\eta$  будет больше, чем от области с меньшим  $\eta$ , и последняя на изображении будет выглядеть темной (рис. 6а).

Если объект различен и по составу, и по топографии, то возможно отдельно выделить информацию о составе и о геометрии поверхности. Для этого используется парный детектор (рис. 6). *A* и *B* представляют собой твердотельные детекторы, расположенные симметрично относительно объекта (обычно они устанавливаются над объектом у полюсного наконечника объективной линзы). Для плоского объекта сигналы с каждого детекто-

ра одинаковы. При различии в рельефе сигналы детекторов имеют изменения разного знака:  $I_A = I_0 + \Delta_1$  и  $I_B = I_0 - \Delta_2$ . Их суммарный сигнал  $I_{A+B} = 2I_0 + (\Delta_1 - \Delta_2)$  несет информацию об атомном номере элемента, а разностный  $I_{A-B} = \Delta_1 + \Delta_2$  — о геометрии поверхности.

Используя анализатор по энергиям, можно из всей массы отраженных электронов выделить только те, которые испытали лишь вполне определенные небольшие (до нескольких десятков электронвольт) потери энергии, так называемые характеристические потери. Для получения таких изображений объект нужно сильно наклонять к первичному пучку. Разрешение анализатора очень высокое, и информация получается только для тонкого поверхностного слоя, что характерно также и для другой группы электронов, содержащихся в спектре вторичных, — оже-электронов.

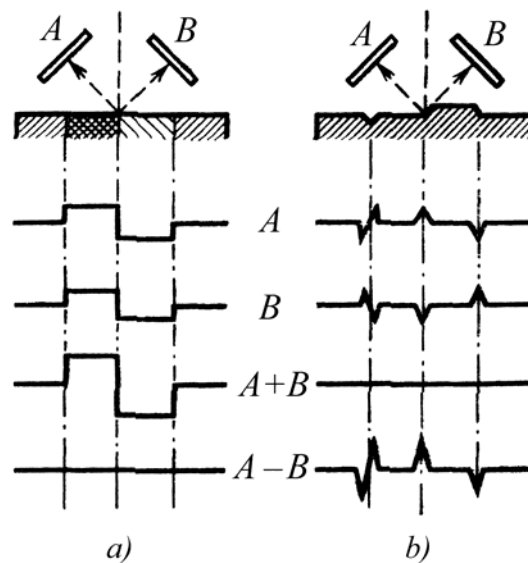


Рис. 6. Принцип работы парного детектора.  $A$  и  $B$  — твердотельные детекторы, ниже — вид сигналов от каждого детектора, а также вид суммарного и разностного сигналов

Следует отметить ещё одну способность отражённых электронов — аномальное изменение коэффициента отражения при определённых ориентациях монокристаллического объекта относительно первичного пучка. Это связано с эффектом каналирования первичных электронов, и при некоторых условиях этот эффект может дать изображения, аналогичные линиям Кикучи в просвечивающей микроскопии. По этим так называемым картинам каналирования, или линиям псевдо-Кикучи, можно делать заключения о кристаллическом строении объекта.

### **2.2.2. Информативность вторичных электронов**

Режим медленных, истинно вторичных, электронов используется в РЭМ чаще всего. По отношению к изображению в отражённых электронах изображение в медленных вторичных содержит полутона, более «мягкое» и имеет больше деталей. Оно очень объемно и привычно для человеческого глаза. Именно этот режим работы позволяет реализовать важное преимущество РЭМ по отношению к оптическому микроскопу — на два-три порядка большую глубину фокуса, поскольку медленные вторичные электроны удается «вытащить» и уловить коллектором даже из узких и глубоких щелей и отверстий.

Чем же обусловлена большая глубина фокуса в РЭМ? В световом микроскопе всюду имеется жесткое соответствие между плоскостями объекта и изображения, что и ограничивает глубину фокуса. В РЭМ условия иные. Здесь электронные линзы формируют лишь тонкий первичный луч, освещающий образец, а между объектом и коллектором вторичных электронов нет электронной линзы с сильным осесимметричным электрическим полем. Несфокусированный пучок вторичных электронов может дать произвольное пятно засветки на торце сцинтиллятора коллектора. Однако это пятно соответствует полной эмиссии, поступающей со всей «точки» объекта. В отличие от светового микроскопа соответствие между точкой объекта и ее изображением обеспечивается не линзой, а последовательным «освещением»



отдельных мест объекта, причём оба электронных луча в камере микроскопа и в видеотрубке движутся синхронно и синфазно.

Изображение в РЭМ остается резким и в тех случаях, когда нормаль к объекту образует достаточно большой угол с направлением «освещающего» электронного луча. Это так же связано с большой «безоптической» глубиной фокуса изображения. Однако контраст картины сильно зависит от угла наклона, так как вторичная эмиссия характеризуется сильной угловой зависимостью.

### 3. УСТРОЙСТВО И РАБОТА РАСТРОВОГО ЭЛЕКТРОННОГО МИКРОСКОПА

#### 3.1. Общее устройство микроскопа

Микроскоп, изучаемый в ходе данной работы, позволяет вести наблюдения образца в трех основных режимах: во вторичных электронах, в отраженных электронах, в рентгеновских лучах (микроанализатор); кроме того, в оптическом диапазоне (включенный в состав установки оптический микроскоп носит вспомогательный характер). Для первых двух режимов оптимальный ток с точки зрения точности результатов составляет 1–1000 пА, при рентгеновском микроанализе оптимальным считается ток зонда порядка 100 нА. Поэтому ток зонда микроскопа изменяется в широких пределах.

Структурная схема микроскопа дана на рисунке 7. Рассмотрим все по порядку, начиная с формирования электронного зонда. Ускорение и фокусировка пучка происходит в колонне, вверху которой находится электронная пушка, испускающая электроны. Далее следует система электронной оптики, которая формирует узкий зонд, а также позволяет отклонять его в сторону, направляя в определенные точки образца. Здесь же в колонне находится измеритель тока зонда и оптический микроскоп. Во внутренних областях колонны поддерживается вакуум, чтобы избежать рассеяния электронов и окисления вольфрамовой нити, являющейся источником электронов.

Образец крепится в специальном держателе, позволяющем максимально удобно оперировать с образцами в процессе работы. Образец окружен детектирующей аппаратурой — детектором отражённых электронов, детектором вторичных электронов.

Помимо колонны, в виде отдельных блоков смонтирована остальная аппаратура — это вакуумная система, управляющая система с монитором для отображения результатов, счетный блок рентгеновского спектрометра и компьютер, позволяющий считывать результаты наблюдений.

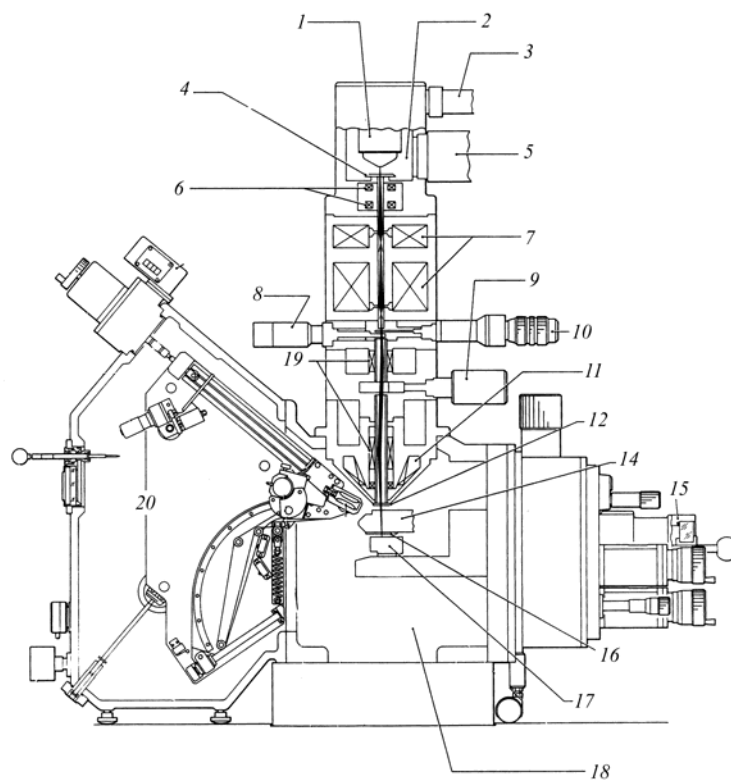


Рис. 7. Общая схема растрового электронного микроскопа:  
 1 — электронная пушка; 2 — камера электронной пушки;  
 3 — высоковольтный кабель; 4 — анод; 5 — вакуумная магистраль;  
 6 — юстировочные катушки; 7 — конденсорные линзы;  
 8 — измеритель тока пучка; 9 — вакуумный клапан;  
 10 — устройство выбора диафрагм; 11 — объектная линза;  
 12,16 — детектор упругоотражённых электронов;  
 14 — оптический микроскоп; 15 — шлюз для замены образцов;  
 17 — держатель образцов; 18 — основная вакуумная камера;  
 19 — сканирующие катушки; 20 — рентгеновский спектрометр

## 3.2. Электронный зонд

### 3.2.1. Эмиссия и ускорение электронов

Источником электронов в приборе Jeol JSM-840 служит V-образный термоэлектронный катод из вольфрамовой проволоки. Электроны, испущенные катодом, проходят через цилиндр Венельта (рис. 8), на который подается еще более низкий потенциал, чем на катод (напряжение смещения). Подобно сетке в электронной лампе цилиндр Венельта управляет током пушки. Он связан определенной электрической схемой с катодом, чтобы нивелировать нестабильность потока электронов от вольфрамовой нити, испускательная способность которой сильно зависит от температуры (тока накала).

С увеличением температуры нити возрастает эмиссия электронов, которая, однако, достигает насыщения при некоторой температуре и остается постоянной при дальнейшем нагреве. С помощью напряжения смещения между катодом и цилиндром Венельта можно регулировать уровень тока насыщения.

Далее, по ходу пучка, на расстоянии около 10 мм от цилиндра Венельта, располагается анодная пластина с отверстием около 3 мм. Анод заземляется, а на катод подается отрицательное напряжение от 1 до 50 кВ. На участке от цилиндра Венельта до анода происходит ускорение электронов. Ускоряющее напряжение по модулю равно потенциалу Венельта (который практически равен потенциалу катода).

Катод, цилиндр Венельта и анод образуют трёхэлектродную пушку, траектории электронов в которой схематически показаны на рис. 8.

В пространстве между цилиндром Венельта и анодом пучок сужается, образуя кроссовер, диаметр которого  $d_c$  определяется тепловым разбросом скоростей электронов и зависит от фокусного расстояния пушки  $f$ , анодного напряжения  $V_a$  и температуры катода  $T_k$ :

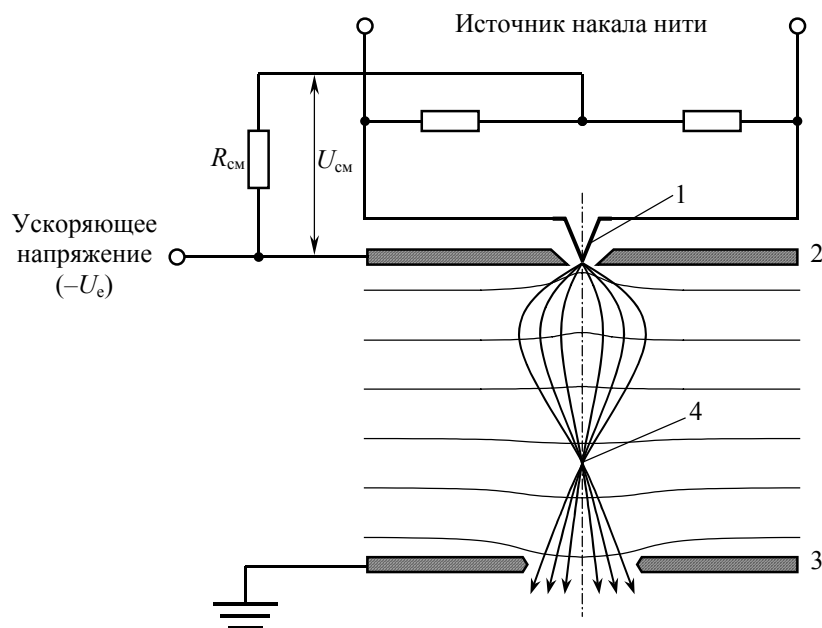


Рис. 8. Схематическое изображение электронной пушки и траектории электронов в ней:  
1 — катод, 2 — венельт, 3 — анод, 4 — кроссовер

$$d_c \approx 2f \sqrt{\frac{kT_k}{eV_a}}. \quad (1)$$

Типичный режим работы пушки: ток пучка  $i = 100$  мкА,  $f = 5$  мм,  $V_a = 20$  кВ,  $T_k = 2700$  К,  $d_c \approx 20$ – $50$  мкм. Расходимость пучка составит около 1 градуса. При уменьшении запирающего напряжения на цилиндре Венельта увеличивается ток пучка и его расходимость, а диаметр кроссовера остаётся неизменным. Неизменной остаётся и яркость пучка  $\beta$ , которая определяется как отношение плотности электронного тока в фокусе к телесному углу, в пределах которого распространяется сфокусированный

пучок. Яркость пучка электронов, эмитированных термокатодом, равна

$$\beta = \frac{j_k e V_a}{\pi k T_k}, \quad (2)$$

где  $j_k$  — плотность тока эмиссии катода и для вольфрамового катода при типичных условиях составляет  $10^4$ – $10^5$  А ср/см<sup>2</sup>. Яркость пучка в электронно-оптической системе, так же, как и в оптике, постоянна и не зависит ни от числа линз в системе, ни от их оптической силы.

### 3.2.2. Работа электронной оптики

Пройдя через отверстие в анодной пластине, электроны попадают в систему электромагнитных линз, при помощи которых формируется узкий зонд. Линзы представляют собой соленоиды, соосные электронному пучку. Схематически линза изображена на рис. 6. Она представляет собой цилиндрически симметричный электромагнит с очень острыми кольцевыми наконечниками полюсов, который создает в малой области очень сильное неоднородное магнитное поле, которое фокусирует электроны, летящие вертикально через эту область. Механизм фокусировки нетрудно понять, посмотрите на увеличенное изображение области вблизи наконечников полюсов на рис. 10.

Вы видите два электрона  $a$  и  $b$ , которые покидают источник  $S$  под некоторым углом по отношению к оси. Как только электрон  $a$  достигнет начала поля, горизонтальная компонента поля отклонит его в направлении от вас. Он приобретет боковую скорость и, пролетая через сильное вертикальное поле, получит импульс в направлении к оси. Боковое же движение убирается магнитной силой, когда электрон покидает поле, так что окончательным эффектом будет импульс, направленный к оси, плюс «вращение» относительно нее.

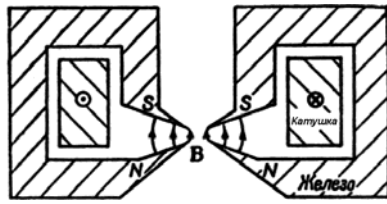


Рис. 9. Магнитная линза

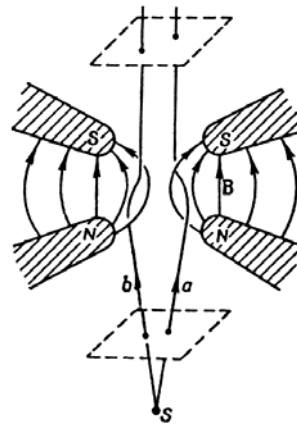


Рис. 10. Движение электрона в магнитной линзе

На частицу  $b$  действуют те же силы, но в противоположном направлении, поэтому она тоже отклоняется по направлению к оси. На рисунке 10 видно, как расходящиеся электроны собираются в параллельный пучок. Действие такого устройства подобно работе оптической линзы, когда объект находится не в фокусе. Если бы теперь сверху поставить еще одну такую же линзу, то она сфокусировала бы электроны снова в одну точку, и получилось бы изображение источника  $S$ .

При создании узкого зонда необходимо, чтобы в целом электронная оптика работала как микроскоп, т.е. давала бы на образце уменьшенное изображение источника электронов — кроссовера электронной пушки. Для этого используют две или три линзы. Причем последнюю, объектную линзу, необходимо расположить как можно ближе к образцу, чтобы достигнуть максимальной фокусировки электронов. Однако размещение объектной линзы в непосредственной близости образца помешало бы выходу и регистрации исследуемого излучения, а также размещению оптического микроскопа и регистрирующей аппаратуры.

Рассмотрим работу электронно-оптической системы на примере двухлинзовой схемы. Она должна формировать уменьшенное изображение кроссовера на поверхности образца. Для получения диаметра электронного зонда, равного 0.1 мкм (1000 Å), требуется уменьшение в сотни раз. Такое уменьшение может быть достигнуто с помощью двухлинзовой системы формирования зонда (рис. 11). Применяя законы геометрической оптики для тонких линз, найдём уменьшение системы  $D$ :

$$D = \frac{a}{f_1} \left( \frac{b}{f_2} - 1 \right) - \frac{a+b}{f_2} + 1, \quad (3)$$

где  $f_1$  и  $f_2$  — фокусные расстояния первой (конденсорной) и второй (объектной) линз. При типичных значениях параметров  $a = 200$  мм,  $b = 300$  мм,  $f_1 = 25$  мм,  $f_2 = 20$  мм уменьшение  $D$  равняется 88, так что диаметр зонда должен составлять доли микрона. При необходимости более сильного уменьшения применяют трёхлинзовую или четырёхлинзовую электронно-оптическую систему.

На рис. 12 приведена схема электронно-оптической системы микроскопа Jeol JSM-840. В данном микроскопе применяется 3-линзовая система. Рассмотрим, как работает эта система. Электронный пучок, выходя из пушки 1, при помощи юстировочных катушек 2 и 3 совмещается с оптической осью системы. Затем он фокусируется при помощи конденсорных линз 4 и 5, так же при помощи этих линз происходит регулировка тока пучка. Далее по ходу пучка установлена сменная диафрагма 6, размер которой изменяется в зависимости от режима работы микроскопа. При помощи электромагнитных катушек 8 и 10 происходит сканирование пучка по поверхности образца. Вместе с катушками 8 и 10 установлены отклоняющие катушки 7 и 9, при помощи которых происходит перемещение раstra по поверхности образца. Затем электронный пучок фокусируется при помощи объектной линзы 11 и попадает на образец 12.



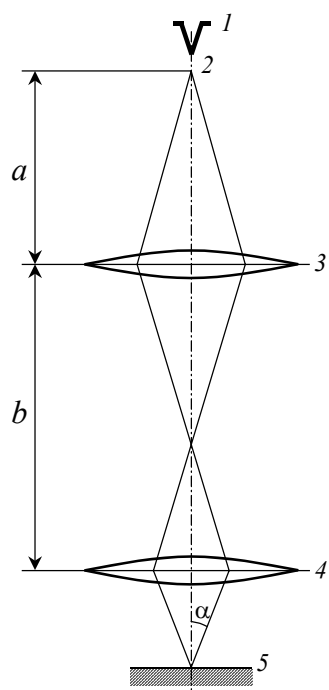


Рис. 11. Двухлинзовая система формирования зонда:

- 1 — электронная пушка;
- 2 — кроссовер;
- 3 — конденсорная линза;
- 4 — объектная линза;
- 5 — образец

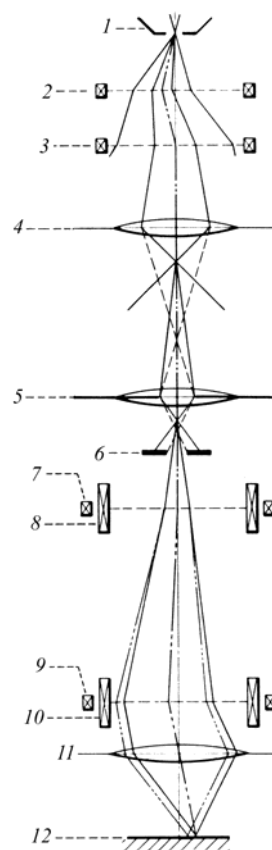


Рис. 12. Электронно-оптическая система Jeol JSM-840:

- 1 — электронная пушка; 6 — диафрагма;
- 2, 3 — катушки юстировки пучка по  $X$  и  $Y$ ;
- 4, 5 — 1-я и 2-я конденсорные линзы;
- 7, 9 — катушки сдвига изображения по  $X$  и  $Y$ ;
- 8, 10 — сканирующие катушки по  $X$  и  $Y$ ;
- 11 — объектная линза; 12 — образец

Однако создание сильного уменьшения электронно-оптической системы ещё не решает задачу получения зонда малого диаметра. При сильном уменьшении резко возрастает угол сходимости пучка  $\alpha$  (рис. 11), что приводит к увеличению сферической аберрации последней линзы и в конечном счёте к расширению пучка. Диаметр кружка рассеяния  $d_s$  в сфокусированном на образец пучке равен

$$d_s = \frac{1}{2} C_s \alpha^3, \quad (4)$$

где  $C_s$  — коэффициент сферической аберрации линзы, обычно равный 2–3 фокусным расстояниям. Чтобы уменьшить сферическую аберрацию, электронный пучок ограничивают диафрагмами, что в свою очередь приводит к уменьшению полного тока пучка.

Найдём ток зонда для диаметра фокального изображения  $d_i$ , воспользовавшись определением яркости пучка  $\beta$ :

$$i_p = \frac{1}{4} \pi^2 d_i^2 \alpha^2 \beta. \quad (5)$$

Кроме того, будем полагать, что полный диаметр зонда  $d$  определяется равенством:

$$d^2 = d_i^2 + d_s^2. \quad (6)$$

Поставим задачу нахождения оптимального значения апертурного угла  $\alpha$ , при котором ток зонда  $I_p$  при заданном значении диаметра зонда  $d$  будет максимальным. Для её решения подставим (6) и (4) в (5), продифференцируем  $i_p$  по  $\alpha$  и результат приравняем к нулю. Тогда найдём оптимальное значение апертурного угла:

$$\alpha_{\text{опт}} = \left( \frac{d}{C_s} \right)^{1/3}, \quad (7)$$

а затем оптимальное уменьшение

$$D_{\text{опт}} = \frac{d_c}{d_i} = \frac{2d_c}{\sqrt{3}d} \quad (8)$$

и максимальный ток зонда

$$i_{p_{\max}} = \frac{3}{16} \pi^2 \beta C_s^{-2/3} \alpha^{8/3}. \quad (9)$$

Подставляя в полученные выражения типичные значения  $C_s = 50$  мм,  $\beta = 3 \cdot 10^4$  А ср/см<sup>2</sup>, получим приведённый на рис. 13 график зависимости оптимальных значений апертурного угла  $\alpha$ , уменьшения  $D$  и максимального тока зонда от его диаметра. Из графика следует, что ток зонда диаметром 1000 Å может достигать  $7 \cdot 10^{-10}$  А при уменьшении 550 раз и угле полуоткрытия 13 мрад. Однако на практике не всегда удаётся обеспечить оптимальные условия, так как апертурный угол определяется небольшим числом сменных диафрагм, а уменьшение, которое регулируется током конденсорной линзы, всегда имеет некоторый верхний предел. Поэтому реальный ток зонда всегда бывает меньше расчётного.

Приведённый расчёт не учитывает хроматическую aberrацию линз и волновые свойства электрона. Учёт этих факторов приводит к ограничению минимального диаметра зонда, как это следует из расчётного графика, приведённого на рис. 14.

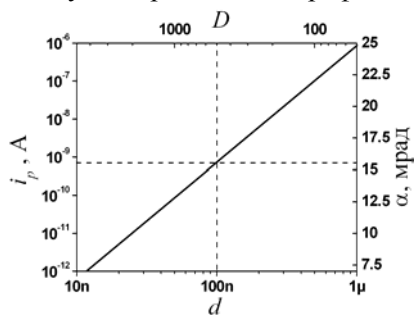


Рис. 13. Зависимость оптимальных значений уменьшения  $D$ , угла полураствора  $\alpha$  и максимального тока зонда  $i_p$  от его диаметра  $d$

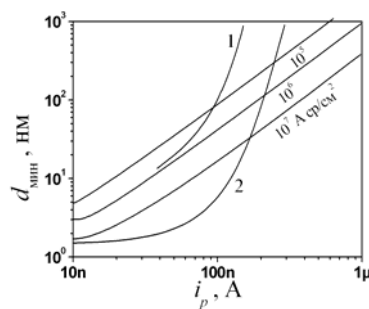


Рис. 14. Зависимость минимального диаметра пучка от тока пучка для термокатодов с различной яркостью и автокатодов.

1 — автоэмиссионная пушка;  
2 — автоэмиссионная пушка с линзой

Из рис. 13 следует, что решающим фактором увеличения тока зонда является яркость пучка. Практически единственным путём повышения яркости электронного пучка, полученного от вольфрамового термокатода, является повышение его температуры и плотности тока эмиссии  $j$ . Однако при этом катастрофически быстро уменьшается срок службы катода  $\tau$ :

$$\tau[\text{час}] = \frac{50}{j[\text{A}/\text{см}^2]} \quad (10)$$

При температуре 2640 К катод обеспечивает плотность тока  $j = 1 \text{ A}/\text{см}^2$  и яркость  $3 \cdot 10^4 \text{ A sr}/\text{см}^2$ , а срок его службы составляет всего 50 часов. Большую яркость могут обеспечивать катоды из гексаборида лантана  $\beta = 10^5 \text{ A sr}/\text{см}^2$  и автоэлектронные катоды  $\beta = 10^7 \text{ A sr}/\text{см}^2$ , однако работать эти катоды могут лишь в высоком вакууме при давлении остаточных газов  $10^{-5}$  Торр и  $10^{-9}$  Торр соответственно. Вольфрамовый же катод может работать и при давлении  $\approx 10^{-3}$  Торр. Поэтому, когда не требуется разрешение лучше  $100 \text{ \AA}$ , используется вольфрамовый термокатод.

### 3.3. Детекторы электронов

#### 3.3.1. Детектор вторичных электронов

Детектор представляет собой сцинтиляторный счетчик. Принцип его действия прост. Вторичные электроны собираются детектором, состоящим из сетки, находящейся под небольшим положительным потенциалом по отношению к образцу, и сцинтиллятора, на который подаётся положительный ускоряющий потенциал 10–15 кВ. Падающие электроны вызывают в специально напыленном слое испускание световых фотонов, которые по кварцевому световоду попадают в фотоумножитель. Показания тока фотоэлектронного умножителя прямо пропорциональны потоку электронов на детектор. Эффективность детектора электронов близка к 100 %.

### **3.3.2. Детектор отраженных электронов**

Если вторичные электроны за счет рассеяния в толще образца вылетают изотропно, то отраженные — направленным пучком в какую-то одну сторону. При этом основная масса отражённых электронов направлена навстречу падающему пучку. Так как, в отличие от истинно вторичных, отражённые электроны в РЭМ обладают большими энергиями, для их регистрации используется менее чувствительный твёрдотельный детектор. Детектор изготавливается в форме кольца, охватывающего первичный пучок электронов. Кольцо разделено на две половины, каждая из которых функционирует как отдельный детектор. Прецизионный усилитель может измерять либо разностный, либо суммарный сигнал этих двух детекторов, тем самым реализуется возможность получения изображения в элементном или топографическом контрасте.

Следует отметить, что твердотельный детектор является более инерционным по сравнению со сцинтилятором детектором. Поэтому для получения качественного изображения в отражённых электронах необходимо производить сканирование с более низкой скоростью.

## **3.4. Формирование изображения в РЭМ**

Из названия микроскопа следует, что это растровое устройство, т.е. изображение получается не целиком, а формируется поточечно. Облучая тонким электронным пучком одну точку на образце, мы в одном режиме регистрируем истинно вторичные электроны, а в другом — упругоотражённые, которые содержат информацию об этой точке.

### **3.4.1. Отклонение электронного зонда при сканировании**

Теперь обратимся к тому, как на основе этих данных формируется изображение исследуемой поверхности в целом. Для того чтобы получить целостную картину, необходимо сканировать поверхность образца электронным зондом, проводя измере-

ния последовательно в каждой точке. В итоге получается растровое изображение, которое и выводится на экран.

Электронный зонд переходит от точки к точке путём отклонения пучка с помощью пары электромагнитных катушек, которые находятся перед последней (объектной) электронной линзой (рис. 12). Катушки создают магнитное поле поперек зонда, и пучок немного «заворачивает» вокруг силовых линий. Подавая на электромагниты пилообразное напряжение развертки, аналогично тому, как это делается в трубке телевизора, можно «водить» зондом по поверхности исследуемого образца. На рис. 15 приведены графики изменения во времени тока отклоняющих катушек и схематическое изображение сформированного растра.

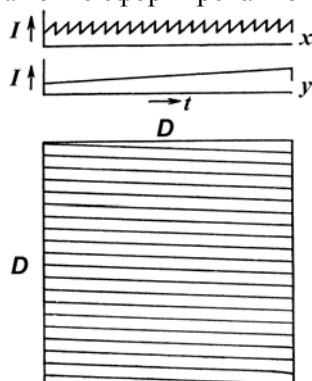


Рис. 15. Изменение во времени тока отклоняющих катушек и схематическое изображение сформированного растра

Усиленный сигнал с детекторов электронов управляет яркостью луча электронно-лучевой трубки, развёртка которой синхронизирована с развёрткой электронного микроскопа. Частота сканирования и число строк могут изменяться в широких пределах. Увеличение микроскопа легко изменяется при пропорциональном изменении силы тока в отклоняющих катушках микроскопа по отношению к току в отклоняющих катушках электронно-лучевой трубки.

Монитор формирует черно-белое изображение, на котором градациям серого цвета соответствуют градации интенсивности потока истинно вторичных или упругоотражённых электронов. В данной установке имеется возможность оцифровки и последующей передачи изображения в компьютер. Это позволяет, используя математические методы обработки изображений, повысить качество получаемых снимков.

#### **3.4.2. Выбор раstra и скорости сканирования**

Как обсуждалось выше, размер исследуемой микроанализатором «точки» не может быть меньше 100 Å. Поэтому ясно, что расстояние между строками раstra не имеет смысла делать меньшим этой величины. В данной установке количество строк вертикальной развертки может варьироваться от 250 до 2500 в зависимости от режима сканирования.

Сканирование в горизонтальном направлении носит не дискретный характер, т.к. показания детекторов электронов являются непрерывными. Но если привлекать для анализа и отображения результатов компьютер, то, разумеется, в этом случае строка «разбивается» на отдельные пиксели.

Остановимся на вопросе выбора скорости сканирования. Получение качественного изображения требует правильного выбора скорости развёртки луча и увеличения микроскопа. Для формирования изображения важно изменение интенсивности излучения от точки к точке. Стоит заметить, что чувствительность детекторов зависит от времени нахождения луча в каждой конкретной точке. При высоких скоростях сканирования информации для формирования изображения поступает очень мало. Поэтому для получения изображения высокого качества приходится «долго ждать», чтобы получить достаточный сигнал от каждой точки.

Поясним это на примере. Пусть требуется получить изображение поверхности с разрешением 1000 Å. Ток пучка при таком разрешении достигнет  $1 \cdot 10^{-10}$  А. На качественной фотографии размером 10×10 см должно содержаться 1000×1000

элементов. Поэтому выбираем увеличение  $\frac{10\text{ см}}{1000 \cdot 1000\text{ \AA}} = 10^3$ ,

пусть каждый элемент поверхности должен иметь  $k$  градаций яркости. Тогда, как установлено на практике, в видеосигнале отношение сигнала к шуму  $S/N$  должно быть не хуже  $5k$ . Если  $k = 10$ , то  $S/N = 50$ . Если на элемент поверхности  $1000 \times 1000 \text{ \AA}^2$  при сканировании в среднем падает  $n$  электронов, то отношение сигнала ( $n$ ) к шуму ( $\sqrt{n}$ ) за счёт флуктуации числа электронов будет

$S/N = \frac{n}{\sqrt{n}} = \sqrt{n}$ . Однако реальное отношение сигнал/шум будет

хуже примерно в 4 раза за счёт статистического характера вторичной электронной эмиссии, т.е.  $S/N = \sqrt{n}/4$ . При необходимости

отношения  $S/N=50$  получим  $50 = \frac{\sqrt{n}}{4}$ , так что  $n = 4 \cdot 10^4$  элек-

тронов. Так как полное число элементов в изображении равно  $1000 \times 1000 = 10^6$ , то для получения всего изображения потребуется  $4 \cdot 10^4 \cdot 10^6 = 4 \cdot 10^{10}$  электронов. При токе зонда  $1 \cdot 10^{-10} \text{ А}$  для этого потребуется время:

$$\frac{4 \cdot 10^{10} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}}{1 \cdot 10^{-10} \text{ А}} = 60 \text{ с}.$$

### 3.4.3. Стереометрические измерения в РЭМ

В растровом электронном микроскопе могут быть получены и стереоскопические изображения. Обычно стереоскопические изображения состоят из пары снимков (стереопары), при специальном рассмотрении которых возможно получить объемное изображение. Стереопары получают путём съёмки одного и того же места объекта при одинаковом увеличении, но при различном наклоне объекта относительно первичного пучка. Разница в углах наклона обычно составляет  $6-8^\circ$ , что соответствует разнице при рассмотрении объекта правым и левым глазом.



Рассмотрим подробно, как получить стереоизображение объекта. Техника изготовления следующая. Первый снимок делается обычным образом, а на экране отмечается положение некоторых деталей образца. После этого образец наклоняется, и происходит некоторое смещение объекта. Положение образца восстанавливается с помощью горизонтального перемещения по отмеченным деталям. Подфокусировка производится перемещением образца по оси  $Z$ , так как увеличение должно остаться неизменным. На рис. 16 приведен пример стереоизображения.

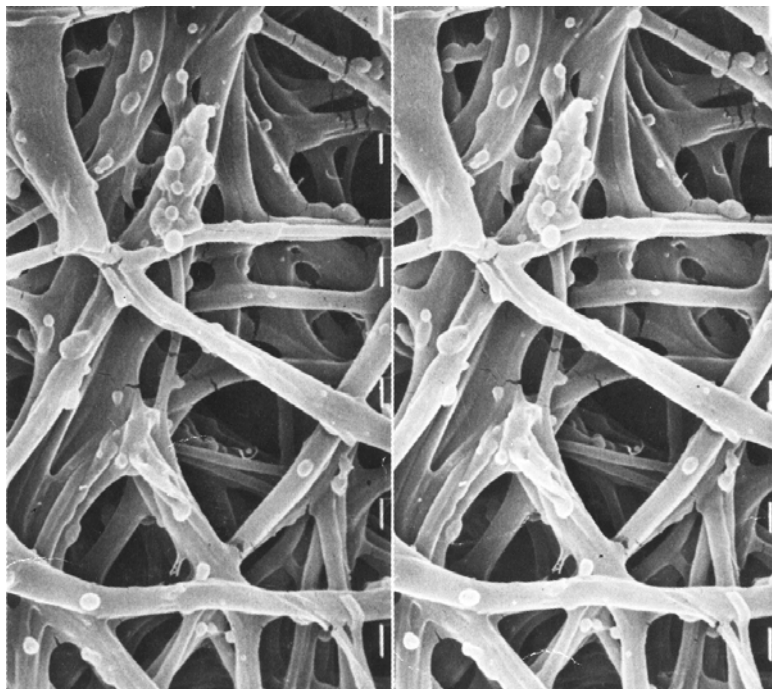


Рис. 16. Стереоизображение структуры яичной скорлупы в РЭМ, увеличение в 1400 раз, углы съёмки: левый кадр —  $10^\circ$ , правый —  $15^\circ$

Полученную таким образом пару изображений можно использовать не только для получения стереоскопического изображения

жения, но и для определения вертикальных размеров объекта. Рассмотрим на примере, как можно определить высоту объекта  $h$  (см. рис. 17). При работе с увеличениями в 500 раз и выше изменение наклона пучка при сканировании настолько мало, что им можно пренебречь и при расчете пользоваться упрощенными формулами параллельной проекции.

Здесь поворот произведен относительно оси  $Y$ ;  $X_{л}$  и  $X_{пр}$  — расстояния от вершины объекта до контрольной точки, измеренные соответственно на левой и правой фотографии стереопары. Тогда высоту объекта можно вычислить по следующей формуле:

$$h = \frac{X_{л} \cos \alpha - X_{пр}}{\sin \alpha} = \frac{X_{л} - X_{пр} / \cos \alpha}{\operatorname{tg} \alpha}.$$

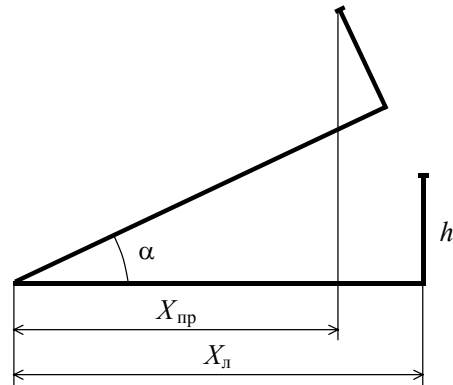


Рис. 17. Схема параллельной проекции

#### 4. ЗАДАНИЕ

1. Получить изображение образца медь–хром в различных режимах работы микроскопа: в режиме сбора истинно вторичных электронов (SEI), в режиме сбора упругоотраженных электронов (BE) топографический (ТОПО) и элементный (COMP) контрасты.
2. Получить изображения вольфрамового острия и кантеливера в режиме сбора истинно вторичных электронов (SEI) при максимальном увеличении. Определить характерный радиус закругления острия и кантеливера.
3. Получить изображение микросхемы операционного усилителя в режиме сбора истинно вторичных электронов (SEI). Определить высоту выступания маркировки над поверхностью подложки при помощи пары стереоизображений.
4. Изучить специальный образец, состоящий из отдельных участков напыленных на одну подложку пленок различных материалов (золото платина палладий). Получить изображение при ускоряющем напряжении 10–30 кВ в режиме сбора отраженных электронов (BE). Обратит внимание на различие контраста изображения участков, отличающихся по составу. Построить зависимость относительного значения сигнала от атомного номера вещества для 2–3 значений ускоряющего напряжения. Объяснить результаты.
5. Получить изображение биологических объектов. Объяснить особенности изображений.

## 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как формируется электрический зонд?
2. Как происходит формирование изображения в РЭМ?
3. Чем обусловлена большая глубина фокуса в растровом электронном микроскопе?
4. Как выглядит спектр вторичных электронов?
5. Что такое оже-электроны и характеристическое рентгеновское излучение?
6. Какова информативность упруго отраженных электронов?
7. Какова информативность истинно вторичных электронов?
8. В чём отличие детекторов упруго отраженных и истинно вторичных электронов?
9. Как формируется контраст изображения в истинно вторичных электронах (поясните на примере цилиндрического объекта на плоской подложке)?
10. Как регистрируется элементный контраст в упруго отраженных электронах?
11. Определите дифракционный предел разрешения растрового электронного микроскопа, чем на самом деле определяется разрешающая способность РЭМ?
12. Определите соотношение сигнал–шум при сканировании образца зондом с кадровой развёрткой 10 Гц, размер изображения  $512 \times 512$  пикселей, коэффициент вторичной эмиссии 0.2, ток зонда  $1 \cdot 10^{-10}$  А.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фридрихов С.А., Мовнин С.М. Физические основы электронной техники: Учебник для вузов. — М.: Высш. школа, 1982
2. Фейман Р, Лейтон Р., Сэндс М. Феймановские лекции по физике т.6, “Электродинамика”, М., Мир, 1996
3. Специальный физический практикум, ч. 2, изд. 3. Изд-во Моск. ун-та 1977 г.
4. Вейнберг Ф. Приборы и методы физического металловедения. Выпуск 2. — М.: Мир, 1974.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Трехэлектродная электронная пушка (прожектор)

Электронные пучки широко используются в науке и технике. Рассмотрим маломощные слаботочные пучки, применяемые в информационных и аналитических приборах. Плотность тока в них мала, так что влиянием пространственного заряда можно пренебречь. Для получения пучка минимального диаметра используется осесимметричная электронно-лучевая система, в которой отклонение электронов от оси принимается малым (условие параксиальности).

На рис. 1 показана типичная конструкция трёхэлектродной электронной пушки кинескопа с торцевым оксидным катодом, а также типичные потенциалы электродов и две эквипотенциали — 0 В и +300 В. Центральная часть катода имеет у поверхности ускоряющее электроны поле и поэтому определяет ток пучка. При изменении потенциала цилиндра Венельта эта площадь изменяется, изменяется и ток пучка.

Формально трехэлектродную пушку можно описать как иммерсионную линзу с фокусным расстоянием  $f$ , как показано на рис. 2. Электронный пучок в фокусе (кроссовере) имеет конечный радиус  $r_c$ . Основная причина этого — хроматические aberrации, иначе говоря, разброс начальных скоростей. Высокая температура  $T_k$  термокатода определяет высокую, порядка  $kT_k$ , кинетическую энергию тангенциального движения электронов. В то же время за счёт ускоряющего напряжения  $V_a$  электроны имеют кинетическую энергию  $eV_a$ . Учитывая, что энергия есть квадратичная форма скорости, получим  $\gamma = \sqrt{kT_k / eV_a}$ , и затем найдём радиус кроссовера:

$$r_c = f \sqrt{\frac{kT_k}{eV_a}}. \quad (1)$$

Также по аналогии с оптикой введём понятие яркости электронного пучка  $\beta$ . Это плотность электронного пучка в кроссовере  $j_c$ ,

отнесённая к телесному углу расходимости пучка:  $\beta = j_c / \pi \alpha^2$ .  
 Учитывая очевидные геометрические соображения и формулу (1),  
 получим

$$\beta = \frac{j_k e V_a}{\pi k T_k}, \quad (2)$$

где  $j_k$  — плотность электронной эмиссии катода.

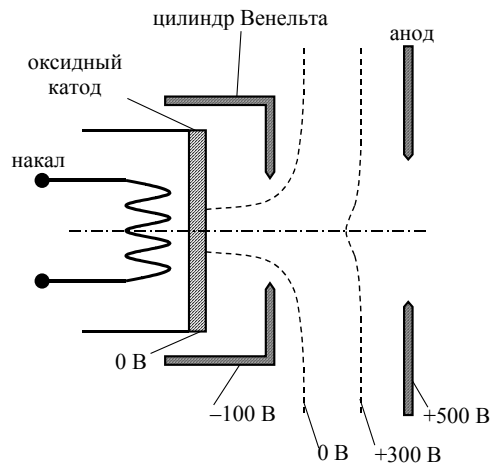


Рис. 1. Схематическое изображение трёхэлектродной электронной пушки

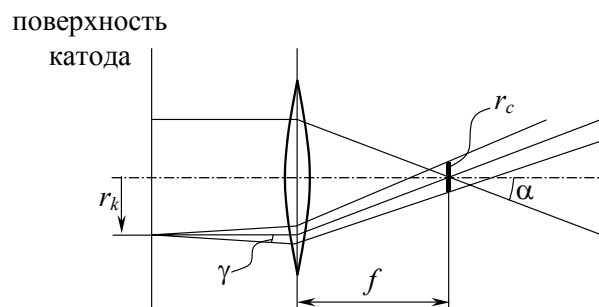


Рис. 2. Ход лучей в трёхэлектродной пушке

## **Растровый электронный микроскоп**

Лабораторная работа  
по курсу Вакуумная электроника

Составители:

***Батури́н Андрей Серге́евич***  
***Нико́льский Константи́н Николаевич***  
***Потребич Анастасия Александровна***  
***Тишин Евгений Алексеевич***  
***Шешин Евгений Павлович***

Корректор *О.П. Котова*

Редактор *И.А. Волкова*

Подписано в печать 29.09.2003. Формат 60 x 84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,5.  
Уч.- изд. л. 2,5. Тираж 100 экз. Заказ № ф-76.

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального  
образования  
Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

Отдел автоматизированных издательских систем  
“ФИЗТЕХ-ПОЛИГРАФ”  
141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9