

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

**ИССЛЕДОВАНИЕ  
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
МЕТОДОМ РАСТРОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ  
МИКРОСКОПИИ**

Учебно-методическое пособие для вузов

Составители:  
Ю.А. Юраков,  
А.С. Леньшин,  
П.В. Середин

Воронеж  
Издательский дом ВГУ  
2014

## Физические основы растровой электронной микроскопии

Принцип действия растрового электронного микроскопа основан на использовании некоторых эффектов, возникающих при облучении поверхности объектов тонкофокусированным пучком электронов – зондом. В результате взаимодействия электронов с веществом генерируются различные сигналы. Основными из них являются поток электронов: *отраженных, вторичных, Оже-электронов, поглощенных, прошедших через образец*, а также излучений: *катодолюминесцентного и рентгеновского*.

Для получения изображения поверхности образца используются *вторичные, отраженные и поглощенные электроны*. Остальные излучения применяются в растровой электронной микроскопии (РЭМ) как дополнительные источники информации.

Важнейшей характеристикой любого микроскопа является его *разрешающая способность*. Она определяется площадью сечения или диаметром зонда; контрастом, создаваемым образцом и детекторной системой; областью генерации сигнала в образце.

Диаметр зонда в основном зависит от конструктивных особенностей и качества узлов микроскопа и, прежде всего, электронной оптики. В современных РЭМ достигнуто высокое совершенство компонентов конструкции, что позволило уменьшить диаметр зонда до 5–10 нм.

Влияние *контраста* на разрешающую способность проявляется в следующем. Формирование контраста в РЭМ определяется разностью детектируемых сигналов от соседних участков образца: чем она больше, тем выше контраст изображения. Контраст зависит от нескольких факторов: топографии поверхности, химического состава объекта, поверхностных локальных магнитных и электрических полей, кристаллографической ориентации элементов структуры. Важнейшими из них являются *топографический контраст*, зависящий от неровностей поверхности образца, а также *композиционный*, зависящий от химического состава. Уровень контраста определяется также и эффективностью преобразования падающего на детектор излучения, которое создает сигнал на его выходе. Если получаемый в итоге контраст недостаточен, то его можно повысить, увеличив ток зонда. Однако большой поток электронов в силу особенностей электронной оптики не может быть хорошо сфокусирован, т. е. диаметр зонда возрастет, и, соответственно снижается разрешающая способность.

Другой фактор, ограничивающий разрешение, зависит от размеров *области генерации* сигнала в образце. Схема генерации различных излучений и частиц при воздействии электронного пучка на образец представлена на рис. 1. При проникновении первичных электронов в образец они рассеиваются во всех направлениях, поэтому внутри образца происходит расширение пучка электронов.

Схема растрового электронного микроскопа приведена на рис. 2. Он состоит из следующих основных узлов: *электронной пушки 1–3*, эмиттирующей электроны; *электронно-оптической системы 4–10*, формирующей электронный зонд и обеспечивающей его сканирование на поверхности образца *12*; *системы, формирующей изображение 11–17*. РЭМ имеет вакуумную систему, которая служит для создания необходимого разрежения ( $10^{-3}$  Па) в рабочем объеме электронной пушки и электронно-оптической системы. Составными частями микроскопа являются также механические узлы (шлюзы, гониометрический столик и т. д.), обеспечивающие установку и перемещение образца.

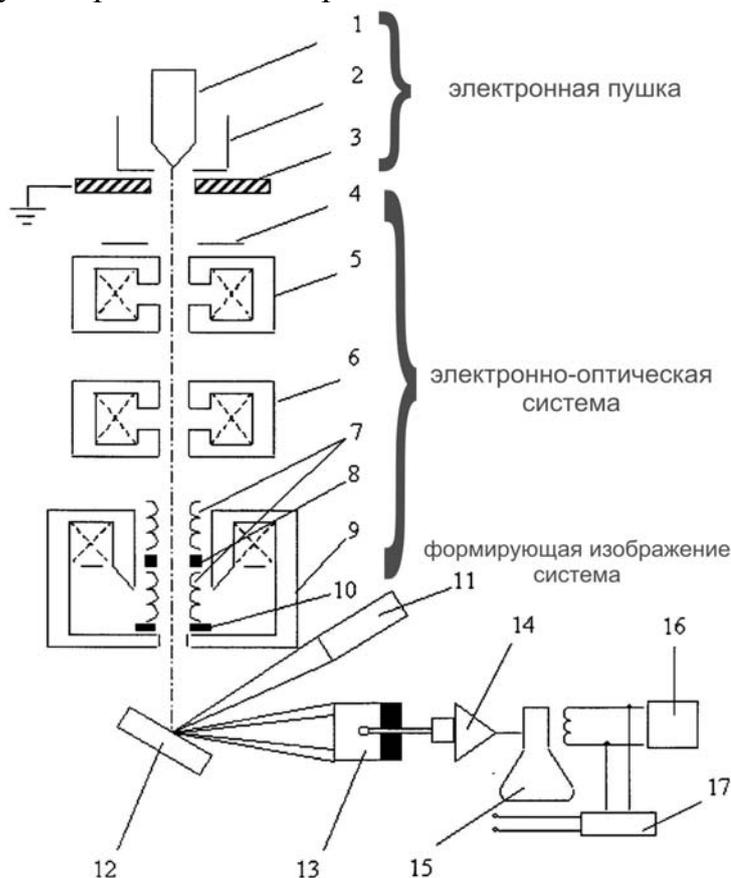


Рис. 2. Принципиальная схема растрового электронного микроскопа.

Электронная пушка: 1 – катод, 2 – цилиндр Венельта, 3 – анод, 4 – конденсорная диафрагма; электронно-оптическая система: 5 – первый конденсор, 6 – второй конденсор, 7 – отклоняющие катушки, 8 – стигматор; 9 – объективная линза, 10 – объективная диафрагма, 12 – объект исследования; формирующая изображение система: 11 – рентгеновский спектрометр, 13 – детектор вторичных электронов, 14 – усилитель, 15 – электронно-лучевая трубка (монитор компьютера), 16 – генератор развертки, 17 – блок управления увеличением, связанный с отклоняющей системой

Электронная пушка состоит из катода 1, цилиндра Венельта 2 и анода 3. Обычно в качестве катода используется вольфрамовая V-образная прово-

лока, согнута под углом, как это показано на рисунке. При нагреве катода прямым пропусканием тока происходит термоэмиссия электронов. В современных моделях микроскопов часто применяются электронные пушки с автоэмиссионным (холодным) катодом из-за его более высокой яркости, т. е. плотности тока в пучке. Электроны ускоряются напряжением, приложенным между катодом и анодом, которое можно изменять от 1 до 50 кВ. *Цилиндр Венельта* имеет высокий отрицательный потенциал и служит для регулировки потока электронов. 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 так называемого полюсного наконечника и воздействует на проходящий через него поток электронов. Фокусное расстояние линзы можно плавно регулировать путем изменения силы тока в обмотке соленоида. В системе имеются две *диафрагмы* 4, 10, ограничивающие расходимость пучка электронов.

Несовершенства электронной оптики, как указывалось ранее, оказывают влияние на разрешающую способность микроскопа. К несовершенствам оптики относятся *хроматическая, сферическая абберации и астигматизм*. *Хроматическая абберация* возникает из-за различной скорости (т. е. длины волны) электронов и изменения ее по времени, 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 проходят на различных угловых расстояниях от оптической оси линзы и поэтому по разному фокусируются. 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 неё 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 потока электронов. Катушки соединены с *генератором* 16, обеспечивающим синхронность передвижения электронного зонда по образцу и электронного луча по экрану *электронно-лучевой трубки* 15. В

современных микроскопах используется цифровая развёртка, позволяющая получать изображение на ЖК-мониторе. Это даёт возможность производить цифровую обработку изображения, в том числе для повышения разрешающей способности, для измерения линейных размеров особенностей и т. д.

*Образец 12* крепится на предметном столике, который может перемещаться в трех взаимно перпендикулярных направлениях, допускает наклон образца к электронно-оптической оси и вращение вокруг этой оси.

Электронный пучок, сфокусированный на поверхности образца, вызывает появление *отраженных, вторичных и поглощенных электронов*, которые используются для получения изображения поверхности образца. Эти сигналы улавливаются специальными детекторами. На схеме РЭМ (рис. 2) представлен только один из возможного набора тип детекторов, используемый для регистрации *вторичных электронов 13*. В детекторе поток электронов преобразуется в электрический сигнал (ток). После прохождения тока через *усилитель 14* модулируется яркость экрана.

В качестве детектора *вторичных электронов* используется *детектор Эверхарта–Торнли*. Схема детектора представлена на рис. 3. Коллектор 1 имеет положительный потенциал, приблизительно +250 В, благодаря чему траектории вторичных электронов искривляются, и они попадают в коллектор. На первичные и отраженные электроны, имеющие высокие значения энергии, этот потенциал существенного влияния не оказывает. Внутри коллектора электроны ускоряются. Для этого на сцинтиллятор 3 подается высокое 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. Мощность этого сигнала и, следовательно, яркость соответствующей точки на экране при использовании вторичных электронов определяется топографическим контрастом. Характерная особенность топографического контраста в РЭМ – повышенная яркость изображения острых вершин и выступов рельефа поверхности образца вызывается увеличением выхода электронов с этих участков.

Большая разрешающая способность РЭМ при работе в режиме регистрации *вторичных электронов* служит причиной того, что именно он используется при изучении топографии поверхности (поверхность излома, протравленный шлиф и др.). При формировании изображения в режиме детектирования *вторичных электронов* возможно появление композиционного контраста. Однако он относительно невелик. Для регистрации отраженных электронов могут использоваться различные типы детекторов, в том числе и *детектор Эверхарта–Торнли*, но с некоторым изменением. Это вызвано тем, что отраженные электроны имеют высокую энергию, движутся прямолинейно, не отклоняясь электрическим полем, в отличие от вторич-