**Содержание:**

1. **Путь микроскопии 3**
2. **Предел микроскопии 5**
3. **Невидимые излучения 7**
4. **Электроны и электронная оптика 9**
5. **Электроны — волны!? 12**
6. **Устройство электронного микроскопа 13**
7. **Объекты электронной микроскопии 15**
8. **Виды электронных микроскопов 17**
9. **Особенности работы с электронным микроскопом 21**
10. **Пути преодоления дифракционного предела электронной микроскопии 23**
11. **Список литературы 27**
12. **Рисунки 28**

**Примечания:**

1. **Символ ↑ означает возведение в степень. Например, 2↑3 означает «2 в степени 3».**
2. **Символ e означает запись числа в показательной форме. Например, 2e3 означает «2, умноженное на 10 в 3 степени».**
3. **Все рисунки находятся на последней странице.**
4. **Вследствие использования не совсем «свежей» литературы данные в этом реферате не отличаются особой «свежестью».**

**Глаз не видел бы Солнца,**

**если бы он не был подобен**

**Солнцу.**

**Гёте.**

**Путь микроскопии.**

Когда на пороге XVII столетия был создан первый микроскоп, вряд ли кто-либо (и даже его изобретатель) мог представить будущие успехи и многочисленные области применения микроскопии. Оглядыва­ясь назад, мы убеждаемся, что это изобретение знаменовало собой нечто большее, чем создание нового устройства: впервые человек по­лучил возможность увидеть ранее невидимое.

Примерно к этому же времени относится еще одно событие ⎯ изобретение телескопа, позволившее увидеть невидимое в мире пла­нет и звезд. Изобретение микроскопа и телескопа представляло собой революцию не только в способах изучения природы, но и в самом ме­тоде исследования.

Действительно, натурфилософы древности наблюдали природу, узнавая о ней только то, что видел глаз, чувствовала кожа, слышало ухо. Можно лишь удивляться тому, как много правильных сведений об окружающем мире получили они, пользуясь «невооруженными» орга­нами чувств и не ставя специальных экспериментов, как это делают сейчас. Вместе с тем наряду с точными фактами и гениальными до­гадками как много ложных «наблюдений», утверждений и выводов ос­тавили нам ученые древности и средних веков!

Лишь значительно позднее был найден метод изучения при­роды, заключающийся в постановке сознательно планируемых экспе­риментов, целью которых является проверка предположений и четко сформулированных гипотез. Особенности этого метода исследования Фрэнсис Бэкон - один из его создателей - выразил в следующих, став­ших знаменитыми, словах: «Ставить эксперимент - это учинять допрос природе».Самые первые шаги экспериментального метода по совре­менным представлениям были скромны, и в большинстве случаев экс­периментаторы того времени обходились без каких-либо устройств, «усиливающих» органы чувств. Изобретение микроскопа и телескопа представляло собой колоссальное расширение возможностей наблю­дения и эксперимента.

Уже первые наблюдения, проведённые с помощью самой простой и несовершенной по современным представлениям техники, открыли «целый мир в капле воды». Оказалось, что знакомые предметы выгля­дят совсем по-иному, если их рассматривать в микроскоп: гладкие на взгляд и ощупь поверхности оказываются в действительности шерохо­ватыми, в «чистой» воде движутся мириады мельчайших организмов. Точно так же первые астрономические наблюдения с помощью теле­скопов дали возможность человеку по-новому увидеть привычный мир планет и звёзд: например, поверхность Луны, воспетой поэтами всех поколений, оказалась гористой и испещрённой многочисленными кра­терами, а у Венеры была обнаружена смена фаз, как и у Луны.

В дальнейшем эти простейшие наблюдения дадут жизнь само­стоятельным областям науки ⎯ микроскопии и наблюдательной ас­трономии. Пройдут годы, и каждая из этих областей разовьется в мно­гочисленные разветвления, выражающиеся в целом ряде самых раз­личных применений в биологии, медицине, технике, химии, физике, на­вигации.

Современные микроскопы, которые в отличие от электронных мы будем называть оптическими, представляют собой совершенные при­боры, позволяющие получать большие увеличения с высокой разре­шающей способностью. Разрешающая способность определяется рас­стоянием, на котором два соседних элемента структуры могут быть ещё видимы раздельно. Однако, как показали исследования, оптиче­ская микроскопия практически достигла принципиального предела своих возможностей из-за дифракции и интерференции ⎯ явлений, обусловленных волновой природой света.

Степень монохроматичности и когерентности является важной характеристикой волн любой природы (электромагнитных, звуковых и др.). Монохроматические колебания ⎯ это колебания, состоящие из синусоидальных волн одной определённой частоты. Когда мы пред­ставляем колебания в виде простой синусоиды соответственно с по­стоянными амплитудой, частотой и фазой, то это является опреде­лённой идеализацией, так как, строго говоря, в природе не существует колебаний и волн, абсолютно точно описываемых синусоидой. Однако, как показали исследования, реальные колебания и волны могут с большей или меньшей степенью точности приближаться к идеальной синусоиде (обладать большей или меньшей степенью монохроматич­ности). Колебания и волны сложной формы можно представить в виде набора синусоидальных колебаний и волн. По сути дела, эту математи­ческую операцию осуществляет призма, разлагающая в цветной спектр солнечный свет.

Монохроматические волны, в том числе и световые, одной и той же частоты (при определённых условиях!) могут взаимодействовать между собой таким образом, что в результате «свет превратится в темноту» или, как говорят, волны могут интерферировать. При интер­ференции происходят местные «усиления и подавления» волн друг другом. Для того чтобы картина интерференции волн оставалась не­изменной с течением времени (например, при рассматривании её гла­зом или фотографировании), необходимо, чтобы волны были между собой когерентны (две волны когерентны между собой, если они дают устойчивую картину интерференции, чему соответствуют равенства их частот и неизменный сдвиг фаз).

Если на пути распространения волн поместить препятствия, то они будут существенно влиять на направление распространения этих волн. Такими препятствиями могут быть края отверстий в экранах, не­прозрачные предметы, а также любые другие виды неоднородностей на пути распространения волн. В частности, неоднородностями могут быть также и прозрачные (для данного излучения) предметы, но отли­чающиеся по коэффициенту преломления, а значит, и по скорости про­хождения волн внутри них. Явление изменения направления распро­странения волн при прохождении их вблизи препятствий называют дифракцией. Обычно дифракция сопровождается интерференцион­ными явлениями.

**Предел микроскопии .**

Изображение, получаемое при помощи любой оптической сис­темы, есть результат интерференции различных частей световой волны, прошедшей через эту систему. В частности, известно, что огра­ничение световой волны входным зрачком системы (краями линз, зер­кал и диафрагм, составляющих оптическую систему) и связанное с ним явление дифракции приводит к тому, что светящаяся точка будет изо­бражена в виде дифракционного кружка. Это обстоятельство ограни­чивает возможность различать мелкие детали изображения, форми­руемого оптической системой. Изображение, например, бесконечно удалённого источника света (звезды) в результате дифракции на круг­лом зрачке (оправе зрительной трубы), представляет собой довольно сложную картину (см. рис. 1). На этой картине можно увидеть набор концентрических светлых и тёмных колец. Распределение освещённо­стей, которое можно зафиксировать, если двигаться от центра кар­тины к её краям, описывается довольно сложными формулами, кото­рые приводятся в курсах оптики. Однако закономерности, свойствен­ные положению первого (от центра картины) тёмного кольца, выглядят просто. Обозначим через D диаметр входного зрачка оптической сис­темы и через λ длину волны света, посылаемого бесконечно удалён­ным источником.

**Рис. 1. Дифракционное изображение светящейся точки (так называемый диск Эйри).**

Если обозначить через j угол, под которым виден радиус первого тёмного кольца, то как доказывается в оптике

**sin ϕ ≈ 1,22\*(λ/D)**.

Таким образом, в результате ограничения волнового фронта краями оптической системы (входным зрачком) вместо изображения светящейся точки, соответствующей бесконечно удаленному объекту, мы получаем набор дифракционных колец. Естественно, что это явле­ние ограничивает возможность различения двух близко расположенных точечных источников света. Действительно, в случае двух удаленных источников, например двух звезд, расположенных очень близко друг к другу на небесном своде, в плоскости наблюдения образуются две сис­темы концентрических колец. При определенных условиях они могут перекрываться, и различение источников становится невозможным. Не случайно поэтому в соответствии с «рекомендацией» формулы, приве­денной выше, стремятся строить астрономические телескопы с боль­шими размерами входного зрачка. Предел разрешения, при котором могут наблюдаться два близко расположенных источника света, опре­деляют следующим образом: для определенности в качестве предела разрешения принимают такое положение дифракционных изображений двух точечных источников света, при котором первое тёмное кольцо, создаваемое одним из источников, совпадает с центром светлого пятна, создаваемого другим источником.

**Рис. 2. Кривая распределения интенсивности в дифрак­ционной картине от двух точечных источников света.**

**d ⎯ расстояние между центральными максимумами, M ⎯ увели­чение оптической системы.**

На рис. 2 приведён график, характеризующий распределение ин­тенсивности света при наложении дифракционных картин двух близко расположенных точечных источников света для случая, соответствую­щего критерию Релея. По оси абсцисс отложена величина, пропорцио­нальная расстоянию от центра (см. рис. 1). Сплошная тонкая крива ха­рактеризует распределение интенсивности света, создаваемое пер­вым источником; пунктирная кривая относится ко второму из разре­шаемых источников. Первые максимумы по высоте (т.е. интенсивности) заметно выше последующих, соответствующих интенсивности света в кольцах, удалённых от центра (см. рис. 1). Сплошная толстая кривая характеризует суммарное распределение интенсивности света.

Теория показывает, что в случае разрешения по критерию Релея угол θ, под которым видны два исследуемых источника света, равен:

θ ≈ 0,61\*(λ/D). Часто используется величина А, обратная предельному углу θ:

**А=(1/θ)=D/(0,61\*λ)**,

носящая название разрешающей силы оптической системы.

Приведённые основные закономерности обусловлены волновой природой света и ограничивают возможность разрешения источников с помощью любых оптических систем, в том числе в астрономии и мик­роскопии. Следует подчеркнуть, что приведённая формула соответст­вует случаю самосветящихся объектов, посылающих некогерентные волны. Как известно, с помощью микроскопов часто рассматривают объекты, освещаемые посторонним источником; это значит, что от­дельные точки объекта рассеивают световые волны, исходящие из од­ной и той же точки источника, и свет, идущий от разных точек объекта, оказывается поэтому в значительной мере когерентным. Определение разрешающей способности микроскопа в случае когерентного освеще­ния, проводимое по методу Аббе, приводит к аналогичному результату (некоторое различие в численных коэффициентах несущественно, по­скольку вообще понятие разрешающей способности несколько ус­ловно).

Предельную разрешающую способность микроскопа часто назы­вают дифракционным пределом, поскольку она определяется явле­ниями дифракции на входном зрачке. Правда, ряд остроумных ухищре­ний позволил «заглянуть» несколько дальше этого предела. Здесь следует упомянуть метод, основанный на применении иммерсионных систем (в котором пространство между предметом и объективом за­полняется специальными средами) и позволяющий повысить разре­шающую способность примерно в 1,5 раза; метод тёмного поля, осно­ванный на явлении рассеяния света на малых частицах и позволяющий регистрировать наличие сверхмалых частиц, когда их размеры лежат за пределом разрешающей способности микроскопа; метод фазового контраста, при помощи которого можно изучать полностью прозрачные объекты.

**Невидимые излучения.**

Пользуясь современным языком теории информации, можно ска­зать, что за попытку проникнуть за дифракционный предел приходится платить ценой потери информации о деталях изучаемого объекта. Действительно, методы субмикроскопии позволяют лишь судить о на­личии микрообъектов в поле зрения микроскопа, но не об их форме и других деталях.

Весьма заметный качественный скачок в методах микроскопии был сделан физиками, которые стали использовать в микроскопии инфракрасное, ультрафиолетовое и другие невидимые глазом излуче­ния. Применение этих излучений для освещения объектов наблюдения было связано с их способностью поглощать, отражать, пропускать и преломлять падающее на них излучение. Поэтому, вообще говоря, при использовании излучений различных участков спектра эти объекты вы­глядят по-разному. Следовательно, подбирая соответствующее осве­щение, можно получить новую информацию о предмете, так как характеристики поглощения, отражения, пропускания и преломления реальных неорганических и органических веществ зависят от длины волны.

Наряду с этим следует отметить, что использование в микро­скопии ультрафиолетового излучения (более коротковолнового по сравнению с видимым) позволило повысить предел разрешающей спо­собности микроскопа. Это легко понять, если вспомнить, что теорети­ческий предел разрешающей способности пропорционален длине волны источника излучения. Если при λ ≈ 5200 ⎯ 5800 A°[[1]](#footnote-1) (жёлто-зелё­ная область, где глаз обладает наибольшей чувствительностью) тео­ретический предел разрешающей способности при n=1 (где n - показатель преломления) составляет около 2000 A°, то при использо­вании ультрафиолетового излучения (λ ≈ 3000 A°) теоретический пре­дел разрешающей способности достигает примерно 1200A°. Ясно, что в таких ультрафиолетовых микроскопах используются специальные оптические элементы.

Все приборы, использующие невидимые глазом излучения, со­стоят из осветителя (источника освещения), оптических элементов (линз, зеркал, призм и т. п.), пригодных для работ в данном участке спектра, и элементов, преобразующих «невидимое изображение» в ви­димое. В последнее время стали успешно использовать для получения информации о строении объектов радиоизлучение (миллиметрового и субмиллиметрового), длины волн которого значительно больше длин волн видимого излучения.

Остановимся несколько подробнее на некоторых общих физиче­ских закономерностях, свойственных получению изображения в микро­скопии.

Получение большого увеличения в принципе осуществимо путём использования соответствующих оптических элементов. Однако если предел разрешающей способности прибора уже достигнут и детали изображения нельзя различить, то дальнейшее увеличение исследуе­мого предмета теряет практический смысл. Поэтому существует тер­мин «полезное увеличение микроскопа». С вопросом увеличения связан также и вопрос об искажениях в микроскопе (как и в других оптических приборах). Эти искажения возникают из-за отклонения оптических по­верхностей элементов (линз и т. п.) от идеальной формы, неточного расположения элементов и т. п. Кроме этого, искажения (хроматическая аберрация) возникают и из-за зависимости коэффици­ента преломления материалов, из которых изготавливаются оптиче­ские элементы, от длины волны света (дисперсии света в материалах). Таким образом, мы видим, что «проникнуть глубже» в мир малых объ­ектов путём использования больших увеличений нельзя. И только ис­пользование более коротковолновых излучений, т. е. излучений с меньшими длинами волн, чем у видимого света, должно в принципе привести к повышению разрешающей способности. Тем самым пресло­вутый дифракционный предел может быть «отодвинут», и открывается возможность наблюдения и исследования новых классов невидимых объектов и новых деталей уже известных объектов.

Большие надежды возлагались и возлагаются на диапазон рентгеновских лучей (некогда таинственных X- лучей). Напомним, что рентгеновское излучение, создаваемое в рентгеновских трубках путем разгона электронов электрическим полем и их последующего тормо­жения на положительно заряженном электроде (антикатоде), так же как и видимый свет, является электромагнитным излучением. Оно ха­рактеризуется длинами волн на четыре-пять порядков меньшими, чем у видимого света. Например, в медицинской диагностике применяется рентгеновское излучение с λ≈0,17 ⎯ 0,10A°, а при просвечивании мате­риалов (толстые стальные и другие изделия) ⎯ с λ ≈ 0,05 A°. Отсюда видно, что использование рентгеновского излучения в обычном опти­ческом микроскопе вместо видимого могло бы дать соответствующее, легко оцениваемое теоретически повышение разрешающей способно­сти прибора.

Воспользуемся формулой для определения предела разрешаю­щей способности прибора d≈(0,61\*λ)/(n\*sinϕ). Для рентгенов­ских лучей коэффициент преломления n среды очень близок к единице. Поэтому, если воспользоваться рентгеновским излучением с λ ≈ 0,1A° (это со­ответствует ускоряющему напряжению около 120 кв.), то дифракцион­ный предел составит приблизительно 0,05A°. Однако на пути реализации такой заманчивой возможности существуют принципиаль­ные трудности, связанные с особенностями рентгеновского излучения и его взаимодействия с веществом. Первая и наиболее существенная трудность заключается в том, что рентгеновские лучи практически не­возможно фокусировать, получать их зеркальное отражение, а также другие явления, лежащие в основе процесса формирования изображе­ний в оптической микроскопии. Для создания линз, призм и других по­добных оптических элементов в этом случае нужны материалы с коэффициентом преломления, большим единицы[[2]](#footnote-2). Из-за особенностей взаимодействия рентгеновских лучей с веществом (мы здесь не будем касаться подробностей этого вопроса) коэффициент преломления их практически во всех материалах близок к единице, а точнее - не­сколько меньше единицы. Даже лучшие полированные поверхности не могут обеспечить зеркального отражения рентгеновских лучей (длины волн рентгеновского излучения практически всегда меньше средних размеров неоднородностей поверхности). Это обстоятельство препят­ствует созданию зеркального рентгеновского микроскопа.

Несмотря на перечисленные затруднения, в СССР и за границей были успешно проведены эксперименты в области рентгеновской мик­роскопии, используя некоторые специальные приемы. Правда, резуль­таты этих работ пока не получили технической реализации. Кроме того, они в настоящее время не дают возможности надеяться на какое-либо продвижение в сторону дифракционного предела, соответствующего диапазону рентгеновского излучения. Вместе с тем проблема рентге­новской микроскопии является в настоящее время настолько актуаль­ной, что в технике получили развитие некоторые «обходные» приемы, основывающиеся на сочетании методов рентгеновской проекции с ра­диотехническими (в том числе телевизионными) устройствами, позво­ляющими получить дополнительное увеличение (10÷30\*) и приемлемое разрешение (порядка нескольких десятков микрон). И хотя это чрезвы­чайно далеко от потенциальных возможностей рентгеновской микро­скопии, подобные устройства находят применение в науке и технике.

**Электроны и электронная оптика.**

Подлинная революция в микроскопии произошла в 20-х годах нашего века, когда возникла идея использовать в ней потоки частиц - электронов. На основе этой идеи возникла и быстро развилась новая область науки ? электронная микроскопия, позволившая осуществить наиболее глубокий прорыв в области видения и изучения сверхмалых объектов.

Мы привыкли к тому, что видение объекта, формирование его изображения связаны с поступлением в прибор (а в конечном счёте в глаз) световых волн от этого предмета, того, что мы называем излуче­нием. Как же можно получить изображение объекта, причём даже с го­раздо более высокой разрешающей способностью, используя не световое излучение, а поток электронов? Другими словами, как воз­можно видение предметов на основе использования не волн, а частиц?

Забегая несколько вперед, скажем, что электроны проявляют волновые свойства отнюдь не в меньшей мере, чем «настоящие», при­вычные волны, например, радио или световые. Но об этом ниже... Вмес­те с тем электроны ведут себя как настоящие частицы, обладающие массой, траекторией движения, энергией и другими свойствами, при­сущими различным предметам. Так в первую очередь ведут себя электроны во многих приборах и устройствах, широко применяющихся не только в науке и технике, но и в быту ⎯ в электронных лампах, кине­скопах и других электронных приборах радиоприёмников и телевизоров.

Современная физика весьма подробно знает «анкетные дан­ные» электрона. Это отрицательно заряженная частица (e=4,8e-10 CGSE) с массой 9,1e-28 г, но физики тщательно обходят вопросы, ко­торые иногда хочется задать чрезмерно любопытным, например о форме электрона, а о его размерах обычно говорят с оговорками. Зву­чит эта оговорка примерно так: «классический радиус электрона составляет ~ 10↑-13 см, а в рамках релятивистской теории это вообще точечная частица». Если не касаться определённой группы ситуаций, в которых электроны ведут себя не по правилам «здравого смысла» (об этом ниже), то это частицы, поведение которых можно описать и весьма точно рассчитать по законам механики и теории электромагне­тизма, как и любого другого объекта. Правда, в этих случаях, т. е. тогда, когда ещё не проявляются закономерности так называемой квантовой механики, приходится учитывать проявление эффектов теории относительности (релятивистских эффектов) и в первую оче­редь возрастание массы электрона с ростом скорости его движения.

Во многих практических применениях электронных потоков, на­пример в вакуумных приборах, электроны ведут себя как вполне «нормальные» частицы. Под действием известной силы, например, создаваемой электрическим полем между электродами, электрон при­обретает ускорение, пропорциональное силе и обратно пропорциональ­ное его массе. Движущиеся потоки электронов эквива­лентны электрическим токам, поэтому могут эффективно взаимодействовать с внешними магнитными полями. Таким образом, электрические и магнитные поля могут существенно влиять на траек­тории и скорости электронных потоков, и с помощью таких полей можно управлять движением электронов. Наука, занимающаяся нахождением траекторий движения электронов в электрических и магнитных полях, а также расчётом элементов и устройств, способных формировать нужные поля, называется электронной оптикой (обратите внимание ⎯ электронной оптикой ).

Более подробный анализ анкетных данных электрона обнаружи­вает необычность ряда его свойств. Действительно, если подходить к электрону с обычными мерками и считать, что он занимает объём V и обладает массой m, то «плотность вещества в электроне» ρ≈(m/V)=(9,1e-28)/(4/3\*π\*r↑3)≈10↑11 г/см↑3 (!). Здесь мы считаем элек­трон шариком с радиусом r порядка 10↑-13 см. Масса, заряд и некоторые другие постоянные, характеризующие электроны, известны уже с весьма высокой точностью[[3]](#footnote-3). Вопрос о том, каким образом элек­трон удерживается как целое и не разлетается под действием сил расталкивания, выходит далеко за рамки этого реферата…

Если предметам, с которыми мы имеем дело в повседневной жизни, достаточно трудно сообщить большую скорость (например, по­рядка нескольких километров в секунду), то электрон даже в поле с U=1В приобретает скорость V=(2\*e/m\*U)↑0,5≈6e7 см/сек. Таким обра­зом, электроны легче разогнать до больших скоростей, чем «остановить», т. е. заставить находиться в покое. Электроны в обыч­ной медицинской рентгеновской трубке тормозятся в поверхностном слое антикатода, проходя при этом путь в несколько ангстрем. Отри­цательное ускорение на пути s (например, при U≈100 кв.) при этом будет весьма велико:

**ω≈(v↑2)/(2\*s)≈10↑23 см/сек↑2 (!)**.

Наконец, укажем, что, как правило, в наших приборах для их нор­мальной работы необходим электронный поток, содержащий внушительное число частиц (например, электронному току в 1A соот­ветствует поток электронов в 10↑19 частиц в секунду!).

Итак, положение с электронами выглядит своеобразно:

1. есть объект, которым мы умеем управлять и свойства кото­рого научились использовать;
2. мы достаточно хорошо знаем свойства этого объекта и научи­лись проводить измерение даже точнее, чем для многих других объектов, с которыми встречаемся в повседневной жизни и которые можем видеть невооружённым глазом;
3. никто никогда не видел электронов, но все знакомы с резуль­татами его действий;
4. с точки зрения «здравого смысла» и на основе сопоставления результатов очень хорошо поставленных экспериментов электрон является далеко не тривиальным объектом: плот­ность электронного вещества фантастически велика, он является сверх прочным объектом, способным «противостоять» действию сверхбольших инерциальных и электрических (кулоновских) сил.

**Электроны ⎯ волны!?**

Нечего удивляться, что столь «странная личность», какой явля­ется электрон, ведёт себя уже совсем необычно в ряде ситуаций. Эти ситуации проявляются, во-первых, тогда, когда электронов много или вернее, когда их много в единице объёма и, во-вторых, когда элек­троны взаимодействуют с атомами и молекулами вещества. Эти и ряд других ситуаций характерны для явлений, рассматриваемых квантовой механикой. Из этой удивительной области мы упомянем только то, что в ряде ситуаций электрон ведёт себя как волна. Что это значит?

Мы знаем, что, например, световые волны при взаимодействии с пространственной периодической структурой претерпевают дифрак­цию. Точно так же при соблюдении определённых условий волны могут интерферировать. Аналогичные свойства наблюдаются у электронов. Так, например, в определённых условиях электронный поток, взаимо­действующий с периодической пространственной структурой кристалла, образует дифракционную картину, которую можно зафикси­ровать на фотопластинке. Известно большое число фактов, когда электроны проявляют волновые свойства. Более того, советские учё­ные В. Фабрикант, Л. Биберман и Н. Сушкин продемонстрировали волновые свойства отдельных электронов!

Итак, анкетные данные электрона выглядят странно и необычно.

Не вдаваясь в тонкости вопроса о волновых свойствах электро­нов (как и других микрочастиц!), скажем, что электрону, движущемуся со скоростью v(см/сек), соответствует длина волны λ=h/(m\*v), где m ⎯ масса электрона, а h= 6,6e-27 эрг\*сек ⎯ знаменитая константа Планка.

Так как v=(2\*e/m\*U), то λ=(12,25/U↑0,5)A°; здесь U выражено в киловольтах.

Так, например, при U=100 кв. λ=0,037 A°. Таким образом, если ис­пользовать электроны в микроскопии, то дифракционный предел, обусловленный волновыми свойствами электронов, лежит значи­тельно дальше, чем в оптической микроскопии. А так как электронами можно управлять с помощью электрических и магнитных полей, то электронная оптика позволяет нам заранее рассчитывать такие сис­темы формирования этих полей, которые способны фокусировать потоки электронов, управлять электронными лучами и совершать дру­гие необходимые действия.

В нашем распоряжении также имеются люминесцентные экраны, которые светятся при попадании на их поверхность электронов (вспомним работу кинескопа в телевизоре!); при попадании электронов на фотопластинку происходит фотолитическое почернение. Сущест­вуют и другие способы регистрации электронов. Напомним, что электроны способны, кроме того, проникать сквозь тонкие слои мате­риалов, отражаться и рассеиваться материалами. Эти свойства электронов и их взаимодействия с полями и исследуемым веществом лежат в основе электронной микроскопии. Рассмотрим схемы и особен­ности устройства электронных микроскопов.

**Устройство электронного микро­скопа.**

Как же устроен электронный микроскоп? В чём его отличие от оптического микроскопа, существует ли между ними какая-нибудь ана­логия?

В основе работы электронного микроскопа (общий вид его при­ведён на рис. 3) лежит свойство неоднородных электрических и магнитных полей, обладающих вращательной симметрией, оказывать на электронные пучки фокусирующее действие. Таким образом, роль линз в электронном микроскопе играет совокупность соответствующим образом рассчитанных электрических и магнитных полей; соответст­вующие устройства, создающие эти поля, называют «электронными линзами». В зависимости от вида электронных линз электронные мик­роскопы делятся на магнитные, электростатические и комбинированные.

**Рис. 3. Электронный микроскоп EM8 фирмы АЕС-Цейсс.**

Какого же типа объекты могут быть исследованы с помощью электронного микроскопа? Так же как и в случае оптического микро­скопа объекты, во-первых, могут быть «самосветящимися», т. е. служить источником электронов. Это, например, накаленный катод или освещаемый фотоэлектронный катод. Во-вторых, могут быть исполь­зованы объекты, «прозрачные» для электронов, обладающих определённой скоростью. Иными словами, при работе на просвет объ­екты должны быть достаточно тонкими, а электроны достаточно быстрыми, чтобы они проходили сквозь объекты и поступали в систему электронных линз. Кроме того, путём использования отражённых элек­тронных лучей могут быть изучены поверхности массивных объектов (в основном металлов и металлизированных образцов). Такой способ на­блюдения аналогичен методам отражательной оптической микроскопии.

По характеру исследования объектов электронные микроскопы разделяют на просвечивающие, отражательные, эмиссионные, растро­вые, теневые и зеркальные.

Наиболее распространёнными в настоящее время являются электромагнитные микроскопы просвечивающего типа, в которых изо­бражение создаётся электронами, проходящими сквозь объект наблюдения. Устройство такого микроскопа показано на рис. 4 (слева для сравнения показано устройство оптического микроскопа). Он со­стоит из следующих основных узлов: осветительной системы, камеры объекта, фокусирующей системы и блока регистрации конечного изо­бражения, состоящего из фотокамеры и флуоресцирующего экрана. Все эти узлы соединены друг с другом, образуя так называемую ко­лонну микроскопа, внутри которой поддерживается давление ~10↑-4 ⎯ 10↑-5 мм рт. ст. Осветительная система обычно состоит из трёхэлек­тродной электронной пушки (катод, фокусирующий электрод, анод) и конденсорной линзы (здесь и далее речь идёт об электронных линзах). Она формирует пучок быстрых электронов нужного сечения и интен­сивности и направляет его на исследуемый объект, находящийся в камере объектов. Пучок электронов, прошедший сквозь объект, посту­пает в фокусирующую (проекционную) систему, состоящую из объективной линзы и одной или нескольких проекционных линз.

**Рис. 4. Схемы устройств оптического микроскопа (а) и электронного микроскопа просвечивающего типа (б):**

**1** ⎯ **источник света (электронов);**

**2** ⎯ **конденсорная линза;**

**3** ⎯ **объект;**

**4** ⎯ **объективная линза;**

**5** ⎯ **промежуточное изображение;**

**6** ⎯ **проекционная линза;**

**7** ⎯ **конечное изображение.**

Объективная линза предназначена для получения увеличенного электронного изображения (обычно увеличение~100\*). Часто это уве­личенное изображение называют промежуточным. Для его наблюдения в плоскости изображений объективной линзы располагают специаль­ный экран. Этот экран, покрытый люминесцирующим веществом (люминофором), аналогичен экрану в кинескопах, превращает элек­тронное изображение в видимое.

Часть электронов из числа попадающих на экран необходимо направлять в проекционную линзу для формирования конечного элек­тронного изображения; с этой целью в центре экрана сделано круглое отверстие. Поток электронов, прошедших сквозь отверстие, перед по­ступлением в проекционную линзу диафрагмируется. В более слож­ных микроскопах используются две электронные линзы. В этих случаях первую из линз называют промежуточной; она формирует второе про­межуточное изображение. Вторая же проекционная линза формирует конечное электронное изображение, которое фиксируется в блоке ре­гистрации. Результат электронно-микроскопического исследования может быть получен либо в виде распределения плотностей почерне­ния фотографической пластинки, либо в виде распределения ярко­с­тей свечения люминесцентного экрана.

Образование изображения в просвечивающем электронном мик­роскопе связано главным образом с различной степенью рассеяния электронов различными участками исследуемого образца и в меньшей мере с различием в поглощении электронов этими участками. В зави­симости от степени рассеяния электронов участками образца через так называемую апертурную диафрагму, помещённую перед объектив­ной линзой, проходит большее или меньшее число электронов (диафрагма пропускает лишь те электроны, углы рассеяния которых не очень велики). Контрастность получаемого изображения определяется отношением числа прошедших через диафрагму электронов к общему числу электронов, рассеянных данным микроучастком образца.

Максимальное увеличение такого микроскопа определяется ве­личинами фокусных расстояний объективной и проекционной линз и расстоянием между объектом наблюдения и плоскостью конечного изображения. Для просвечивающего микроскопа с одной проекционной линзой эта зависимость выражается следующей простой формулой:

**M=L↑2/(4\*f1\*f2)**,

где L ⎯ расстояние между объектом и плоскостью изображения; f1 и f2 ⎯ соответственно фокусные расстояния объективной и проекцион­ной линз.

Из формулы видно, что для достижения больших увеличений целесообразно использовать короткофокусные линзы и располагать их на большом расстоянии друг от друга, что соответствует большому значению величины L. Заметим, что в этом отношении электронный микроскоп аналогичен оптическому.

Реально в современных электронных микроскопах L не превы­шает 1⎯ 2 м, а величины f1 и f2 составляют порядка 1,5 ⎯ 2 мм. Нетрудно подсчитать, что в этом случае Mмакс=20000÷40000. Однако для электронного микроскопа есть смысл добиваться дальнейшего повышения увеличения ещё на порядок, поскольку максимальное по­лезное увеличение его, определяемое отношением разрешающей способности человеческого глаза (~0,2 мм) на расстоянии наилучшего зрения к разрешающей способности электронного микроскопа, состав­ляет порядка 400000.

Хотя, как мы видели, теоретическая разрешающая способность в электронной микроскопии, ограничиваемая дифракционным преде­лом, при использовании ускоряющего напряжения порядка 100 кв составляет 0,037А°, реально достижимое разрешение в силу ряда при­чин, о которых речь пойдёт ниже, оказывается существенно меньше этой величины. В современных электронных микроскопах гарантируе­мое разрешение составляет 4,5 ⎯ 5,0А°. Величина максимального полезного увеличения (400 000\*) соответствует разрешающей способ­ности в 5,0А°. Для достижения столь большого увеличения в электронных микроскопах обычно используются промежуточные линзы небольшого увеличения.

**Объекты электронной микроскопии.**

Теперь посмотрим, какие объекты можем мы наблюдать и ис­следовать с помощью, обладающего разрешающей способностью порядка нескольких ангстрем, т. е. порядка 10↑-10 м. Очень немного говорит эта цифра, так как число с десятью нулями представить не очень просто. Почему эту величину следует считать малой и даже сверхмалой? По сравнению с чем? В старом учебнике физики Цингера была фраза, смысл которой сводился к следующему: «Если портной ошибётся в длине вашего платья на один сантиметр, вы вряд ли это заметите, но если наборщик сместит буквы на один сантиметр ⎯ это каждый сразу заметит». Величина 10↑-10 м очень малая, если её срав­нивать с размерами предметов в нашей комнате. Это также очень малая величина по сравнению с размерами тех вещей, тех объектов, которые мы можем взять руками, можем потрогать. Все эти предметы состоят из громадного числа атомов и молекул. Величина же 10↑-10 м сравнима с размерами отдельных атомов и молекул. Таким образом, научившись видеть и общаться с такими величинами, мы приобретаем возможность «работать» с отдельными атомами и молекулами веще­ства или по крайней мере с объектами, в которых не очень много атомов. Современные электронные микроскопы позволяют наблюдать и изучать большие органические молекулы.

Итак, совершив «прорыв» в средствах наблюдения в область размеров порядка 10↑-9÷10↑-10 м, мы по сравнению с метром ⎯ вели­чиной, сравнимой с длиной шага, совершаем скачок в миллиарды (10↑9) раз. Обратим внимание, что расстояние от Земли до окраинных объектов Солнечной системы ~6e9 км, которое свет(его скорость 300000 км/сек) проходит примерно за 6 ч, по сравнению с линейными размерами города (~10 км), оказывается больше в 6e8 раз.

Но хорошо, что же можно узнать нового, проникнув в область сверх малых размеров, открываемых электронной микроскопией? Не представляет ли собой этот мир атомов и молекул нечто, в котором отсутствуют не только краски и звуки, но и вообще какие-либо признаки разнообразия, жизни и красоты? Оказывается не нужно даже обладать богатым воображением, чтобы увидеть своеобразную красоту мира сверх малых объектов и увлечься ею. Посмотрите на рис. 5, и вы в этом убедитесь.

**Рис. 5. Кристалл K2PtCl4, выраженный на пленке из вод­ного раствора.**

На уровне размеров, разрешаемой современной электронной микроскопией, разворачиваются события, играющие в конечном итоге исключительно важную роль в жизни человека, природе и технике. Прежде всего биология. Живые клетки представляют собой сложные структурные образования; в них протекают сложнейшие, изученные лишь частично биохимические процессы. Ход этих процессов опреде­ляет жизнедеятельность клеток, их взаимосвязь и в конечном итоге жизнедеятельность организмов.

В этом мире нашему взору открываются ранее не известные нам населяющие его «жители», их действия и привычки, взаимоотношения между собой, их дружба и маленькие трагедии, которые в конечном итоге приводят к событиям, играющим важнейшую роль в масштабах природы и человечества. Здесь на молекулярном уровне хранится ве­личайшая тайна ⎯ тайна жизни, ее вечного воспроизведения и совершенствования. Здесь же спрятаны такие факторы, как причины болезней и смерти, либо прерывающие жизнь, либо делающие ее тра­гической; вирусы многих грозных болезней «легких», таких, как грипп, и страшных - таких, как чума; сложные молекулярные структуры ⎯ моле­кулы ДНК, РНК, хранящие вековечный код жизни, воспроизводящие и осуществляющие эту жизнь, ⎯ принадлежат к этому миру.

Многие свойства материалов, являющихся основой современной техники и использующихся в повседневной жизни человека и общества в целом, определяются свойствами микроструктур вещества, также относящихся к этому миру.

Таким образом, мир, который открывают нам методы электрон­ной микроскопии, не только многообразен и по своему красочен, но и играет чрезвычайно важную роль в жизни природы и человечества.

**Виды электронных микроскопов.**

Многообразие явлений, требующих изучения при помощи элек­тронной микроскопии, определяет разнообразие и специфику ее методов и соответствующих устройств. Мы уже знакомы с принципом действия просвечивающего электронного микроскопа. С его помощью можно исследовать тонкие образцы, пропускающие падающий на них пучок электронов.

В ряде случаев и в первую очередь для исследования массивных объектов применяются электронные микроскопы других типов.

Эмиссионный электронный микроскоп формирует изображение с помощью электронов, испускаемых самим объектом. Такое испускание достигается путем нагревания объекта (термоэлектронная эмиссия), освещения его (фотоэлектронная эмиссия), бомбардировки электро­нами или ионами (вторичная электронная эмиссия), а также помещением его в сильное электрическое поле (автоэлектронная эмиссия). Увеличенное изображение формируется подобно тому, как это делается в микроскопе просвечивающего типа. Образование изо­бражения в эмиссионном электронном микроскопе происходит в основном за счет различного испускания электронов микроучастками объекта. При эмиссионных исследованиях объектов разрешающая спо­собность микроскопов составляет ~300А°.

Эмиссионная электронная микроскопия нашла широкое приме­нение в исследованиях и разработках катодов электровакуумных приборов различного, в том числе радиолокационного применения, а также в физических исследованиях металлов и полупроводников.

В отражательном электронном микроскопе изображение созда­ется с помощью электронов, отраженных (рассеянных) поверхностным слоем объекта. Образование изображения в нем обусловлено разли­чием рассеяния электронов в разных точках объекта в зависимости от материала и микрорельефа. Обычно образцы получаются под малым углом (приблизительно несколько градусов) к поверхности. Практиче­ски на электронных микроскопах такого типа достигнуто разрешение порядка 100 ангстрем.

Одна из особенностей отражательного электронного микро­скопа — различие увеличений в различных направления вдоль плоскости объекта связано с наклонным положением объекта по от­ношению к оптической оси микроскопа. Поэтому увеличение такого микроскопа характеризуют обычно двумя величинами: увеличением в плоскости падения пучка электронов и увеличением в плоскости, пер­пендикулярной плоскости падения.

Растровый электронный микроскоп основан на использовании предварительно сформированного тонкого электронного луча (зонда), положением которого управляют с помощью электромагнитных полей. Это управление (сканирование) во многом аналогично процессу раз­вертки в телевизионных кинескопах. Электронный зонд последовательно проходит по поверхности исследуемого образца. Под воздействием электронов пучка происходит ряд процессов, характер­ных для данного материала и его структуры. К их числу относятся рассеяние первичных электронов, испускание (эмиссия) вторичных электронов, появление электронов, прошедших сквозь объект (в слу­чае тонких объектов), возникновение рентгеновского излучения. В ряде специальных случаев (люминесцирующие материалы, полупро­водники) возникает также световое излучение. Регистрация электронов, выходящих из объекта, а также других видов излучения (рентгеновского, светового) дает информацию о различных свойствах микроучастков изучаемого объекта. Соответственно этому системы индикации и другие элементы растровых микроскопов различаются в зависимости от вида регистрируемого излучения.

Синхронно с разверткой электронного зонда осуществляется развертка луча большого кинескопа. Рассмотрим работу растрового электронного микроскопа в режиме индикации тока вторичных элек­тронов. В этом случае величина вторичного электронного тока определяет глубину модуляции яркости на экране кинескопа. Растро­вый электронный микроскоп такого типа позволяет получить увеличение 100 ÷ 100 000 при достаточной контрастности изобра­жения. Разрешающая способность растровых электронных микроскопов определяется диаметром электронного зонда и в случае получения изображения в электронных лучах составляет ~300À°. Растровые элек­тронные микроскопы позволяют изучать, например, так называемые p-n переходы в полупроводниках.

Из электронных микроскопов упомянем зеркальный электронный микроскоп, основной особенностью которого является чувствитель­ность к микроскопическим электрическим и магнитным полям на отражающем массивном объекте. При этом достигается разрешение деталей порядка 1000А° и увеличение почти в 2000\*. Работа такого микроскопа основана на действии микроскопических электрических и магнитных полей на электронный поток. Зеркальный электронный мик­роскоп позволяет изучать, например, доменную структуру ферромагнитных материалов, структуру сегнетоэлектриков.

В теневом электронном микроскопе, так же как и в растровом, формируется электронный зонд, однако положение его остается неиз­менным. Электронные лучи зонда служат для получения увеличенного теневого изображения объекта, помещенного в непосредственной бли­зости от зонда. Образование изображения обусловлено рассеянием и поглощением электронов различными участками объекта. Следует от­метить, что интенсивность конечного изображения в теневом электронном микроскопе незначительна, поэтому обычно в них исполь­зуются усилители света типа электронно-оптических преобразо­вателей.

Важной разновидностью электронных микроскопов растрового типа является микрорентгеноспектральный анализатор. Прибор осно­ван на возбуждении так называемого характеристического рентгеновского излучения атомов малого участка поверхности - об­разца с помощью тонкого высокоскоростного электронного зонда. Электронный зонд с помощью системы развертки обегает исследуе­мую поверхность. При торможении электронов на поверхности возникает наряду с так называемым тормозным излучением характери­стическое рентгеновское излучение, свойства которого существенно определяются строением электронных оболочек в атомах вещества. Это излучение обязано своим возникновением энергетическим перехо­дом между глубокими энергетическими уровнями атомов.

Возникающее характеристическое излучение регистрируется с помощью рентгеноспектральной аппаратуры. Диаметр электронного зонда может изменяться от 360 до 0,5 мкм, а размер просматриваемой площадки представляет собой квадрат со стороной 360, 180, 90 или 45 мкм. В одном из приборов такого типа скорость анализа по одному хи­мическому элементу соответствует движению зонда 8 или 96 мкм/мин (при механическом перемещении объекта). Анализировать можно все элементы периодической системы элементов Менделеева, легких (от атомного номера 11 - натрия).минимальный объем вещества, поддаю­щегося количественному анализу, составляет 0,1 мкг. С помощью микрорентгеновского анализатора получают распределение физико-химического состава вдоль исследуемой поверхности.

В СССР серийно выпускается (выпускался) микрорентгеновский анализатор типа МАР-1 (диаметр зонда около 1 мкм, наименьшая ана­лизируемая площадь 1мкм↑2). Приборы такого вида находят применение в электронной промышленности и в других областях науки и техники.

Читатель, видимо, обратил внимание на тот факт, что в элек­тронных микроскопах не достигается разрешающая способность, предсказываемая теорией. В чем же дело? Вспомним, что в формиро­вании изображения в электронных микроскопах важную роль играют элементы электронной оптики, позволяющие осуществлять управле­ние электронными пучками. Этим элементам — электронным линзам свойственны различного рода отклонения от идеального (требуемого расчетом) распределения электрических и магнитных полей. Положе­ние здесь во многом аналогично ограничениям в оптической микроскопии, связанным с неточностью изготовления оптических линз, зеркал и других элементов. Кроме того, ряд трудностей связан с осо­бенностями изготовления и работы источников электронных потоков (катодов), а также с проблемой создания потоков, в которых электроны мало отличаются по скоростям. В соответствии с этими фактами, дей­ствующими в реальных условиях, различают определённые виды искажений в электронных микроскопах, используя при этом терминоло­гию, заимствованную из световой оптики.

Основными видами искажений электронных линз в просвечи­вающих микроскопах являются сферическая и хроматическая аберрации, а также дифракция и приосевой астигматизм. Не останав­ливаясь на происхождении различных видов искажений, связанных с нарушениями симметрии полей и взаимным расположением элементов электронной оптики, упомянем лишь о хроматической аберрации. По­следний вид искажений аналогичен возникновению окрашенных изображений в простых биноклях и лупах. Использование спектрально чистого монохроматического света в оптике (вместо белого) устраняет этот вид искажений. Аналогично этому в электронной микроскопии ис­пользуют по возможности пучки электронов, скорости которых отличаются мало (вспомним соотношение λ=h/(m\*v) äëÿ ýëåêòðîíà!). Этого достигают применением высокостабильных источников элек­трического питания.

Близким «родственником» электронного микроскопа является электронограф ⎯ прибор, использующий явление дифракции элек­тронов, той самой дифракции, которая в своё время подтвердила наличие волновых свойств у электронов и ставит в наши дни предел разрешения в электронном микроскопе. В случае электронов объек­тами, в которых может происходить дифракция на периодической структуре (аналогичной объёмной дифракционной решётке в оптике), служат кристаллические структуры. Известно, что в кристаллах атомы расположены в строгом геометрическом порядке на расстояниях по­рядка единиц ангстрем. Особенно правильно это расположение в так называемых монокристаллах. При взаимодействии электронов с та­кими структурами возникает рассеяние электронов в преимуществен­ных направлениях в соответствии с предсказываемыми теорией соотношениями. Регистрируя рассеянные электроны (например, фотографируя их), можно получать информацию об атом­ной структуре вещества. В современных условиях электронография широко применяется при исследованиях не только твёрдых, но и жид­ких, газообразных тел. О виде получаемых электронограмм можно судить по фотографиям (см. рис.6).

**Рис. 6. Электорнограмма высокого разрешения (окись цинка):**

**вверху ⎯ электронограмма; внизу ⎯ увеличенное изображение участка А.**

В нашей стране и за рубежом применяются специализированные электронографы промышленного типа. Кроме того, в некоторых элек­тронных микроскопах предусмотрена возможность работы в режиме электронографии.

Следует заметить, что с точки зрения физики получение элек­тронограмм представляет собой процесс, во многом близкий процессу получению рентгенограмм в рентгеноструктурном анализе. Действи­тельно, если в электрографии используется дифракция электронов, то в рентгеноструктурном анализе происходит дифракция рентгенов­ских лучей на атомных структурах. Естественно, что каждый из этих методов имеет свою область применения.

**Особенности работы с электронным микроскопом.**

Остановимся кратко на основных приемах работы в электронной микроскопии. Естественно, что эти приемы своеобразны, учитывая сверхмалые размеры объектов, подлежащих исследованию. Так, на­пример, в биологических исследованиях находят применения «сверхтонкие ножи» - микротомы, позволяющие получать срезы биоло­гических объектов толщиной менее 1 мкм.

Главные особенности методики электронной микроскопии опре­деляются необходимостью помещения объекта исследования внутрь колонны электронного микроскопа, т.е. в вакуум и обеспечения условий высокой чистоты, так как малейшие загрязнения могут существенно исказить результаты. Для просвечивающего электронного микроскопа объект приготовляется в виде тонких пленок, в качестве которых мо­гут служить различного рода лаки, пленки металлов и полупроводников, ультратонкие срезы биологических препаратов. Кроме того, объектами исследования могут быть тонко измельченные (диспергированные) совокупности частиц. Обычно в просвечивающих микроскопах, работающих при напряжениях 50-100 кв, толщина объек­тов не может превышать 200 А°(для неорганических веществ) и 1000 А° (для органических). Биологические объекты в большинстве случаев приходится контрастировать, т.е. «окрашивать» (солями тяжелых ме­таллов), оттенять напылением металлов (платиной, палладием и др.) и использовать ряд других приемов. Необходимость контрастирования вызвана тем, что большинство биологических объектов содержит атомы легких элементов (с малым атомным номером) - водород, угле­род, азот, кислород, фосфор и т.д. в то же время толщина объектов, интересных для биологии и медицины, составляет величину порядка 50 А°. Без контрастирования при электронно-микроскопических ис­следованиях вирусов наблюдаются бесструктурные пятна, а отдельные молекулы нуклеиновых кислот вообще неразличимы. Ис­пользование методов контрастирования позволяет эффективно применить электронную микроскопию в биологических исследованиях и в том числе при исследованиях больших молекул (макромолекул) ⎯ см., например, рис. 7.

**Рис. 7. РНК из вируса табачной мозаики (из раствора с ионной силой 0,0003 мкм).**

В ряде случаев при исследовании, например, массивных объек­тов в технике широкое применение находит метод получения отпечатков, который заключается в изготовлении и последующем ис­следовании в микроскопе копий поверхностей объектов.

Используются как естественные отпечатки (тонкие слои оки­слов), так и искусственные, получаемые путем нанесения (напыления, осаждения) пленок кварца, углерода и других веществ. Наибольшее разрешение ( ~10 А°) позволяют получить угольные реплики, которые находят широкое применение как в технике, так и в биологии.

При наблюдении электронно-микроскопическими методами влажных объектов ( в том числе живых клеток) используются вакуумно-изолированные газовые микрокамеры. Объекты исследования помещаются в электронных микроскопах на тончайшие пленки - под­ложки, которые крепятся на специальных сетках, изготовляемых обычно из меди электролитическим способом. Эти пленки должны удовлетворять целому ряду требований, поскольку относительно большая толщина их, а также сильное рассеяние ими электронов при­водят к резкому ухудшению качества изображения объекта. Кроме того, материал таких пленок должен обладать хорошей теплопровод­ностью и высокой стойкостью к электронной бомбардировке.

Кстати, об электронной бомбардировке объекта исследования и ее последствиях. При попадании электронов на объект они выделяют энергию, примерно равную кинетической энергии их движения. В ре­зультате могут происходить местный разогрев и разрушение участков объекта.

Электронный микроскоп часто используется для микрохимичес­кого анализа исследуемого вещества согласно методу, предложенному М. И. Земляновой и Ю. М. Кушниром. По существу этот метод аналоги­чен методу микрохимического анализа с помощью оптического микро­скопа. В данном случае электронный микроскоп используется в качес­тве устройства, способного обнаружить малые количества искомого вещества (по форме и структуре кристаллов и т.п.). на поверхность водного раствора, в котором предполагается наличие искомых ионов, наносится капля 1 — 1,5% раствора нитроклетчатки в амилацетате. Капля растекается по поверхности жидкости и образует коллодиевую пленку, на которую наносится капля реагента. Ионы реагента прони­кают (диффундируют) сквозь пленку и, взаимодействуя с раствором, образуют на поверхности пленки кристаллы, которые содержат ионы, подлежащие обнаружению. После специальной очистки кусочек пленки с кристалликами помещается в электронный микроскоп, и на основе изучения этих кристалликов оказывается возможным дать ответ о на­личии искомых ионов, а в ряде случаев — и об их концентрации. Такой метод микрохимического анализа характеризуется высокой чувстви­тельностью (на 2 — 3 порядка большей по сравнению с другими спосо­бами). Например, ионы марганца могут быть обнаружены в растворе с концентрацией не ниже 10↑-11 нормального раствора при содержании иона 10↑-11 г (по данным А. М. Решетникова).

**Пути преодоления дифракционного предела электронной микроскопии.**

К настоящему времени электронная микроскопия достигла больших успехов и нашла многочисленные применения. Однако в ряде случаев, о которых кратко было сказано выше, было бы чрезвычайно желательным добиться дальнейшего прогресса в электронной микро­скопии. Это в первую очередь относится к проблеме достижения большей разрешающей способности.

На пути решения этой краеугольной задачи стоят чрезвычайно серьезные технические трудности, связанные с проблемами создания электронных линз, их взаимного расположения формирования одно­скоростных электронных потоков. Совокупность этих факторов приво­дит в конечном итоге к различного рода искажениям, играющим важ­ную роль при больших увеличениях и приводящим к тому, что практи­чески достигаемое разрешение оказывается хуже предельного.

По мере приближения электронной микроскопии к своим пре­дельным возможностям все труднее и труднее становится вносить в нее дальнейшие усовершенствования.

Самые последние достижения в электронной микроскопии осно­ваны на применении новых высоковольтных (V = 100 кв) и сверхвысоко­вакуумных (вакуум 2e-10 мм рт. ст.) приборов. Высоковольтная элек­тронная микроскопия, как показывает опыт, позволяет уменьшить хро­матическую аберрацию электронных линз. В печати сообщается, на­пример, о том, что с помощью нового японского микроскопа SMH-5 мо­гут быть получены фотографии решеток с межплоскостным расстоя­нием ~1 А°. Сообщается также, что на новом электронном микроскопе с ускоряющим напряжением 750 кв получено разрешение, равное 3 А°.

Рассматриваются возможности применения в электронной мик­роскопии линз из сверхпроводящих сплавов (например, Hi ⎯ Zn), кото­рые позволят получить высокие оптические свойства электронных сис­тем и исключительную стабильность полей. Ожидается, что использо­вание специальных линз-фильтров позволит получить новые резуль­таты в отражательной электронной микроскопии. При использовании таких линз в просвечивающем электронном микроскопе удалось суще­ственно улучшить их разрешающую способность.

В растровых электронных микроскопах просвечивающего типа к настоящему времени достигнута разрешающая способность в 100 А°. Новый эмиссионный микроскоп позволяет получать разрешения дета­лей с размерами от 120 (для фотоэмиссии) до 270 А° (для вторичной эмиссии).

Вызывает интерес сообщение о том, что голландская фирма Philips вносит ряд усовершенствований в микроскоп типа EM-300, кото­рые позволят довести практическую разрешающую способность до теоретического предела (!). Правда, о существе этих усовершенство­ваний пока не сообщается.

Важность проблемы улучшения разрешающей способности в электронной микроскопии, приближение ее к теоретическому пределу стимулировала проведение целого ряда исследований в этой области. Из многочисленных предложений и идей, зачастую остроумных и весьма перспективных, остановимся на идеях, высказанных английским физиком Габором, получивших в последние годы широкое развитие в оптике, радиофизике, акустике, особенно в связи с созданием оптиче­ских квантовых генераторов (лазеров). Речь идет о так называемой голографии, о которой известно сейчас не только специалистам, но и всем тем, кто интересуется новейшими достижениями физики. Вместе с тем не все, наверное, знают, что первые работы Габора по гологра­фии, проведенные еще в «долазерный» период (1948-1951), были поставлены и выполнены именно в связи с задачей повышения разре­шающей способности в электронной микроскопии.

Сущность предлагавшегося метода сводилась к следующему. Монохроматический поток электронов, т.е. поток, содержащий элек­троны с одинаковыми скоростями, освещает объект исследования (по схеме просвечивающего или теневого микроскопа). При этом происхо­дит дифракция электронов на объекте (вспомним волновые свойства электронов!). Обычно в электронном микроскопе пучок, претерпевший дифракцию на объекте, поступает в систему электронных линз, фор­мирующих изображение и обеспечивающих нужное большое увеличение. Однако эти же линзы, как мы уже отмечали, являются ис­точниками трудно устранимых искажений, препятствующих достижению теоретического разрешения. В новом методе предлагалось фиксиро­вать результат дифракции электронов фотографически в виде дифракционной картины и подвергать эту картину последующей обра­ботке с помощью оптических методов, где получение нужных усилений может быть достигнуто с меньшими искажениями. В таком двухступен­чатом процессе получения изображений основное увеличение достигается за счет перехода от «электронных» длин волн к оптиче­ским. При этом следует отметить, что обрабатываемая оптическими методами картина дифракции практически не имеет сходства с объек­том исследования. Однако с помощью светового излучения (видимого) по этой картине в несложном оптическом устройстве можно восстано­вить изображение исследуемого объекта. Для этого источник излучения должен посылать монохроматические когерентные волны, т.е. должен обладать теми свойствами, которые так ярко проявляются у оптических квантовых генераторов.

Заметим, что, образно говоря, в этом двухступенчатом процессе мы фиксируем, «замораживаем» фронт электронных волн и потом вос­производим его вновь в виде фронта световой волны в значительно большем масштабе, используя при этом различие длин волн света и электронов (это соотношение, например, может быть порядка 6000А°/0,030А° ≈ 200000).

В таком «безлинзовом», а потому и не вносящим искажений уве­личении и заключается основное достоинство метода голографии в электронной микроскопии.

К числу новых направлений следует также отнести область мик­роскопии, использующую вместо электронов другие виды микрочастиц, тяжелых по сравнению с электронами. В этом случае дифракционный предел, предсказываемый теорией, смещен в более далекую область малых размеров. Примером такого направления микроскопии является развивающаяся автоионная микроскопия.

В автоионных микроскопах, используемых при исследовании фи­зики поверхностных явлений, главным образом в металлах, оказывается возможным видение отдельных атомов. Методика авто­ионной микроскопии весьма своеобразна; эта область претерпевает бурное развитие.

Как же далеко мы сможем еще продвинуться по пути раскрытия тайн микрообъектов? Мы видим, что за исторически короткий срок, ис­пользуя новейшие достижения физики и радиоэлектроники, электронная микроскопия превратилась в мощное орудие исследова­ния природы. Обозримое будущее этой области науки связано с реализацией дерзновенных проектов создания таких приборов, кото­рые позволят «приблизить» и сделать зримым многообразный и красочный микромир. Далеко не всё ещё ясно на этом пути, на котором постоянно возникают всё более и более сложные научно-технические и технологические проблемы. Современные приборы микроскопии явля­ются несравненно более сложными устройствами, чем микроскопы недавнего прошлого.

Уже сейчас мы сталкиваемся с очевидным фактом: приборы мик­роскопии становятся всё более сложными и громоздкими по мере проникновения в ранее недосягаемые тайны мира малых объектов. Дальнейшее усложнение этих приборов, увеличение затрат на их изго­товление определяются необходимостью разрешения новых всё более сложных проблем.

Здесь уместно провести аналогию с развитием эксперименталь­ной ядерной физики, где получение информации о свойствах микрочастиц вещества, из которых состоят ядра атомов, связано с созданием сложнейших и, как правило, чрезвычайно громоздких и до­рогих приборов и установок.

Получение информации, раскрывающей тайны микромира, опла­чивается высокой ценой. Однако происходящие при этом затраты интеллектуальных и материальных ресурсов, как показывает опыт ис­тории науки, безусловно, окупаются теми возможностями, которые открываются при этом в технике, физике, химии, биологии и медицине.

*Литература:*

1. Рукман Г.И. , Клименко И.С. ***Электронная микроскопия.*** М., Знание, 1968.
2. Савельев И.В. ***Курс физики, т.3.*** М., Наука, 1989.

**Ðèñóíêè:**

1. Напомним, что 1Α° (ангстрем) = 10e-10 м. [↑](#footnote-ref-1)
2. В абсолютной системе единиц коэффициент преломления вакуума равен единице. [↑](#footnote-ref-2)
3. Обратим внимание на то, что масса электрона по данным 1996 г. известна с относительной погрешностью не более 0,00003, а заряд ⎯ не более 0,00002. [↑](#footnote-ref-3)