

СЕМИНАР

для педагогических работников города Москвы, работающих в профильных классах инженерной направленности

«Электронная микроскопия»

Разрешающая способность светового микроскопа определяется дифракционным пределом Аббе (1873 г.) (подробнее, см. ссылку <http://lab.bmstu.ru/sm/part2/part2/index.htm>):

$$d_{min} = \lambda / (2n \cdot \sin \alpha),$$

где α — апертурный угол (у хороших объективов световых микроскопов α близок к 90°);

n — показатель преломления среды, для типичной иммерсионной жидкости для светового микроскопа, кедрового масла $n=1,515$; $n \cdot \sin \alpha$ — числовая апертура, маркируется на объективе в виде двух цифр, например, 0,65; 1,25;

λ — длина волны белого света, для зелёного цвета $\lambda=0,55$ мкм.

Тогда разрешающая способность светового микроскопа

$$d_{min} \approx 0,2 \text{ мкм}.$$

Таким образом, для увеличения разрешающей способности оптического прибора необходимо уменьшать длину волны излучения, падающего на исследуемый объект. Например, в качестве излучения использовать пучок электронов.

Определим длину волны электронов в электронном микроскопе.

Формула Луи де Бройля (1924 г.) связывает импульс электрона (а также любого материального объекта) с длиной волны и представляет волновой характер его движения:

$$\lambda = \frac{h}{mV},$$

где h — постоянная Планка, $h=6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж•с; m — масса электрона, $m=9,11 \cdot 10^{-31}$ кг; V — его скорость.

В электронном микроскопе кинетическая энергия электрона связана с ускоряющим напряжением электронной пушки U (В):

$$\frac{mV^2}{2} = eU,$$

где e — заряд электрона, $e=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Тогда

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meU}} \approx \sqrt{\frac{1,5}{U}}, \text{ нм}.$$

При характерном значении ускоряющего напряжения $U=100$ кВ длина волны электрона составит $\lambda=0,00387$ нм, что на два порядка меньше типичных межатомных расстояний в материалах (например, для железа Fe_α с ОЦК решеткой период равен 0,28 нм), и поэтому электронный микроскоп позволяет изучать атомно-кристаллическое строение материалов.

При бóльших ускоряющих напряжениях (современные просвечивающие электронные микроскопы работают с ускоряющим напряжением $U=1$ МВ) скорость электрона приближается к скорости света и необходимо учитывать релятивистскую поправку.

Существуют просвечивающие (ПЭМ) и растровые (РЭМ) электронные микроскопы.

ПЭМ разработал немецкий инженер Г. Руске в 1931 г., за что получил Нобелевскую премию по физике в 1986 г. В ПЭМ проводится **регистрация электронов, прошедших сквозь тонкий образец** толщиной около 0,1 мкм.

РЭМ разработал русский инженер Владимир Зворыкин (работал в США) в 1942 г. В РЭМ тонкий электронный пучок сканирует по поверхности образца и проводится **регистрация возникающих на поверхности излучений**.

Далее рассмотрим физический принцип работы и конструкцию растрового электронного микроскопа: <http://lab.bmstu.ru/rem/index.htm> .