

К. ЯНЧЕВСКИЙ

## ОСВЕЩЕНИЕ ОБЪЕКТОВ В ЭЛЕКТРОННЫХ МИКРОСКОПАХ

(Представлено академиком А. А. Лебедевым 2 IX 1948)

Как известно, современные электронные микроскопы вследствие больших аберраций своих линз способны давать высокие разрешения лишь при уменьшении апертур до значения  $10^{-3}$ — $10^{-4}$ . С другой стороны, условия рассматривания и фотографирования изображений при больших увеличениях требуют повышения плотности тока, просвечивающего объект. В соответствии с этим задача осветительного устройства состоит в создании пучка электронов большой плотности тока с угловым раствором, равным или меньшим апертуры объектива микроскопа, и сечением в плоскости образца, равным полю зрения при наименьшем рабочем увеличении прибора.

Так например, для конечного изображения на экране или фотопластинке диаметром в 50 мм и увеличении  $\times 1000$  изображаемый участок объекта будет равен 0,05 мм.

Если апертура освещающего пучка меньше апертуры объектива, к чему обычно стремятся на практике, то действующей будет первая, т. е. апертура освещения. Роль же диафрагмы объектива при этом заключается в ограничении пучков, рассеянных веществом объекта, т. е. в создании контраста изображения.

Электронные излучатели осветительных устройств современных микроскопов состоят обычно из катода  $K$  (вольфрам, диаметр 0,1—0,15 мм), управляющего электрода  $C$  и анода  $A$  (рис. 1, *a*).

Такая система, при надлежащей геометрии электродов, в условиях электронного микроскопа может дать расходящийся электронный пучок с углом раствора  $\alpha_0$  до  $1$ — $1,5^\circ$  при радиусе наименьшего сечения  $r_p = 0,05$ — $0,03$  мм.

Это сечение, или шейка пучка, при рассмотрении последующего хода лучей и принимается обычно за эффективный или действующий источник электронов.

Рассмотрим условия освещения объекта в электронном микроскопе от такого источника непосредственно, без участия дополнительных конденстрирующих или конденсорных линз. Поставим условием, чтобы электронный пучок после прохождения объекта заполнил (без рассеяния в объекте) угол  $\beta$ , равный или меньший апертуры объектива.

Чтобы выполнить его без применения конденсорных линз, поместим объект на такое расстояние, при котором источник  $r_p$  виден из объекта под заданным углом  $\beta$  (рис. 1, *b*).

Это расстояние (обозначим его через  $L_{opt}$ ) будет равно:

$$L_{opt} = r_p / \operatorname{tg} \beta.$$

В таком случае из всего потока, излучаемого источником в пределах угла  $\alpha_0$ , полезно будет использована часть его, заключенная в угле  $\alpha_B$ , под которым объект виден из центра источника (рис. 1, в).

Следовательно,  $\text{tg } \alpha_B = r_B / L_{\text{opt}}$ .

Если теперь принять, несколько упрощая действительную картину, что плотность тока по сечению пучка постоянна, то степень полезно-

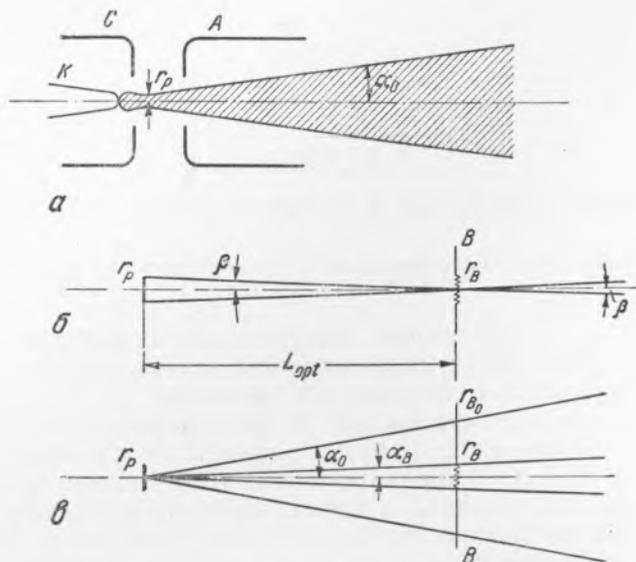


Рис. 1

го использования его  $\gamma$  для расстояния  $L = L_{\text{opt}}$  определится отношением:

$$\gamma = \left( \frac{\text{tg } \beta r_B}{\text{tg } \alpha_0 r_p} \right)^2.$$

Так как величины источника и объекта практически одного порядка, то, полагая  $r_p \cong r_B$ , а следовательно, и  $\alpha_B = \beta$ , получаем

$$\gamma = \frac{\text{tg}^2 \beta}{\text{tg}^2 \alpha_0} = \frac{\text{tg}^2 \alpha_B}{\text{tg}^2 \alpha_0}.$$

Введем теперь в систему конденсорную линзу, поместив ее вначале на равных расстояниях от источника и объекта (рис. 2). При этом условии угловой расхождение пучка, прошедшего через объект (без рассеивания в нем), будет равен, очевидно, углу начального расхождения  $\alpha_0$ , а апертурный угол объектива, который должен быть заполнен, попрежнему  $\beta$ . Тогда для коэффициента использования пучка получаем снова

$$\gamma = \frac{\text{tg}^2 \beta}{\text{tg}^2 \alpha_0}.$$

Положение не изменится и в том случае, если угол  $\alpha_0'$  будет меньше угла расхождения  $\alpha_0$ , так как это может быть достигнуто согласно закону Лагранжа-Гельмгольца  $r_p \text{tg } \alpha_0 = r_p' \text{tg } \alpha_0'$ , при  $n = n'$ , только за счет увеличения изображения  $r_p'$ , даваемого линзой, а следовательно, за счет соответственного же уменьшения плотности тока.

Эти рассуждения приводят к тому выводу, что, поскольку конденсорные линзы, не изменяющие энергии электронов, интенсивности освещающего пучка не увеличивают, само применение их в электронных микроскопах не является целесообразным.

Примерную величину расстояния  $L_{opt}$  от источника до объекта для системы без конденсора можно получить, зная апертурный угол объектива  $\beta$  и наименьшее сечение пучка  $r_p$ . Беря для апертурного угла

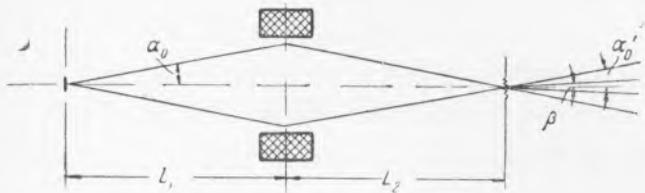


Рис. 2

обычно применяемое значение  $\beta = 0,001$ , а для сечения  $r_p$  некоторую среднюю величину, полученную из экспериментов с излучателями электроннолучевых трубок, равную 0,05 мм, находим:

$$L_{opt} = 50 \text{ мм,}$$

т. е. расстояние, выполнимое на практике и способствующее более компактному размещению частей микроскопа.

Величина эффективного источника, т. е. сечение  $r_p$ , не остается постоянной при изменении геометрии электродов или отношения потенциалов на них. Это свойство излучателя можно использовать для выбора расстояния между катодом и объектом, а также для изменения апертуры освещающего пучка. В последнем случае оказывается достаточной регулировка потенциала управляющего электрода или расстояния между ним и катодом.



Рис. 3

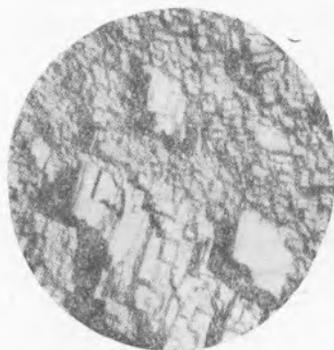


Рис. 4

С целью проверки изложенных здесь положений было предпринято сравнение работы двух микроскопов, один из которых имел осветительное устройство с конденсором, а второй без него при расстоянии между катодом и объектом  $L = 65$  мм. Это сравнение показало, что простое осветительное устройство дает возможность работать при таких малых анодных токах (20—30  $\mu\text{A}$ ), которые обычно считаются достижимыми лишь при наличии в устройстве специальных фокусирующих линз.

На рис. 3 приведен снимок поверхности алюминия, полученный на микроскопе с конденсором, а на рис. 4 снимок такого же объекта на втором микроскопе с осветительным устройством без этой линзы. Эти снимки, сделанные при одинаковых анодных напряжениях, токах и экспозициях, как видим, практически не отличаются друг от друга.

Поступило  
20 II 1948