

П. А. СТОЯНОВ, В. В. МОСЕЕВ

РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ЭЛЕКТРОННОГО МИКРОСКОПА С ОДНОПОЛЬНЫМ КОНДЕНСОР-ОБЪЕКТИВОМ

(Представлено академиком Л. А. Арцимовичем 13 I 1972)

Однопольный конденсор-объектив обладает практически минимальным коэффициентом сферической аберрации $C_{сф}$ ⁽¹⁾. В этой линзе объект располагается в средней плоскости, так что одна половина фокусирующего поля влияет на пучок осветителя и служит короткофокусным конденсором, а другая формирует изображение и является объективом. Теоретический предел разрешающей способности электронного микроскопа, зависящий от коэффициента сферической аберрации объектива и длины волны электронов λ , в данном случае достигает наивысшего значения и зависит от диаметра отверстий D и ширины немагнитного зазора S конденсор-объектива.

Для уменьшения $(C_{сф})_{min}$ и соответствующего улучшения теоретического предела разрешения δ_r оба параметра следует снижать. Однако ряд факторов, и в том числе необходимость размещения в щели и каналах наконечника конструктивных и оптических элементов (апертурной и защитных диафрагм, держателя объекта, стигматора и т. д.), накладывает свои ограничения на их величину. Существует оптимум для D и S , который следует выбирать с учетом реальных возможностей. В данной работе оптимальными считаются $D = S = 3$ мм. В объективе с указанной геометрией полюсного наконечника из пермендюра было измерено распределение поля на оптической оси при различных значениях магнитодвижущей силы (м.д.с.) от 3000 до 16 000 ампервитков. В этом интервале значений м.д.с. режим конденсор-объектива может поддерживаться при ускоряющих напряжениях микроскопа до 300 кв, так что $C_{сф}$ имеет все время близкое к минимальному значение. По распределению поля на ЭВМ были вычислены значения $C_{сф}$ в зависимости от ускоряющего напряжения. В частности, для 100-киловольтного микроскопа при указанных выше D и S $C_{сф} = 0,67$ мм. Теоретическое разрешение по Шерцеру ⁽²⁾ в этом случае составляет 1,77 Å.

Магнитные поля рассеяния, возникающие вдоль магнитной цепи электронных линз, нарушают юстировку прибора и снижают его разрешающую способность. В результате теоретическое разрешение δ_r не реализуется. Для снижения полей рассеяния магнитная цепь конденсор-объектива была разработана из пермаллоя марки 50Н, а башмаки полюсного наконечника из пермендюра ЭП-558 вакуумноиндукционной плавки из сверхчистых исходных материалов. Расчеты и моделирование позволили найти оптимальную геометрию магнитопровода, при которой индукция в нем не превышала 1,1 тл при м.д.с. = 16 000 ав и всего 0,55 тл при 7 700 ав — м.д.с. конденсор-объектива 100-киловольтного микроскопа.

Описанный выше конденсор-объектив был установлен на электронном микроскопе ЭМВ-100Л. В этом приборе почти полностью отсутствует влияние всех факторов, ухудшающих разрешающую способность электронного микроскопа (механические и термические дрейфы, влияние вибраций, зарастание объекта углеводородными осадками и т. д.). Поэтому при благоприятных условиях на ЭМВ-100Л реализуется предельное

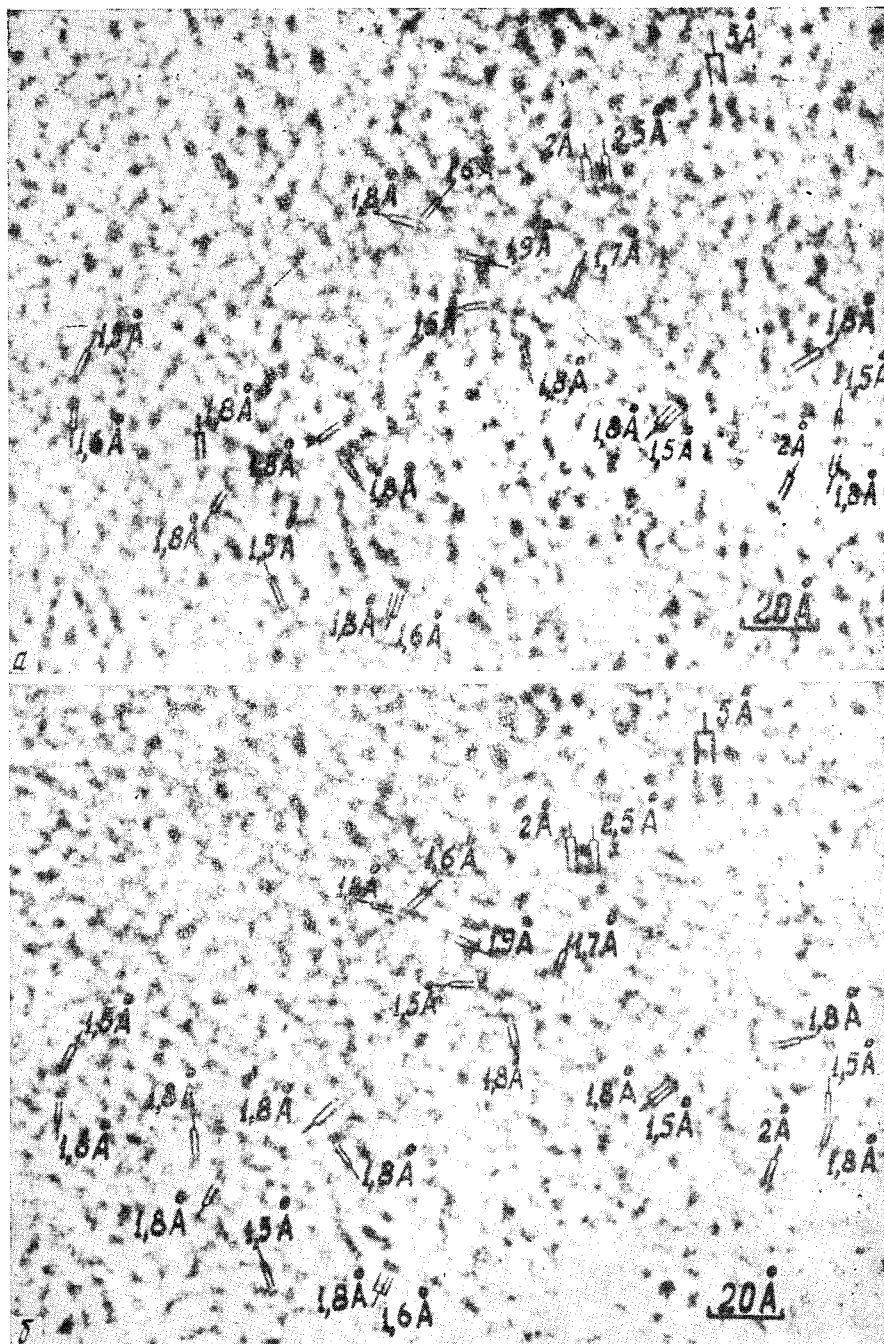


Рис. 1. Угольная пленка; 5 000 000 ×

разрешение (³, ⁴). Конденсор-объектив был подключен к высокостабилизированному источнику тока, нестабильность которого составляла $2 \cdot 10^{-6}$ мин⁻¹. Столь же низкой была нестабильность ускоряющего напряжения. Работа производилась при напряжении 100 кв.

При настройке микроскопа встретились значительные трудности с юстировкой осветительной системы, так как регулировка угла наклона освещающего пучка и его перемещения по объекту оказались взаимосвязанными. Только при очень точной настройке отклоняющих систем, при помощи которых юстируется осветитель, можно добиться независимой регулировки. На практике требуемая точность не всегда достижима. Была разработана соответствующая методика юстировки, позволившая преодолеть возникшие трудности.

Наблюдение и фотографирование изображения производились при электроннооптическом увеличении до 500 000 X. В качестве тест-объекта использовалась угольная пленка. После предварительной тщательной настройки стигматора по дифракционным полосам Френеля, наблюдаемым на краю отверстий в пленке, окончательная коррекция астигматизма производилась непосредственно по наблюдаемым на изображении частицам. Добивались, чтобы при переходе от слегка недофокусированного изображения к перефокусированному форма частиц не изменялась, а контраст в момент точного фокуса был минимальным. В результате удалось получить снимки, на которых полностью отсутствует астигматизм. На фотографиях удалось зарегистрировать наивысшее разрешение, которое может быть получено в современных 100-киловольтных микроскопах. На рис. 1 приведена пара снимков-дублей, на которых зарегистрировано разрешение, достигающее 1,5 Å. Вновь наблюдалось некоторое расхождение между теорией и экспериментом (на практике разрешение выше, чем теоретически вычисленный предел), возможное объяснение которому было дано в нашей предыдущей работе (³).

В заключение авторы выражают благодарность Э. И. Кафтаненко, разработавшей питающее устройство для конденсор-объектива.

Поступило
23 XII 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ E. R u s k a, Naturwiss. Rundschau, **17**, № 4 125 (1964). ² O. S c h e r z e r, J. Appl. Phys., **20**, 1 (1949). ³ П. А. Стоянов, В. В. Мосеев, В. В. Поливанов, ДАН, **186**, № 1, 78 (1969). ⁴ П. А. Стоянов, В. В. Мосеев и др., Изв. АН СССР, сер. физ., **34**, 1389 (1970).