

Вполне возможно, что вскоре рентгеновские «микроскопы» станут ценным инструментом в ряде областей исследования. В частности, очень интересна возможность исследования биологических объектов, не подвергшихся высушивающему действию вакуума и электронной бомбардировке, мешающим в ряде случаев при работе с электронным микроскопом. С другой стороны, возможна широкая область применения в металлографии. Избирательность поглощения рентгеновых лучей, вероятно, может быть использована для химического анализа образцов, при изучении их под рентгеновским микроскопом в монохроматических лучах.

*В. Вавилов*

## НАБЛЮДЕНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ МОЛЕКУЛ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОГО МИКРОПРОЕКТОРА

Проблема увеличения разрешающей способности электронно-оптических приборов и возможности перехода к непосредственному наблюдению молекул и распознаванию их форм давно стоит перед электронной микроскопией.

В настоящее время при разрешающей способности электронных микроскопов в несколько десятков ангстрем в лучшем случае удаётся заметить отдельные крупные органические молекулы, состоящие из тысяч атомов, но не судить о их форме. Опознавать отдельные молекулы впервые удалось с помощью так называемого электронного проектора — прибора, дающего в руках умелого экспериментатора возможность получать при непосредственном увеличении объекта в миллион и более раз разрешение, превышающее пределы, технически достижимые в лучших из электронных микроскопов с магнитными или электростатическими линзами<sup>1</sup>.

Электронный проектор в простейшей форме состоит из отпаянного стеклянного сосуда, откачанного до возможно более высокого вакуума — порядка  $10^{-8}$  мм ртутного столба. Внутри сосуда находится металлическое (обычно вольфрамовое или молибденовое) острие с весьма малым радиусом закругления и вспомогательный электрод, часто в виде кольца (рис. 1). На стенке сосуда наносится флуоресцирующий экран. Острие служит катодом; ко второму электроду прикладывается

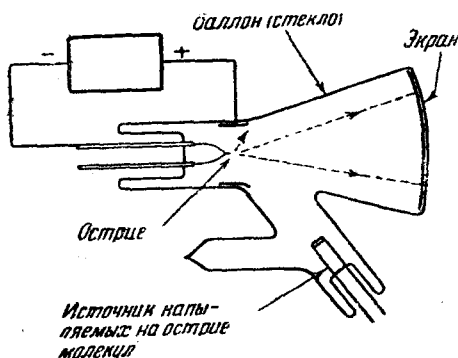


Рис. 1. Схема электронного микропроектора.

положительный потенциал. Когда градиент электрического поля у острия достигает величины порядка  $10^7$  в/см, из металла начинают вырываться электроны, летящие по радиусам, выходящим, практически, из одной точки, и бомбардирующие флуоресцирующий экран. Если на пути электронов находится препятствие, на экране возникает его те-

новое изображение. Наибольшее увеличение достигается, если объект лежит на поверхности острия; в первом приближении оно равно  $\frac{R}{r_0}$ ,

где  $r_0$  — радиус закругления острия, а  $R$  — расстояние от острия до экрана. Радиус закругления вольфрамового острия, изготовленного путём электролитического травления в слабом растворе щёлочи переменным током и последующей ионной бомбардировки, достигал в некоторых опытах 180 и даже 110 ангстрем<sup>2</sup>. При этом в случае достаточно чистого металла конец острия представляет собою монокристалл. Конец такого острия невидим при наблюдении в световой микроскоп. Радиус закругления определяют наблюдением в электронный микроскоп или из соотношения тока холодной эмиссии и приложенной разности потенциалов.

Начиная примерно с 1937 г., с помощью электронных проекторов изучался ряд процессов: закономерности холодной эмиссии электронов, явления адсорбции, миграция атомов по поверхности катода и осаждение атомов на монокристаллы при катодном распылении.

Разрешающая способность электронного микропроектора зависит от ускоряющего напряжения, радиуса закругления острия и работы выхода металла, из которого остриё изготовлено. Размытие изображения точечного объекта в случае сферического острия в конечном счёте определяется тангенциальными составляющими скоростей электронов при их выходе из металла в вакуум. Рис. 2 показывает зависимость диаметра кружка размытия, соответствующего точечному объекту на поверхности острия, от ускоряющего напряжения и работы выхода<sup>2</sup>. Разумеется, при работе с проектором приходится поддерживать ускоряющее напряжение таким, чтобы ток эмиссии вызывал достаточно яркое свечение экрана. Как видно из кривых рис. 2, в случае низких напряжений, т. е. острий с радиусом порядка сотен ангстрем, разрешающая способность проектора превосходит предел, практически достижимый для электронного микроскопа.

Мюллеру<sup>3</sup> удалось показать, что если на вольфрамовое остриё микропроектора нанести испарением некоторое число молекул фталоцианина, эти молекулы, повидимому благодаря своим полупроводящим свойствам (см., например, 4), вызывают местное усиление электронной эмиссии. На характерную геометрическую фигуру на экране проектора, соответствующую максимумам и минимумам эмиссии с разных кристаллографических направлений вольфрама, накладываются гораздо более мелкие яркие пятнышки. При более детальном рассмотрении каждое из пятнышек оказывается состоящим из четырёх сегментов (рис. 3). Между тем, согласно химическим и рентгенографическим данным, молекула фталоцианина представляет собой нечто вроде «цветка» с четырьмя «лепестками», образуемыми бензольными кольцами (рис. 4). Совпадение теневых изображений с формой молекулы, поперечник которой достигает примерно 14 ангстрем, подтверждает тот факт, что на снимке рис. 3 мы имеем дело с изображением отдельных молекул.

Нельзя, разумеется, недооценивать и трудности применённой методики по сравнению с работой с электронным микроскопом. Электронный проектор нельзя открывать для смены исследуемого объекта; разборные же системы из-за недостаточно высокого вакуума не могут дать большую разрешающую способность. Кроме того, исследуемые молекулы должны быть достаточно устойчивыми, т. е. не распадаться при высоких температурах.

Естественно, возникает вопрос о дальнейшем шаге — о том, нельзя ли, уменьшая радиус закругления острия проектора, увидеть и более мелкие детали структуры молекул. Для этого необходимо, чтобы

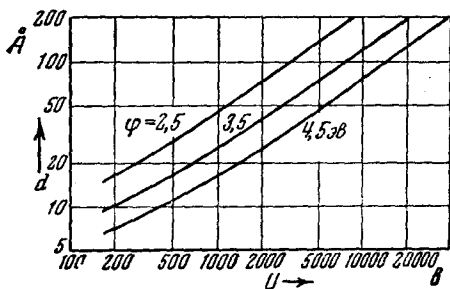


Рис. 2. Зависимость разрешающей способности электронного проектора от ускоряющего напряжения и работы выхода металла острия.

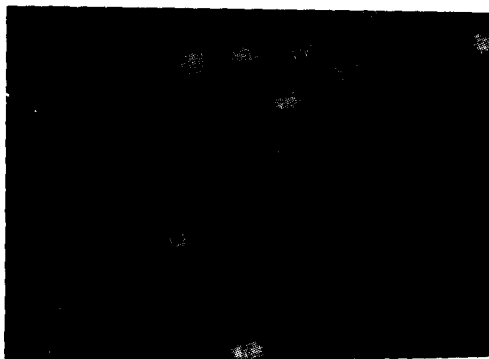


Рис. 3. Молекулы фталоцианина меди. Теневое изображение на экране электронного микропроектора.

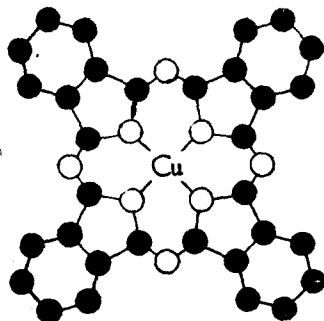


Рис. 4. Формы молекулы фталоцианина меди, по данным химии. Чёрные кружки—атомы углерода, белые — азота. Атомы водорода в бензольных кольцах не показаны.

испускающая электроны сферическая поверхность имела радиус кривизны порядка 20—30 ангстрем. Диаметр кружка размытия при этом составил бы около 5 ангстрем. Однако острия с  $r_0$ , меньшим 100—200 ангстрем, обычно уже не имеют достаточно правильной формы. Иногда форму их удаётся выправлять, испаряя на острие атомы вольфрама при очень малой интенсивности напыления. Другое, более важное препятствие заключается в том, что протяжённость потенциального барьера, сквозь который при холодной эмиссии вырываются полем электроны, — того же порядка величины, что и детали структуры молекулы (межатомные расстояния).

В. С. Вавилов

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Б. М. Царев, Электронный проектор как метод физико-химических исследований, УФН 36, 181 (1943).
2. E. Müller, Zeits. f. Physik 120, 277 (1943).
3. E. Müller, Discovery 9, 231 (1950).
4. А. Т. Бартамян, Журн. Физ. Химии 22, 763 (1948).

#### НОВЫЙ ПРИЁМНИК ИНФРАКРАСНЫХ ЛУЧЕЙ

В журнале «Оптика» \*) описан новый приёмник инфракрасных лучей, обладающий, согласно утверждению автора, очень малой инерцией и принимающий без ослабления сигнала, модулированные с частотой 20000 герц. Описываемый приёмник представляет собой полосу вольфрамовой жести, помещённую в откачанный баллон с окном из кристалла KRS 5 (диаметр 40 мм, толщина 3 мм). Вольфрамовая лента накаливается электрическим током до высокой температуры (2000° К). Излучение ленты собирается линзой ( $F = 20$  мм, диаметр — 20 мм) на цельный вакуумный фотоэлемент. Инфракрасные лучи от источника излучения (чёрное тело при 231° К;  $\lambda_{\text{макс}} = 3,1 \mu$ ; плотность излучения  $14,6 \text{ вт/см}^2$ ; отверстие  $0,02 \text{ см}^2$ ) собирались поочередным с передней стороны зеркалом ( $f = 120$  мм, диаметр — 60 мм) на диафрагме диаметром 2 мм. Диафрагма с помощью второго подобного же зеркала проектировалась в отношении 1 : 1 на накалённую вольфрамовую ленту. Угол между падающими и выходящими лучами составлял около 33°. Перед диафрагмой помещалось модуляционное устройство.

Под действием инфракрасных лучей поверхностная температура вольфрамовой ленты повышается (в условиях опыта приблизительно на  $0,3^\circ$ ), соответственно возрастает её излучение, а следовательно, и фототок, который поступает в усилитель, настроенный в резонанс с частотой модуляции инфракрасных лучей. Постоянная составляющая фототока отсекается, и величина тока на выходе усилителя, измеряемая гальванометром, будет поэтому пропорциональна интенсивности потока инфракрасных лучей. Автор приводит следующие данные, характеризующие новый приёмник: поток энергии на зеркало —  $8,7 \cdot 10^{-5} \text{ вт}$ ; из них лентой поглощалось  $1,4 \cdot 10^{-5} \text{ вт}$ , в результате чего её температура повышалась на  $0,33^\circ \text{С}$ . Поток видимого излучения с участка ленты, на которой фокусировались инфракрасные лучи, составлял  $8,0 \text{ вт}$ , а энергия модулированного излучения —  $1,4 \cdot 10^{-5} \text{ вт}$ . Соответственно этому на фотоэлемент падал поток излучения в  $5,5 \cdot 10^{-2} \text{ вт}$ , а модули-

\*) Р. Е. Weber, Optik 6, 290 (1950).