

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 распознанию 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 достичимые в лучших из электронных микроскопов с магнитными или электростатическими линзами¹.

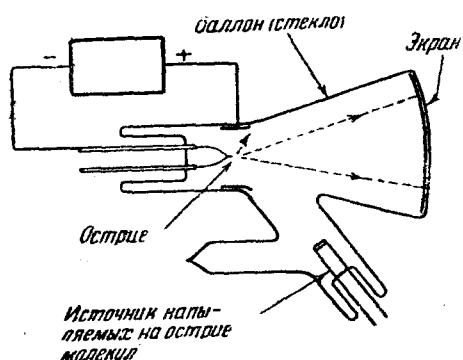


Рис. 1. Схема электронного микропроектора.

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 тень.

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

невое 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, достигает в некоторых опытах 180 и даже 110 ангстрем². 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 выхода³. 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 доступный для электронного микроскопа.

Мюллеру³ 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, попечерничок которой достигает примерно 14 ангстрем, подтверждает тот факт, что на снимке рис. 3 мы имеем дело с изображением отдельных молекул.

Нельзя, разумеется, недооценивать и трудностей 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

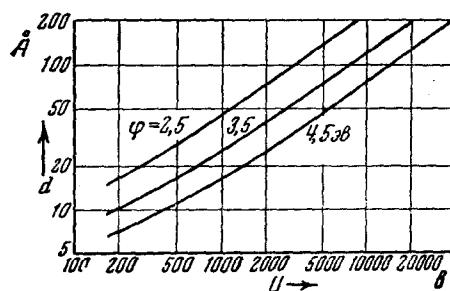


Рис. 2. Зависимость разрешающей способности электронного проектора от ускоряющего напряжения и работы выхода металла острия.

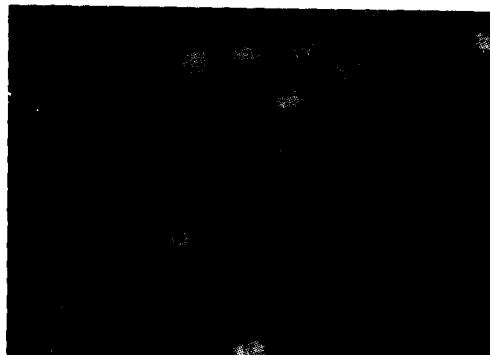


Рис. 3. Молекулы фталоцианина меди. Теневое изображение на экране электронного микропроектора.

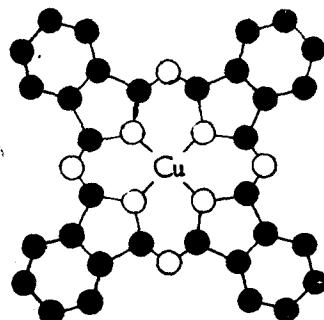


Рис. 4. Формы молекулы фталоцианина меди, по данным химии. Чёрные кружки — атомы углерода, белые — азота. Атомы водорода в бензольных кольцах не показаны.

испускающая электроны сферическая поверхность имела радиус кривизны порядка 20—30 ангстрем. Диаметр кружка размытия при этом составил бы около 5 ангстрем. Однако острая с r_0 , меньшим 150—200 ангстрем, обычно уже не имеют достаточно правильной формы. Иногда форму их удается выпрямлять, испаряя на острие атомы вольфрама при очень малой интенсивности напыления. Другое, более важное препятствие заключается в том, что протяженность потенциального барьера, сквозь который при холодной эмиссии вырываются полем электроны, — того же порядка величины, что и детали структуры молекулы (межатомные расстояния).

B. C. Вавилов

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Б. М. Царев, Электронный проектор как метод физико-химических исследований, *УФН* 36, 181 (1945).
2. Е. Müller, *Zeits. f. Physik* 120, 277 (1943).
3. Е. Müller, *Discovery* 9, 291 (1950).
4. А. Т. Бартанян, Журн. Физ. Химии 22, 763 (1948).

НСВЫЙ ПРИЁМНИК ИНФРАКРАСНЫХ ЛУЧЕЙ

В журнале «Оптика»*) описан новый приёмник инфракрасных лучей, обладающий, согласно утверждению автора, очень малой инерцией и принимающий без ослабления сигналы, модулированные с частотой 2000 герц. Описываемый приёмник представляет собой полоску вольфрамовой жестяи, 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 — 25 мм) на цилиндрический вакуумный фотоэлемент. Инфракрасные лучи от источника излучения (чёрное тело при 531° К; $\lambda_{\max} = 3,1 \mu$; плотность излучения $14,6 \text{ вт/см}^2$; отверстие $0,2 \text{ см}^2$) собирались по-золоченным с передней стороны зеркалом ($r = 120$ 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 35°. Перед диафрагмой помещалось модуляционное устройство.

Под действием инфракрасных лучей поверхностная температура вольфрамовой ленты повышается (в условиях опыта приблизительно на 0,5°), соответственно возрастает её излучение, а следовательно, и фототок, который поступает в усилитель, настроенный в резонанс с частотой модуляции инфракрасных лучей. Постоянная составляющая фототока отсутствует, 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 = $8,7 \cdot 10^{-10} \text{ вт}$; из них лентой поглощалось $1,4 \cdot 10^{-5} \text{ вт}$, в результате чего её температура повышалась на $0,48^\circ$ С. Поток видимого излучения с участка ленты, на которой фокусировались инфракрасные лучи, составлял $8,0 \text{ вт}$, а энергия модулированного излучения — $1,4 \cdot 10^{-2} \text{ вт}$. Соответственно этому на фотоэлемент падал поток излучения в $5,5 \cdot 10^{-2} \text{ вт}$, а модули-

*) P. E. Weber, Optik 6, 290 (1950).