ИОННЫЙ МИКРОПРОЕКТОР

В предыдущей заметке[3] нами были описаны опыты, в которых с помощью электронного микропроектора наблюдались изображения сравнительно простых молекул фталоцианина меди. При этом на изображении удавалось опознавать молекулы по их форме, сравнивая снимки с данными, полученными стереохимическим и рентгенографическим способами.

В электронном микропроекторе[1,2] полусферическая поверхность металлического острия отображается с большим увеличением на флуоресцирующем экране. Электроны вырываются из металла в сильном электрическом поле, напряжённость которого составляет около $5 \cdot 10^7$ *в/см*. При радиусе закругления острия порядка 10^{-5} *см* для этого достаточно анодное напряжение в несколько тысяч вольт. Разрешающая способность подобного проектора[1,3] составляет в среднем 20 Å, т. е. несколько превышает практически достигаемое разрешение современных моделей электронных микроскопов.

При расстоянии от острия до экрана $R = 10$ *см* увеличение составляет около миллиона. Кружок рассеяния, соответствующий точке на

поверхности острия, имеет диаметр 2 *мм*. Согласно данным Мюллера этот диаметр может быть выражен, как

$$D = 2R\sqrt{\frac{u}{U}},$$

где u — независимая от ускоряющего напряжения U тангенциальная начальная скорость электронов (в вольтах); u обычно составляет около 0,5 *в*. На разрешающую способность влияет также электронная диффракция; в случае вырывания электронов полем учесть это влияние количественно достаточно трудно[5].

Повышению разрешающей способности увеличением напряжённости поля мешает чрезвычайно быстро нарастающая плотность тока эмиссии, достигающая 10^8 *а/см*^{2} и приводящая к оплавлению острия.

Значительного роста разрешения можно ожидать, если заменить электроны положительными ионами с меньшей длиной волн де-Брогля и термическими начальными тангенциальными скоростями.

Уже в 1941 г. было показано[6], что, изменив знак потенциала острия электронного проектора, можно путём увеличения напряжённости поля

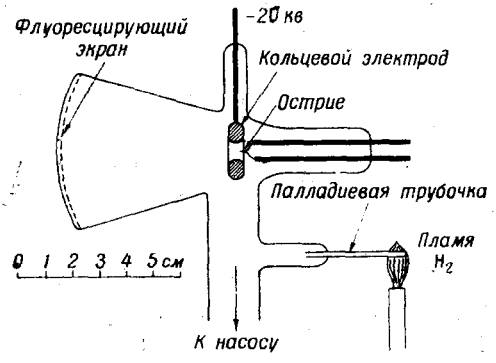

Рис. 1.

до 0,8—1,2 · 10^8 *в/см* заставить атомы бария срываться с острия, на поверхности которого они были адсорбированы. Если частицы покидают поверхность металла в виде положительных ионов, они должны двигаться прямолинейно к флуоресцирующему экрану и образовывать на нём картину поверхности острия, т. е. тех участков, на которых они были адсорбированы.

Плотность тока при этом явлении, названном Мюллером «десорбцией в поле», весьма мала. В моноатомном слое бария на 1 *см*^{2} поверхности приходится около 10^{14} атомов, а так как поверхность эмитирующей части острия составляет менее 10^{-9} *см*^{2}, то перенесённый при удалении ионов заряд составит всего 10^{-14} кулона. Для появления едва обнаруживаемого изображения на экране интенсивность должна быть приблизительно в миллион раз больше.

Это может быть осуществлено быстрым повторением процессов адсорбции и десорбции в электрическом поле. Для этого отнюдь не обязательна подача ускоряющего напряжения импульсами. Как только нейтральные частицы занимают место на поверхности, они отдают свой электрон, десорбируются в качестве положительных ионов и летят к экрану. Пути их почти совпадают с траекториями электронов в микро-

проекторе, с той разницей, что тангенциальная составляющая скорости по порядку величины соответствует тепловой энергии. Резкость изображения в результате этого значительно возрастает.

В настоящее время трудно указать элементы, ионы которых давали бы наилучшие результаты в подобных опытах. Для этой цели удобен водород, размеры атома которого меньше, чем у атомов металла, образующего остриё; адсорбция в этом случае имеет место при впуске малого количества водорода в баллон проектора. Напряжённость поля, при которой имеет место десорбция, однако, в этом случае много выше, чем для бария.

На рис. 1 изображена схема ионного (протонного) микропроектора[5]. Изображение на экране наблюдалось в лупу или фотографировалось с помощью светосильного объектива. Вследствие малых интенсивностей следует ожидать лучших результатов при внутривакуумном фотографировании, когда протоны непосредственно бомбардируют пластинку. Однако естественно, что резиновые и другие уплотнения, применяемые в «шлюзах» для пластинок электронных микроскопов, в данном случае неприменимы.

Вначале, после откачки, прибор испытывался с отрицательным остриём, т. е. в качестве электронного проектора. При этом можно было судить о совершенстве поверхности острия. На рис. 2 приводится ограниченное отверстием кольцевого электрода изображение поверхности вольфрамового острия. На поверхности видны следы адсорбированного углерода, о чём можно судить по светлому кольцу, окружающему центральную плоскость 110, и по появлению плоскостей 334 вокруг полюсов октаэдра[7]. Одновременно с углеродом на поверхности адсорбировался водород, находившийся внутри прибора во время наблюдения и экспозиции. При анодном напряжении в 3,3 *кв* остриём эмитировался ток 10^{-5} ампера; согласно теории[8] при работе выхода $\varphi = 4{,}8$ *эв* этому соответствует радиус острия $r = 940$ ангстремам. Напряжённость поля составляет $5{,}4 \cdot 10^7$ *в/см*. На экране, удалённом на $R = 45$ *мм*, возникает изображение, увеличенное приблизительно в $\frac{R}{r} = 480\,000$ раз. Радиус кружка размытия (определяющий разрешение), который нельзя достаточно хорошо определить по приводимому автором снимку, равен 1,2 *мм* и соответствует 25 Å на объекте.

После изменения знака потенциала острия напряжение между остриём и кольцевым электродом должно быть значительно повышено, прежде чем на экране возникнет изображение. При давлении водорода около 10^{-3} *мм* рт. ст. при разности потенциалов 12 *кв*, т. е. напряжённости поля $2 \cdot 18^8$ *в/см*, появлялось очень слабое, но резкое изображение.

При дальнейшем росте напряжения яркость росла, резкость же оставалась неизменной. Кроме того, яркость была пропорциональна давлению, которое в описываемом приборе удавалось повышать до $6 \cdot 10^{-3}$ *мм* без возникновения тлеющего разряда. Снимок, приводимый на рис. 3, сделан при 17 *кв*, т. е. $2{,}8 \cdot 10^8$ *в/см*, на высокочувствительной плёнке, при $F = 1 \cdot 2$ и экспозиции в 30 сек. В сравнении с электронным изображением резкость очень велика; автор утверждает, что диаметр кружка рассеяния составлял 0,1—0,2 *мм*, т. е. соответствовал 2—4 Å на объекте. Фотографический снимок вследствие помех за время экспозиции и возможных колебаний потенциала зёрен флуоресцирующего экрана значительно менее резок. Однако на снимке видно, что светлое окаймление плоскости 110 разбилось на «ступеньки». Концентрическое диффузное светлое пятно большого радиуса в центре возникает вследствие вторичной электронной эмиссии с кольцевого электрода, вызываемой попадающими на него протонами, что доказывается отклонением в магнитном поле.

Ионное изображение довольно контрастно. Края, окружающие плоскость 110, обнаруживали, по словам автора, при наблюдении в лупу и хорошей адаптации глаза в темноте мелкие, регулярно чередующиеся выступы и ступеньки, расстояния между которыми близки к постоянной кристаллической решётки. С целью устранения возможных ошибок за счёт зернистого строения экрана, наблюдения были повторены в другом приборе с увеличением, равным 10^6 ($R = 10$ *см*). Кроме упомянутых «ступенек», наблюдались многочисленные яркие сцинтиллировавшие точки, не ориентированные относительно кристаллической решётки. Возможно, что в этих точках имели место нарушения решётки, на которых десорбция происходила с большей лёгкостью.

Рис. 2.

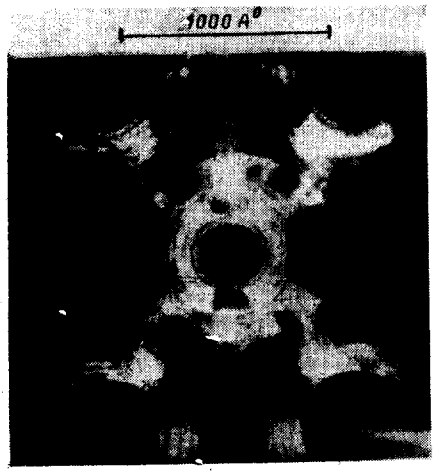

Рис. 3.

Поверхность одного и того же монокристаллического вольфрамового острия при отображении электронами (рис. 2) и протонами (рис. 3).

Описанные результаты, касающиеся разрешающей способности, соответствуют тому, чего можно ожидать на основании соображений, применявшихся к электронному микропроектору. Тангенциальная скорость отображающей частицы в этом случае соответствует энергии максимума максвелловского распределения, т. е. $u = 0{,}04$ *в* при комнатной температуре.

Ускоряющее напряжение в рассматриваемом примере составляло 17 *кв*. Диаметр кружка рассеяния $D = 0{,}14$ *мм*, или 2,9 Å, т. е. почти в 10 раз меньше, чем при отображении электронами. При охлаждении всего прибора жидким воздухом кружок рассеяния уменьшился бы до 1,6 Å. Влияние электронной диффракции при этом сказывается незначительно, так как длина волны де-Брогля для протона с энергией 0,04 *в* составляет 1,42 Å; при скорости в 2 вольта, достигаемой на расстоянии 3 Å от поверхности (с учётом «силы изображения»), длина волны равна всего 0,2 Å.

При достигнутом давлении в $6 \cdot 10^{-3}$ *мм* рт. ст. на полусферу ра-

дпусом в 940 Å попадает $5{,}2 \cdot 10^9$ молекул водорода в секунду. Ионный ток, соответствующий удвоенному количеству протонов, вследствие диссоциации молекул может достичь $1{,}66 \cdot 10^{-9}$ *а*. В действительности, при описанных условиях ток составлял $6 \cdot 10^{-8}$ *а*. Повидимому, следует считать, что в сильном электрическом поле на остриё попадает значительно больше молекул, чем это следует из газокинетической теории. Многие из пролетающих молекул могут быть притянуты, как диполи, в сильно неоднородном поле.

Важным вопросом в области «микроскопии атомных размеров» является воздействие отображающих частиц на объект исследования. Молекулы, захватываемые остриём, падают на него со скоростью, превышающей термическую. Если частица, характеризуемая поляризуемостью α, втягивается из области нулевого поля в область, где напряжённость поля равна E, её энергия $W = \frac{\alpha}{2} E^2$. В поле $2{,}8 \cdot 10^8$ *в/см*, если считать, что для молекулы водорода $\alpha = 0{,}8 \cdot 10^{-24}$ *см*^{3} энергия соударения с остриём составляет $\frac{1}{6}$ *эв*, чего недостаточно для того, чтобы вызвать разрушение поверхности вольфрама.

Если напряжённость поля превышает $(2{,}9 \pm 3) \cdot 10^8$ *в/см*, изображение на экране становится нерезким. Следует считать, что в этом случае возникновение ионов происходит не на поверхности кристалла острия, а в пространстве, окружающем остриё.

При напряжённостях поля между 2 и $3 \cdot 10^8$ *в/см* нагревание острия до 400—500° К приводит к полной потере резкости изображения. Возможно, что адсорбированные атомы не могут в этом случае занять определённого положения на поверхности вследствие термических колебаний. При более высоких температурах острия (от 800 до 900°) в сильном электрическом поле разрушается кристаллическая решётка вольфрама.

Результаты описанных опытов, повидимому, указывают на то, что с помощью ионного микропроектора достигнуто разрешение, позволяющее непосредственно «видеть» кристаллическую решётку металла. Разумеется, полученные данные носят предварительный характер, так как ввиду технических трудностей, связанных с внутривакуумной съёмкой, наблюдения производились визуальным методом. Автор считает, что можно ожидать хороших результатов, достаточно сильно охлаждая остриё и применяя в качестве отображающих частиц ионы лития, десорбция которых должна происходить в более слабых электрических полях, или ионы гелия. Исследование металлов, кристаллическая решётка которых связана слабее, чем у вольфрама, повидимому, возможно только в более слабых полях у острия.

Следует считать, что описанный метод будет с успехом применён для изучения особенностей строения реальных кристаллов.

В. С. Вавилов

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Б. М. Царёв, Электронный проектор как метод физико-химических исследований, УФН **36**, 181 (1948).
2. E. W. Müller, Zeits. f. Physik **106**, 541 (1937).
3. В. С. Вавилов, УФН **42**, 580 (1950).
4. E. W. Müller, Zeits. f. Physik **120**, 270 (1943).
5. E. W. Müller, Zeits. f. Physik **131**, 136 (1951).
6. E. W. Müller, Naturwiss. **29**, 533 (1941).
7. E. W. Müller, Naturwiss. Rundschau, 255 (1951).
8. R. Haefer, Zeits. f. Physik **116**, 604 (1940).