

ОБНАРУЖЕНИЕ ВЫТЯГИВАНИЯ ОСТРИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ.

В. Г. Павлов, А. А. Рабинович, В. Н. Шредник

Обнаружено, что при нагревании вольфрамовых острий до 2300 — 2700°К в электрическом поле $(3 - 6) \cdot 10^7$ в/см вопреки прежним наблюдениям происходит заострение и удлинение острий в направлениях нормальных к плотноупакованным граням. Опыты проводились методами автоэлектронной микроскопии с остриями радиусом 0,1 — 1,5 мкм.

Прогрев металлического острия приводит к его затуплению: уменьшению длины и увеличению радиуса кривизны вершины [1, 2]. Приложением электрического поля можно уменьшить скорость затупления и остановить его при некотором поле E_0 [3]. Классическая макроскопи-

ческая теория Херинга [4], упрощенная предположением об изотропности материала острия [3], предсказывает зависимость скорости отступления кончика острия от величины поля E , хорошо согласующуюся с полученной для вольфрама экспериментально [3]. По этой теории, при $E > E_0$ острие должно вытягиваться полем (увеличивать длину и уменьшать радиус кривизны). Однако, в экспериментах такой рост острия вперед при прогреве в электрическом поле никогда не наблюдался (см., например [5]). Это объяснялось либо тем, что зарождение новых атомных слоев на гладких плотноупакованных гранях затруднено [3], либо отсутствием значительной диффузии атомов к вершине острия [5]. Вместо вытягивания при $E > E_0$ до сих пор удавалось наблюдать лишь процесс "перестройки" вершины острия в многогранную форму, а при еще больших E появление на поверхности хаотических "нагромождений атомов" или ступеней, высота которых ограничивалась полем испарением [5, 6].

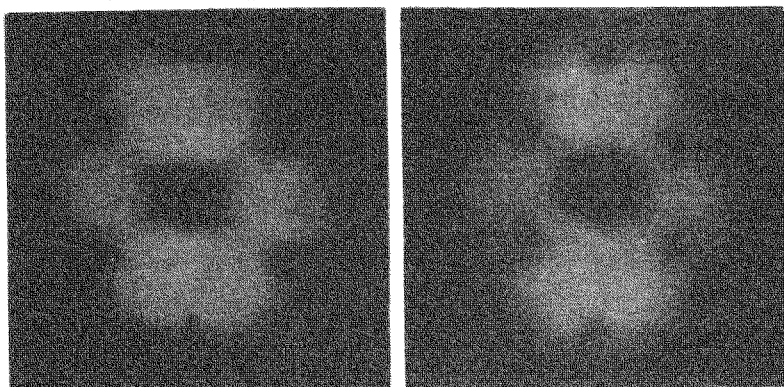


Рис. 1. Автоэлектронные изображения острий: а) исходного б) вытянутого полем ("заостренного") и отожженного.

Наши опыты проводились в автоэмиссионном микроскопе с давлением остаточных газов $< 10^{-9}$ тор на остриях из вольфрама, ориентированных параллельно кристаллографическому направлению $< 011 >$, предварительно отожженных при 3000°K (рис. 1, а). О форме острия судили по наблюдению автоэлектронного изображения и по характеристикам Фаулера-Нордгейма. Из последних определялась также величина напряженности электрического поля у вершины острия в предположении, что работа выхода вольфрама $4,4 \text{ эв}$.

Прогрев острия при $T = 2300 - 2700^\circ\text{K}$ в присутствии положительного электрического поля $E = (3 - 6) \cdot 10^7 \text{ в/см}$ (величина поля определялась для отожженного острия) в течение промежутков времени от нескольких минут до нескольких часов приводил к вытягиванию острия. При этом поверхность острия кроме того перестраивалась и на ней появлялись вышеупомянутые "нагромождения атомов". Поэтому перед снятием характеристики Фаулера - Нордгейма острия отжигались в отсутствие поля до достижения формы отжига (рис. 1, б).

На рис. 2 представлены типичные графики Фаулера - Нордгейма для отожженного острия до и после описанного выше прогрева в поле.

Наклон характеристик уменьшается (в приведенном примере более чем в два раза), что указывает на увеличение полевого множителя и, следовательно, на удлинение острия и уменьшение радиуса его кривизны.

В некоторых случаях (в полях $E > 5 \cdot 10^7$ в/см) в процессе отжига наблюдались автоэлектронные изображения, аналогичные показанному на рис. 3. На изображении видно, что на поверхности исходного острия в разных направлениях выросли несколько острий-наростов. Прогрев острия до достижения обычной формы отжига (рис. 1, а) сопровождался в таких случаях значительным затуплением острия.

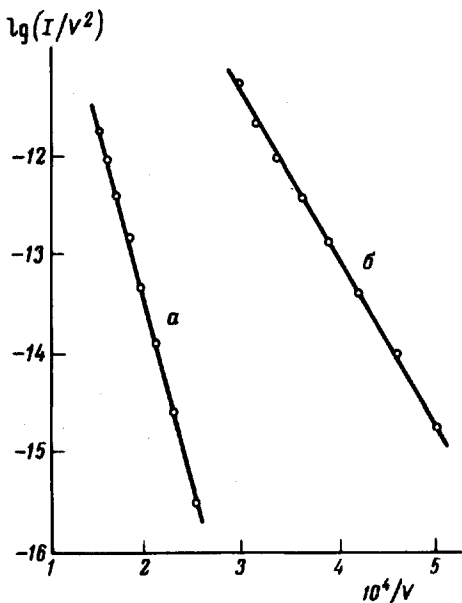


Рис. 2. Характеристики Фаулера – Нордгейма острий: а) исходного, б) вытянутого полем и отожженного

На основе макроскопического подхода явления, происходящие при прогреве кристаллического острия в электрическом поле, можно объяснить конкуренцией давления p_γ , связанного с поверхностным натяжением,

и давления $(p_E = -\frac{E^2}{8\pi})$ электрического поля.

Если $E > E_0$ и $|p_E| > |p_\gamma|$, то изменение формы острия может идти с уменьшением локальных радиусов кривизны поверхности и, следовательно, будут расти величины локальных полей E и давлений $|p_E|$ и $|p_\gamma|$. Возможны 2 случая: 1) $|p_E|$ растет медленнее, чем $|p_\gamma|$ (практически это значит, что E растет медленнее, чем по закону обратного квадратного корня из наименьшего радиуса кривизны). Острие может придти в равновесную форму. По-видимому, этот случай реализуется при "перестройке". 2) $|p_E|$ растет быстрее, чем $|p_\gamma|$. При этом не может быть достигнуто равновесное состояние, поверхность кристалла оказывается неустойчивой, "вспучивается", на ней растут острия-наросты, подобные изображенным на рис. 3. Если это условие выполняется на самой вершине острия, то происходит вытягивание острия.

С микроскопической точки зрения рост острий можно объяснить следующим образом: при достаточно больших полях за счет переноса ато-

мов вдоль поверхности к участкам наибольшего поля создается пересыщение "двумерного газа", достаточное для зарождения и роста новых атомных слоев. Если достаточное пересыщение имеет место на нескольких участках поверхности, то одновременно растут несколько острий-наростов (см. рис.3). Если пересыщение достигается только на вершине острия, то происходит вытягивание острия. Рост острий прекращается, когда скорости полевого испарения и поступления материала к участкам наибольшего поля выравниваются. При этом поверхность кристалла, подобно ступеням Дрекслера, приходит в квазистационарное состояние.

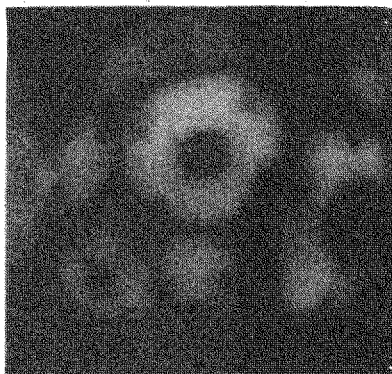


Рис. 3

Таким образом, при достаточно высоких температурах и полях реализуются условия для относительно быстрого роста острия в направлениях, перпендикулярных плотноупакованным граням; в том числе грани, расположенной на вершине острия.

Этот процесс может быть использован, в частности, для заострения автоэлектронных и автоионных эмиттеров в высоком вакууме без вскрытия прибора. Это существенно расширяет возможности исследований методами автоэмиссионной микроскопии кристаллов, хорошо очищенных в вакууме.

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе

Поступила в редакцию
23 января 1973 г.

Литература

- [1] E.W.Müller, Z. Phys., 126, 642, 1949.
- [2] I.Barbour et al Phys. Rev., 117, 1452, 1960.
- [3] W.P.Dyke et al, I. Appl. Phys., 31, 790, 1960.
- [4] C.Herring, Structure and Properties of Solid Surfaces Univers. Chicago Press, Chicago, 1953, p. 5.
- [5] И.Л.Сокольская. В сборнике "Поверхностная диффузия и растекание" М., изд. Наука, 1969, стр. 108.
- [6] M.Drechsler, Z.Electrochemil., 61, 48, 1957.