

Полевая десорбционная микроскопия термополевых формоизменений

© В.Г. Павлов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: vpavlov@ms.ioffe.rssi.ru

(Поступила в Редакцию 10 ноября 2004 г.
В окончательной редакции 14 декабря 2004 г.)

С помощью методов полевой эмиссионной микроскопии и полевой десорбционной микроскопии непрерывного режима изучены изменения формы вольфрамового острия радиуса 500–1000 nm при нагревании в электрическом поле. Наблюдения проводились непосредственно после термополевой обработки без сглаживания микровыступов прогревом или полевым испарением. Ребра перестроенного в многогранник острия состоят из моноатомных ступеней шириной ~ 1 nm и длиной ~ 100 nm. Микровыступы размером ~ 10 nm имеют форму пирамиды или клина с вершиной в виде единичного атома или моноатомного ребра и боковыми гранями, продолжающими боковые грани перестроенного острия или нароста, на которых они находятся. Наросты имеют форму ступенчатых усеченных пирамид с моноатомными ребрами. Предложено объяснение наблюдаемых явлений, основанное на рассмотрении конкурирующих процессов поверхностной диффузии, кристаллического роста в электрическом поле и полевого испарения.

1. Введение

Изменения формы металлических кристаллов, которые происходят при нагревании в электрическом поле (термополевая обработка), ранее изучались с помощью полевой электронной, полевой ионной микроскопии, просвечивающей электронной микроскопии и микроскопии высокотемпературного полевого испарения. Объектом изучения обычно является металлическое острие, вершина которого после высокотемпературного прогрева представляет собой монокристалл, имеющий на поверхности плоские грани и переходные округленные области. Были выявлены и изучены основные типы формоизменений: перестройка вершины острия в многогранник, образованный наиболее плотно упакованными плоскостями; формирование наростов на плотноупакованных гранях; образование микровыступов нанометрового размера на углах и ребрах кристалла и наростов [1–5].

Применявшиеся методики полевой эмиссионной микроскопии позволяют наблюдать области поверхности с наибольшей напряженностью поля, т.е. выступающие острые участки поверхности. Если имеются микровыступы, то на полевых эмиссионных изображениях только они и видны [1,3–5]. В просвечивающем электронном микроскопе виден профиль кристалла [2,6]. В обоих случаях остаются ненаблюдаемыми промежуточные между выступающими частями кристалла области поверхности. Для исследования этих областей микровыступы и острые углы затуляют с помощью прогрева [3,5] и на основании наблюдения полевых эмиссионных изображений острия после прогрева делают выводы об исходной форме, которая была до прогрева, т.е. о форме острия, получившейся в результате термополевой обработки. При использовании полевой ионной микроскопии аналогичная процедура — удаление выступающих частей — выполняется с помощью низкотемпературного полевого испарения [4].

Дополнительную информацию о недостаточно изученных участках поверхности, образующихся при термополевых формоизменениях, и происходящих на них процессах может предоставить методика полевой десорбционной микроскопии непрерывного режима [7–9]. С ее помощью можно также получить более точные сведения о реальной форме наростов и микровыступов непосредственно после термополевой обработки, а также о форме и структуре поверхности перестроенного острия.

В настоящей работе предпринята попытка изучения состояния поверхности непосредственно после прогрева в электрическом поле с помощью полевой десорбционной микроскопии непрерывного режима. В качестве исследуемого материала выбран вольфрам, для которого наиболее полно изучены термополевые формоизменения, а в качестве изображающих адсорбатов — калий и цезий, с помощью которых можно получить полевые десорбционные изображения при наименьших значениях напряженности поля и температуры и соответственно при наименьшем воздействии на исследуемую поверхность.

2. Полевая десорбционная микроскопия непрерывного режима

В полевой десорбционной микроскопии непрерывного режима в качестве изображающих частиц используются ионы легко ионизируемых и слабо связанных с поверхностью изображаемого объекта веществ, например щелочных и щелочно-земельных металлов. На поверхность острия наносится слой щелочного металла толщиной порядка моноатомного слоя. Затем прикладывается десорбирующее поле („плюс“ на острие), и движущиеся по радиально расходящимся траекториям

десорбирующиеся ионы щелочного металла создают на экране полевого эмиссионного микроскопа увеличенное изображение поверхности вершины острия. При этом температура острия поддерживается достаточно высокой для поверхностной диффузии изображающего адсорбата и для его возобновления в зоне десорбции. Обычным приемом получения изображений является предварительный подъем напряжения для десорбции всего адсорбата с вершины острия, а затем понижение напряжения и наблюдение изображений, получающихся за счет диффузии адсорбата с боковой поверхности острия и полевой десорбции его с вершины.

Характер десорбционного изображения зависит от многих параметров: приложенного напряжения, температуры, поверхностной концентрации адсорбата на изображаемом участке поверхности и в его окрестности, работы выхода, формы и атомарной структуры поверхности. Для целей данной работы наиболее ценным является возможность при изменении приложенного напряжения проследить за различными участками поверхности. Если после десорбции адсорбата с вершины постепенно снижать напряжение, то сначала на изображении появятся области периферии острия с наименьшей напряженностью поля, так как до участков с более высокой напряженностью поля адсорбат не доходит из-за десорбции. При понижении напряжения появляется изображение областей с большей напряженностью поля. Таким образом, в отличие от других видов полевой эмиссионной микроскопии наблюдаются не только участки поверхности с максимальной напряженностью поля. В случае острия неправильной формы поведение изображения может быть более сложным, поскольку диффузия адсорбата к изображаемому участку проходит вдоль пути с немонотонным изменением напряженности поля. Прослеживая изменения изображения при повышении и понижении напряжения, можно попытаться определить форму поверхности острия.

3. Методика проведения эксперимента

Эксперименты проводились в металлической сверхвысоковакуумной установке полевого эмиссионного микроскопа с давлением остаточных газов менее 10^{-10} mm Hg. Полевые эмиссионные и десорбционные изображения получались с помощью детектора из двух микроканальных пластин и люминесцентного экрана, снимались на видеокамеру и вводились в компьютер. Напряженность электрического поля F определялась из вольт-амперных характеристик Фаулера–Нордгейма с подстановкой средней автоэмиссионной работы выхода чистого вольфрама 4.44 eV. Острие из вольфрама предварительно прогревалось при температуре 2800 K в течение десятков минут для очистки и формирования исходной (близкой к равновесной) формы микрокристалла.

Эксперимент осуществлялся следующим образом: острие нагревалось до требуемой температуры T , затем к нему прикладывался электрический потенциал

положительной полярности; если при этом происходило полево испарение, то изображение, формируемое ионами вольфрама, записывалось видеокамерой, после завершения термополевой обработки прекращался нагрев острия и после его охлаждения снималось высокое напряжение. После этого фиксировались вольт-амперные характеристики полевой электронной эмиссии и полевые электронные изображения. Затем на острие наносился цезий или калий и наблюдались полевые десорбционные изображения при варьировании электрического поля. Температура острия при этом постепенно повышалась начиная с комнатной. После того как достигалась температура термической десорбции изображающего адсорбата и десорбционные изображения пропадали, снова регистрировались характеристики полевой электронной эмиссии и полевые электронные изображения.

4. Результаты эксперимента

Наблюдения полевых десорбционных изображений поверхности непосредственно после термополевой обработки острия в основном подтверждают общую схему формоизменений, полученную из анализа полевых электронных и полевых ионных изображений, зафиксированных после сглаживания обработанного острия прогревом или низкотемпературным полевым испарением. В то же время для наблюдаемых процессов и формируемых образований были получены существенные уточнения.

На стадии перестройки и после полной перестройки (при высоких T и низких F) наблюдалось не только расширение плотноупакованных граней, но и образование на них новых атомных слоев — послойный кристаллический рост. Эти слои проявлялись на полевых десорбционных изображениях в виде контура ступени, не доходящей до края грани. На полевых электронных изображениях эти ступени не видны, картина состоит только из ярких пятен, соответствующих углам перестроенного острия, независимо от того, есть ступени или нет. Послойный кристаллический рост на этой стадии термополевых формоизменений не приводил к образованию наростов и микровыступов.

На стадии полной перестройки, когда на полевых электронных изображениях видны только трехгранные углы $\langle 111 \rangle$, образованные пересечением плоскостей типа (011), а вершина острия ограничена только плотноупакованными гранями (011) или гранями (011) и (001), с помощью полевых десорбционных изображений (рис. 1) удалось изучить структуру ребер, разделяющих грани. Грани разделены или моноатомными ребрами, или ребрами, имеющими более сложную структуру (рис. 2). Ребра, разделяющие грани (011), образованы ступенями кристаллографической плоскости (112). Ступени имеют ширину (поперек ребра) от одного до нескольких атомных рядов. На рис. 1, с изображение ребра, имеющего длину ~ 500 nm разделено на шесть ступеней, т.е. в данном случае длина ступени вдоль

ребра составляет ~ 100 нм. Вследствие того что увеличение в проекционном полевом эмиссионном микроскопе поперек ребра намного больше, чем вдоль, ступени длиной ~ 100 нм и шириной 1 нм на полевом десорбционном изображении имеют обратное соотношение размеров: ширина (поперек ребра) больше, чем длина. На полевых электронных изображениях структура ребер никак не проявляется. Наблюдаются только трехгранные углы $\langle 111 \rangle$ в виде ярких точек, размытых треугольников или трехлучевых звезд. Ступени поперек ребра (рис. 1, *b*) появлялись преимущественно тогда, когда во время термополевой обработки происходило полевое испарение с вершины трехгранного угла $\langle 111 \rangle$. Если полевого испарения не было, то ребро представляет собой моноатомный ряд или состоит из преимущественно продольных ступеней (рис. 1, *a*).

При низких T и высоких F огранки острия не происходит, образуются ступени различной высоты и ширины (в зависимости от T и F). Чем больше T , тем выше и шире ступени и меньше их число. В плане ступени представляют собой многогранники, они окружают грани (100), (110) и (112) исходного острия. На углах ступеней появляются микровыступы, с них происходит полевое испарение, которое проявляется в виде изображений микровыступов на экране. При повышении F изображения микровыступов, образующие кольца, сдвигаются к центрам граней и исчезают, получается картина „схлопывающихся колец“ [10]. Центральные ступени уменьшаются в размере (по ширине) и исчезают, на периферии граней появляются новые ступени.

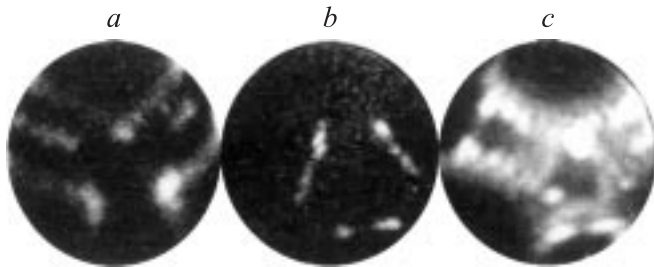


Рис. 1. Полевые десорбционные изображения ребер перестроенного острия. *a* — при термополевой обработке не было полевого испарения; *b, c* — происходило полевое испарение с вершины угла $\langle 111 \rangle$.

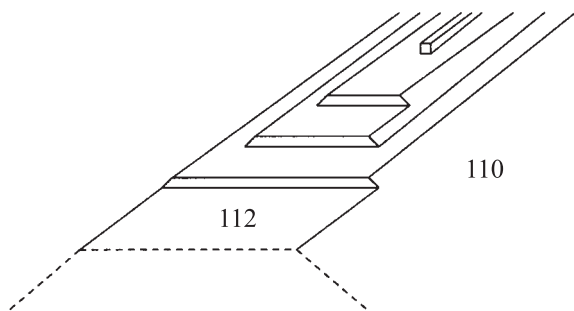


Рис. 2. Схематическое изображение ребра перестроенного острия со ступенями плоскости (112).

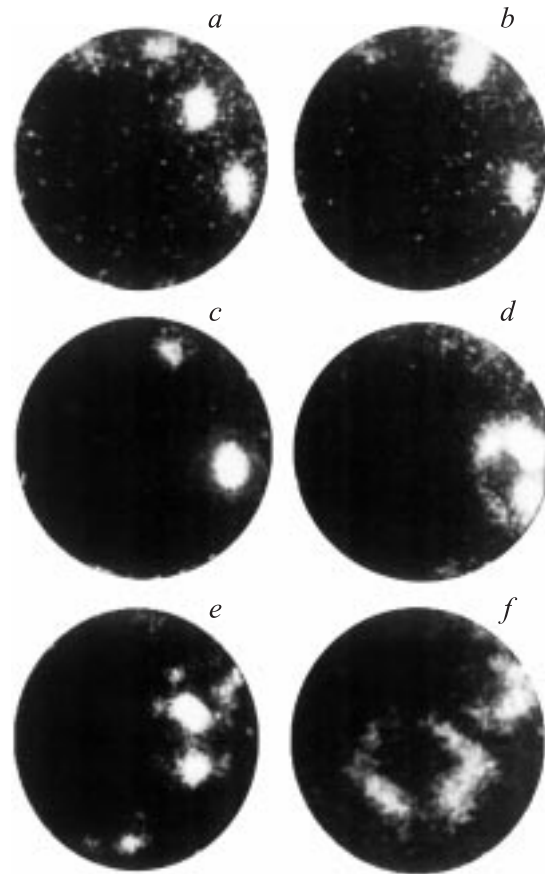


Рис. 3. Изображения микровыступов и наростов. *a* — полевое испарение при $T = 2400$ К; *b* — то же при $T = 1550$ К; *c-f* — полевая десорбция цезия.

Наросты на плотноупакованных гранях (100) и (110) появляются при T и F более высоких, чем при перестройке. Полевые десорбционные изображения подтверждают, что наросты являются усеченными пирамидами или ступенчатыми усеченными пирамидами (рис. 3, *f*). Верхняя плоскость пирамиды представляет собой многоугольник (в случае нароста на грани (100) квадрат или прямоугольник). На краю каждой ступени нароста находятся микровыступы.

На этой стадии формоизменений (начало образования наростов) часто наблюдались колебания тока полевого испарения с микровыступа: изображение микровыступа на картине полевого испарения пропадало и снова появлялось на том же месте. Другим интересным фактом является то, что полевое испарение с микровыступа при неизменном приложенном напряжении может происходить в очень широком интервале температур (~ 1000 К, рис. 3, *a, b*). При повышении F число микровыступов увеличивалось, их изображения на картинах полевого испарения передвигались. Наблюдался эффект схлопывания колец, подобный случаю образования и разрушения ступеней при низких T и высоких F . Острие при этом затуплялось. Увеличение радиуса острия определялось после сглаживания наростов прогревом.

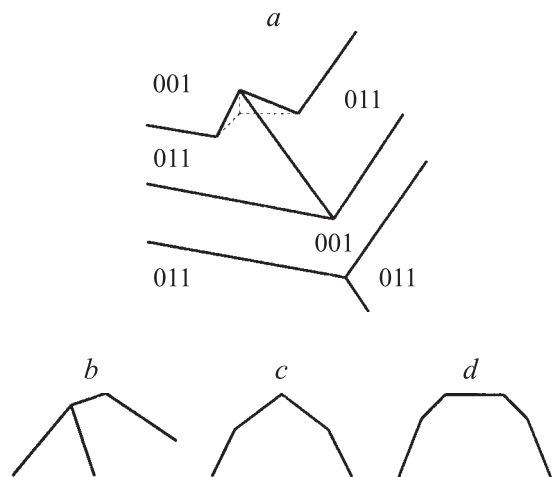


Рис. 4. Схематические изображения микровыступов. *a* — пирамидальный на краю нароста на грани (001); *b* — клиновидный; *c* — пирамида или клин на усеченной пирамиде; *d* — усеченная пирамида на усеченной пирамиде.

Полевые десорбционные изображения микровыступов и схематическое представление их формы показаны на рис. 3, *c–e* и 4. При постепенном повышении десорбирующего напряжения сначала появляются яркие точки — изображения вершин микровыступов (рис. 3, *c*), потом изображения плавно и скачками расширяются и на них проявляются грани и ребра микровыступов (рис. 3, *d, e*). Расширение в одних случаях идет симметрично во всех направлениях от вершины острия, а в других — преимущественно в одну сторону (рис. 3, *d, e*). Иногда происходит раздвоение изображения вершины микровыступа (рис. 3, *e*).

5. Обсуждение результатов

Выводы о форме получающихся при нагревании острия в электрическом поле образований сделаны на основе анализа динамики изменения полевых десорбционных изображений при изменении десорбирующего поля, а не по отдельным кадрам видеозаписи, приведенным здесь. Например, на рис. 1, *b* видно по одной ступени на каждом ребре перестроенного острия. При изменении поля изображение перескакивает с одной ступени на другую. При резком повышении поля можно зафиксировать все ступени на одном кадре (рис. 1, *c*).

Основная схема формоизменений, базирующаяся на результатах исследований, полученных с помощью полевой эмиссионной микроскопии, подтверждается. В то же время десорбционная микроскопия непрерывного режима позволила уточнить некоторые детали формоизменений и изучить особенности формы, не наблюдаемые другими методами, такие как структура ребер и углов перестроенного острия и наростов, а также форма микровыступов.

Наблюдавшиеся микровыступы всегда имели острые вершины, оканчивающиеся, по-видимому, одним атомом или монокристаллическим ребром. Однако наблюдение произошло после охлаждения острия. Из-за тепловой инерции охлаждение занимало некоторое время, в течение которого продолжались процессы поверхностной диффузии, кристаллического роста и полевого испарения. Если полевое испарение прекращалось раньше, чем диффузия, то микровыступ в том случае, когда его рост ограничивался полевым испарением, вследствие которого вершина была скруглена, мог достроиться до пирамиды. Следовательно, непосредственно во время прогрева в поле, когда происходили формоизменения и полевое испарение с микровыступа, микровыступ мог иметь форму, отличную от пирамиды. Это подтверждается и картинками полевого испарения, на которых изображения вершин микровыступов имеют достаточно большие размеры. Таким образом, микровыступы в процессе роста и термополевого испарения имеют форму пирамиды или клина с усеченной (рис. 4, *c, d*) или скругленной вершиной, а после охлаждения — форму правильной пирамиды или клина с острой вершиной в виде одного атома или монокристаллического ребра (рис. 4, *a–c*).

Десорбционные изображения показывают, что послойный рост на плотноупакованных гранях может происходить и на стадии перестройки, когда изменения формы ограничиваются переходом от частично скругленного острия к многограннику, а наростов и микровыступов нет. В таком случае остаются непонятными причины, по которым происходит переход от роста слоев с сохранением формы вершины острия в виде многогранника к образованию наростов. Непонятен и широкий интервал температур, в котором происходит полевое испарение с микровыступов на начальной стадии формирования наростов. Поскольку и полевое испарение, и поверхностная самодиффузия, обеспечивающая возобновление испаряемого материала на вершине микровыступа, очень резко зависят от температуры, полевое испарение с вершины микровыступа должно бы прекратиться при небольшом снижении температуры независимо от того, чем ограничивается скорость полевого испарения (самим процессом полевого испарения или диффузионным подводом материала). Другими необъясненными процессами являются прекращение полевого испарения микровыступа и возобновление его на том же месте через некоторое время. Попытки охладить острие в момент прекращения полевого испарения с микровыступа и последующие наблюдения с помощью полевой электронной и десорбционной микроскопии показали, что микровыступ наблюдался во всех случаях и не было замечено различий свойств микровыступов в зависимости от момента охлаждения (при наличии полевого испарения или при его отсутствии). Непонятными остаются и некоторые перемещения микровыступов во время термополевого воздействия. Только часть из этих перемещений связана с изменением формы поверхности, на которой находятся микровыступы.

Для объяснения наблюдаемых эффектов можно предложить схему процессов, происходящих при высокотемпературном прогреве острия в электрическом поле, основанную на конкуренции между поверхностной диффузией, послойным кристаллическим ростом и полевым испарением. Схема базируется на теории Херринга [11] и представлениях, развитых в работах [1–5, 12–14]. При высокой температуре на поверхности острия происходят отрыв атома от ступени (плоской сетки) с переходом в поверхностно адсорбированное состояние (разрушение атомных слоев), поверхностная диффузия (миграция) адсорбированных атомов, присоединение атомов к ступеням (рост атомных слоев). Результирующий перенос веществ определяется градиентом химического потенциала поверхностных атомов. В отсутствие внешнего электрического поля градиент химического потенциала и перенос вещества направлены в сторону уменьшения кривизны поверхности, т.е. от вершины острия на его боковую поверхность, слои на вершине острия разрушаются, а на боковой поверхности растут (происходит затупление острия). После длительного прогрева без поля острие приобретает квазиравновесную форму, процессы разрушения и роста атомных слоев приходят в равновесие.

Электрическое поле нарушает равновесие. Оно вносит вклад $-F^2/8\pi$ в свободную поверхностную энергию металла и химический потенциал поверхностно адсорбированных атомов [11]. Локальная напряженность поля на вершине острия и у краев плоских граней выше, чем на боковой поверхности острия и в центре плоских граней. Электрическое поле может компенсировать влияние кривизны, повернуть потоки переноса, прекратить затупление острия и привести к огранке острия плотноупакованными плоскостями. Огранка происходит вследствие большей скорости роста на рыхлых гранях и трудности зарождения новых атомных слоев на плотноупакованных плоскостях.

После полной огранки острия диффузионный поток продолжает поставку атомов на вершину острия на плоские грани и может создать достаточное поверхностное пересыщение (превышение поверхностной концентрации атомов над равновесной для процессов присоединения и отрыва атомов от двумерного островка) для образования двумерных зародышей нового слоя и роста нового атомного слоя. Если последовательно происходит рост новых слоев на всей грани, вершина острия сохраняет форму многогранника. Пересыщение у края грани больше, чем в центре ввиду большей напряженности поля и из-за того, что приток атомов происходит через край грани. Поэтому скорость зарождения и роста у края грани больше. Это напоминает условия, при которых происходит скелетный рост кристалла из раствора без его перемешивания. Зарождение нового слоя может произойти до завершения роста предыдущего слоя. При этом рост нижележащего слоя замедляется вследствие захвата части мигрирующих атомов новым слоем и частичного экранирования поля. Верхний слой может

„догнать“ нижний при образовании ступени удвоенной высоты. Напряженность поля на верхнем крае ступени возрастет, а на нижнем уменьшится, и одиночный атом, „приставший“ к краю ступени, с большой вероятностью перейдет на верхнюю плоскость ступени прежде, чем „дойдет“ следующих атомов и образует зародыш нового атомного ряда. Рост ступени в ширину замедлится или остановится.

Этот же процесс может привести к образованию микровыступа у края ступени, если зарождение новых слоев значительно опережает их рост. Процесс роста может принять лавинообразный характер из-за возрастания напряженности поля при увеличении высоты микровыступа. Часть подходящих к наросту с боковой поверхности острия атомов (рис. 4, а) переходит на плотноупакованную плоскость боковой поверхности нароста, диффундирует по ней на микровыступ и испаряется полем с его вершины. Это уменьшает концентрацию атомов на нижней плоскости и у края образующегося нароста и препятствует росту нового слоя нижней плоскости.

Таким образом, предполагаются два механизма ограничения роста слоя до заполнения им всей грани перестроенного острия, а следовательно, и перехода от огранки острия к образованию наростов.

1) Появление на грани ступеней более чем моноатомной высоты (из-за того, что верхние слои „догоняют“ нижние) с плотноупакованными боковыми поверхностями и уменьшение вероятности зарождения новых атомных рядов на грани из-за оттока атомов на верхнюю плоскость ступени.

2) Появление микровыступа на краю ступени (не на краю грани) и полевое испарение с его вершины атомов, которые при отсутствии испарения достроили бы ступень до края грани.

Вероятно, реализуются оба механизма, но, поскольку в эксперименте появление нароста всегда сопровождалось появлением микровыступов на всех его ступенях, второй механизм представляется преобладающим. Полевое испарение может определять переход к образованию наростов.

Рост микровыступа и полевое испарение с его вершины с одной стороны, зарождение и рост атомных слоев с другой являются конкурирующими процессами, так как они ведут к уменьшению концентрации атомов на поверхности грани и наростов. Полевое испарение с микровыступа уменьшает скорости зарождения и роста атомного слоя, в то же время растущий слой поглощает часть атомов, поступающих на грань, и уменьшает поток полевого испарения с микровыступа (предполагается, что поток ограничен подводом атомов к микровыступу). В рамках этой модели можно объяснить колебания тока полевого испарения и широкий интервал температур, в котором при прочих постоянных условиях наблюдается полевое испарение с микровыступа. Если роста нового слоя не происходит, диффузионный поток создает на грани большую концентрацию атомов, которые удаляются

только посредством полевого испарения с микровыступами. Когда произошло зарождение и идет рост нового атомного слоя, концентрация атомов уменьшается. Соответственно уменьшается и поток полевого испарения. После завершения слоя и до зарождения нового поток полевого испарения возобновляется. Происходит колебание тока полевого испарения. Снижение температуры приводит к уменьшению скорости зарождения атомных слоев, т.е. конкурирующего с полевым испарением процесса, что при определенных условиях может привести к сохранению потока полевого испарения даже при значительном понижении температуры. Колебания тока полевого испарения (меньшей амплитуды и с более высокой частотой) могут быть связаны также с зарождением и ростом новых атомных рядов на краю растущего слоя.

Повышение приложенного к острию потенциала может привести к тому, что из-за увеличения потока полевого испарения с микровыступов концентрация атомов на плоскости станет ниже критической для зарождения новых атомных слоев, формирование нароста прекратится. При еще большем повышении напряженности поля испарение превысит диффузионный приток, динамическое равновесие рост–разрушение атомных слоев сместится в сторону разрушения, начнется растворение атомных слоев и удаление материала разрушающихся слоев путем полевого испарения с микровыступов. Вершина острия отстывает, сохраняя форму многогранника со ступенчатыми наростами на гранях и микровыступами на углах. Этот процесс сопровождается увеличением числа микровыступов, перемещением изображений микровыступов на картинах полевого испарения. Разрушение ступени нароста и постепенное уменьшение ширины разрушающейся ступени проявляются в эффекте схлопывания колец микровыступов.

6. Заключение

Таким образом, применение полевой десорбционной микроскопии непрерывного режима для исследования формоизменений, происходящих при нагреве металлического острия в сильном электрическом поле, позволило точнее определить форму возникающих образований. Ребра перестроенного в многогранник острия радиуса 500–1000 нм состоят из моноатомных ступеней шириной ~ 1 нм и длиной 100 нм. Микровыступы размером ~ 10 нм имеют форму пирамиды или клина с вершиной в виде единичного атома или моноатомного ребра и боковыми гранями, продолжающими боковые грани перестроенного острия или нароста, на которых они находятся. Подтверждено, что непосредственно после термополевой обработки наросты имеют форму ступенчатых усеченных пирамид с моноатомными ребрами.

Автор посвящает эту статью памяти Владимира Николаевича Шредника.

Список литературы

- [1] M. Benjamen, R.O. Jenkins. Proc. Roy. Soc. Lond. A **176**, 262 (1940).
- [2] P.C. Bettler, F.M. Charbonnier. Phys. Rev. **85**, 85 (1960).
- [3] В.Г. Павлов, А.А. Рабинович, В.Н. Шредник. Письма в ЖЭТФ **17**, 247 (1973).
- [4] В.Н. Шредник, В.Г. Павлов, А.А. Рабинович, Б.М. Шайхин. Изв. АН СССР. Сер. физ. **38**, 296 (1974).
- [5] В.Г. Павлов, А.А. Рабинович, В.Н. Шредник. ФТТ **17**, 2045 (1975).
- [6] В.М. Жуков, С.А. Полежаев. ЖТФ **57**, 1133 (1987).
- [7] Д.П. Бернацкий, Ю.А. Власов, В.Г. Павлов. ЖТФ **57**, 2257 (1987).
- [8] D.P. Bernatskii, V.G. Pavlov, Proc. 9th Int. Vac. Microelectron. Conf. St. Petersburg (1996). P. 47.
- [9] В.Г. Павлов. В кн.: Автоионная и автоэлектронная микроскопия и спектроскопия: история, достижения, современное состояние, перспективы / Под ред. А.Л. Суворова. Академпринт, М. (2003). С. 315.
- [10] В.Г. Бутенко, О.Л. Голубев, Е.Л. Конторович, В.Н. Шредник. Письма в ЖТФ **18**, 86 (1992).
- [11] C. Herring. In: Structure and Properties of Solid Surfaces / Eds R. Gomer, C.S. Smith. Univ. Press, Chicago (1953). P. 5.
- [12] M. Drechsler. Z. Electrochem. **61**, 48 (1957).
- [13] J.P. Barbour, F.M. Charbonnier, W.W. Dolan, W.P. Dyke, E.E. Martin, J.K. Trolan. Phys. Rev. **117**, 1452 (1960).
- [14] Ю.А. Власов, О.Л. Голубев, В.Н. Шредник. Рост кристаллов **19**, 5 (1991).