

10;11;12

Приравновесные термополевые микровыступы как эффективные полевые точечные источники электронов и ионов

© О.Л. Голубев, В.Н. Шредник

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: O.Golubev@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 3 февраля 2005 г.)

С помощью полевых эмиссионных методов изучались условия образования, кристаллографическая локализация и эмиссионные свойства приравновесных термополевых микровыступов ряда тугоплавких металлов. Единичные приравновесные микровыступы относительно легко получаются на W эмиттере обычной ориентации $\langle 110 \rangle$, однако с течением времени в процессе ионной эмиссии меняется их число на поверхности, могут меняться также и их эмиссионные параметры; при эмиссии электронов параметры и число микровыступов не меняются. Большой стабильностью при эмиссии ионов обладают трехгранные углы перестроенного острия, образующиеся в областях $\{111\}$. Единственный и стабильно эмиттирующий ионы трехгранный угол, расположенный на геометрической оси эмиттера, легко получить, используя W эмиттер с ориентацией $\langle 111 \rangle$. На Ta эмиттере обычной ориентации $\langle 110 \rangle$ можно получить два стабильных приравновесных микровыступа, симметрично расположенных относительно оси эмиттера в областях $\{111\}$, такие микровыступы практически не меняют эмиссионные параметры в течение длительного отбора ионного тока.

Введение

Для модификации поверхности, для нанесения на нее рисунков в микрометровом и нанометровом масштабах необходимы управляемые тонкие пучки заряженных частиц. Для этих целей удобно использовать эмиссию ионов при высокотемпературном полевом испарении [1]. Обычно источниками ионов в этом случае оказываются термополевые микровыступы, такие микровыступы вырастают на поверхности полевого эмиттера при достаточно высоких температурах T и напряженностях электрического поля F и при определенных условиях могут длительно эмиттировать [1,2]. При этом токи i ионов собственного материала острия-эмиттера, на котором растут микровыступы, могут достигать $i \sim 10^{-14} - 10^{-12}$ А с одного микровыступа [3,4], которых на поверхности острия может быть больше сотни, а при изменении полярности приложенного напряжения U и при комнатной T острия эти же микровыступы могут использоваться и как источники автоэлектронной эмиссии с гораздо более сильными $i \sim 10^6$ А и более с одного выступа. Размеры таких микровыступов обычно порядка 10 nm, а вершины их, которые собственно и эмиттируют, еще меньше, вплоть до единственного атома на вершине выступа, поэтому такие источники заряженных частиц квалифицируются как точечные [2]. В некоторых случаях ионные пучки этих источников удобно фокусировать, а при применении в сканирующем туннельном микроскопе они оказываются пишущими инструментами в микрометровом и нанометровом масштабах, не требующими фокусировки. Микровыступы являются одной из стадий термополевого формоизменения острийного эмиттера при одновременном воздействии высоких T

и F . Вначале наблюдается стадия перестройки острия — превращения исходной сглаженной формы в ребристый многогранник, затем, при более высоких T и F , вырастают микровыступы; и наконец, при наибольших величинах T и F , главным образом на плотноупакованных гранях, вырастают большие наросты — макронаросты, соизмеримые с размерами граней, при этом вершины и ребра этих макронаростов покрыты микровыступами [5].

В случае наиболее тонкого письма требуются весьма слабые (но сконцентрированные) токи, так чтобы толщина наносимой линии не превышала один или несколько нанометров. В электронном режиме получение таких токов не вызывает затруднений, поскольку ток регулируется приложенным напряжением U и легко может быть доведен до самых малых значений. Что же касается ионных токов, то стационарные пучки ионов эмиттируются обычно вершинами микровыступов, существующих за счет динамического равновесия между диффузионным притоком частиц на вершину микровыступа и уходящим потоком полевого испарения с вершины этого выступа. Такие микровыступы относительно стабильны, однако эмиссия при этом подвержена значительным флуктуациям и отбираемые токи ($i = 10^5 - 10^7$ ионов в секунду) для многих задач нанотехнологии слишком велики. Однако регулирование величины тока изменением приложенного U в этом случае проблематично, поскольку снижение U приводит просто к затуханию микровыступа за счет сил поверхностного натяжения и прекращению эмиссии [5]. Новая и весьма непростая задача состоит в том, чтобы построить такой точечный источник ионов, который мог бы стабильно испускать слабые токи (от 1 до 100 частиц в 1 секунду) и величина тока могла бы регулироваться приложенным U .

Термополевые микровыступы вырастают на поверхности эмиттера в том случае, когда пондеромоторное давление сил электростатического поля $P_F = F^2/8\pi$ превышает лапласово давление капиллярных сил $P_\gamma = 2\gamma/r$ (γ — коэффициент поверхностного натяжения материала эмиттера, r — радиус кривизны эмиттера). Поэтому термополевые микровыступы можно условно разделить на три группы: стационарные, равновесные и приравновесные. Стационарные микровыступы, для которых P_F заметно больше P_γ , существуют за счет динамического равновесия между диффузионным притоком атомов на вершину микровыступа и уходящим потоком полевого испарения ионов с вершины выступа. Равновесные микровыступы, для которых $P_F = P_\gamma$, — весьма стабильные образования, однако они вообще не должны испарять ионы. Наконец, приравновесные микровыступы — это такие микровыступы, для которых $P_F > P_\gamma$, но величина этого превышения крайне незначительна, т. е. когда полевой приток атомов на вершину несколько превышает обратный поток, но микровыступ при этом не заостряется. Подобные микровыступы и должны позволить получать ионные токи от 1 до 10^2 – 10^3 частиц в 1 секунду с возможностью регулирования величины тока приложенным U .

Техника эксперимента

Работа проводилась с применением классических методов полевой эмиссионной микроскопии. В качестве объектов исследования использовались острия-эмиттеры из W и Ta обычной ориентации $\langle 110 \rangle$, а также вырезанные из монокристалла W эмиттеры с ориентацией $\langle 111 \rangle$. Эксперименты с приравновесными микровыступами необходимо проводить в безупречном сверхвысоком вакууме, поскольку адсорбированная примесь даже в самом минимальном количестве может в присутствии сильного электрического поля существенно повлиять на параметры ионного полевого испарения (эффект так называемого „полевого травления“ [6]). Для таких экспериментов весьма удобны полевые электронные микроскопы отпаянного типа, в которых легко можно получить вакуум порядка 10^{-12} Торр по адсорбирующимся газам.

При термополевом воздействии необходимо различать начальное поле обработки F_{tr} , которое всегда определяется относительно исходной формы отжига острия, и конечное поле F_{fin} , которое получается у поверхности эмиттера после изменения его формы. Когда при достижении конечного состояния наблюдается полевое испарение, то величина F_{fin} определяется как испаряющее поле F_{ev} . Термополевая обработка эмиттера при определенных T и F_{tr} проводилась всегда в течение стандартного времени $t = 1$ min. Величины F и работы выхода ϕ определялись обычным способом из наклонов характеристик Фаулера–Нордгейма. При определении F величина ϕ полагалась равной 4.5 eV для W ориентации $\langle 110 \rangle$, 4.1 eV для Ta и 4.4 eV для W, ориентированного гранью $\{111\}$ [7].

Результаты эксперимента и их обсуждение

При равенстве действующих давлений $P_\gamma = P_F$ нетрудно вырастить стабильный, существующий долго в нагретом состоянии равновесный микровыступ [5]. Если P_γ задано геометрией острия и свойствами материала, то величину P_F легко регулировать величиной приложенного напряжения U . Равновесные термополевые микровыступы выращивались и исследовались (например, при определении величины γ для W [8]). Их удобно использовать как электронные эмиттеры при охлаждении острия и смене полярности приложенного U . Разумеется, они при этом уже не будут строго равновесными, но как эмиттеры они хороши тем, что перегрузка током не приведет к катастрофическому взрыву эмиттера. Дело в том, что для них всегда $P_\gamma > P_F$ и малейший нагрев эмиттера вызовет затупление таких микровыступов и снижение тока эмиссии, здесь работает отрицательная обратная связь. Поэтому с таких микровыступов можно отбирать электронные токи предельно высокой плотности, вплоть до величин 10^9 – 10^{10} А/см² [9].

Но что касается ионных токов, то равновесные микровыступы ионов не испускают, испускание ионов порождает третий поток частиц, испаряющихся с поверхности помимо двух — полевого притока частиц к вершине острия и диффузионного потока частиц от вершины острия. Этот третий поток уменьшает число частиц на вершине и складывается с потоком, определяемым P_γ , затупляющим острие. Равновесие будет нарушено, микровыступ начнет затупляться, ионный ток будет уменьшаться, но при этом будет уменьшаться и затупляющий поток.

Обозначим потоки частиц следующим образом: j_F — поток заострения, j_γ — поток затупления и j_e — поток испарения. Приравновесный микровыступ отвечает ситуации, когда $j_F = j_\gamma + j_e$, т. е. когда полевой приток на вершину несколько превышает обратный поток затупления, но острие при этом не заостряется, поскольку весь избыточный поток на вершину уходит в виде потока испарения [10]. Регулируя за счет приложенного U величину F (а также устанавливая различные T эмиттера), нетрудно добиться не только различных равновесных состояний, когда $j_F = j_\gamma$, но и различных приравновесных состояний с $j_e = j_F - j_\gamma$ от потока единичных ионов до более высоких значений.

В отличие от стационарных, динамически уравновешенных только по потокам j_e и j_F микровыступов (j_γ в этих случаях много меньше первых двух потоков, тем меньше, чем дальше отстоит рабочая точка от критической точки срыва эмиссии) приравновесный микровыступ существенно стабильнее. При флуктуациях F , j_e и r он склонен возвращаться в свою прежнюю рабочую точку (точно так же, как равновесный возвращается к исходной форме при флуктуации r [5]). Самым же главным свойством приравновесного микровыступа является возможность его „настройки“, которая позволяет управляемым образом отбирать весьма

малые токи, удобные для письма в нанометровом масштабе. Флюктуации тока такого микровыступа меньше, чем флюктуации стационарного микровыступа, когда $j_e = j_F$. Кроме того, стационарный микровыступ может в процессе эмиссии ионов „ползти“ вдоль линии кривизны $K \sim 1/r$ на кривой $P = f(K)$ [5] в ту или иную сторону, его рабочая точка менее стабильна, не говоря уже об опасности срыва. Приравновесный микровыступ в широких пределах изменения потока испарения j_e и соответственно радиуса кривизны r (т.е. K) сохраняет свои свойства как таковой (приравновесный). Однако с ростом U и он может достигнуть критической точки, за которой всегда $P_F > P_\gamma$, и он стремительно перейдет в состояние стационарного микровыступа. Существенным резервом регулирования здесь является возможность изменения температуры.

Для того чтобы выяснить, являются ли полученные микровыступы равновесными (а также и приравновесными) или же стационарными ($j_e = j_F$), можно использовать простой тест. При небольшом увеличении U до $U + \delta U$ кривизна K вершины микровыступа вырастет, если он равновесный или приравновесный, или же снизится, если выступ стационарный. При уменьшении величины U до $U - \delta U$ изменения соответственно будут носить противоположный характер. Отличие же между приравновесными и равновесными микровыступами состоит в величине изменения K , значительной для равновесных и незначительной для приравновесных микровыступов. Об изменениях K судят по изменению эмиссионного тока при фиксированном U (чем больше ток, тем выше K) или же по величине полевого множителя $\beta = 1/kr$, где k — коэффициент, зависящий от формы острия (чем больше β , тем выше K).

Рис. 1 показывает полевые электронные изображения поверхности острейшего W монокристалла в процессе термополевого воздействия. Рис. 1, *a* показывает исходную классическую форму отжига эмиттера, получающуюся после прогрева при $T \sim 2500$ К, для нее полевой множитель $\beta = 5912$ 1/см, радиус $r = 0.6 \mu\text{m}$ и величина $U_{10} = 4690$ В (U_{10} — величина напряжения, необходимая для получения выбранной нами величины эмиссионного тока $i = 10$ нА, т.е. 10^{-8} А). После воздействия при $T = 1420$ К и $U_{\text{тр}} = 8.5$ кВ, $F_{\text{тр}} = 0.51$ В/А в окрестности граней {001} образовалось несколько микровыступов, для которых $U_{10} = 2021$ В и $\beta = 19473$ 1/см. Эти стационарные микровыступы при данной T и испаряют ионы W, а величина $F_{\text{эв}}$ составляет $F_{\text{эв}} = 1.66$ В/А. Для того чтобы получить приравновесные микровыступы, необходимо последовательно понижать величину $U_{\text{тр}}$ при термополевого воздействии, следя при этом за величинами U_{10} и β . Вначале величина β растет, а U_{10} понижается, поскольку микровыступы заостряются с увеличением кривизны K . В процессе заострения величина U_{10} становится равной 1900 В, а $\beta = 20100$ 1/см при понижении $U_{\text{тр}}$ до 7.8 кВ. Наконец, при уменьшении $U_{\text{тр}}$ до 7.5 кВ величина U_{10} слабо повышается до 1960 В, а β понижается до 19240 1/см, что и соответствует приравновесным микровыступам.

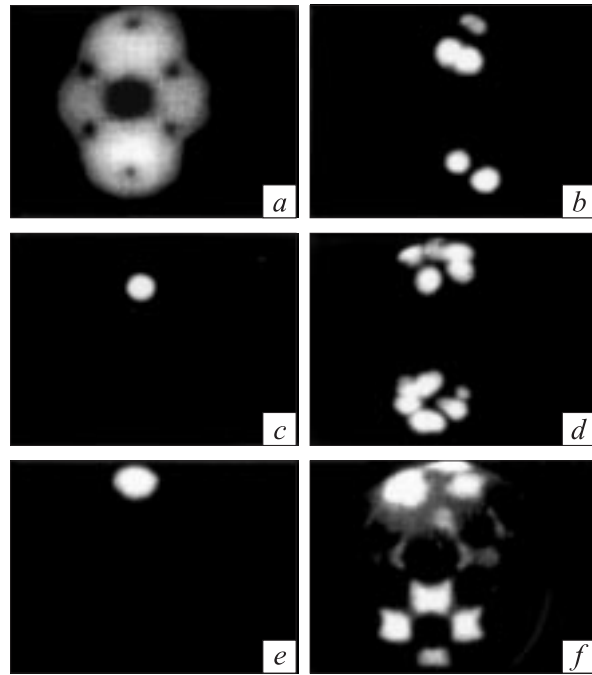


Рис. 1. Полевые электронные изображения поверхности вольфрамового эмиттера с ориентацией $\langle 110 \rangle$ в процессе термополевого воздействия при $T = 1420$ К и различных $F_{\text{тр}}$. *a* — исходная форма отжига, *b* — после прогрева эмиттера при $F_{\text{тр}} = 0.52$ В/А и последующем снижении $F_{\text{тр}}$ до 0.44 В/А, *c* — после дальнейшего снижения $F_{\text{тр}}$ до 0.42 В/А, *d* — после выдержки эмиттера при $F_{\text{тр}} = 0.42$ В/А и $T = 1420$ К в течение 20 min, *e* — после прогрева при $F_{\text{тр}} = 0.37$ В/А, *f* — после выдержки эмиттера при $T = 1420$ К и $F_{\text{тр}} = 0.37$ В/А в течение 20 min.

Любой из этих микровыступов может служить точечным источником электронов и ионов, однако наиболее интересной является ситуация, когда на поверхности эмиттера остается единственный микровыступ. Для этого необходимо далее понижать величину $F_{\text{тр}}$, при этом микровыступы снова станут стационарными и будут заостряться, последовательно пересекая прямую $P_\gamma(K)$ на графике $P_F, P_\gamma(K)$ [5], после этого сильно затупляться и исчезать на поверхности эмиттера. Таким способом можно оставить на поверхности эмиттера только один выступ, подобная ситуация показана на рис. 1, *c* после понижения $U_{\text{тр}}$ до 8.25 кВ. Данный выступ обеспечивает $U_{10} = 2108$ В и $\beta = 19100$ 1/см. Такой микровыступ является стабильным точечным источником электронов, по крайней мере в течение 1 часа такой эмиттер обеспечивал ток $i = 1000$ нА, при этом величина необходимого для этого U изменилась от 2664 до 2687 В. Однако в случае эмиссии ионов, т.е. при одновременном воздействии T и F , подобной стабильности не наблюдается. Рис. 1, *d* показывает ситуацию, когда единственный микровыступ, показанный на рис. 1, *c*, эмиттировал ионы в течение 20 min. Видно, что в процессе термополевого воздействия в областях {001} выросло пять микровыступов и величина $U_{10} = 1740$ В, хотя величина β при

этом практически не изменилась. При термополевого воздействии на поверхности эмиттера непрерывно происходят процессы полевого кристаллического роста, что и приводит к появлению новых микровыступов.

Можно попытаться удержать на поверхности эмиттера одиночный приравновесный микровыступ, прилагая к нему очень слабые поля и отбирая очень слабые токи, чтобы уменьшить скорость ростовых процессов, однако и это может не привести к успеху. Рис. 1, *e* показывает одиночный приравновесный микровыступ, полученный при $U_{tr} = 6.25 \text{ kV}$, $F_{tr} = 0.37 \text{ V/\AA}$ и $T = 1400 \text{ K}$. Выступ имеет параметры $U_{10} = 2020 \text{ V}$ и $\beta = 20410 \text{ 1/cm}$. Через 10 min непрерывной ионной эмиссии параметры выступа практически не изменились, однако через 20 min возникла эмиссионная картина, показанная на рис. 1, *f*. Картина эта соответствует острию, перестроенному в электрическом поле, $U_{10} = 3095 \text{ V}$ и $\beta = 10920 \text{ 1/cm}$, т.е. микровыступ просто исчез и „растворился“, поскольку достиг состояния, когда $P_\gamma > P_F$. Таким образом, проводя термополевого обработку при низких температурах $T \leq 1500 \text{ K}$, можно без труда получать приравновесные микровыступы, при этом эмиттер совершенно не тупится и ситуация полностью воспроизводима, однако практически невозможно удержать на поверхности единственный микровыступ. В процессе ионной эмиссии либо вырастают новые микровыступы, либо микровыступ растворяется.

При более высокой T обработки и соответственно более низких U и F можно получить другой тип перестройки W эмиттера [11], когда грани типа $\{112\}$ не расширяются, а, наоборот, зарастают, а в областях $\{111\}$ образуются трехгранные углы, получающиеся за счет расширения наиболее плотноупакованных граней $\{011\}$. В этих областях и можно попытаться вырастить приравновесные микровыступы. Рис. 2, *a* показывает эмиссионную картину поверхности эмиттера после обработки при $T = 1800 \text{ K}$, $U_{tr} = 5.0 \text{ kV}$ и $F_{tr} = 0.3 \text{ V/\AA}$. Видно, что в областях граней $\{111\}$ образовалось два микровыступа, тесты показали, что это приравновесные микровыступы, для которых $U_{10} = 1760 \text{ V}$ и $\beta = 19856 \text{ 1/cm}$. Если такой эмиттер выдерживать при тех же T и F_{tr} в течение времени, то величина U_{10} постепенно возрастает, а β падает. Рис. 3 показывает изменение величины U_{10} во времени. Видно, что величина плавно растет от 1760 до 2426 V в течение 45 min и затем не меняется; значение β при этом ведет себя противоположно, т.е. плавно уменьшается от исходного 19856 до 14978 1/cm и далее также не меняется. Эмиссионные изображения на рис. 2, *b-d* показывают, что при этом микровыступы постепенно тупятся и исчезают, а остаются трехгранные углы, на которых микровыступы выросли. Эти углы в областях $\{111\}$ образованы вследствие расширения трех плотноупакованных граней $\{011\}$, поэтому углы и имеют тройную симметрию (рис. 2, *b*); термическое сглаживание эмиттера прогревом при $T = 1200 \text{ K}$ в отсутствие приложенного поля показывает основания этих углов (рис. 2, *c*) и форму перестроенного острия (рис. 2, *d*). Таким образом, трехгранные углы являются

прекрасными эмиттерами как ионов, так и электронов. Они обладают всеми достоинствами приравновесных микровыступов, но более стабильны на поверхности. Недостатками углов по сравнению с микровыступами является тот факт, что углы эти можно получить лишь в определенных кристаллографических областях при определенной структуре эмиттера, тогда как приравновесные микровыступы можно получить практически в любой точке поверхности при любой структуре эмиттера, никаких физических ограничений здесь не видно. Трехгранные углы являются более „тупыми“ объектами по сравнению с микровыступами; если для микровыступов величины β составляют 18000–24000 1/cm, то для углов $\beta = 14000$ –16000 1/cm, т.е. для получения того же значения тока требуются более высокие U и соответственно F .

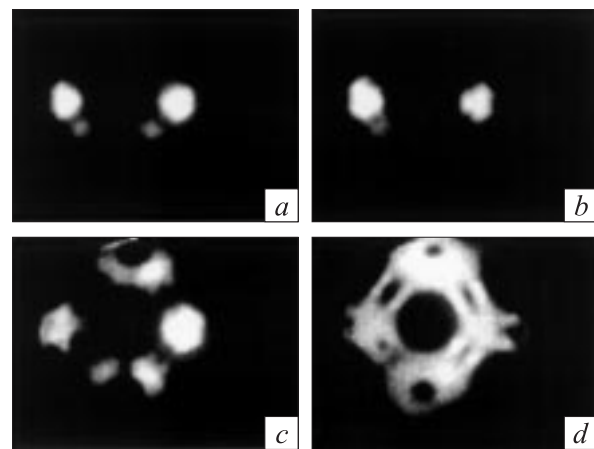


Рис. 2. Полевые электронные изображения поверхности вольфрамового эмиттера с ориентацией $\langle 110 \rangle$ в процессе термополевого воздействия при $T = 1800 \text{ K}$. *a* — после прогрева при $T = 1800 \text{ K}$ и $F_{tr} = 0.32 \text{ V/\AA}$, *b* — после выдержки эмиттера при $T = 1800 \text{ K}$ и $F_{tr} = 0.32 \text{ V/\AA}$ в течение 30 min, *c* — после кратковременного прогрева состояния *b* при $T = 1200 \text{ K}$ в отсутствие поля, *d* — после кратковременного прогрева состояния *c* при $T = 1400 \text{ K}$ в отсутствие поля.

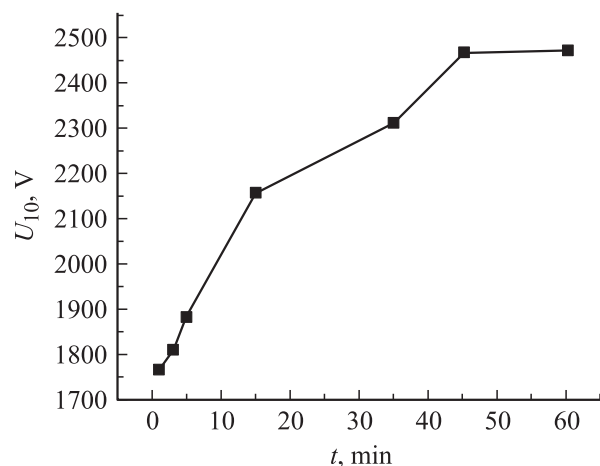


Рис. 3. Изменение величины U_{10} во времени при одновременном воздействии на W эмиттер, $T = 1800 \text{ K}$ и $F_{tr} = 0.32 \text{ V/\AA}$.

Для получения эмиттера ионов и электронов, имеющего всего один эмиттирующий трехгранный угол (либо микровыступ), расположенный в центре на геометрической оси острия, очень удобно использовать W , ориентированный гранью $\{111\}$. Подобный эмиттер был получен из образца, вырезанного из монокристалла W под определенным углом. На рис. 4, *a* показано исходное изображение эмиттера формы отжига, для которого $U_{10} = 7121 \text{ V}$ и $\beta = 4317 \text{ 1/cm}$, т. е. острие имеет радиус $r \sim 0.8 \mu\text{m}$. Эмиттер, вырезанный из монокристалла, требует несколько более высоких T обработки по сравнению с эмиттером, сделанным из проволоки. Термополевая обработка при $T = 2100 \text{ K}$, $U_{\text{tr}} = 7.5 \text{ kV}$ и $F_{\text{tr}} = 0.32 \text{ V/\AA}$ приводит к образованию микровыступа на ступенчатых областях граней $\{001\}$ и трехгранного угла в области $\{111\}$ на вершине эмиттера (рис. 4, *b*). Снижение U_{tr} до 6.75 kV при той же T вызывает растворение микровыступа и на поверхности остается трехгранный угол в центре эмиттера (рис. 4, *c*), для которого $U_{10} = 3616 \text{ V}$ и $\beta = 13\,824 \text{ 1/cm}$. Данный угол практически не меняет своих эмиссионных параметров при отборе ионного тока в течение нескольких часов. Наконец, рис. 4, *d* показывает эмиссионную картину после термического сглаживания, видно основание трехгранного угла в центре и маленький макронарост в области $\{001\}$, на котором вырос микровыступ.

Рис. 5 показывает эволюцию поверхности Ta острия, при термополевом воздействии. Ta имеет такую же кристаллографическую структуру объемно центрированного куба, как и W , но несколько другую огранку поверхности, больший размер граней $\{011\}$ и отсутствие граней $\{112\}$. Известно [12], что при термополевой обработке Ta в отличие от W довольно легко перестраивается, образуя углы в областях $\{111\}$, происходит это именно вследствие специфики огранки поверхности. Эмиттер этот довольно тупой, поскольку величина $r \sim 1.1 \mu\text{m}$,

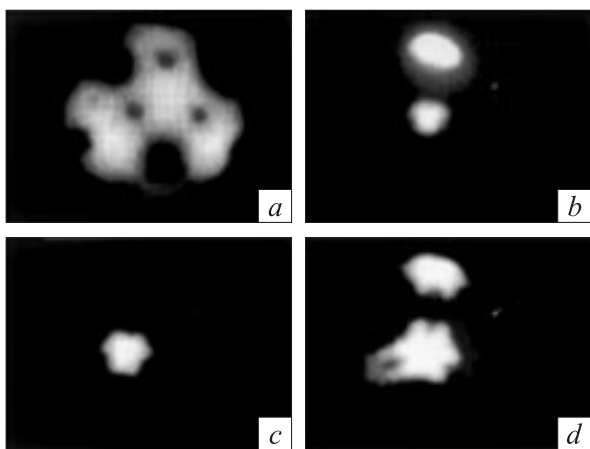


Рис. 4. Полевые эмиссионные изображения вольфрамового эмиттера с ориентацией $\langle 111 \rangle$ в процессе термополевого воздействия. *a* — исходная форма отжига, *b* — после прогрева эмиттера при $T = 2100 \text{ K}$ и $F_{\text{tr}} = 0.32 \text{ V/\AA}$, *c* — после снижения F_{tr} до 0.29 V/\AA при той же T , *d* — после прогрева состояния „*c*“ при $T = 1200 \text{ K}$ в отсутствие поля.

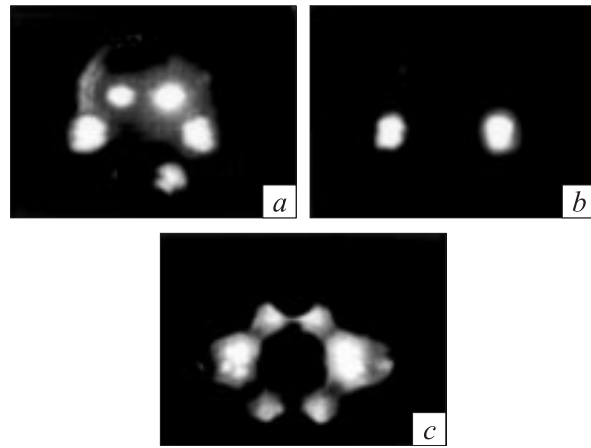


Рис. 5. Полевые эмиссионные изображения танталового эмиттера в процессе термополевого воздействия. *a* — после прогрева эмиттера при $T = 1450 \text{ K}$ и $F_{\text{tr}} = 0.22 \text{ V/\AA}$, *b* — после прогрева эмиттера при $T = 1550 \text{ K}$ и $F_{\text{tr}} = 0.32 \text{ V/\AA}$, *c* — после прогрева состояния *b* при $T = 1200 \text{ K}$ в отсутствие поля.

$U_{10} = 7050 \text{ V}$ и $\beta = 3100 \text{ 1/cm}$. Рис. 5, *a* показывает перестройку эмиттера при $T = 1450 \text{ K}$, $U_{\text{tr}} = 7.5 \text{ kV}$, $F_{\text{tr}} = 0.22 \text{ V/\AA}$, острие при этом эмиссионно заостряется значительно, поскольку образуются два острых угла в областях граней $\{111\}$ вследствие расширения граней $\{011\}$ и углы в областях граней $\{113\}$, которые образовались из-за расширения граней $\{001\}$ и $\{011\}$. Для такого эмиттера $U_{10} = 3810 \text{ V}$ и $\beta = 8685 \text{ 1/cm}$. Повышение F_{tr} до 0.32 V/\AA и T до 1550 K приводит к росту микровыступов на углах в областях $\{111\}$, данные микровыступы путем снижения F_{tr} можно сделать приравновесными. Рис. 5, *b* показывает два таких приравновесных микровыступа, для которых $U_{10} = 3263 \text{ V}$ и $\beta = 10\,263 \text{ 1/cm}$. Эксплуатация такого эмиттера в режиме эмиссии ионов при тех же T и F_{tr} в течение первых 20 min вызывает слабое заострение микровыступов до $U_{10} = 2538 \text{ V}$ и $\beta = 12\,694 \text{ 1/cm}$, затем параметры микровыступов практически не меняются. Наконец, последний рис. 5, *c* показывает ситуацию после термического сглаживания микровыступов. В областях $\{111\}$ видны яркие точки, соответствующие центрам зарождения микровыступов. Видно, что этих центров несколько, а эмиттирует тот микровыступ, который оказался наиболее острым, поэтому иногда микровыступ получается на изображении двойным, так как вырастают два рядом расположенных одинаковых микровыступа (рис. 5, *d*). Следовательно, танталовый эмиттер в отличие от вольфрамового позволяет получать в областях $\{111\}$ стабильно эмиттирующие приравновесные микровыступы, при этом использование трехгранных углов также возможно.

Выводы

На W эмиттере обычной ориентации $\langle 110 \rangle$ можно получить одиночные приравновесные микровыступы при относительно низких $T = 1400\text{--}1600 \text{ K}$ и

$F_{tr} = 0.4-0.6 \text{ V/\AA}$ практически в любой точке на вершине острия. Однако с течением времени в процессе термополевого воздействия параметры микровыступа могут изменяться, меняется также и число микровыступов на поверхности вследствие явления полевого кристаллического роста.

Получение двух единичных приравновесных микровыступов все-таки возможно, но только в областях $\{111\}$, где образуются в процессе термополевого воздействия острые трехгранные углы, и при более высоких $T = 1700-2000 \text{ K}$ и примерно тех же величинах F_{tr} . Однако микровыступы в процессе эмиссии постепенно тупятся и растворяются, при этом обладают всеми достоинствами приравновесных микровыступов.

Одиночный, стабильно эмиттирующий трехгранный угол, расположенный в центре на геометрической оси острия, относительно легко получается на W эмиттере с ориентацией $\langle 111 \rangle$. Такой микровыступ является идеальным и стабильно работающим точечным источником ионов и электронов.

Та эмиттер обычной ориентации $\langle 110 \rangle$ дает возможность относительно легко получить два стабильно эмиттирующих приравновесных микровыступа, симметрично расположенных относительно геометрической оси острия в областях $\{111\}$, используя термополевою обработку при $F_{tr} = 0.3-0.5 \text{ V/\AA}$ и $T = 1300-1500 \text{ K}$. В отличие от W танталовый эмиттер дает возможность выращивать весьма стабильные приравновесные микровыступы.

Трехгранные углы перестроенного острия обладают по сравнению с микровыступами рядом преимуществ при использовании в качестве стабильных источников ионов, однако получить их можно только в определенных кристаллографических областях и при определенной структуре эмиттера, приравновесные микровыступы в этом смысле универсальны.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 04-02-17658) и программы Министерства науки и технологии Российской Федерации (контракт № 40.012.1.1.1152).

Список литературы

- [1] Власов Ю.А., Павлов В.Г., Шредник В.Н. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. Вып. 9. С. 548–552.
- [2] Шредник В.Н. // Поверхность. 1998. № 2. С. 102–110.
- [3] Голубев О.Л., Шредник В.Н. // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 8. С. 109–115.
- [4] Голубев О.Л., Шредник В.Н. // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 6. С. 118–122.
- [5] Власов Ю.А., Голубев О.Л., Шредник В.Н. // Рост кристаллов. М.: Наука, 1991. Т. 19. С. 5–21.
- [6] Мюллер Э.В., Цонг Т.Т. Полевая ионная микроскопия, полевая ионизация, полевое испарение. М.: Наука, 1980. 224 с.
- [7] Фоменко В.С. Эмиссионные свойства материалов. Справочник. Киев: Наукова думка, 1981. 338 с.

- [8] Власов Ю.А., Голубев О.Л., Шредник В.Н. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1988. Т. 52. № 8. С. 1538–1543.
- [9] Павлов В.Г., Рабинович А.А., Шредник В.Н. // ЖТФ. 1975. Т. 45. Вып. 10. С. 2126–2134.
- [10] Шредник В.Н., Глазанов Д.В., Конторович Е.Л. // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 9. С. 120–125.
- [11] Benjamin M., Jenkins R.O. // Proc. Roy. Soc. (London) A. 1940. Vol. 176. P. 262–279.
- [12] Drechsler M. // Zs. Elektrochemie. 1954. Bd 58. S. 327–334.