

10;11,12

Регулирование количества локальных эмитирующих нановыступов на поверхности полевого эмиттера

© О.Л. Голубев, В.А. Ивченко

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург
Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина, Екатеринбург
E-mail: O. Golubev@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 10 мая 2012 г.

Описывается процедура направленного изменения количества эмитирующих наноразмерных выступов на поверхности полевого вольфрамового эмиттера. Суть процедуры состоит в том, что сначала посредством термополевого воздействия на эмиттер на его поверхности выращивается некое достаточно большое количество выступов, что не представляет, как правило, больших сложностей. Затем посредством процедуры контролируемого снижения величины напряженности приложенного электрического поля при определенной постоянной температуре эмиттера можно уменьшать количество выступов вплоть до единичного выступа на поверхности.

Для направленной модификации поверхности в нанометровом масштабе, для создания современных электронно-лучевых приборов высокого разрешения и для других целей развития современной электроники и нанотехнологии необходимы тонкие лучи заряженных частиц предельно высокой яркости при локализации эмиссии в малом телесном угле. Перспективным путем создания таких лучей представляется использование для получения электронных токов явления полевой электронной эмиссии, а для ионных токов — явлений полевого испарения либо полевой десорбции. Источниками же электронов и ионов в этом случае могут служить наноразмерные выступы, которые можно вырастить на поверхности полевого острейного эмиттера по специальной процедуре в случае одновременного воздействия на эмиттеры сильного электрического поля напряженностью F и высокой температуры T (так называемая термополевая обработка эмиттера [1,2]). Такие наноразмер-

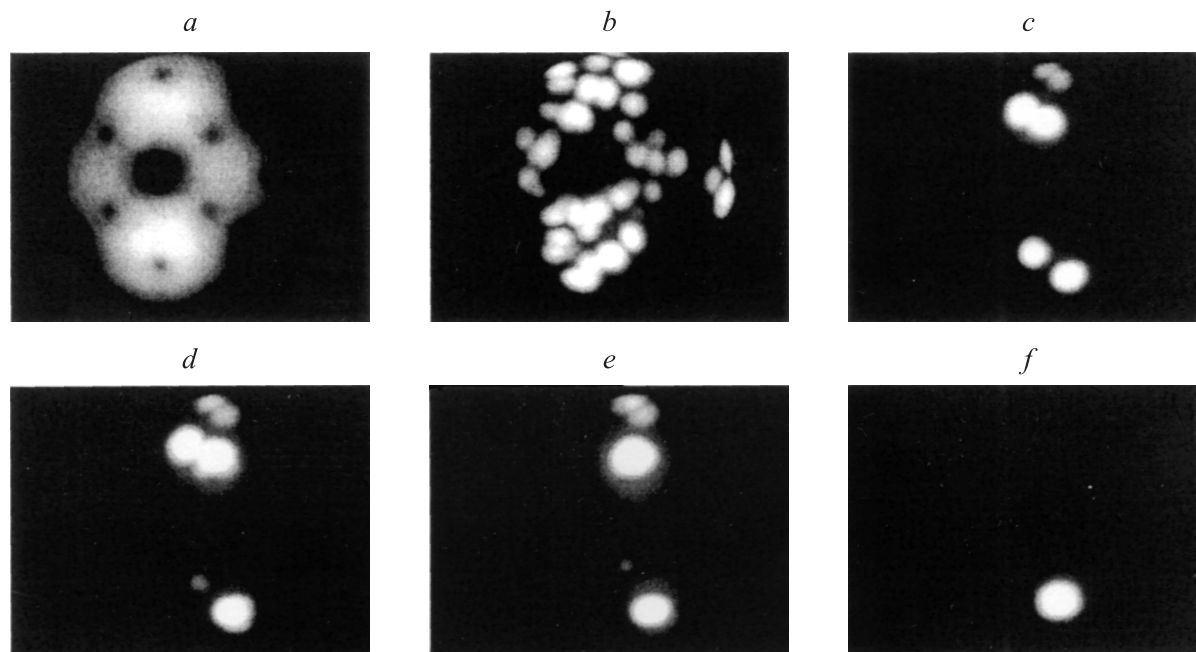
ные выступы могут при определенных условиях довольно длительно и стабильно эмитировать электроны и ионы, при этом локальные плотности электронных токов с единичного нановыступа могут достигать предельно высоких значений вплоть до $j \sim 10^{10}$ А/см² А/см² [3], а сами электронные токи $i \sim 10^{-6} - 10^{-5}$ А в стационарном режиме. В случае эмиссии ионов величины токов и плотностей токов будет естественно меньше на 4–6 порядков. Размеры таких конических нановыступов обычно бывают порядка 10 nm, а вершины их, которые собственно и эмитируют, еще меньше, вплоть до единственного атома на вершине выступа, поэтому такие источники заряженных частиц обычно квалифицируются как точечные [4].

Термополевые наноразмерные выступы вырастают на поверхности эмиттера в том случае, когда пондеромоторное давление сил электростатического поля $P_F = F^2/8\pi$ превышает лапласово давление сил поверхностного натяжения $P_\gamma = 2\gamma/r$ (γ — коэффициент поверхностного натяжения материала эмиттера, r — радиус кривизны эмиттера) [4]. Они, по существу, являются одной из стадий формоизменения поверхности эмиттера в процессе термополевого воздействия (обработки) [5], и их можно условно разделить на три группы: стационарные, равновесные и приравновесные. Стационарные нановыступы, для которых P_F заметно больше P_γ , существуют за счет динамического равновесия между диффузионным притоком атомов на вершину нановыступа и уходящим потоком ионов в процессе полевого испарения атомов с вершины нановыступа. Равновесные нановыступы, для которых $P_F = P_\gamma$ являются весьма стабильными наростами, можно эффективно использовать в качестве точечных источников электронов, однако они не испаряют ионы. Что касается приравновесных нановыступов, то для них также P_F больше P_γ , но это превышение крайне незначительно, т.е. приток атомов на вершину выступа очень мало превышает уходящий поток испарения и нановыступ практически не заостряется. Такие выступы могут служить ионными источниками очень малых токов от единиц ионов до $10^2 - 10^3$ ионов в секунду для целей нанотехнологии с возможностью эффективного регулирования величины ионного тока просто изменением приложенного напряжения U [6].

При термополевым воздействии на полевой эмиттер необходимо различать начальное поле обработки F_{ir} , которое всегда определяется относительно исходной формы отжига эмиттера, и конечное поле F_{fin} , которое получается у поверхности эмиттера после изменения его фор-

мы в процессе воздействия. Если при достижении конечного состояния наблюдается процесс полевого испарения, то величина F_{fin} определяется как испаряющее поле F_{ev} . Термополевая обработка эмиттера при определенных T и F_{tr} всегда проводилась в течение фиксированного времени $t = 1 \text{ min}$. Эксперименты проводились с использованием методики полевой электронной микроскопии с вольфрамовыми эмиттерами. Величины F и работы выхода ϕ определялись обычным способом из эмиссионных характеристик Фаулера–Нордгейма, при определении F величина ϕ полагалась для W равной 4.5 eV [7], вакуум в приборах был $p \sim 10^{-11}$ Торр по адсорбирующимся газам.

Рисунок показывает полевые электронные изображения поверхности острейного W монокристалла в процессе термополевого воздействия. Первый (см. рисунок, *a*) демонстрирует исходную классическую форму отжига эмиттера, которая получается после прогрева эмиттера при $T \sim 2500 \text{ K}$. Для нее полевой множитель $\beta = 5560 \text{ 1/cm}$ ($F = \beta U$, $\beta = 1 \text{ kr}$, где k — коэффициент, определяемый в основном формой острия-эмиттера), средний радиус $r = 640 \text{ nm}$ и величина $U_{10} = 4690 \text{ V}$. U_{10} — величина приложенного напряжения, необходимого для получения выбранной нами одной и той же фиксированной величины эмиссионного электронного тока, равной $i = 10 \text{ nA}$, т.е. 10^{-8} A . Рисунок, *a* — классическое изображение поверхности монокристалла W, содержащее темную центральную зону грани $\{110\}$ с высокой локальной $\phi \sim 5.3 \text{ eV}$, четыре симметрично расположенные темные грани типа $\{112\}$ и сверху и внизу две темные грани $\{100\}$. На рисунке, *b* показана ситуация после воздействия при высоких значения $U_{tr} = 8000 \text{ V}$, $F_{tr} = 4.45 \text{ V/nm}$ и $T = 1700 \text{ K}$, эмиссионная картина демонстрирует большое количество ярких пятен от эмитирующих нановыступов практически по всей поверхности эмиттера, за исключением зоны центральной плоской грани $\{110\}$, где ниже локальное поле. Значение β достигает здесь уже $\beta = 18750 \text{ 1/cm}$, т.е. возрастает в 3.37 раза по сравнению с исходной формой отжига, а величина U_{10} падает до $U_{10} = 1718 \text{ V}$, т.е. уменьшается в 2.73 раза, следовательно, эмиттер в эмиссионном смысле становится „острее“ примерно в 3 раза. При этом конечная величина поля достигает $F_{fin} = 15 \text{ V/nm}$, при таких температурах и полях уже возможно и полевое испарение W, хотя испаряющее поле для W при криогенных T составляет $F_{ev} = 57 \text{ V/nm}$. Любой из нановыступов, изображенных на рисунке, *b*, может служить точечным источником электронов или ионов, поскольку имеют весьма малые углы эмиссии



Полевые электронные изображения изменений поверхности вольфрамового эмиттера в процессе термополевого воздействия: *a* — исходный эмиттер формы отжига; *b* — после воздействия при $F_{ir} = 4.45$ V/nm и $T = 1700$ К; *c-f* — после снижения F_{i2} до 4.13, 3.80, 3.50 и 3.05 V/nm при $T = 1700$ К соответственно.

$\omega \sim 0.05$ sr. Однако наиболее интересной является ситуация, когда мы можем управлять количеством нановыступов, меняя их число на поверхности вплоть до ситуации, когда на поверхности остается всего один нановыступ. Подбирать экспериментально величины T и F_{tr} , при которых на поверхности эмиттера будет образовываться нужное нам количество нановыступов, достаточно трудно, и успех здесь весьма проблематичен. Для достижения этой цели можно предложить следующую процедуру, которая оказывается во многих случаях весьма эффективной. Вначале нужно получить в процессе термополевой обработки состояние поверхности с большим количеством нановыступов, такое состояние показано на рисунке, *b*, и это, как правило, не вызывает больших проблем. Затем необходимо, поддерживая эмиттер при определенной T , ступенчато понижать величину приложенного F_{tr} , наблюдая при этом состояние поверхности после каждого акта снижения поля. При этом самый острый нановыступ (или несколько выступов) будет вначале заостряться, до тех пор пока не достигнет состояния, при котором P_γ станет больше P_F , тогда этот выступ сильно затупится и исчезнет на эмиссионной картине, т. е. перестанет эмиттировать. Продолжая такую процедуру далее, можно постепенно уменьшать количество нановыступов на поверхности, оставляя такое их количество, какое необходимо. Подобную процедуру управления количеством нановыступов демонстрируют эмиссионные картины (см. рисунок, *c-f*). Если при той же $T=1700$ К снизить величину приложенного поля до $F_{tr} = 4.13$ V/nm, то на поверхности, как показывает рисунок, *c*, останется только четыре нановыступа, по два в областях верхней и нижней на картине граней [100]. Дальнейшее снижение поля до $F_{tr} = 3.80$ V/nm оставляет на поверхности только три выступа (см. рисунок, *d*), а уменьшение поля до $F_{tr} = 3.50$ V/nm приводит к сохранению только двух выступов (см. рисунок, *e*). Наконец, снижение величины поля до $F_{tr} = 3.05$ V/nm приводит к ситуации, когда на поверхности эмиттера остается всего только один выступ, как видно на последнем рисунке, *f*. Величина его фактора поля уже достигает $\beta = 21\,420$ 1/cm, а величина U_{10} падает до $U_{10} = 1840$ V. Вообще рекордными для нановыступов на показанном на рисунке вольфрамовом эмиттере были значения величин $U_{10} = 1330$ V и $\beta = 27\,340$ 1/cm, т. е. ток в 10 nA достигался при величинах приложенного напряжения в 3.5 раза меньше по сравнению с исходным эмиттером формы отжига. Ситуация, когда на поверхности остается единичный

эмитирующий наноразмерный выступ, является оптимальной с точки зрения локализации эмиссии электронов и ионов [8,9].

В приведенных данных нановыступы образовывались в областях граней $\{100\}$, однако если проводить термополевую обработку эмиттера при более высоких T , но более низких F_{tr} , то можно получить другой тип перестройки поверхности эмиттера, когда выступы будут образовываться в областях граней $\{111\}$. Однако для получения наиболее благоприятной ситуации, когда получается единичный нановыступ на самой вершине эмиттера, на его геометрической оси, вольфрамовый эмиттер обычной ориентации $\langle 110 \rangle$ мало пригоден, поскольку в центре оказывается протяженная плоская грань $\{110\}$, где локальное электрическое поле мало, и нановыступы вырастить в этой области эмиттера сложно. Для достижения этой цели необходимо использовать эмиттеры с ориентацией $\langle 111 \rangle$ либо $\langle 100 \rangle$, в этом случае подобная цель вполне достижима [6].

Список литературы

- [1] Шредник В.Н. // Поверхность. 1998. N 2. С. 102–110.
- [2] Власов Ю.А., Павлов В.Г., Шредник В.Н. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 9. С. 548–552.
- [3] Павлов В.Г., Рабинович А.А., Шредник В.Н. // ЖТФ. 1975. Т. 45. В. 10. С. 2126–2134.
- [4] Власов Ю.А., Голубев О.Л., Шредник В.Н. // Рост кристаллов. М.: Наука, 1991. Т. 19. С. 5–21.
- [5] Venjaten M., Jenkins R.O. // Proc. Roy. Soc. A. 1940. V. 176. P. 262–279.
- [6] Голубев О.Л., Шредник В.Н. // ЖТФ. 2005. Т. 75. В. 9. С. 111–116.
- [7] Фоменко В.С. // Эмиссионные свойства материалов: Справочник. Киев: Наук. думка, 1981. 338 с.
- [8] Голубев О.Л. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 12. С. 18–24.
- [9] Голубев О.Л. // ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 16. С. 56–62.