

## Изменение поверхности эмиттера при полевой электронной эмиссии большой плотности тока с трехгранного угла $\langle 111 \rangle$ перестроенного вольфрамового острия

© Д.П. Бернацкий, В.Г. Павлов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: bernatskii@ms.ioffe.rssi.ru; vpavlov@ms.ioffe.rssi.ru

(Поступило в Редакцию 13 февраля 2007 г.)

С использованием метода полевой десорбционной микроскопии непрерывного действия изучено изменение формы эмиттера и эмиссионных характеристик при полевой электронной эмиссии большой плотности тока с атомарно острого трехгранного угла  $\langle 111 \rangle$  перестроенного в электрическом поле вольфрамового острия. Основные изменения формы острия и наклона характеристики Фаулера–Нордгейма происходят при эмиссионном токе  $1\text{--}5\ \mu\text{A}$ . При токе с угла  $50\text{--}100\ \mu\text{A}$  форма острия и эмиссионные характеристики стабилизируются и в дальнейшем не изменяются в интервале  $0\text{--}150\ \mu\text{A}$ . Новая форма острия характеризуется расширением ребер угла, появлением на них ступеней плоскостей  $\{112\}$  и  $\{001\}$ , уменьшением размеров образующих грани угла плоскостей  $\{011\}$ , появлением ступенчатых переходных областей между гранями  $\{011\}$ ,  $\{001\}$  и  $\{112\}$ . Происходящие изменения формы связываются с более слабым полем при эмиссии, чем при предварительной перестройке острия, ослаблением поля пространственным зарядом эмитированных электронов и неоднородным распределением температуры по острию.

PACS: 68.37.Vj

### Введение

Перестройка скругленной вершины металлического острия в многогранник происходит при нагревании в сильном электрическом поле — термополевой обработке (ТПО) [1–3]. При определенных режимах ТПО (температура —  $T$ , напряжение —  $V$ , время обработки —  $t$ ) форма вершины острия приближается к многограннику, гранями которого являются плотноупакованные кристаллографические плоскости. В случае металлов в объемно-центрированной (ОЦК) решеткой (W, Mo, Ta, Nb) наиболее плотно упакованными плоскостями являются плоскости  $\{011\}$ , а их пересечение образует трехгранный угол  $\langle 111 \rangle$ . Перестройку острия обычно производят при положительном потенциале на острии, для того чтобы исключить полевую электронную (автоэлектронную) эмиссию, которая может разрушить острие.

Перестроенное острие является эффективным источником электронов, обладающим рядом ценных для электронно-оптических применений свойств [4–7]. При полевой электронной эмиссии с угла перестроенного острия к таким свойствам можно отнести: малый размер источника электронов, удобное для фокусировки радиальное расхождение электронных траекторий с малым разбросом тангенциальных составляющих скорости, очень большую электронную яркость (ток, деленный на эмиссионную площадь и объемный угол электронного пучка).

Еще одним преимуществом использования перестроенного острия в качестве эмиттера является его высокая устойчивость к разрушению при отборе больших

эмиссионных токов. Нагревание эмиттера, происходящее при больших токах полевой электронной эмиссии в стационарном режиме, активирует поверхностную самодиффузию. При использовании перестроенного острия форма эмиттера изменяется, происходят усиление локальных напряженностей поля, лавинообразный рост эмиссионного тока и разрушение эмиттера. Перестроенное в электрическом поле острие полностью или частично лишено этого недостатка, поскольку оно уже подверглось обработке прогревом в поле и его форма может быть равновесной или стационарной в электрическом поле и не изменяется при полевой поверхностной самодиффузии. Кроме того, при эмиссии с многогранного угла геометрия перестроенного острия обеспечивает хороший теплоотвод от эмитирующего участка поверхности.

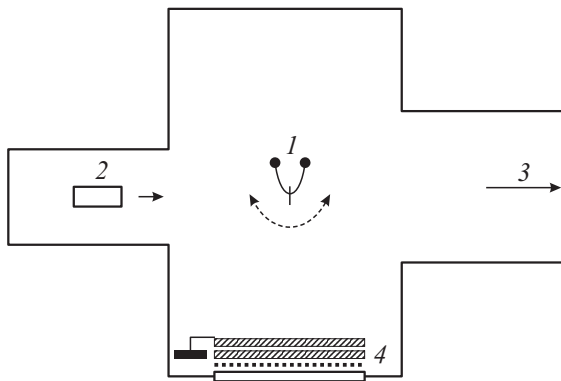
С трехгранного угла  $\langle 111 \rangle$  перестроенного прогревом в электрическом поле вольфрамового острия была получена рекордно высокая плотность тока полевой электронной эмиссии в стационарном режиме [8–10]. Было замечено, что при отборе больших плотностей тока происходит изменение эмиссионных свойств эмиттера, обусловленное изменением формы острия. Эти изменения фиксировались по изменениям вольт-амперных характеристик полевой электронной эмиссии (характеристик Фаулера–Нордгейма) и по изменению полевого электронного изображения. Характер изменений формы острия установить не удалось, во-первых, из-за недостаточного разрешения полевого электронного микроскопа, во-вторых — из-за того, что напряженность поля у поверхности резко падает при удалении от вершины угла, и на полевого эмиссионном изображении

наблюдаются только вершина угла и ее ближайшая окрестность.

Для преодоления этих недостатков полевой электронной микроскопии в данной работе изменение формы эмиттера при отборе больших плотностей тока изучалось с использованием методики полевой десорбционной микроскопии непрерывного режима (действия) [11].

## Методика эксперимента

Для проведения исследований использовался полевой эмиссионный микроскоп, схема которого приведена на рис. 1. Полевые электронные и десорбционные изображения получались с помощью детектора из двух микроканальных пластин и люминесцентного экрана. Острие изготавливалось электролитическим травлением вольфрамовой проволоки  $\varnothing 0.1$  мм, приваренной к вольфрамовой проволоке  $\varnothing 0.2$  мм в форме дуги, пропусканием тока через которую производится нагревание острия. Была предусмотрена возможность вращения держателя острия, во время работы использовались три основных положения острия: центральное — для получения эмиссионных и десорбционных изображений, правое — для отбора интенсивных токов полевой электронной эмиссии и левое — для нанесения на острие изображающих адсорбатов. Направление электронного потока в металлическую трубу было предназначено для защиты микроканальных пластин от разрушения большими токами и для уменьшения десорбции молекул и ионов с электродов и стенок камеры под воздействием потока электронов, и соответственно ослабления ионной бомбардировки и загрязнения поверхности эмиттера. Перед началом работы острие прогревалось при  $T = 2600$  К в течение нескольких часов для очистки и формирования равновесной скругленной вершины острия (формы отжига). Для изучения изменений формы острия использовались методики полевой электронной микроскопии, полевой десорбционной микроскопии непрерывного режима, микроскопии высокотемпературного полевого испарения [12] и вольт-амперные эмиссионные харак-



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 — острие, 2 — источник цезия, 3 — вакуумная откачка, 4 — блок микроканальных пластин.

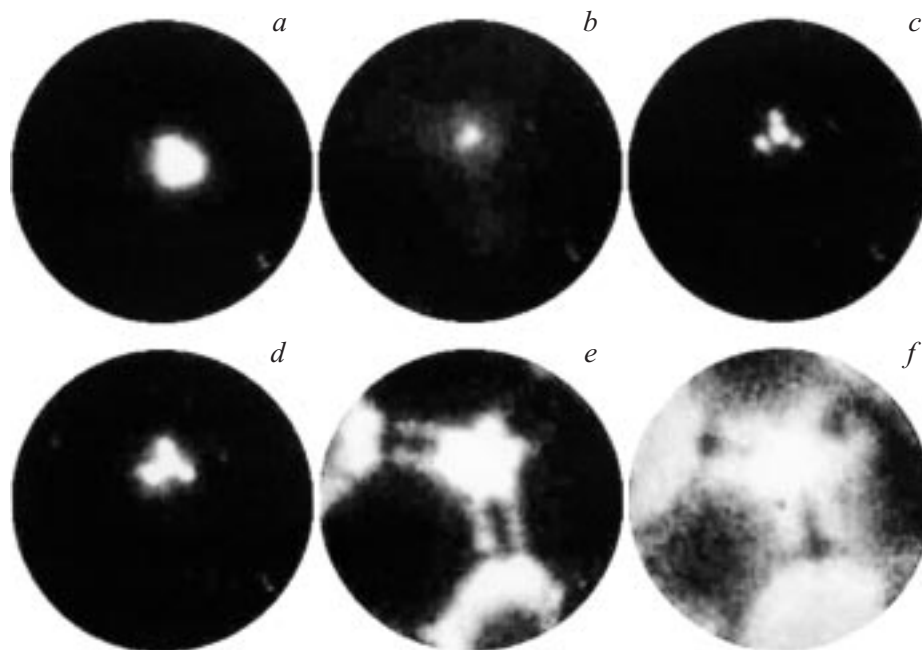
теристики Фаулера–Нордгейма, которые снимались на всех этапах эксперимента.

Процедура эксперимента состояла в следующем. Острие нагревалось до заданной температуры термополевой обработки (2000–2600 К), затем к нему прикладывался положительный электрический потенциал, создающий на поверхности острия электрическое поле в интервале  $(2-8) \cdot 10^7$  В/см, по истечении времени ТПО выключался нагрев, а после остывания острия с него снимался электрический потенциал. Во время ТПО были включены микроканальные пластины, и если происходило полевое испарение материала острия, то создаваемое ионами вольфрама изображение (картины микроскопии высокотемпературного полевого испарения) записывались на видеокамеру.

Форма острия, полученная в результате ТПО, исследовалась с помощью полевой эмиссионной микроскопии при комнатной температуре, а затем на острие наносился изображающий адсорбат — Cs, и производились наблюдение и съемка на видеокамеру полевых десорбционных изображений при вариации температуры и поля. Основные эксперименты проведены на острие с ориентацией оси, близкой к кристаллографическому направлению  $\langle 111 \rangle$ . После термополевой перестройки эмитировал только один угол  $\langle 111 \rangle$ .

Переход к изучению влияния отбора эмиссионных токов на форму перестроенного острия осуществлялся тремя способами. Первый — непосредственно после ТПО и наблюдения полевых электронных изображений острие поворачивалось в положение отбора эмиссии и производился отбор эмиссионного тока. Второй — переход к эмиссионным нагрузкам следовал за наблюдениями полевых десорбционных изображений непрерывного режима, на последней стадии которых острие нагревалось до  $T \geq 500$  К и цезий с острия термически десорбировался. Третий — после термической десорбции цезия к острию сначала прикладывался тот же потенциал, что был при ТПО, и затем острие в течение 2 min прогревалось при  $T = 1000-2600$  К. Эмиссионные и десорбционные изображения, а также характеристики Фаулера–Нордгейма не выявили заметных отличий при использовании этих трех способов, что свидетельствует в пользу того, что нанесение цезия и его термическая и полевая десорбция не оказывают заметного влияния на структуру поверхности и форму перестроенного острия.

Использование полевой десорбционной микроскопии непрерывного действия (ПДМНД) позволяет изучить форму всей вершины перестроенного острия до и после отбора больших эмиссионных токов. Такая возможность обеспечивается особенностью методики, состоящей в том, что в ПДМНД можно наблюдать не только участки поверхности с наибольшим усилением поля (углы перестроенного острия), как в других методах полевой эмиссионной микроскопии. Непрерывное изображение в ПДМНД получается за счет поверхностной диффузии изображающего адсорбата с боковой поверхности



**Рис. 2.** Полевые эмиссионные изображения атомарно острого трехгранного угла  $\langle 111 \rangle$  перестроенного вольфрамового острия до отбора эмиссионных токов большой плотности: *a* — полевое электронное изображение ( $T = 300 \text{ K}$ ,  $V = 3000 \text{ V}$ ); *b-f* — видеокдры полевого десорбционного изображения непрерывного действия, снятые при изменении температуры от 320 до 380 К и напряжения от 2000 до 5000 В.

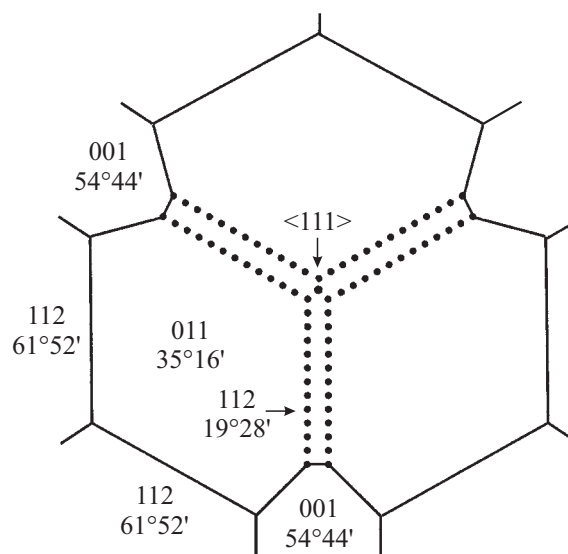
острия на его вершину и полевой десорбции в виде положительных ионов. Ионы двигаются по радиально расходящимся траекториям и, попадая на экран, создают увеличенное изображение участка поверхности, с которого они десорбировались. При повышении приложенного к острию напряжения зона десорбции перемещается по поверхности острия от участка поверхности с наибольшей напряженностью поля, где десорбция началась, к участкам с меньшим локальным усилением поля. С участков поверхности с большей, чем в зоне десорбции, напряженностью поля адсорбат полностью удален и не может туда поступить из-за десорбции на окружающей поверхности. При изменении напряжения зона десорбции (изображающая) перемещается по поверхности, что позволяет проследить форму всей вершины острия.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

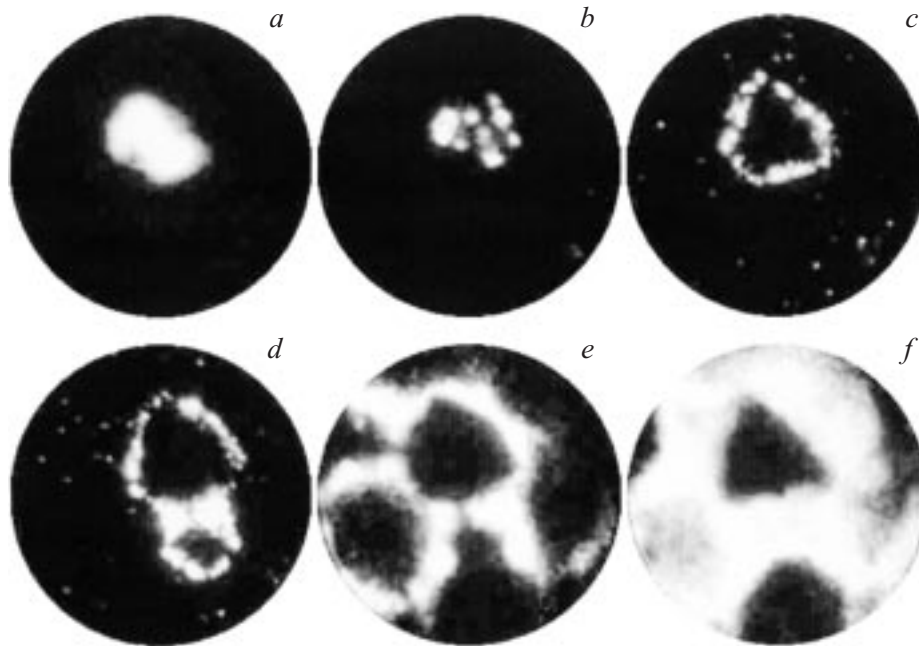
Поверхность острия, перестроенного при использовании режима ТПО, состояла из трех гладких плоскостей  $\{011\}$ , образующих грани угла  $\langle 111 \rangle$ , плоскости  $\{111\}$  на вершине угла с неупорядоченно расположенными на ней поверхностными атомами и образующих ребра угла узких и длинных плоскостей  $\{112\}$  с поперечными или продольными ступенями. Размеры граней  $\{111\}$ , количество, расположение и размеры ступеней плоскостей  $\{112\}$  зависели от режимов ТПО. В случае больших граней  $\{111\}$  и  $\{112\}$  заметные изменения

эмиссионных характеристик и огранки вершины острия проявляются при токе полевой электронной эмиссии  $50-100 \mu\text{A}$ . Если вершины и ребра многогранного угла близки к моноатомным, то изменения начинаются при токе менее  $1 \mu\text{A}$ .

На рис. 2 показаны полевые электронные и десорбционные изображения вольфрамового острия после ТПО, приведшей к наиболее приближенной к идеаль-



**Рис. 3.** Схема перестроенного острия. Цифрами обозначены индексы Миллера плоскостей и углы их наклона к плоскости рисунка.



**Рис. 4.** Полевые эмиссионные изображения после отбора эмиссионного тока  $100\ \mu\text{A}$ : *a* — полевое электронное изображение ( $T = 300\ \text{K}$ ,  $V = 3700\ \text{V}$ ); *b–f* — полевые десорбционные изображения непрерывного действия.

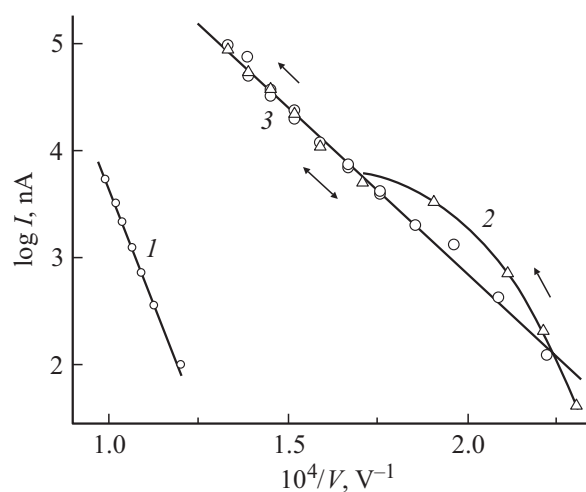
ному трехгранному углу форме острия. Режимы ТПО:  $V = 9700\ \text{V}$ ,  $T = 2200\ \text{K}$ ,  $t = 120\ \text{s}$ . Схема полученной формы вершины острия приведена на рис. 3. Рис. 4 представляет электронные и десорбционные изображения того же острия после отбора тока полевой электронной эмиссии  $100\ \mu\text{A}$  в течение  $5\ \text{min}$ . На рис. 5 приведены характеристики Фаулера–Нордгейма.

Непосредственно после перестройки ребра трехгранного угла состояли из длинных плоскостей  $\{112\}$ , состоявших из двух плотноупакованных рядов атомов, грань  $(111)$  отсутствует, а на вершине угла расположен единичный атом (рис. 3). После отбора эмиссионного тока  $100\ \mu\text{A}$  огранка острия изменилась. Изменения произошли в наиболее острых участках поверхности — вершине трехгранного угла и его ребрах. На вершине угла появилась грань  $(111)$ , перпендикулярная оси угла, т. е. вершина угла „срезана“ плоскостью  $(111)$ .

Грани  $\{112\}$ , образующие ребра угла, расширились и на ребрах появились ступени и новые грани, которых не было на острии до отбора тока. Ребра угла из длинных и узких плоскостей  $\{112\}$  (шириной в 2 атомных ряда) превратились в области, состоящие из плоскостей  $\{112\}$  и  $\{001\}$  и их ступеней. Плоские грани  $\{011\}$  и  $\{001\}$ , которые были на острие до отбора тока, сохранились. Размеры граней  $\{001\}$  уменьшились за счет расширения ребер и появления ступенчатых и скругленных переходных областей между плоскостями  $\{011\}$ ,  $\{001\}$  и  $\{112\}$ .

Характеристика Фаулера–Нордгейма, снятая при первоначальном подъеме эмиссионного тока (кривая 2, рис. 5), показывает, что изменения формы острия и эмиссионных характеристик начинаются при токе  $\sim 100\ \text{nA}$ , а основные изменения произошли в интервале

токов  $1–5\ \mu\text{A}$ . При дальнейшем увеличении тока до  $100\ \mu\text{A}$  эмиссионные характеристики острия изменились мало. После выдержки при токе  $100\ \mu\text{A}$  в течение  $5\ \text{min}$  форма острия стабилизировалась и не изменялась заметным образом при отборе эмиссионного тока вплоть до  $150\ \mu\text{A}$ . Характеристика Фаулера–Нордгейма, снятая как при повышении напряжения, так и при понижении, была прямой. Эмиссионные характеристики сохранялись после отбора эмиссионного тока  $150\ \mu\text{A}$  в течение  $5\ \text{min}$ . Плотности тока, при которых происходили изменения формы эмиттера, можно определить



**Рис. 5.** Вольт-амперные характеристики Фаулера–Нордгейма, снятые с: 1 — исходного острия формы отжига; 2 — перестроенного острия при подъеме тока от 0 до  $100\ \mu\text{A}$ ; 3 — острия новой стабилизированной эмиссионным током формы.

из характеристик Фаулера–Нордгейма и эмиссионных и десорбционных изображений. Сравнение изображений рис. 2, *a* и *c* показывает, что первоначальная площадь эмиссии в интервале токов 0.1–1  $\mu\text{A}$  составляла  $\sim 10^{-14} \text{ cm}^2$ . Соответственно изменение формы атомарно острого эмиттера началось при плотности тока  $10^7$ – $10^8 \text{ A/cm}^2$ . При повышении тока до 100  $\mu\text{A}$  площадь эмиссии увеличилась до  $\sim 10^{-13} \text{ cm}^2$ , и плотность тока составляла  $\sim 10^9 \text{ A/cm}^2$ .

Используемая форма эмиттера (перестроенное в электрическом поле острие) была равновесной в электрическом поле и не изменялась при нагревании в поле при положительном потенциале острия до  $T = 2600 \text{ K}$ . Однако при приложении потенциала противоположного знака и отборе тока полевой электронной эмиссии происходили заметные изменения формы острия. Это может быть связано с несколькими причинами. Приложенное к острию напряжение при эмиссии отличается от величины напряжения при ТПО. В приведенном примере ТПО производилась при  $V = 9.7 \text{ kV}$ , а эмиссия — при  $V = 7 \text{ kV}$ , при этом поле дополнительно ослаблено пространственным зарядом эмитированных электронов.

Вторая возможная причина — отличие распределения температуры по острию. В случае ТПО нагревание вершины острия получалось за счет теплопроводности от его основания. При эмиссии тепло выделяется в эмиссионной области. В нашем случае площадка эмиссии размером порядка 1  $\mu\text{m}$  находится на вершине пирамиды со средним углом раствора примерно  $120^\circ$ . Геометрия эмиттера обеспечивает хороший теплоотвод от эмитирующей области, что создает большой перепад температуры на вершине острия. Таким образом, к движущим силам поверхностной диффузии наряду с поверхностным натяжением и давлением электрического поля [13] добавляются градиент температуры вдоль поверхности острия от его вершины к основанию и неоднородное тепловое расширение.

Наличие данных факторов объясняет возможность появления при полевой электронной эмиссии наблюдаемой особой формы острия, которая не совпадает с известными формами, получаемыми при термополевой обработке и последовательном сочетании термополевой обработки с прогревом без поля. Форма острия, полученная при эмиссии, отличается от перестроенного в поле острия только в областях, прилегающих к вершине угла. Другие участки поверхности острия при эмиссии не изменились. Это связано с тем, что при более низком напряжении, чем при перестройке, поле на участках поверхности с наибольшей кривизной недостаточно для компенсации сглаживающего действия поверхностного натяжения. В то же время температура, достаточная для активации поверхностной диффузии, в отличие от режима ТПО имеется только в непосредственной близости от области эмиссии (вершины угла). Получаемая в результате отбора эмиссионного тока  $> 50 \mu\text{A}$  с угла перестроенного острия форма является стабильной при полевой электронной эмиссии и сохраняется при самопрогреве эмиттера эмиссионным током.

## Заключение

Отбор полевой электронной эмиссии большой плотности тока с трехгранного угла  $\langle 111 \rangle$  перестроенного в электрическом поле вольфрамового острия вызывает изменения формы эмиттера. Эти изменения, в отличие от эмиттеров с более гладкой поверхностью, не приводят к локальному усилению поля, лавинообразному росту эмиссионного тока и разрушению эмиттера. Изменения формы сводятся к сглаживанию вершины угла с образованием (или расширением, если она была на исходном перестроенном острие) грани  $\{111\}$  и к расширению участков ребер угла, прилегающих к вершине с соответствующим уменьшением размеров плоскостей  $\{011\}$ , образующих грани угла. На расширенных участках ребер растут ступени плоскостей  $\{112\}$  и  $\{001\}$ . При эмиссионном токе  $\sim 100 \mu\text{A}$  образуется новая стабильная в условиях эмиссии форма острия, которая не совпадает с известными формами перестроенного острия. Отличия связаны, по-видимому, с характером нагрева и распределения температуры по острию при эмиссии. Максимальный ток ( $\sim 100 \text{ nA}$ ), который можно получить с атомарно острого угла, ограничен происходящим при эмиссии затуплением угла, а не пространственным зарядом эмитированных электронов или другими причинами.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 05-08-18047-а).

## Список литературы

- [1] *Benjamin M., Jenkins R.O.* // Proc. Roy. Soc. Lond. 1940. Vol. A 176. P. 262.
- [2] *Bettler P.C., Charbonnier F.M.* // Phys. Rev. 1960. Vol. 119. P. 85.
- [3] *Шредник В.Н.* Рост кристаллов. М.: Наука, 1980. Т. 13. С. 68.
- [4] *Swanson L.W., Crouser L.C.* // J. Appl. Phys. 1969. Vol. 40. Iss. 12. P. 4741.
- [5] *Science of Microscopy* / Ed. by P.W. Hawkes, J.C.H. Spence. Springer, 2007. 1318 p.
- [6] *Rokuta E., Itagaki T., Ishikawa T., Cho B.-L., Kuo H.-S., Tsong T.T., Oshima C.* // Appl. Surf. Sci. 2006. Vol. 252. P. 3686.
- [7] *Yu M.L., Hussey B.W., Kim H.-S., Chang T.H.P., Vac J.* // Sci. Technol. 1994. Vol. B 12. P. 3431.
- [8] *Павлов В.Г., Рабинович А.А., Шредник В.Н.* // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 17. С. 247.
- [9] *Шредник В.Н.* // Микроэлектроника. 1977. Т. 26. № 2. С. 97.
- [10] *Fursey G.N.* // Appl. Surf. Sci. 2003. Vol. 215. P. 113.
- [11] *Bernatski D.P., Pavlov V.G.* // Proc. 9<sup>th</sup> Int. Vac. Microelectron. Conf. St.-Petersburg: Nevskiy Kur'er, 1996. P. 47.
- [12] *Власов Ю.А., Павлов В.Г., Шредник В.Н.* // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. С. 548.
- [13] *Herring C.* // Structure and properties of solid surfaces / Ed. by R. Gomer and C.S. Smith. Chicago: University Press, 1953. P. 5.