

11;12  
©1995

## ОДНОВРЕМЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ И ТЕМПЕРАТУР НА КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ СЛОИ КРЕМНИЯ НА ВОЛЬФРАМЕ

*О.Л.Голубев*

Одной из основных проблем развития приборов современной вакуумной микроэлектроники является выбор катода. Лучше всего идеи вакуумной микроэлектроники реализуются на основе матричных автоэмиссионных катодов [1]. Такие катоды дают уже в настоящее время плотности эмиссионного тока до  $1000 \text{ А/см}^2$  при рабочих напряжениях 50–100 В. Важнейшими проблемами, которые требуют решения для дальнейшего развития подобных катодов, являются повышение плотности тока, крутизны вольт-амперной характеристики и снижение рабочего напряжения. Весьма эффективным способом решения подобных задач может быть термополевая ( $T-F$ ) обработка — одновременное воздействие сильных электрических полей и относительно высоких температур на острия-автоэмиттеры.

В данной работе изучалась  $T-F$  обработка поверхности автоэмиссионного катода, представлявшего собой вольфрамовое  $W$ -острие с радиусом закругления  $r = 0.5-0.7 \text{ мкм}$ , на которое наносился слой кремния Si толщиной 900–1000 монокристаллических слоев. Такая система лучше всего моделирует ситуацию, характерную для матричных автоэмиссионных катодов, когда эмитирующие конусы из Mo, Si и других материалов выращиваются на Si-подложке, причем характерные высоты таких конусов порядка 1–2 мкм и  $r = 400-500 \text{ А}$  [2]. Система Si-W удобна также и тем, что позволяет сформировать достаточно “толстые” слои Si на поверхности  $W$  при различных температурах подложки вплоть до  $T = 800 \text{ К}$ , выше которой только начинается заметная диффузия атомов Si в объем  $W$ . При этом слои Si можно получить как относительно рыхлые при низких  $t \sim 300 \text{ К}$ , так и кристаллически упорядоченные — при  $T = 600-700 \text{ К}$ .

В работе применялась методика полевой электронной микроскопии, вакуум в приборе —  $10^{-10}-10^{-11}$  Тор по адсорбирующимся газам. Использовались низкие по сравнению с  $T-F$  обработкой металлов  $T = 700-1000 \text{ К}$  и относительно умеренные поля  $F = 0.3-0.8 \text{ В/А}$ . На поверхности  $W$ -острия было сконденсировано 900–1000 монослоев Si при

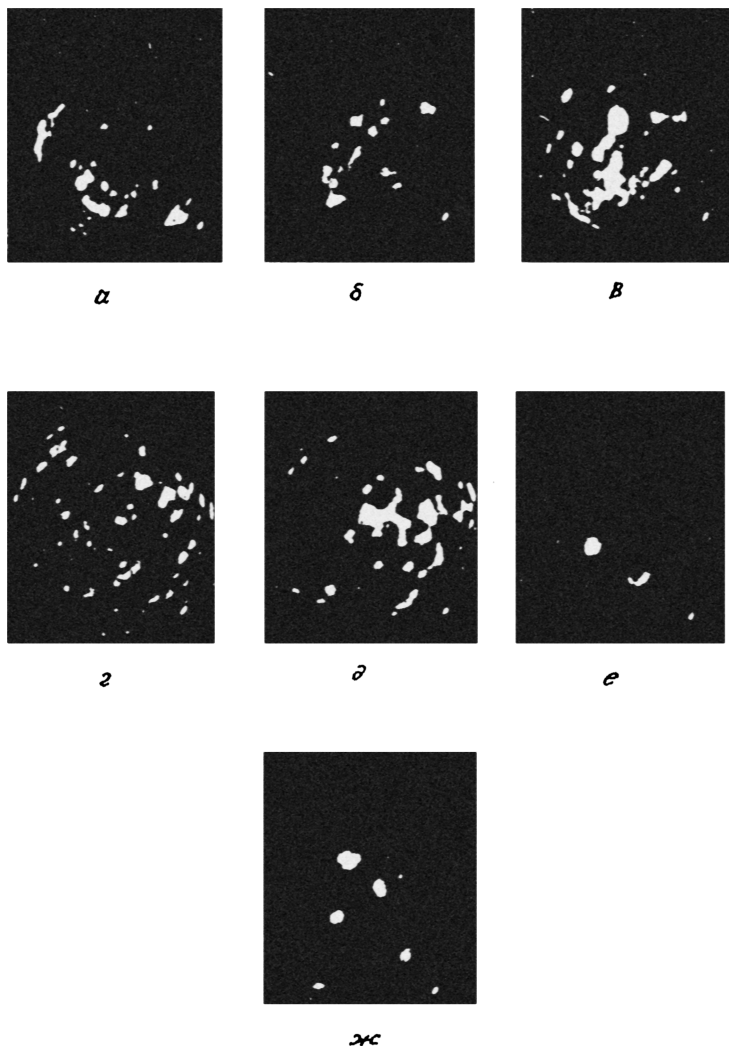


Рис. 1. Полевые электронные изображения поверхности слоя Si на W (толщина — 900 моноатомных слоев) на различных стадиях  $T$ - $F$  обработки: *а* — исходное состояние,  $U_{10} = 7190$  В; *б* — после обработки при  $T_{06} = 700$  К и  $F_{06} = 0.55$  В/А, начальная стадия перестройки в поле,  $U_{10} = 6280$  В; *в* — после  $T_{06} = 780$  К и  $F_{06} = 0.66$  В/А, стадия глубокой перестройки,  $U_{10} = 4700$  В; *г* — после  $T_{06} = 870$  К и  $F_{06} = 0.82$  В/А, большое число невысоких микровыступов,  $U_{10} = 4540$  В; *д* — после прогрева состояния “*г*” при  $T = 870$  К в отсутствие поля, макроноросты на поверхности; *е* — после  $T_{06} = 980$  К и  $F_{06} = 0.66$  В/А, два острых микровыступа,  $U_{10} = 2960$  В; *ж* — после  $T_{06} = 980$  К и  $F_{06} = 0.82$  В/А, слабое затупление микровыступов,  $U_{10} = 3210$  В.

$T$  подложки 620 К, когда на поверхности вырастали кристаллиты Si, имеющие собственную огранку (рис. 1). Затем производилась  $T-F$  обработка этого конденсата при различных  $T_{06}$  и  $F_{06}$ , т.е. напряжений обработки  $U_{06}$ . Напряжение  $U_{06}$  имеет знак, обратный тому, при котором катод дает эмиссионный электронный ток. После каждого цикла обработки при определенных  $T_{06}$  и  $F_{06}$  ( $U_{06}$ ) снимались эмиссионные характеристики Фаулера-Нордгейма и определялись параметры эмиттера: фактор поля  $\alpha = F/U$  и напряжение  $U_{10}$ , необходимое для получения фиксированного значения эмиссионного тока 10 нА. Во всех экспериментах использовалась стандартная продолжительность  $T-F$  обработки для каждого цикла — одна минута.

При наиболее низких  $T_{06} = 700$  К и  $U_{06} = 8-10$  кВ ( $F_{06} = 0.44-0.55$  В/А) происходило очень слабое “заострение” эмиттера, поскольку  $U_{10}$  падало от исходного значения 7190 до 6280 В, т.е. на  $\sim 13\%$ . При этом полевое электронное изображение поверхности (рис. 1, б) практически не обнаруживало заметных изменений по сравнению с исходным состоянием (рис. 1, а). Рост  $T_{06}$  до 780 К и  $F_{06}$  до 0.66 В/А приводит к заметной перестройке поверхности конденсата в электрическом поле, в этом случае эмитируют только ребра расширившихся граней (рис. 1, в). Перестройка поверхности приводит уже к значительному падению  $U_{10} = 4700$  В и росту  $\alpha$  от исходной величины 5463 до 9471 1/см. Повышение  $T_{06}$  до 870 К при том же  $F_{06} = 0.66$  В/А вызывает появление на поверхности микровыступов (рис. 1, г), однако эти микровыступы не “острые” и высота их незначительна, в этом случае  $U_{10} = 4540$  В, т.е. меньше исходного в 1.58 раза, а  $\alpha = 10\,2871$  /см, что больше исходного в 1.88 раза. Дальнейший рост  $U_{06}$  до 15 кВ (при этом  $F_{06} = 0.82$  В/А) вызывает некоторое затупление микровыступов и  $U_{10}$  уже несколько возрастает до 5040 В. Осторожное сглаживание микровыступов прогревом острия при  $T = 870$  К в отсутствие внешнего поля демонстрирует наличие на поверхности больших наростов — макронаростов, выросших на кристаллитах Si, на углах и ребрах макронаростов, и растут микровыступы (рис. 1, д). Это означает, что на кристаллически упорядоченных адсорбированных слоях наблюдаются те же типы формоизменений поверхности при  $T-F$  воздействии, что и для чистых металлов — перестройка в электрическом поле, образование микровыступов и макронаростов [3]. Таким образом, при  $T_{06}$ , вплоть до 870 К и  $U_{06}$ , примерно в 1.5–1.6 раза превышающих исходное  $U_{10}$ , можно “заострить” эмиттер по напряжению в 1.5–1.6 раза.

Радикальные изменения происходят с эмиттером при  $T_{06} = 980$  К. Уже при  $U_{06} = 9$  кВ величина  $U_{10} = 4110$  В падает по сравнению с исходной в 1.75 раза, а  $\alpha$  растет

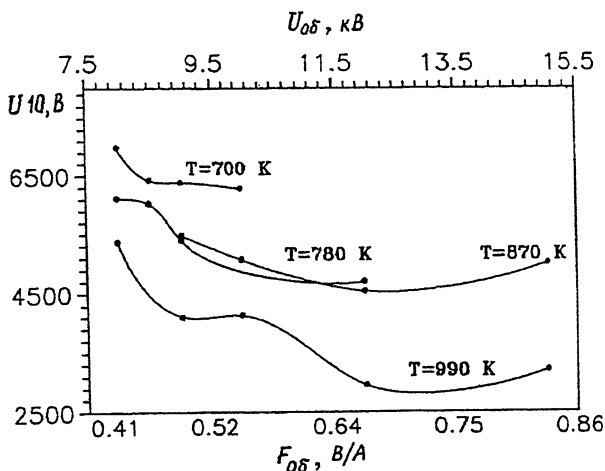


Рис. 2. Зависимость величины  $U_{10}$  от  $F_{06}$  при различных  $T_{06}$ .

до 119031/см. Эмиссионная картина показывает наличие нескольких яркоэмитирующих микровыступов и углов перестроенного острия. Увеличение  $U_{06}$  до 12 кВ и  $F_{06}$  до 0.66 В/А вызывает образование на поверхности 2–3 весьма острых микровыступов (рис. 1, е), при этом  $U_{10}$  падает до 2960 В, т.е. в 2.43 раза, и  $\alpha$  возрастает до 183751/см. Дальнейшее повышение  $U_{06}$  до 15 кВ ( $F_{06} = 0.82$  В/А) так же, как и в случае  $T_{06} = 870$  К, приводит к слабому затуплению эмиттера и изменению числа микровыступов (рис. 1, ж). Очевидно, что при прогреве уже до  $T = 870$  К и особенно при

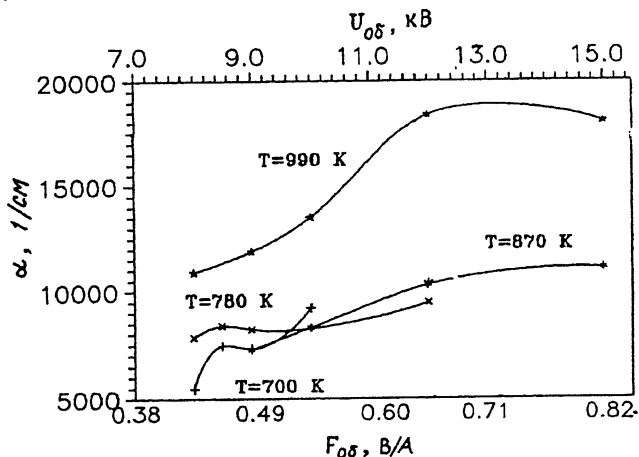


Рис. 3. Зависимость величины фактора поля  $\alpha$  от  $F_{06}$  при разных  $T_{06}$ .

$T = 980 \text{ K}$  происходит объемная диффузия Si с образованием силицида  $\text{WSi}_2$  [4]. Изменение величин  $U_{10}$  и  $\alpha$  в зависимости от  $U_{06}$  и  $T_{06}$  показано на рис. 2 и 3 соответственно.

Таким образом,  $T-F$  обработка эмиттеров из конденсата Si на W при невысоких  $T < 1000 \text{ K}$  и умеренных  $F = 0.3-0.8 \text{ В/А}$  (при этом  $U_{06}$  в 1.5-1.6 раза больше величины, при которой исходный эмиттер дает весьма слабый ток  $10 \text{ нА}$ ), может приводить к таким формоизменениям эмиттера, когда напряжение, необходимое для получения фиксированного значения эмиссионного тока, может падать в 2.0-2.5 раза, т.е.  $T-F$  обработка при правильно подобранных величинах  $T_{06}$  и  $U_{06}$  обеспечивает значительное повышение эффективности катода.

### Список литературы

- [1] Spindt C.A., Brodie I., Humphrey L., Westerberg E.R. // Journ. Appl. Phys. 1976. V. 42. P. 5248-5253.
- [2] Gray H.F. Proceeding of the 29th Field Emission Symposium. Goteborg, 1982. P. 111-119.
- [3] Шредник В.Н. Рост кристаллов. М.: Наука, 1980. С. 326.
- [4] Nishikawa O., Matsushima T., Aruma K. // Surf. Sci. 1983. V. 126. N. 4. P. 529-532.

Физико-технический  
институт им. А.Ф. Иоффе  
С.-Петербург

Поступило в Редакцию  
5 сентября 1995 г.