

05; 11

© 1990

ПРЯМЫЕ ЭЛЕКТРОННОМИКРОСКОПИЧЕСКИЕ
НАБЛЮДЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ МИКРОВЫСТУПОВ
НА ПЛОТНОУПАКОВАННЫХ ГРЯНЯХ МОНОКРИСТАЛЛА
ВОЛЬФРАМА В СИЛЬНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Г.В. Ф у р с е й, Б.Н. М о в ч а н,
В.А. Ш в а р к у н о в

Известно, что при нагреве острия до температуры достаточной для активации процесса самодиффузии и при одновременном приложении сильного электрического поля $F > (16\pi\gamma/R)^{1/2}$ (где γ - коэффициент поверхностного натяжения, R - радиус кривизны острия) на поверхности острейного монокристалла образуются микровыступы. Факт их образования отмечался уже в ранних работах по автоэмиссионной (АЭ) микроскопии [1, 2]. Детальное исследование этого процесса выполнено в работах [3, 4].

Интерес к этому явлению в последние годы связан с развитием новых диагностических методов исследования геометрических структур нанометрового диапазона. Все более становится также очевидным, что образование в электрическом поле микровыступов определяет электрическую прочность вакуумных промежутков и стабильность электронных и ионных полевых источников [5].

Существуют два характерных типа микровыступов, образующихся в электрическом поле: большие микровыступы - макронаросты, соизмеримые с размерами плотноупакованных граней, и существенно более мелкие в десятки ангстрем [3].

Образование больших микровыступов связывается с процессами автоэпитаксиального роста при переносе вещества в электрическом поле на вершину острия. Этот рост, в частности, может приводить к заострению эмиттера в целом [6].

В большинстве экспериментов процесс формирования микровыступов наблюдается в обратном электрическом поле (плюс - на катоде). Определенным недостатком метода обратного поля является то, что одновременно с ростом микровыступов на поверхности происходит их интенсивное испарение полем, а также укорочение острейного кристалла [4]. В работах [7, 8] это послужило основанием для полного отрицания ростового характера при формировании микрорельефа острия в процессе перестройки.

Эксперимент в прямом поле (минус - на катоде) полностью исключает искажающее влияние полевого испарения. Первые эксперименты в прямом поле, показывающие общее заострение эмиттера, выполнены в работе [9]. Однако в этих исследованиях не исключалось полностью адсорбционное загрязнение поверхности. Предвари-

тельные эксперименты на атомарно-чистой поверхности в прямом поле с применением АЭ микроскопии указывают на возможность автоэпитаксиального роста в электрическом поле [10, 11].

В настоящей работе осуществлены непосредственные наблюдения образования больших микровыступов, сформированных на атомарно-чистой поверхности в прямом электрическом поле с применением растровой электронной и просвечивающей электронной микроскопии (РЭМ и ПЭМ) высокого разрешения.

Исследования проводились на острых монокристаллах вольфрама, ориентированных в направлении $[001]$, $[111]$, $[00\bar{1}]$. Основные исследования выполнялись при ориентации кристаллов $[011]$. Для облегчения наблюдения микровыступов при РЭМ эксперименты проводились на монокристаллах с достаточно большим радиусом кривизны $R = 0.6-1.0$ мкм.

Перестройка поверхности монокристалла осуществлялась в сильном электрическом поле при начальном значении вблизи сглаженной поверхности $F_0 \approx 5 \cdot 10^7$ В/см и при температурах $T=1600-2000$ К в вакууме ($p=10^{-9}$ Тор).

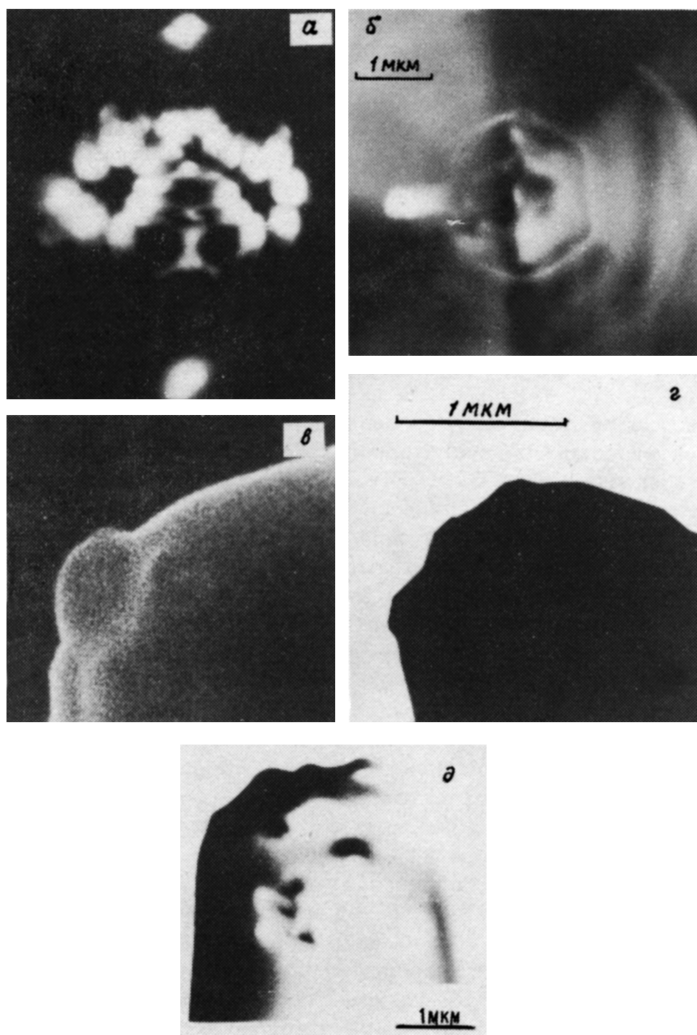
Процедура измерений состояла в следующем: формирование микровыступов проходило в сверхвысоком вакууме АЭ проектора Мюллера, при этом анализировалась АЭ картина и кинетика изменения АЭ тока на различных стадиях перестройки. Затем перестроенное острие извлекалось из проектора и исследовалось в ПЭМ и РЭМ.

Главным результатом исследований является прямое наблюдение больших микровыступов, сформированных на поверхности в прямом электрическом поле (см. рисунок, б, в, г). Наиболее показательный рост этих микровыступов иллюстрируется теневой фотографией, полученной в ПЭМ (разрешение 5 \AA).

АЭ изображение (см. рисунок, а), соответствующее электронно-микроскопическим фотографиям (рисунок, б, в, г), идентично наблюдавшемуся в наших экспериментах для тех же стадий перестройки в обратном поле, а также ранее наблюдавшимся в поле того же знака в работах [3, 4]. Большие микровыступы имеют форму усеченных пирамид. Они расположены на плотноупакованных гранях $\{011\}$, $\{001\}$, $\{211\}$. На теневом профиле острия (рис. 1, 2) проецированы грани (211) (в центре), а также (121) и (100) (сбоку). Вид профиля острия в прямом поле подобен профилям, наблюдавшимся ранее в обратном поле в ряде работ ([4] - рис. 2, 4; [7] - рис. 1, б).

Характерным для перестройки в прямом поле является четкая огранка всей верхушечной части острия. Форма огранки - соосные шестигранники, расположенные друг над другом и разграниченные террасами (см. рисунок, в).

Форма поверхности, полученная при перестройке острия в обратном поле (см. рисунок, д) в основных чертах подобна наблюдавшейся в прямом. Характерной особенностью структуры поверхности в обратном поле является эрозия вершин пирамидальных выступов, происходящая, по-видимому, в результате полевого испарения.



Формы поверхности в процессе перестройки острия в сильном электрическом поле; а - АЭ изображение острия, перестроенного в сильном электрическом поле ($F_0 \approx 5 \cdot 10^7$ в/см); б - ПЭМ фотография вершины острия, вид сверху; в - РЭМ фотография вершины острия, центральный выступ соответствует направлению $[011]$; 2 - ПЭМ фотография вершины острия; д - РЭМ фотография вершины острия, перестроенного в обратном поле. Рисунки а, б, в, г соответствуют одному и тому же острию и одной и той же стадии перестройки в прямом поле.

Таким образом, согласно всей совокупности полученных данных следует, что формирование больших микровыступов как в прямом, так и в обратном поле имеет, по-видимому, общий характер. Испарение электрическим полем лишь частично искажает картину вследствие уноса вещества из мест наибольшей напряженности поля на краях формирующихся микровыступов.

Полученные результаты показывают, что обсуждавшийся ранее механизм формирования больших микровыступов на поверхности острых кристаллов в сильном электрическом поле в результате автоэпитаксиального роста плотноупакованных граней [6] является достаточно обоснованным. Это следует из результатов прямых наблюдений формирования этих микровыступов в прямом поле: четкая огранка микровыступов, строгое соответствие мест их возникновения структуре кристаллической решетки.

Компроментирующая эти представления идея [7] о том, что форма перестройки при нагреве в сильном электрическом поле может быть связана только с „выеданием“ материала катода в результате полевого испарения, в свете полученных нами экспериментальных фактов представляется неправомерной.

Считаем своим долгом заметить, что некоторое влияние на процесс формирования в прямом поле может оказывать ионная бомбардировка с анода, дополнительно активизирующая процесс поверхностной самодиффузии.

В заключение авторы выражают благодарность С.А. Полежаеву за помощь в работе.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Benjamin M., Jenkins R.O. // Proc. Roy. Soc. London. 1940. V. A176. P. 262-279.
- [2] Сокольская И.Л. // ЖТФ. 1956. Т. 26. В. 6. С. 1177-1184.
- [3] Шредник В.Н., Павлов В.Г., Рабинович А.А., Шайкин Б.М. // Изв. АН СССР, Сер. физ., 1974. Т. 38. С. 296-301.
- [4] Вентова И.Д., Фурсей Г.Н., Полежаев С.А. // ЖТФ. 1977. Т. 47. В. 4. С. 849-856.
- [5] Furse G.N. // IEEE Transactions on Electrical Insulation. 1985. V. E1-20. N 4. P. 659-670.
- [6] Shrednic V.M., Pavlov V.G., Rabinovich A.A., Shaikin B.M. // Phys. Status Solid (a). 1974. Bd. 23. S. 373-381.
- [7] Жуков В.М., Полежаев С.А. // ЖТФ. 1987. Т. 57. В. 6. С. 1133-1136.
- [8] Жуков В.М., Полежаев С.А. // Радиотехника и электроника. 1988. Т. 33. В. 8. С. 1741-1747.
- [9] Фурсей Г.Н., Карцев Г.К. // ЖТФ. 1970. Т. 40. В. 2. С. 310-319.

- [10] Фурсей Г.Н., Птицын В.Э., Кротович Д.Н., Шваркунов В.А. // Тез. докл. XX Всес. конф. по эмиссионной электронике. Киев, 1987. Т. 1. С. 202.
- [11] Птицын В.Э., Фурсей Г.Н. // Изв. АН СССР, сер. физ. 1988. Т. 52. № 8. С. 1513-1517.

Поступило в Редакцию
14 августа 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 20

26 октября 1990 г.

09; 12

© 1990

ПОЛУЧЕНИЕ МОЩНОГО СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ СЛОЖЕНИИ РАДИОСИГНАЛОВ НА ВЫХОДЕ РЕЗОНАНСНЫХ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ

С.А. Новиков, С.В. Разин,
П.Ю. Чумерин, Ю.Г. Юшков

При разработке и создании резонансных формирователей, предназначенных для усиления импульсной мощности радиосигналов СВЧ за счет временной компрессии, необходимо обеспечить устойчивую работу генератора возбуждения [1]. Обычно для этого в волноводный тракт питания формирователя включают развязывающие устройства - ферритовые вентили или циркуляторы. При уровнях мощности возбуждающих генераторов 10^6 - 10^8 Вт применение таких устройств затруднительно из-за малой доступности и низкой электрической прочности. Поэтому представляет интерес осуществить возбуждение резонансных формирователей через мостовые устройства по схеме, предложенной в [2, 3], для питания резонансных ускорителей электронов, когда развязывающие устройства не требуются. Но в этом случае возникают проблемы обеспечения синхронного включения вывода высокочастотной энергии из формирователей и синфазного сложения их выходных радиосигналов.

В данной работе приведены первые результаты исследования схемы возбуждения двух резонансных формирователей через волноводный трехдецибальный мост и сложения выходных наносекундных СВЧ-импульсов в общей нагрузке.

Возбуждение двух формирователей осуществлялось от магнетронного генератора, работающего на частоте 2.82 ГГц и имеющего выходную мощность до $1.3 \cdot 10^6$ Вт, длительность СВЧ-импульсов $3.5 \cdot 10^{-6}$ с и частоту следования 50 Гц, по схеме, показанной на рис. 1. Конструкции резонансных волноводных формирователей были идентичны и выполнены по схеме симметричного двойного волновод-