

05;11;12

©1995

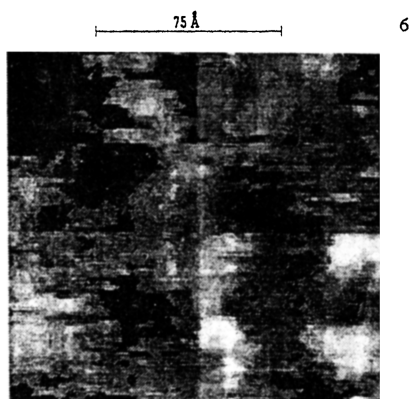
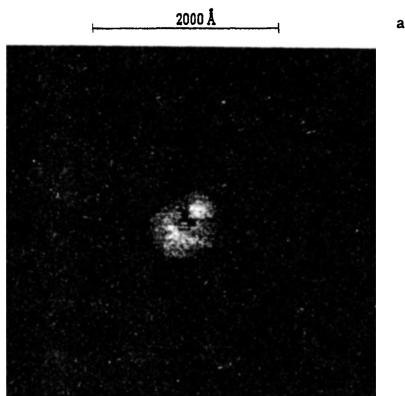
## СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛ-УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК, МОДИФИЦИРОВАННЫХ С ПОМОЩЬЮ СКАНИРУЮЩЕГО ТУННЕЛЬНОГО МИКРОСКОПА

*Д.Г.Волгунов, И.А.Дорофеев, Н.Н.Салащенко, М.И.Токман*

Основные условия локальной модификации поверхности металл-углеродных многослойных синтетических структур (МСС) Fe/C и Ni/C при импульсном ( $\tau \simeq 10^{-8} + 10^{-2}$  с) воздействии тока иглы сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) представлены нами в работе [1]. Относительно низкий порог модификации (при  $\tau = 10^{-8}$  с, пороговое напряжение  $U = 5$  В, ток  $I = 0.5$  мА), большой контраст СТМ-изображения модифицированной области, сканируя, игла поднимается над модифицированной областью на расстояние до 30 нм, и, наконец, возможность получения малых размеров модифицированной области (10–100 нм в диаметре) позволяют предполагать, что наблюдаемый эффект может быть использован как для сверхплотной записи и считывания информации, так и для создания элементов нанoeлектроники.

В экспериментах использовался СТМ, изготовленный в ИФМ РАН. Его калибровка осуществлялась стандартным образом [2]. На атомарном масштабе для калибровки использовался высокоориентированный пиролитический графит, а на микронном — дифракционная решетка с известным периодом.

В настоящей работе приведены экспериментальные данные по изучению топографии и эмиссионных свойств поверхности МСС, модифицированной при помощи СТМ. СТМ-изображения модифицированной области, приведенные на рис. 1 для двух масштабов увеличения, получались сразу после воздействия при одинаковых установочных параметрах —  $I_t = 1$  нА,  $U_t = 0.1$  В. Отметим, что структура модифицированной области зависит от режима импульсного воздействия. Вблизи порога модификации она представляет собой набор “возвышенностей” и “впадин”, не связанных между собой. В целом форма такой области, на наш взгляд, определяется геометрией иглы вблизи



**Рис. 1.** СТМ-изображения модифицированной области на поверхности МСС. Размер кадра: а — 400×400 нм, б — 15×15 нм.

острия, неоднородностью состава металл-углеродной многослойной структуры, характером загрязнений на игле и образце, а также распределением межзеренных границ в материале МСС, которые образуют основные диффузионные каналы в слоях структуры. При повышении напряжения на туннельном промежутке ток протекает в первую очередь через микровыступы иглы, находящиеся ближе к поверхности. Из-за аррениусовской зависимости коэффициента диффузии от температуры и случайного распределения каналов диффузии в МСС появление нижележащего материала на поверхности происходит в отдельных точках нагретой зоны. Следует отметить, что нагрев материала приводит к генерации дефектов в образце и, таким образом, весь про-

цесс приобретает типичные черты неустойчивости с широким набором положительных обратных связей. Наиболее яркое проявление такой термодиффузионной неустойчивости, происходящей в сильно неоднородном электрическом поле, состоит в пороговом характере модификации многослойных структур. Существенную роль полевых процессов можно предполагать по тому, например, что дипольный момент атомов металла много больше, чем атомов углерода, для сравнения: у никеля в десять раз больше, чем у углерода [3]. Соответственно во столько же раз больше сила, втягивающая диполь в область полевой неоднородности.

Все вышеперечисленное приводит к неоднородному распределению металла в углеродном слое с возможной последующей кластеризацией его при превышении некоторого критического размера металлического зародыша. Отметим также возможность химических превращений в нагретой смеси веществ (образование карбидов и др.). Прямым подтверждением наличия металла на поверхности являются результаты Оже-исследований, согласно которым среднее содержание никеля на поверхности после модификации возрастает в 2–3 раза [4].

Подобный сценарий процесса модификации не противоречит наблюдаемому изображению поверхности многослойной структуры с помощью СТМ. На рис. 1, б показана часть модифицированной области с большим разрешением. Перепад высот от светлого до темного зависит от выбранного размера участка, его положения в модифицированной области и в данном случае составляет около 5 нм. Характерный размер светлых областей 5–10 нм может быть принят за размер кластеров, получившихся в результате воздействия импульсного теплового источника.

О неоднородном составе модифицированной области свидетельствуют дополнительные исследования. На рис. 2 представлены вольт-амперные характеристики туннельного контакта  $I(U)$  и зависимости тока от величины уменьшения расстояния между иглой и образцом  $I(-\Delta z)$ , полученные с использованием вольфрамовой иглы. Методика снятия  $I(U)$  и  $I(-\Delta z)$  состоит из нескольких стадий: передвижение иглы к нужному месту поверхности в режиме постоянного тока (в нашем случае  $I_t = 1$  нА,  $U_t = 0.1$  В), выключение обратной связи, подача развертки по напряжению на туннельный промежуток (для снятия  $I(U)$ ) или на пьезодвигатель (для снятия  $I(-\Delta z)$ ). Отметим, что все приведенные зависимости получены после усреднения нескольких десятков кривых.

При снятии зависимостей  $I(U)$  над модифицированной областью игла перемещалась с шагом 1 нм по прямой, пересекающей модифицированную область. При этом полу-

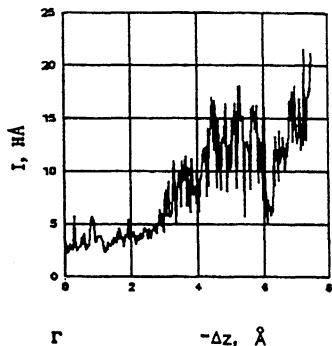
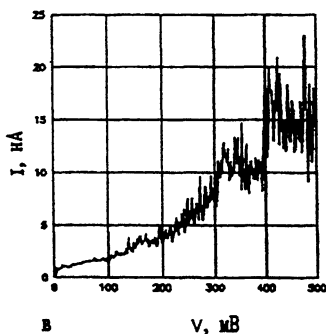
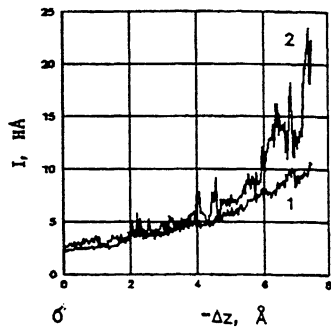
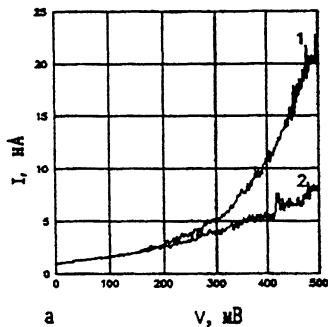


Рис. 2. Зависимости тока: а, в — от напряжения, б, г — от величины уменьшения расстояния между иглой и образцом, а, б — внутри модифицированной области, в, г — на краю модифицированной области.

чались кривые типа 1 и 2 (рис. 2, а). Кривые типа 1 практически совпадают с кривыми  $I(U)$ , получаемыми над поверхностью, не подвергнутой воздействию, а кривые типа 2 совпадают с кривыми, получаемыми над пленками никеля [1]. Характерный размер областей, внутри которых наблюдались ВАХ типа 2, составлял 5–10 нм, причем плотность таких областей на единицу площади поверхности возрастала по мере приближения к центру. Так как кривые типа 2 наблюдались над пленками никеля, то можно предположить, что плотность кластеров металла на единицу поверхности также максимальна в центре.

Внутри модифицированной области также зафиксировано наличие двух типов зависимости тока от величины уменьшения расстояния между иглой и образцом. На рис. 2, б, г представлены кривые  $I(-\Delta z)$ . Они снимались сразу после  $I(U)$ , т. е. в той же точке и с теми же начальными

ми условиями ( $I_t, U_t$ ). На рис. 2, б кривые 1 и 2 соответствуют кривым 1 и 2 рис. 2, а. Про кривые 1 и 2 рис. 2, б также можно сказать, что они схожи с кривыми, получаемыми над исходной поверхностью и над пленками никеля.

Из общих соображений понятно, что вид  $I(U)$  и  $I(-\Delta z)$  определяется работой выхода, плотностью состояний и другими параметрами, совокупность которых определяет величину регистрируемого тока. Изменение вида зависимостей  $I(U)$  и  $I(-\Delta z)$  свидетельствует о наличии участков с различной работой выхода и плотностью состояний, т. е. участков, имеющих разный химический состав. Простой анализ на основе выражения, полученного в [5], приводит к выводу о том, что работа выхода над участками, где получались кривые типа 1 (рис. 2, а, б), меньше, чем над участками, где получались кривые типа 2 (того же рисунка).

Обращает на себя внимание явная корреляция масштаба, на котором меняется тип зависимостей  $I(U)$  и  $I(-\Delta z)$  с характерным размером топографических особенностей СТМ-изображения рельефа модифицированной области. Однако однозначно связать вид подобных характеристик с "темными" или "светлыми" областями на СТМ-изображении модифицированной поверхности нельзя, так как радиус кривизны иглы больше размеров неоднородностей внутри модифицированной области.

На границе исходной и модифицированной области характер зависимостей  $I(U)$  и  $I(-\Delta z)$  резко менялся, происходили большие выбросы тока, типичный вид кривых представлен на рис. 2, в, г. Такие резкие скачки тока можно объяснить тем, что игла имеет конечную кривизну, поэтому при снятии соответствующих зависимостей  $I(U)$  и  $I(-\Delta z)$  возможно перераспределение тока по микровыступам иглы, исходной поверхности и поверхности модифицированной области так, что в процессе снятия какой-либо зависимости ток течет через участки поверхности с разными эмиссионными свойствами. Сложная геометрия туннельного контакта на границе модифицированной области также способствует появлению выбросов на соответствующих кривых.

Таким образом, в нашей работе продемонстрировано изменение эмиссионных свойств в модифицированной области и исследована внутренняя структура модифицированной области.

Авторы благодарят М.Н. Дроздова и Н.В. Востокова за помощь в проведении экспериментов.

Работа поддержана РФФИ, грант 94-02-04537.

## Список литературы

- [1] Аксахлаян А.Д., Гапонов С.В., Дорофеев И.А., Пестерев С.В., Полушкин Н.И., Салащенко Н.Н., Токман М.И. // ЖЭТФ. 1994. Т. 64. В. 4.
- [2] Волгунов Д.Г., Дорофеев И.А., Миронов В.Л., Платнов Ю.Я. // Поверхность. 1993. № 5. С. 43–49.
- [3] Физические величины: Справочник / Под ред. Григорьева С.И., Мейлихова Е.З. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
- [4] Востоков Н.В., Дорофеев И.А., Дроздов М.Н., Полушкин Н.И., Салащенко Н.Н., Шашкин В.И. // Тез докл. Росс. конф. "Микроэлектроника-94". Звенигород, 1994. Ч. 2. С. 151–152.
- [5] Sacks W., Gauthier S., Rousset S., Klein J., Esrick M.A. // Phys. Rev. B. 1987. V. 36. N 2. P. 961–967.

Институт физики  
микроструктур РАН  
Нижний Новгород

Поступило в Редакцию  
11 января 1995 г.