

11;12

Исследование поверхности пленок алмазоподобного углерода, легированного медью

© В.И. Иванов-Омский, С.Г. Ястребов,
А.О. Голубок, С.А. Масалов, В.В. Розанов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
Институт аналитического приборостроения РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 25 марта 1998 г.

Сообщается об исследовании поверхности слоев алмазоподобного углерода, легированного медью, методами сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии. Обнаружено, что введение меди модифицирует как микроструктуру, так и электронные свойства слоев.

Интерес к пленкам аморфного гидрированного углерода ($a\text{-C:H}$), называемого иногда алмазоподобным, ($a\text{-C:H}$) в первую очередь связан с их уникальными свойствами как универсального покрытия [1]. Однако в последнее время привлекли к себе внимание их эмиссионные свойства, в том числе при их легировании, приводящем к заметной полевой эмиссии при сравнительно небольшой величине электрического поля $E \sim 10^4 \text{ V/cm}$ [2].

Целью работы было исследование микрофотографии и локальной электронной эмиссии слоев $a\text{-C:H}$, легированного медью.

Слои $a\text{-C:H}$ формировались на подложках Si (111), на которые методом магнетронного распыления наносился хромовый буферный подслой толщиной $1.5 \mu\text{m}$ для уверенного захвата туннельного тока при последующем исследовании поверхности методом сканирующей туннельной микроскопии (СТМ). На подготовленные таким образом подложки после их обезгаживания в ростовой камере при температуре $T = 200^\circ\text{C}$ при давлении 10^{-6} Torr производилось осаждение слоев $a\text{-C:H:Cu}$ методом магнетронного сораспыления графитовой и медной мишеней в аргоноводородной плазме (80%Ar, 20%H; $P = 10 \text{ mTorr}$ [3]). Мощность, выделяемая на магнетроне, составила величину $\sim 400 \text{ W}$ (ток через магнетрон поддерживался равным 1 А). Толщина пленки

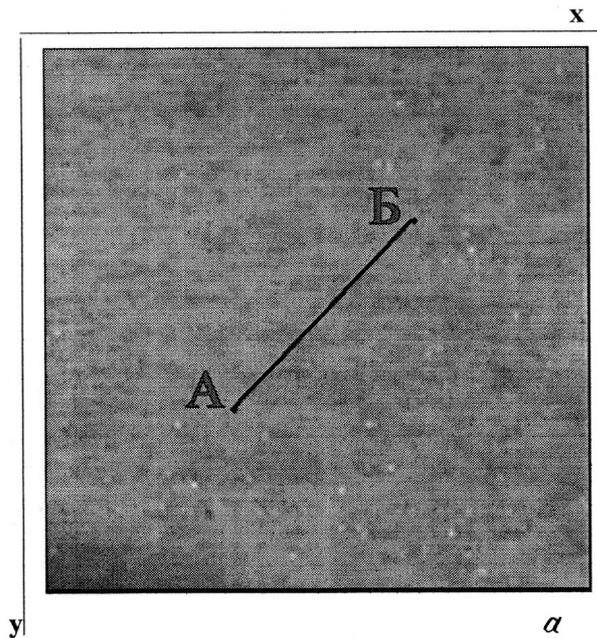


Рис. 1. Результаты диагностики (топография, пространственное сечение, ВАХ) типичной поверхности нелегированной пленки a -C:H: a — типичное СТМ-изображение, снятое вблизи незапыленного участка подложки (темное пятно на изображении). Изображение получено с помощью СЗМ при $V_T = -1$ В и $I_T = 0.05$ нА, площадь сканирования 0.4×0.4 μm ; b — поперечное сечение исследуемой пленки; c — локальная ВАХ.

определялась с помощью эллипсометрии. Скорость роста пленки составила величину 220–300 nm/h, а время напыления — 30 min.

Исследование топологии поверхности и локальных электронных свойств выращенных слоев проводилось с использованием сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) с Iг зондом в режиме измерения топографии и в режиме измерения локальных вольт-амперных характеристик (ВАХ). Исследование топографии проводилось в режиме постоянного туннельного тока. На различных участках исследуемых образцов были получены воспроизводимые СТМ-изображения и проведены локальные измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ).

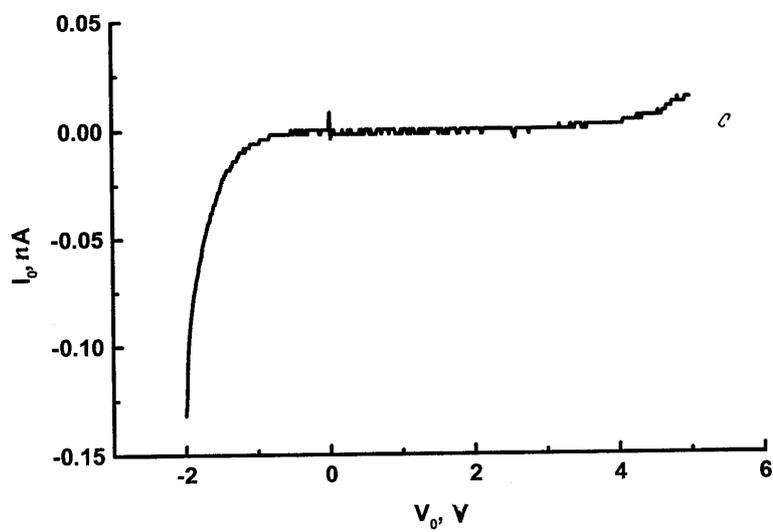
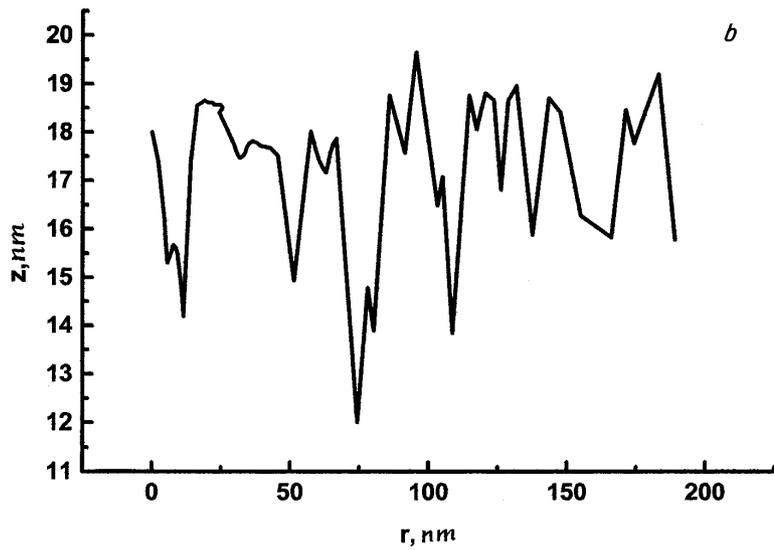


Рис. 1 (продолжение).

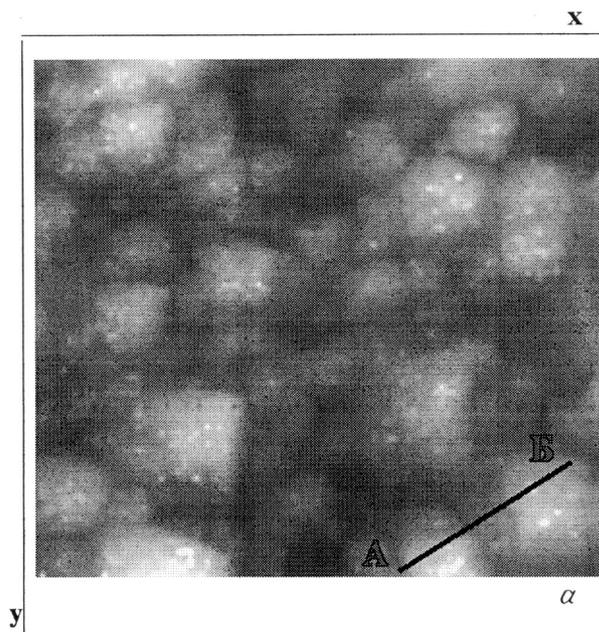


Рис. 2. Результаты диагностики (топография, пространственное сечение, ВАХ) типичной поверхности пленки $a\text{-C:N}$, легированной медью: a — типичное СТМ-изображение пленки $a\text{-C:N}$, легированной медью. Изображение получено с помощью СЗМ при $V_T = -1\text{ V}$ и $I_T = 0.05\text{ nA}$, площадь сканирования $0.4 \times 0.4\ \mu\text{m}^2$; b — поперечное сечение исследуемой пленки; c — локальная ВАХ. В области нулевых смещений появляется нулевая аномалия.

Измерения проводились при атмосферном давлении с двумя сериями образцов. Первая серия — нелегированные образцы. Вторая серия — образцы, легированные медью. Концентрация меди в пленке определялась методом вторичной ионной масс-спектропии и оказалась равной 9 atomic %.

На рис. 1, a представлены типичные СТМ-изображения поверхности нелегированного образца, полученные при смещении на образце $V_T = -1\text{ V}$ и токе $I_T = 0.05\text{ nA}$. На рис. 1, b дано поперечное сечение СТМ-изображения вдоль линии А-Б (рис. 1, a). СТМ-изображение

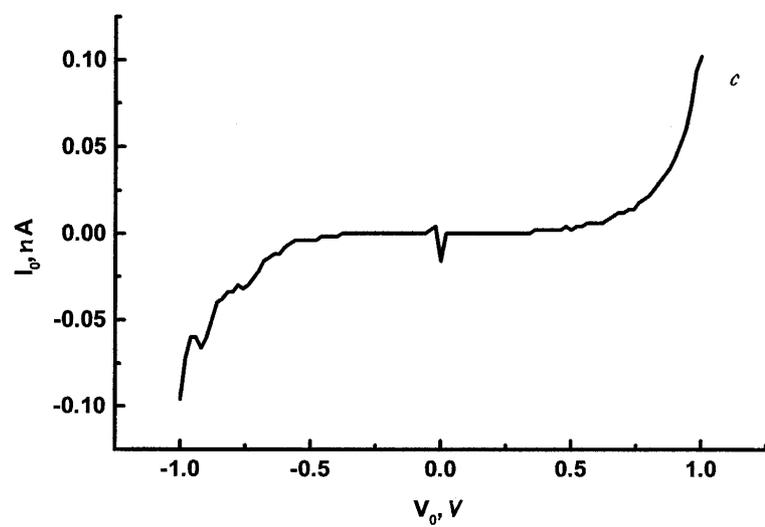
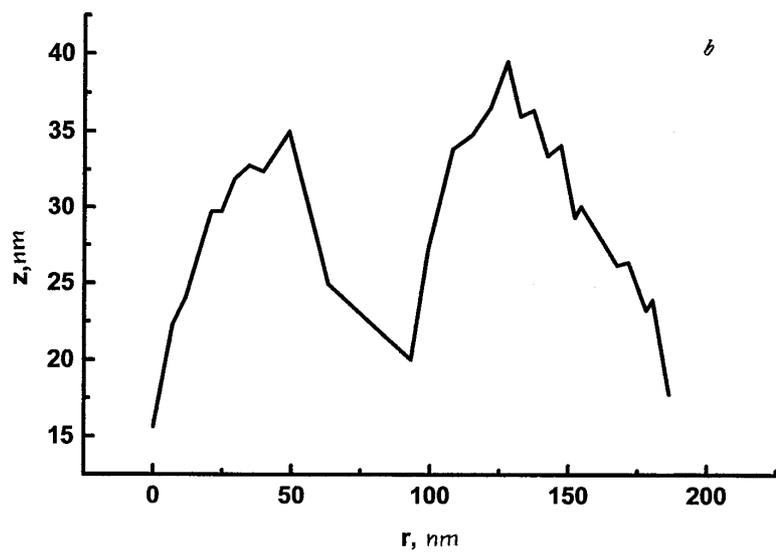


Рис. 2 (продолжение).

нелегированного образца и его поперечное сечение демонстрируют пространственно однородную поверхность пленки со случайным изменением рельефа по координате Z в диапазоне ~ 10 nm в виде легко просматриваемых пиков. При достигнутом разрешении отсутствует какая-либо выраженная структурированность в плоскости (xy).

На рис. 1, *c* представлена локальная ВАХ, измеренная в одной пространственной точке образца при остановке сканирования и развертке напряжения от -2 до $+5$ V при разорванной петле обратной связи. Подобные зависимости получались в различных точках на поверхности образца.

ВАХ (рис. 1, *c*) имеет явно выраженный асимметричный ("диодный") характер с малым туннельным током при положительном смещении на образце и резко возрастающим туннельным током при отрицательном смещении на образце $V_T < -1$ V.

Асимметричный характер зависимости $I(V)$ свидетельствует о p -типе проводимости алмазоподобной пленки. Уровень Ферми располагается у потолка валентной зоны и определяет различие потенциальных барьеров для электронов, туннелирующих из образца в Иг-острие и из Иг-острия в образец в системе Иг-острие–воздушный зазор–алмазоподобная пленка–Cr-хром.

На рис. 2, *a, b* представлено типичное СТМ-изображение поверхности легированного образца и поперечное сечение, соответствующее линии А–Б. Видно, легированный медью образец демонстрирует гранулированную структуру поверхности с более резким перепадом высот по оси Z (~ 40 nm) по сравнению с нелегированным образцом. В плоскости (X, Y) наблюдаются гранулы с несколькими характерными пространственными размерами ~ 1 nm (мелкие гранулы), ~ 40 nm (средние гранулы) и ~ 80 nm (крупные гранулы). Средние и крупные содержат структуры с размерами мелких гранул, что наводит на мысль о фрактальном механизме формирования наблюдаемого профиля поверхности, возникающего под действием мелкодисперсной меди. Химический состав и структура наблюдаемых гранул требуют дальнейшего исследования.

На рис. 2, *c* представлена типичная ВАХ легированного медью образца. Обращает на себя внимание, что ВАХ в этом случае имеет более симметричный вид по сравнению с измеренными для нелегированных образцов, что указывает на существенные различия электронных спектров легированных и нелегированных образцов. Можно полагать, что

симметричность ВАХ легированного образца свидетельствует в пользу инверсии типа проводимости под влиянием легирования графитовой составляющей a -C:H медью.

Таким образом, легирование материала медью существенным образом модифицирует как структуру поверхности пленки, так и ее электронные свойства.

Эта работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ N 97-02-18100-а, 97-03-32273-а, гранта Аризонского университета, грантов Министерства науки РФ (программа "Фуллерены и атомные кластеры) № 980024 ("Гель") и № 94007 ("Пленка").

Список литературы

- [1] *Angus J.C., Hayman C.C.* // *Science*. 1998. V. 241. P. 913–921.
- [2] *Amaratunga Gehan A.J., Silva S.R.P.* // *Appl. Phys. Lett.* 1996. V. 68 (18). N 96. P. 2529.
- [3] *Ivanov-Omskii V.I., Tolmatchev A.V., Yastrebov S.G.* // *Phil. Mag.* 1996. B 73. P. 715–722.