

УДК 539.25+620.187

ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛЬТ–АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТУННЕЛЬНОГО КОНТАКТА ВОЛЬФРАМ–ЗОЛОТО

Н.Ю. Сдобняков, А.С. Антонов, Т.Ю. Зыков, Д.Н. Соколов, Е.А. Воронова,
О.В. Михайлова

*Тверской государственной университет
170002, Тверь, Садовый пер., 35
nsdobnyakov@mail.ru*

Аннотация: В данной работе проведено измерение вольт–амперных характеристик (ВАХ) туннельного контакта вольфрам–золото на сканирующем туннельном микроскопе (СТМ) «Умка–02–G». Кроме того, описаны факторы туннельной системы, которые могут влиять на вид ВАХ на примере модельной системы вольфрам–золото, в частности, физические процессы, протекающие в острие зонда при повышении напряжения и способные привести к изменению длины зонда.

Ключевые слова: *сканирующий туннельный микроскоп, вольт-амперная характеристика, туннельный контакт вольфрам–золото, термическое расширение зонда.*

Физика поверхностных явлений в настоящее время является одним из наиболее интенсивно развивающихся разделов науки. Именно на фундаментальных исследованиях в области физики поверхности твердого тела основаны успехи современных микро- и нанoeлектроники, гетерогенного катализа, космических технологий и т.п. Поэтому исследование разнообразных электронных, атомных и молекулярных процессов, происходящих на поверхности твердых тел, остается актуальной задачей, а заветным желанием исследователей на протяжении многих лет – непосредственное наблюдение за поведением отдельных атомов на поверхности твердого тела и изучение процессов с участием одиночных или небольших групп атомов. Необходимо отметить, что особый интерес представляют собой наноразмерные пленки с фрактальной структурой, получаемые в условиях самоорганизации, далеких от равновесных, в частности результаты для образца «золото на слюде» получены нами в работах [1,2].

С помощью СТМ можно снимать ВАХ туннельного контакта в различных точках поверхности, что позволяет судить о локальной проводимости образца и изучать особенности локальной плотности состояний в энергетическом спектре электронов. Для регистрации ВАХ туннельного контакта в СТМ применяется следующая процедура. На СТМ изображении поверхности выбирается область образца, в которой предполагается произвести измерения. Зонд СТМ выводится сканером в соответствующую точку поверхности. Для получения ВАХ контакта обратная связь на короткое время разрывается, и к туннельному промежутку прикладывается линейно нарастающее напряжение. При этом

синхронно с изменением напряжения регистрируется ток, протекающий через туннельный контакт. Во время снятия ВАХ на время разрыва обратной связи на электрод сканера подается потенциал, равный потенциалу непосредственно перед разрывом. В каждой точке производится снятие нескольких ВАХ. Итоговая ВАХ получается путем усреднения набора ВАХ, снятых в одной точке. Усреднение позволяет существенно минимизировать влияние шумов туннельного промежутка (см. рис. 1).

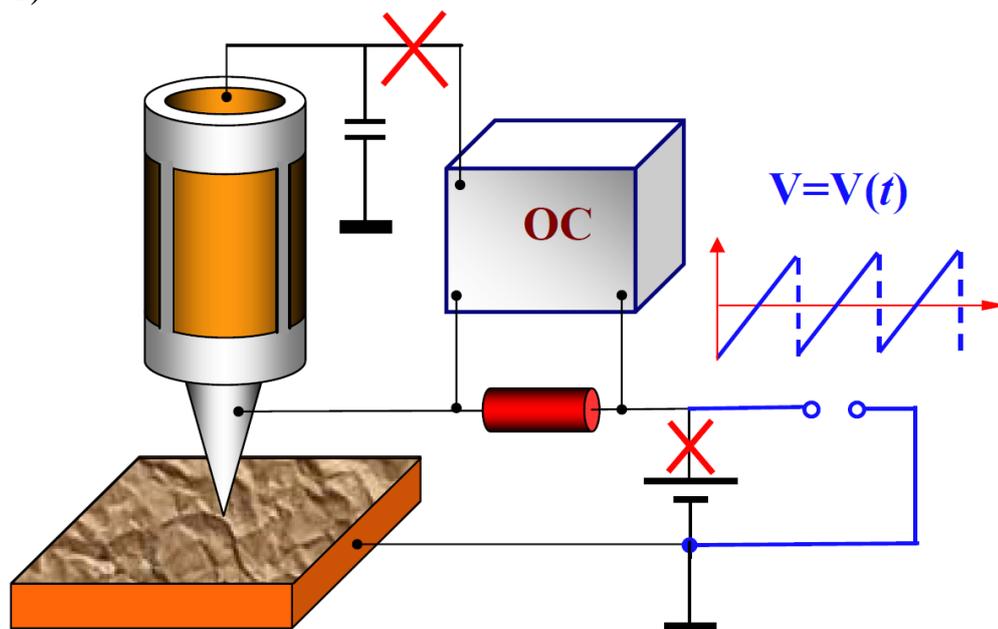


Рис. 1. Схема регистрации ВАХ туннельного промежутка СТМ

Сканирующий туннельный микроскоп позволяет получать ВАХ туннельного контакта зонд–поверхность в любой точке поверхности и исследовать локальные электрические свойства образца. Для характерных напряжений на туннельном контакте порядка 0,1–1 В и туннельных токов на уровне 0,1–1 нА сопротивление туннельного контакта R_t по порядку величин составляет $10^8 \div 10^{10}$ Ом. Как правило, сопротивление исследуемых в СТМ образцов R_s существенно меньше R_t , и характер ВАХ определяется, в основном, свойствами небольшой области образца вблизи туннельного контакта (рис. 2).

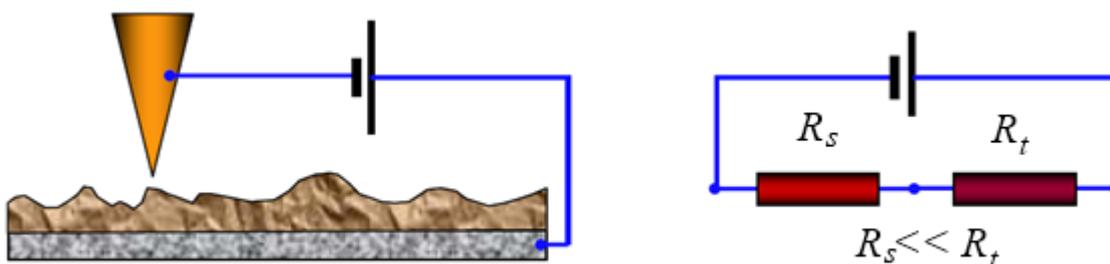


Рис. 2. Эквивалентная схема туннельного контакта по постоянному току

Характер туннельной ВАХ существенно зависит от энергетического спектра электронов в образце. На рис. 3 приведена энергетическая диаграмма туннельного контакта двух металлов.

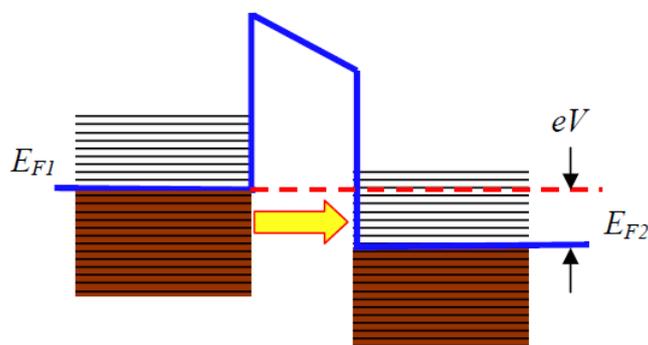


Рис. 3. Энергетическая диаграмма туннельного контакта двух металлов

В туннельном токе участвуют, в основном, электроны с энергиями вблизи уровня Ферми. При прямом смещении (рис. 3) электроны туннелируют из заполненных состояний зоны проводимости зонда на свободные состояния зоны проводимости образца. При обратном смещении электроны туннелируют из образца в зонд. Величина туннельного тока определяется напряжением смещения, коэффициентом прозрачности барьера и плотностью состояний вблизи уровня Ферми. Выражение для туннельного тока в случае дискретного электронного спектра было получено в работах [3–6]. В приближении квазинепрерывного спектра электронов выражение для туннельного тока может быть представлено в следующем виде [3, 7]:

$$dI = A \cdot D(E) \rho_p(E) f_p(E) \rho_s(E) (1 - f_s(E)) dE, \quad (1)$$

где A – некоторая постоянная; $D(E)$ – прозрачность барьера; $\rho_p(E), \rho_s(E)$ – плотность состояний в материале зонда и исследуемого образца соответственно; $f(E)$ – функция распределения Ферми. В простейшем случае прямоугольного барьера при низких температурах и в предположении, что плотность состояний вблизи уровня Ферми в металле зонда практически постоянна, выражение для тока можно записать в виде

$$I(V) = B \int_0^{eV} \rho_s(E) dE. \quad (2)$$

В этом случае зависимость туннельного тока от напряжения определяется, в основном, плотностью состояний в энергетическом спектре образца. На практике величину $\rho_s(E)$ оценивают по величине производной туннельного тока по напряжению:

$$\rho_s(eV) \sim \frac{\partial I}{\partial V}. \quad (3)$$

Исследования локальных туннельных спектров различных материалов проводят, как правило, в условиях высокого вакуума (поскольку туннельный ток очень чувствителен к состоянию поверхности исследуемых образцов) и при низких температурах (так как тепловые возбуждения сильно размывают особенности в электронных спектрах). Туннелирование электронов через барьер между двумя металлами рассматривалось во многих работах задолго до появления СТМ [8, 9]. Как было показано, для малых напряжений смещения зависимость туннельного тока от напряжения линейная, и проводимость туннельного контакта определяется, в основном, параметрами барьера:

$$j_t = j_0(V) e^{-\frac{4\pi}{h} \sqrt{2m\phi^*} \Delta Z}, \quad (4)$$

где ΔZ – ширина барьера, ϕ^* – средняя работа выхода электрона, m – масса электрона, h – постоянная Планка.

При очень высоких напряжениях форма барьера будет сильно изменяться, и ток будет описываться формулой Фаулера–Нордгейма. Типичная ВАХ, наблюдаемая для туннельного контакта металл–металл, изображена схематически на рис. 4.

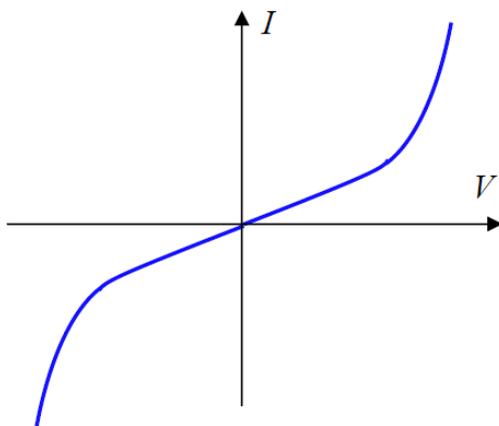


Рис. 4. Характерный вид ВАХ туннельного контакта металл–металл

Как видно из рисунка, ВАХ туннельного контакта металл–металл нелинейна и, как правило, практически симметрична.

Одним из приложений СТМ и спектроскопии является исследование неоднородности электрических свойств образцов сложного состава. В этом случае совместный анализ морфологии поверхности и ВАХ, снятых в различных точках поверхности, позволяет судить о распределении различных фаз на поверхности композитных структур, исследовать корреляции между технологическими параметрами их получения и электронными свойствами. В частности, снимая ВАХ в различных точках поверхности, можно исследовать распределение сверхпроводящей фазы в образцах неоднородного состава. С этой целью при сканировании одновременно с регистрацией рельефа поверхности в каждой точке

производится снятие ВАХ. По локальной ВАХ рассчитывается значение параметра Δ (при низких температурах электроны образуют так называемые Куперовские пары и концентрируются на уровне, отстоящем на величину Δ от зоны проводимости), которое заносится в отдельный файл.

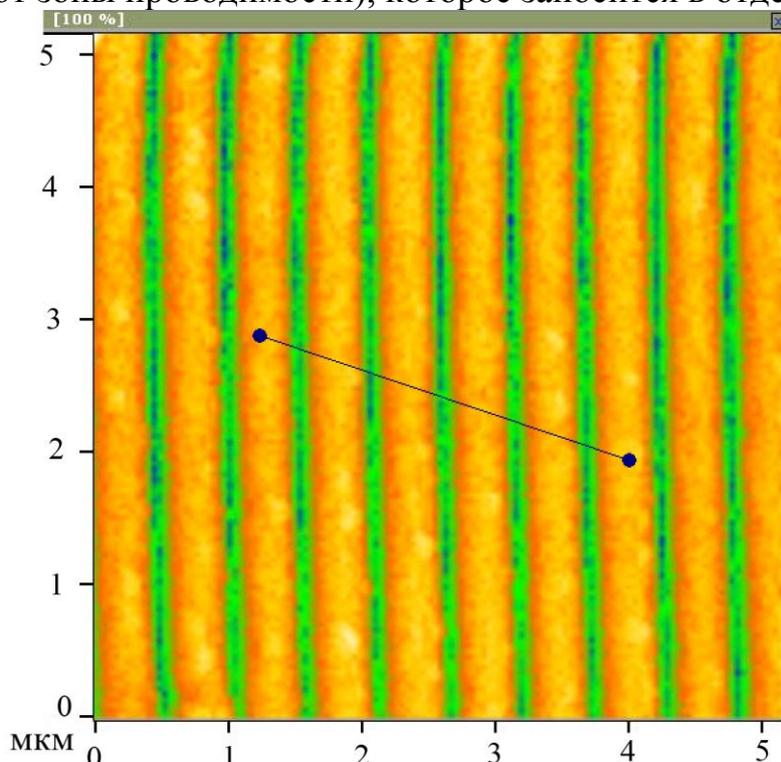


Рис. 5. Результат сканирования рельефа образца «золото на поликарбонате» (размер области сканирования 5,15x5,15 мкм)

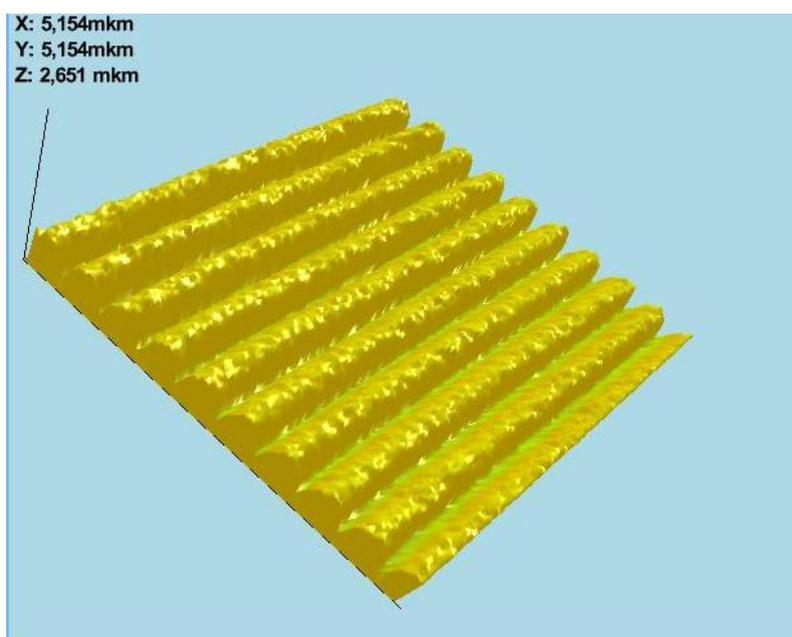


Рис. 6. 3-d изображения периодических наноструктур золота на диэлектрической подложке (поликарбонат), полученных с помощью СТМ (5,15 мкмx5,15 мкм)

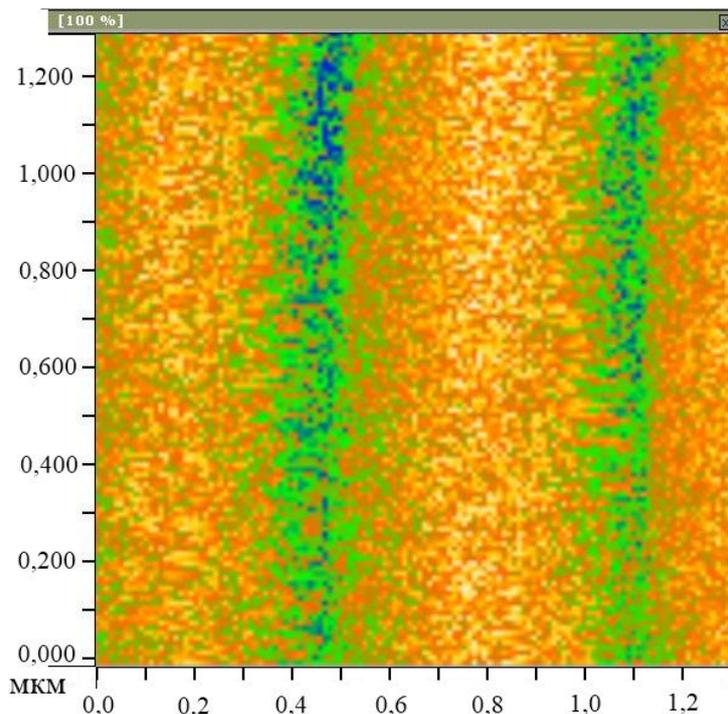


Рис. 7. Результат сканирования рельефа образца «золото на поликарбонате» (размер области сканирования 2,8х2,9 мкм)

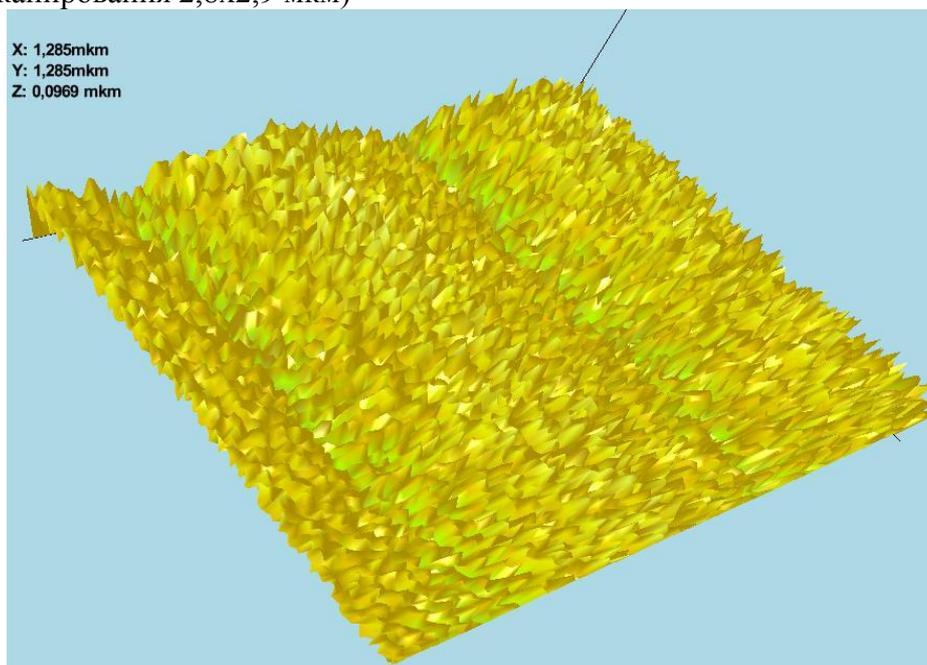


Рис. 8. 3D изображения периодических наноструктур золота на диэлектрической подложке (поликарбонат), полученных с помощью сканирующего зондового микроскопа в режиме СТМ (1,29 мкм×1,29 мкм)

В дальнейшем строится распределение $\Delta = f(x, y)$, которое характеризует структуру сверхпроводящего состояния образца. В нашей работе для исследования ВАХ контакта металл–металл мы использовали образец с периодической структурой золота на поверхности поликарбоната (см. рис. 5-8). Анализ результатов сканирования показывает, что

технологически с достаточно высоким качеством на поликарбонат нанесена периодическая структура золота (дорожки).

Для оценки качества получаемой периодической структуры нами были построены профили поверхности по заданному направлению, а также гистограмма частоты появления точек поверхности с определенной высотой относительно поверхности образца (см. рис. 9-10). Уменьшая область сканирования, можно получить изображения рельефа отдельных периодических наноструктур золота (дорожек) на поликарбонате.

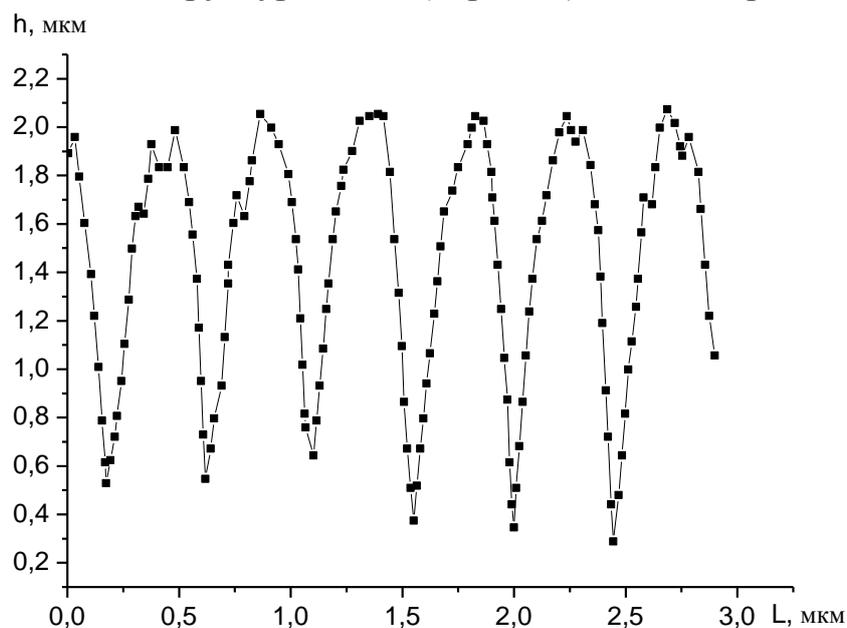


Рис. 9. Профиль поверхности образца «золото на поликарбонате» по направлению, выделенному на рис. 5. Среднеквадратичная величина пиков поверхности образца – 1,6 мкм, среднее арифметическое – 0,4 мкм

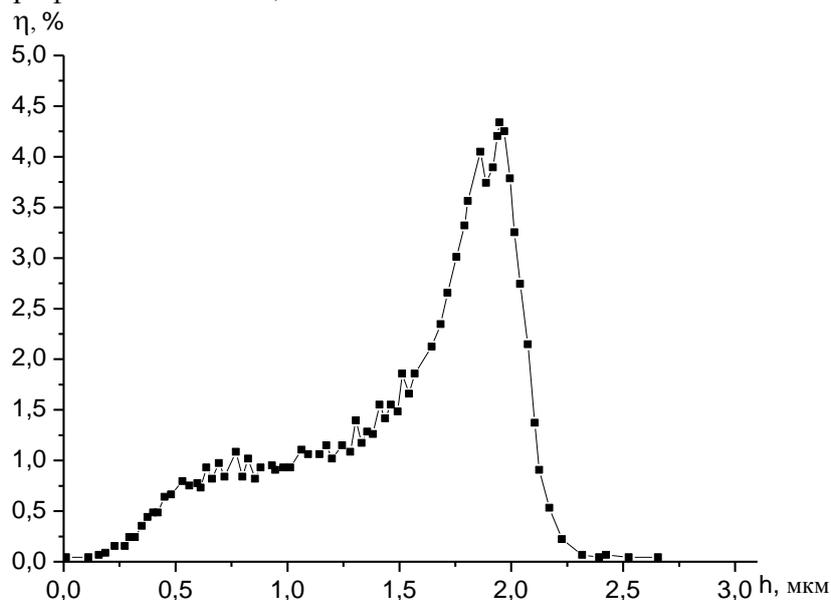
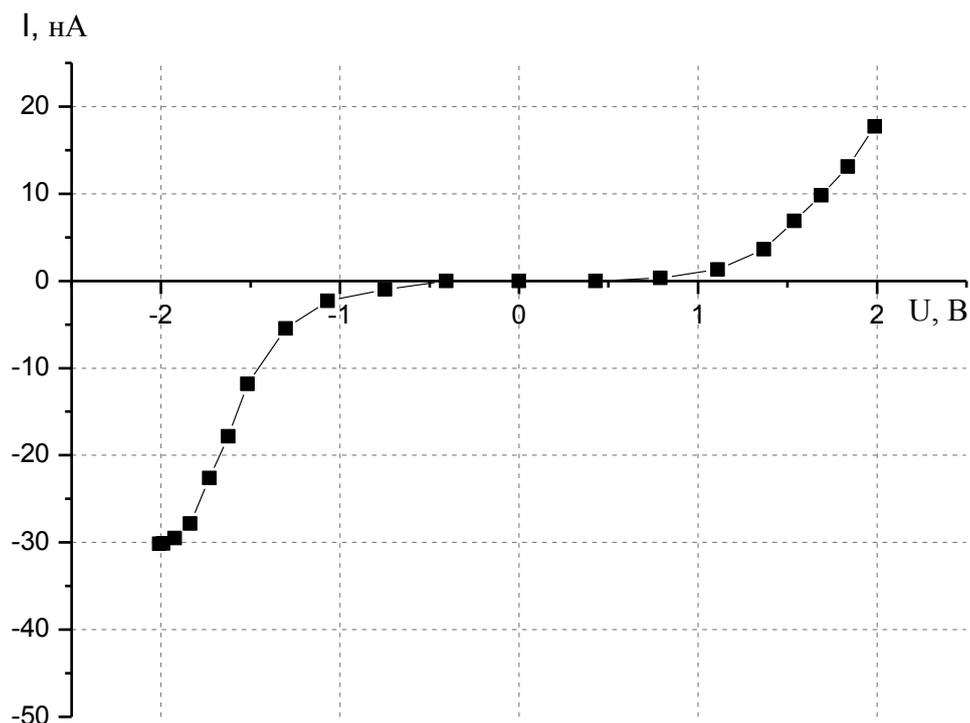
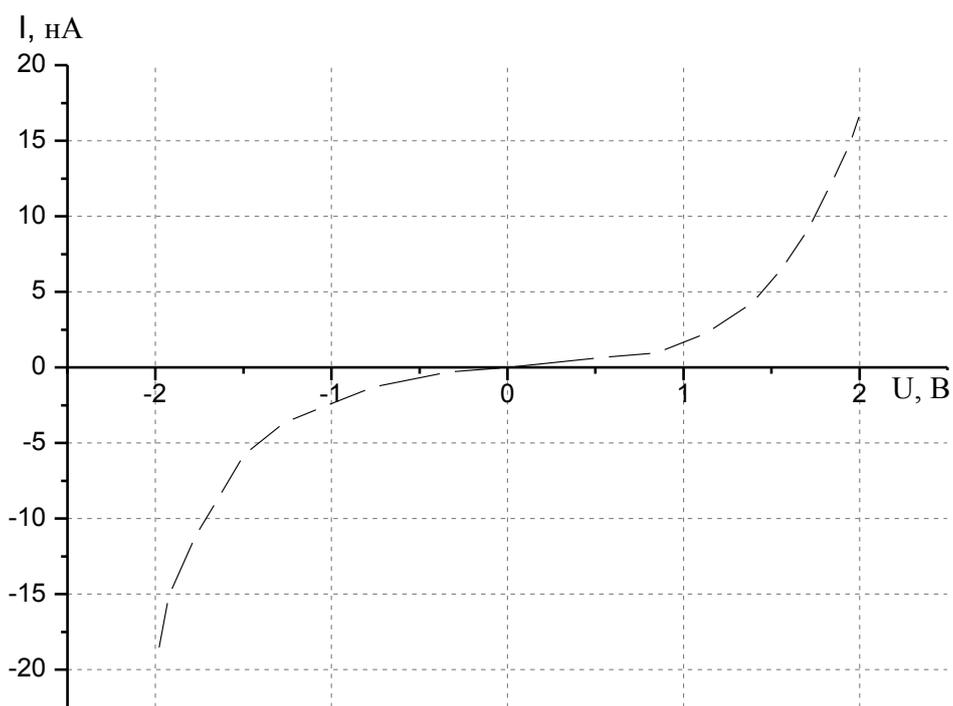


Рис. 10. Гистограмма частоты появления пиков заданной высоты по направлению, выделенному на рис. 5



а



б

Рис. 11. ВАХ контакта вольфрам–золото. Кривая на рис. б отвечает долговременному использованию зонда и наличию эффекта термического расширения

Благодаря своей химической инертности, высокой электрической проводимости и отражательной способности широкое применение находят пленки золота, в том числе с периодической структурой. Они

используются как защитные и буферные слои [10], омические контакты [11,12], отражающие покрытия в широком диапазоне длин волн [13].

СТМ позволяет исследовать не только морфологию поверхности образца, но и ее локальную электронную структуру. Получаемая из этих данных информация об электронной структуре образца может быть сильно искажена влиянием различных факторов, которые не всегда можно учесть. Нами было изучено влияния параметров туннельной системы на вид ВАХ на примере модельной системы острие (вольфрам) – образец (золото). На рис. 11 приведены результаты серии измерений ВАХ, сделанных без замены острия. Кривая, соответствующая одному из первых сканов (рис. 11а), оказалась асимметрична относительно знака напряжения, что свидетельствует о влиянии электронной структуры острия. При проведении многократных измерений с одним и тем же острием зависимость становится симметричной относительно знака напряжения (рис. 11б). Из этого можно сделать вывод, что электронная структура острия изменилась, что может быть объяснено массопереносом с образца на острие. Необходимо отметить, что в наиболее общем случае форма туннельного барьера зависит от работ выхода из материалов образца и острия, приложенного напряжения, расстояния между электродами. Кроме того, необходимо учитывать потенциал сил зеркального изображения. Проведенные расчеты ВАХ показали, что учет потенциала сил зеркального изображения приводит к различиям не только в значениях туннельного тока, но и в форме кривых [14]. Кривые 1 и 2 (рис. 12) соответствуют расчету без учета потенциала сил зеркального изображения и расчету с учетом потенциала сил зеркального изображения соответственно. Также при изменении напряжения между острием и образцом может происходить термический разогрев острия, вызванный энергией, выделяющейся в приповерхностной области острия в процессе туннелирования электронов (термическое расширение острия, связанное с выделением энергии Джоуля–Ленца и термическое расширение острия, связанное с выделением энергии Ноттингама) [15]. Этот эффект может оказать влияние на ВАХ туннельного барьера, т.к. ширина зазора зависит от приложенного напряжения. Насколько сильно влияние этого эффекта на ВАХ можно видеть из сравнения кривых 2 и 3 (рис. 12). Кривая 3 рассчитана с учетом эффекта термического расширения. Расчеты [15] подтвердили возможность лавинообразного увеличения тока, приводящего к образованию электрического контакта между острием зонда и поверхностью образца (Характерной особенностью этого процесса является скачкообразное падение сопротивления туннельного промежутка при приложении модифицирующего импульса напряжения). При этом изменение температуры вершины острия остается невелико.

Анализ рис. 11 и 12 показывает, что вид ВАХ для туннельного контакта вольфрам-золото совпадает, но по порядку величины туннельного тока они различаются, что связано, по-видимому, с исследованием пленок золота разной толщины работой [11], а также разными методами получения пленок.

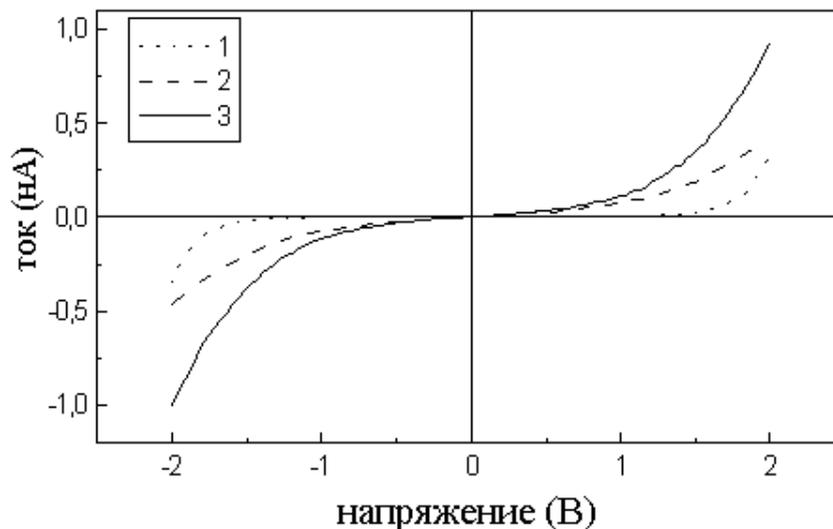


Рис. 12. ВАХ контакта вольфрам–золото [11]: 1, 2 – расчет без учета потенциала сил зеркального изображения и расчету с учетом потенциала сил зеркального изображения соответственно; 3 – расчет с учетом эффекта термического расширения

Отметим, что большинство использующихся пленок золота получается в настоящее время методами термического или электронно-лучевого испарения, магнетронного распыления, катодного распыления [11-13]. В [13] отмечается, что морфология поверхности пленки золота сильно зависит от метода ее получения. Пленки, полученные методом термического испарения, характеризуются поверхностными неоднородностями высотой до 35 нм и диаметром 30-50 нм. Пленки, полученные методом магнетронного напыления, имеют неоднородности с поперечными размерами 50-70 нм. Пленки, полученные методом катодного напыления, характеризуются неоднородностями различных поперечных размеров с плоской поверхностью. Такая разница в рельефе поверхности связана с различной энергией осаждающихся частиц и как следствие различной подвижностью атомов [13]. Если подвижность атомов высокая, то появившиеся первоначально островки пленки объединяются и образуют гладкую сплошную поверхность. Таким образом, возможность получения периодических структур зависит как от метода напыления, так и от свойств самого пучка. Важно также отметить, что для ультратонких пленок золота характерной особенностью является повторение рельефа подложки [16].

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Библиографический список:

1. **Зыков, Т.Ю.** Исследование морфологии рельефа поверхности золота на слюде методом сканирующей туннельной микроскопии / Т.Ю. Зыков, Н.Ю. Сдобняков, В.М. Самсонов, А.Н. Базулев, А.С. Антонов // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2009. – Т. 11. – №4. – С. 309-313.
2. **Сдобняков, Н.Ю.** Применение метода сканирующей туннельной микроскопии для исследования рельефа различной размерности золота на слюде / Н.Ю. Сдобняков, Т.Ю. Зыков, А.Н. Базулев, А.С. Антонов // Вестник ТвГУ, серия «Физика». – 2009. – №41. – Вып. 6. – С. 112-119.
3. **Simons, J.G.** Electric tunnel effect between dissimilar electrodes separated by a thin insulating film / J.G. Simons // Journal of Applied Physics. – 1963. – V. 34. – №9. – P. 2581-2590.
4. **Tersoff, J.** Theory and application for scanning tunneling microscope / J. Tersoff, D.R. Hamann // Physical Review Letters. – 1983. – V. 50. – P. 1998-2001.
5. **Tersoff, J.** Theory of the scanning tunneling microscope / J. Tersoff, D.R. Hamann // Physical Review B. – 1985. – V. 31. – № 2. – P. 805-813.
6. **Tersoff, J.** Method for the calculation of scanning tunneling microscope images and spectra / J. Tersoff // Physical Review B. – 1989. – V. 40. – № 17. – P. 11990-11993.
7. **Пикус, Г.Е.** Основы теории полупроводниковых приборов / Г.Е. Пикус. – М.: Наука, 1965. – 448 с.
8. **Duke, C.B.** Tunneling in solids / C.B. Duke. – New York: Academic Press, 1969. – 353 p.
9. Туннельные явления в твердых телах / под ред. Э. Бурнштейна и С. Лундквиста. – М.: Мир, 1973. – 422 с.
10. **Стогний, А.И.** Ионно–лучевое осаждение уединенного интерфейса Co/Cu на субнаногладкие подложки / А.И. Стогний, Н.Н. Новицкий, О.М. Стукалов // Новые магнитные материалы микроэлектроники: сб. тр. XVIII Международной школы–семинара, Москва (24–28 июня 2002). – М.: МГУ, 2002. – С. 303-305.
11. **Sheu, J.K.** High–transparency Ni/Au ohmic contact to p–type GaN / J.K. Sheu, Y.K. Su, G.C. Chi, P.L. Koh, M.J. Jou, C.M. Chang, C.C. Liu, and W.C. Hung // Applied Physics Letters. – 1999. – V. 74. – № 19. – P. 2340-2342.
12. **Ho, J.K.** Low–resistance ohmic contacts to p–type GaN / J.K. Ho, C.-S. Jong, C. C. Chiu, C.-N. Huang, C.-Y. Chen, K.-K. Shih // Applied Physics Letters. – 1999. – V. 74. – № 9. – P. 1275-1277.
13. **Bendavid, A.** Morphology and optical properties of gold thin film prepared by filtered arc deposition / A. Bendavid, P.J. Martin, L. Wiczorek // Thin Solid Films. – 1999. – V. 354. – P. 169-175.
14. **Корнилов, О.А.** Изучение влияния формы туннельного барьера на туннельный ток в СТМ / О.А. Корнилов // Тезисы ВНКСФ-7. – Санкт-Петербург: СПбГУ, 2001. – С. 187.
15. **Рабинович, Р.М.** Теоретическое исследование изменения длины острия СТМ вследствие разогрева энергией Ноттингама / Р.М. Рабинович // Тезисы ВНКСФ-7. – Санкт-Петербург: СПбГУ, 2001. – С. 242.
16. **Стогний, А.И.** Получение методом ионно–лучевого распыления кислородом и оптические свойства ультратонких пленок золота / А.И. Стогний, Н.Н. Новицкий, С.Д. Тушина, С.В. Калинин // Журнал технической физики. – 2003. – Т. 73. – Вып. 6. – С. 86-89.