

05;11;12

Влияние физико-химических свойств материала острия на модификацию поверхности импульсом напряжения в сканирующем туннельном микроскопе

© Г.Г. Владимиров, А.В. Дроздов, А.Н. Резанов

Научно-исследовательский институт физики С.-Петербургского государственного университета

Поступило в Редакцию 11 ноября 1999 г.

Проведены эксперименты по изменению морфологии поверхности золота с помощью сканирующего туннельного микроскопа с использованием игл, изготовленных из разных материалов. Результаты свидетельствуют о том, что существует зависимость между физико-химическими характеристиками материала острия и пороговым напряжением модифицирующего импульса напряжения. Такая связь между материалом острия и пороговым напряжением может быть объяснена в рамках механизма модификации, основанного на образовании контакта вследствие термического расширения острия.

Реализация поверхностной модификации в нанометровой или атомной области с использованием сканирующего туннельного микроскопа открывает новые возможности в нанолитографии [1]. Наиболее привлекательной в силу простоты реализации и надежности является модификация поверхности под действием электрического поля (приложение к системе острие–образец импульса напряжения). Предложенные к настоящему времени механизмы: термический разогрев поверхности образца [2], полевое испарение [3], индуцируемая полем диффузия [4], стимулированные химические реакции [5] и др., не смогли адекватно объяснить процессы, происходящие при модификации поверхности.

Наиболее реальным и приемлемым, на наш взгляд, является механизм образования механического контакта между иглой и образцом вследствие термического расширения острия [6–8]. В основе данного механизма лежит происходящее при приложении импульса напряжения повышение температуры на острие вследствие разогрева его током высокой плотности и вызываемое этим тепловое расширение острия,

заканчивающееся образованием электрического контакта между иглой и образцом.

В [6] было показано, что на начальном этапе импульса (при полярности, соответствующей эмиссии электронов из острия) величина изменения туннельного промежутка ΔZ может быть оценена из соотношения

$$\Delta Z = K \frac{I \varepsilon_N t}{\pi e}, \quad \text{где } K = \frac{\alpha}{\rho c} \quad (1)$$

(I — плотность тока; ε_N — энергия, выделяемая на эмиттере за счет эффекта Ноттингама; t — время; e — заряд электрона; c , ρ , α — удельная теплоемкость, плотность и коэффициент линейного расширения материала острия соответственно). Из соотношения следует, что удлинение острия должно зависеть от комбинации вышеупомянутых физико-химических постоянных материала острия. Поэтому целью нашего исследования было изучение процесса модификации поверхности импульсом напряжения иглами, изготовленными из разных материалов.

Исследования проводились в сканирующем туннельном микроскопе обычной конструкции на воздухе при комнатной температуре [6] в режиме постоянного тока. Величина тока стабилизации составляла 1 нА при напряжении смещения между острием и образцом 0.1 В полярности, при которой имеет место эмиссия электронов из острия. Поверхность пленки золота (толщиной $\sim 1 \mu\text{m}$), используемой в качестве образца, представляла собой реплику скола монокристалла КВг, приготовленную методом вакуумного напыления (10^{-5} Торр).

Острия изготавливались методом электрохимического травления при переменном напряжении 6 В из проволоки соответствующего материала: вольфрамовые ($\varnothing 0.14 \text{ mm}$, 4% раствор NaOH), нихромовые ($\varnothing 0.14 \text{ mm}$, 20% раствор H_3PO_4), константановые ($\varnothing 0.20 \text{ mm}$, 20% раствор H_3PO_4), медные ($\varnothing 0.16 \text{ mm}$, концентрированный раствор H_3PO_4), серебряные ($\varnothing 0.35 \text{ mm}$, 25% раствор H_2SO_4).

Методика модификации поверхности Au заключалась в приложении одиночных электрических импульсов прямоугольной формы длительностью $10 \mu\text{s}$ во время сканирования иглы вдоль поверхности. Амплитуда импульса изменялась в пределах 0–6 В. Все эксперименты были выполнены на одной экспериментальной установке, чтобы полностью исключить влияние входных параметров электронной схемы установки на результаты [9].

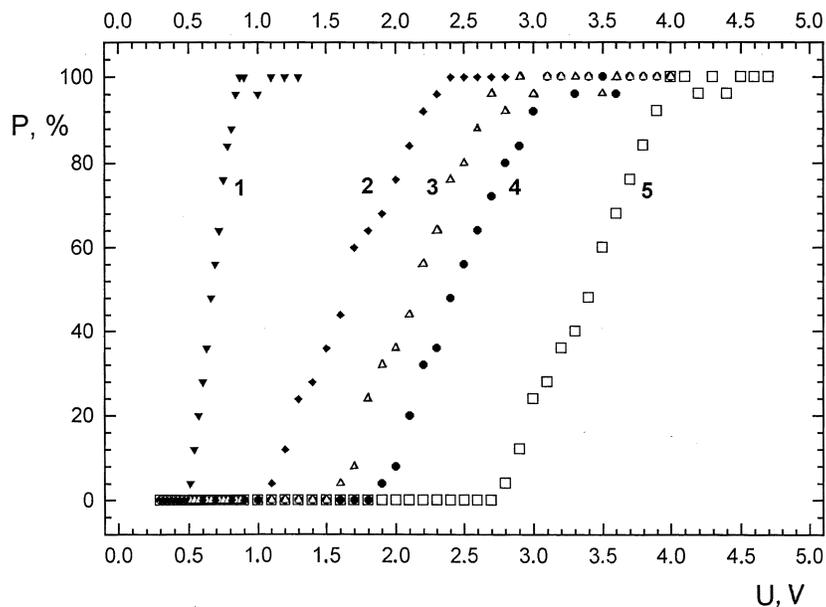


Рис. 1. Вероятность образования наноструктур на поверхности золота от амплитуды прикладываемого импульса напряжения для игл, выполненных из различных материалов: 1 — серебро, 2 — медь, 3 — константан, 4 — нихром, 5 — вольфрам.

Результатом приложения одиночных прямоугольных импульсов напряжения к поверхности золота являлись наноструктуры в виде холмов с типичными размерами 20–30 nm по диаметру в основании и 1–3 nm по высоте.

Процесс образования наноструктур носил вероятностный характер. Вероятность P возникновения холмов в зависимости от амплитуды импульса напряжения U определялась как отношение числа воздействий импульсом напряжения, в результате которых образовывалась наноструктура, к общему числу воздействий. Эта величина имела порообразный характер для каждого материала иглы.

На рис. 1 представлена зависимость вероятности P модификации поверхности золота от амплитуды прикладываемого импульса напря-

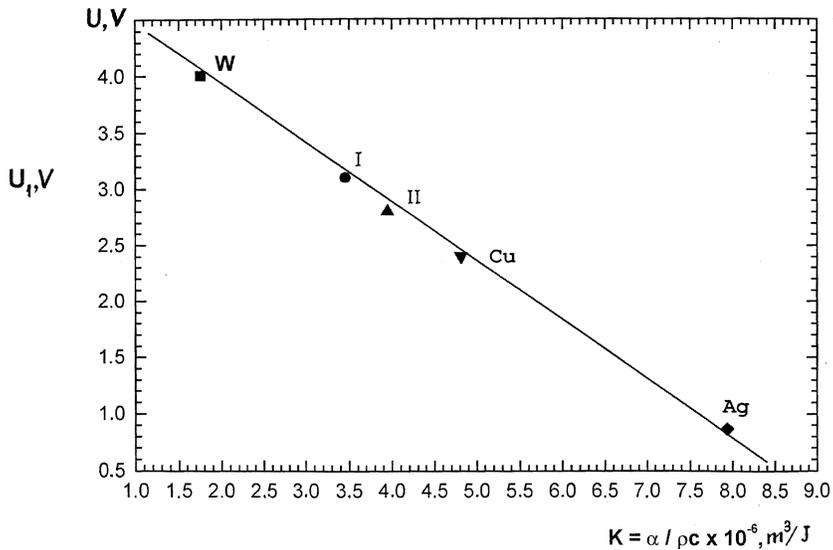


Рис. 2. Зависимость порога образования наноструктур на поверхности золота от коэффициента $K = \frac{\alpha}{\rho c}$ (коэффициент пропорциональности термического удлинения острия) для игл, выполненных из различных материалов: I — нихром, II — константан.

жения U для острий, выполненных из различных материалов. Каждая точка на всех функциональных зависимостях $P(U)$ определялась как результат 25–30 измерений. Зависимости резко возрастали начиная с некоторого значения U и достигали насыщения при увеличении напряжения импульса всего лишь на несколько десятых вольта. Напряжение импульса, соответствующее достижению величиной вероятности насыщения, принималось за значение порогового напряжения U_1 .

Из представленных зависимостей видно, что при изменении материала острия наблюдается сильное изменение пороговых значений амплитуды импульса напряжения, при которых происходит образование наноструктур со 100%-ной вероятностью. При этом величина порогового напряжения практически линейно зависит от коэффициента $K = \alpha / \rho c$, характеризующего материал, из которого изготовлено острие (рис. 2).

Такая связь между характеристиками материала острия и пороговым напряжением хорошо может быть объяснена в рамках механизма термического расширения острия. Величина термического удлинения острия при нагреве иглы током, протекающим в системе острие–образец, определяется именно материалом, из которого оно изготовлено. Поэтому процесс модификации импульсом напряжения при использовании игл из разных материалов, естественно, должен характеризоваться различными значениями амплитуды модифицирующего импульса. Чем меньше величина коэффициента K , тем меньшее напряжение импульса необходимо для разогрева привершинной части острия и образования контакта между острием и образцом.

Таким образом, полученную зависимость между величиной K и U_1 можно рассматривать как еще одно свидетельство справедливости механизма образования контакта между иглой и поверхностью образца вследствие термического расширения острия протекающим током [6–8].

Список литературы

- [1] *Shedd G.M., Russel P.E.* // *Nanotechnology*. 1990. V. 1. P. 67–80.
- [2] *Staufer U., Wiesendanger R., Eng L. et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 1987. V. 51. P. 244–246.
- [3] *Chang C.S., Su W.B., Tsong T.T.* // *Phys. Rev. Lett.* 1994. V. 72. P. 574–577.
- [4] *Mendez J., Gomez-Herrero J., Pascual J.I., Saenz J.J., Soler M.J., Baro A.M.* // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 1996. V. 14 (2). P. 1145–1149.
- [5] *Dagata J.A., Schneir J., Harary H.H., Evans C.J., Posek M.T., Bennett J.* // *Appl. Phys. Lett.* 1990. V. 56. P. 2001–2004.
- [6] *Владимиров Г.Г., Дроздов А.В., Баскин Л.М.* // *Письма в ЖТФ*. 1995. Т. 21. В. 11. С. 66–71.
- [7] *Baskin L.M., Drozdov A.V., Vladimirov G.G.* // *Surf. Sci.* 1996. V. 369. P. 385–392.
- [8] *Vladimirov G.G., Drozdov A.V.* // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 1997. V. 15 (2). P. 482–488.
- [9] *Владимиров Г.Г., Дроздов А.В., Резанов А.Н.* // *Письма в ЖТФ*. 1996. Т. 22. В. 18. С. 67–71.