

11;12

ОБ ИЗМЕНЕНИИ ПОРОГОВОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ НАНОСТРУКТУР НА ПЛЕНКЕ ЗОЛОТА В СКАНИРУЮЩЕМ ТУННЕЛЬНОМ МИКРОСКОПЕ

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

В настоящее время ведутся интенсивные исследования процессов формирования неоднородностей на поверхности твердого тела при воздействии импульса напряжения в сканирующем туннельном микроскопе (СТМ). Экспериментально было показано, что результат воздействия не зависит от полярности и длительности импульса. Было также обнаружено, что неоднородности возникают в том случае, когда амплитуда импульса превышает некоторое пороговое значение $U_{\text{пор}}$.

Для объяснения происходящих процессов было предложено несколько механизмов. Главными из них являются основанные на десорбции полем [1] и на образовании контакта между острием и образцом [2]. В качестве возможной причины образования контакта в [3] предложен механизм термического расширения привершинной части острия. Суть его заключается в том, что уже в начальный момент импульса величина тока эмиссии достигает критического значения, начиная с которого происходит существенное увеличение температуры T на вершине острия. Это вызывает сокращение вакуумного промежутка, возрастание напряженности поля и дальнейшее увеличение тока, в результате чего процесс приобретает лавинообразный характер. В конечном итоге это приводит к смыканию вакуумного промежутка, а в предельном случае возможно даже вдавливание острия в образец. В дальнейшем, поскольку обычно обратная связь в таких экспериментах не отключается, спустя 10...100 мкс начинается отвод острия от поверхности. Он заканчивается разрывом образовавшегося мостика, если имеется хорошая адгезия между острием и поверхностью образца, или на поверхности остается лунка, если связь между ними слабая.

В случае предложенного теплового механизма наиболее важным параметром является общее количество эмитированных при импульсе электронов. Поэтому в настоящей работе была поставлена задача исследовать влияние количества заряда, протекающего в импульсе по цепи острие-образец, на процесс модификации поверхности.

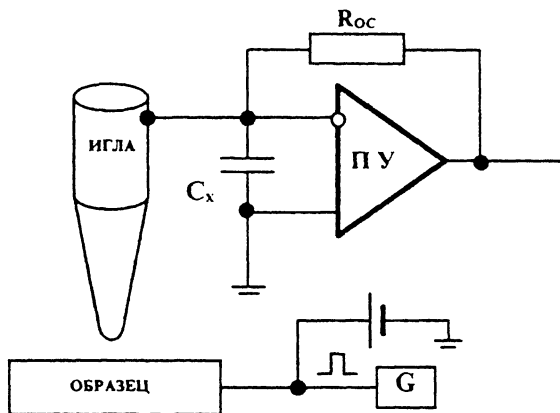


Рис. 1. Схема подключения дополнительной емкости C_x . ПУ — предварительный усилитель (преобразователь ток — напряжение), R_{oc} — сопротивление обратной связи, G — генератор прямоугольных импульсов.

Исследования проводились в сканирующем туннельном микроскопе обычной конструкции [4]. Методики изготовления вольфрамовых острий и образцов, представлявших собой пленки золота, не отличались от приведенных в [5]. Изображение поверхности получалось в результате сканирования острия вдоль поверхности в режиме постоянного тока, величина которого составляла $0.1 \dots 1$ нА при напряжении смещения между острием и образцом 0.1 В. Ширина полосы пропускания цепи обратной связи составляла 10 кГц. Методика модификации поверхности заключалась в подаче на образец одиночных электрических импульсов $U_{имп}$ амплитудой $0.5 \dots 10$ В от генератора Г5-54 длительностью от 1 мкс до 1 мс в режиме сканирования иглой вдоль поверхности. Все эксперименты проводились на воздухе при атмосферном давлении, без отключения обратной связи.

Предварительный усилитель (ПУ) выполнен по схеме преобразователь ток-напряжение на основе операционного усилителя К544УД2А. Параллельно входу ПУ подключался конденсатор C_x (рис. 1), величина которого варьировалась от 0 до 3150 пФ. Варьирование величины C_x приводит к изменению значения входного импеданса ПУ и тем самым к изменению количества протекающего заряда в цепи острие-образец.

Как уже неоднократно отмечалось в ряде работ, при воздействии импульсом напряжения на поверхности золота возникают холмы диаметром $10-20$ нм и высотой $2-3$ нм. Полученные зависимости вероятности их образования от напряжения импульса для различных значений C_x приведены на рис. 2. Видно, что увеличение входной емкости

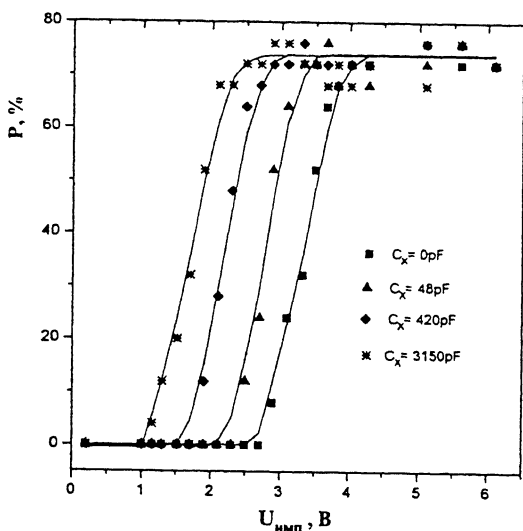


Рис. 2. Вероятность образования холмов на поверхности пленки золота от амплитуды импульса напряжения для различных значений C_x .

приводит к значительному понижению величины порогового напряжения $U_{\text{пор}}$ не изменяя при этом вероятность образования неоднородностей в насыщении. Обращает на себя внимание значительность изменения $U_{\text{пор}}$. При $C_x = 3150$ пФ $U_{\text{пор}}$ составляет порядка 2 В, т. е. по сравнению со случаем $C_x = 0$ пФ уменьшается почти в два раза. Такое поведение однозначно свидетельствует о том, что величина напряженности электрического поля у поверхности не является определяющим фактором. Из этого сразу следует, что механизмы, имеющие пороговый характер относительно напряженности электрического поля, такие как десорбция полем или поверхностная диффузия, стимулированная электрическим полем, по всей видимости не являются основными для образования холмов на поверхности подложки.

Нам представляется, что наблюдаемое смещение порога с увеличением C_x вполне соответствует предложенному в [3] механизму теплового расширения острия. Поскольку при приложении к системе острие-образец импульса $U_{\text{имп}}$ преобразователь ток-напряжение входит в режим насыщения и его полоса ограничена, все напряжение $U_{\text{имп}}$ распределяется между падением напряжения на туннельном промежутке и падением на входном импедансе ПУ. При этом начинается зарядка входной емкости C_{ex} предусилителя. Наличие дополнительной емкости C_x (увеличивающей $C_{\text{вх}}$) приводит к тому, что необходимо большее время на ее зарядку. Это в свою очередь увеличивает время в течение которого на

туннельном промежутке поддерживается большее падение напряжения. А поскольку величина туннельного тока зависит от напряжения на туннельном промежутке, то замедление его спада должно приводить к увеличению количества заряда, протекающего в цепи острие-образец и, следовательно, при прочих равных условиях к увеличению нагрева привершинной части острья.

Такой зависимостью порогового напряжения $U_{\text{пор}}$ от характеристик электронной схемы СТМ вполне можно объяснить наблюдающееся различие в значениях $U_{\text{пор}}$, приводимых в разных работах [6,7], поскольку величина входного импеданса предусилителя разными авторами не нормируется.

Конечно уменьшение величины порогового напряжения (напряженности поля в туннельном промежутке) должно приводить к уменьшению тока эмиссии между острием и подложкой. Однако следует учесть, что разность потенциалов между острием и подложкой существенно меньше работы выхода золота ($\varphi = 5.3 \text{ эВ}$ [8]). Потенциальный барьер для электронов между острием и подложкой имеет в этом случае трапециевидную форму. Расчеты величины тока показывают, что его зависимость от напряженности электрического поля значительно слабее, чем в случае автоэлектронной эмиссии, когда барьер имеет треугольную форму. Так в случае золота при уменьшении напряженности поля F от 4 нм/В до 2 нм/В ток изменяется в $\sim 10^{10}$ раз. При трапециевидном барьере такое же изменение поля F вызывает уменьшение тока только в 20 раз при ширине туннельного промежутка 1 нм и только в 3 раза при ширине 0.6 нм . Такое уменьшение тока частично может быть скомпенсировано увеличением разности потенциалов между острием и подложкой на начальном участке импульса, а также увеличением времени поддержания его при повышенном значении за счет зарядки дополнительной емкости. Кроме того, при трапециевидной форме барьера увеличивается энергия Ноттингама, которая выделяется на острие. Проведенные оценки показывают, что она может в два раза превышать ту, которая имеется при автоэлектронной эмиссии. Указанные причины способны компенсировать потери энергии, связанные с уменьшением эмиссионного тока при понижении напряжения, что и приводит к возможности модификации поверхности при столь низких напряжениях.

Таким образом, полученные результаты позволяют прийти к следующим основным выводам.

1. Уменьшение порогового напряжения при увеличении протекающего в цепи острие-образец количества заряда свидетельствует в пользу теплового механизма образования контакта между острием и образцом.

2. Величина порогового напряжения существенно зависит от характеристик используемой электронной схемы. Поэтому сравнение их величин возможно только при нормировании характеристик электронной схемы СТМ.

Работа выполнена в рамках Российской Государственной программы "Поверхностные атомные структуры", проект № 95-1.15.

Список литературы

- [1] *Mamin H.J., Guethner P.H. and Rugar D.* // Phys. Rev. Lett. 1990. V. 65. P. 2418.
- [2] *Pascual J.I., Mendez J., Gomez-Herrero J. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1993. V. 71. P. 1852.
- [3] *Баскин Л.М., Владимиров Г.Г., Дроздов А.В.* // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. № 11. С. 66.
- [4] *Адамчук В.К., Ермаков А.В., Любинецкий И.В.* // ПТЭ. 1990. № 1. С. 230-235.
- [5] *Владимиров Г.Г., Дроздов А.В., Дмитриев В.К.* // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. N 11. С. 24.
- [6] *Tien T. Tsong and Chia-Seng Chang* // Jpn. J. Appl. Phys. 1995. V. 34. P. 3309.
- [7] *Bessho K. and Hashimoto S.* // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 65. P. 2142.
- [8] *Фоменко В.С.* // Эмиссионные свойства материалов. Киев: Наукова Думка, 1981.

Институт физики
С.-Петербургского государственного
университета

Поступило в Редакцию
13 мая 1996 г.