

11;12

Влияние вибрации острия на вероятность модификации поверхности импульсом напряжения в сканирующем туннельном микроскопе

© Г.Г. Владимиров, А.В. Дроздов, В.Д. Молчунов

Институт физики С.-Петербургского государственного университета

Поступило в Редакцию 17 марта 1998 г.

Исследована вероятность модификации поверхности золота импульсом напряжения в сканирующем туннельном микроскопе при наличии гармонических колебаний острия. Обнаружено существенное смещение величины порогового напряжения и соответствующее расширение переходного участка на зависимости вероятности модификации от амплитуды импульса. Полученные результаты подтверждают предположение, что плавный переход вероятности модификации от нулевого до максимального значения может быть связан с механическими колебаниями острия.

К числу наиболее перспективных методов модификации поверхности в СТМ относится воздействие на поверхность импульсом напряжения. Исследования показали, что процесс образования неоднородностей в этом случае имеет вероятностный характер. Вероятность P становится ненулевой при превышении амплитудой импульса некоторого значения U_0 , после чего P увеличивается и достигает насыщения при $U \geq U_{thr}$. Величина $U_0 - U_{thr}$ достаточно значительна, она может превышать 1 В.

Нам представляется, что причиной плавного изменения P может быть вибрация острия относительно подложки. В связи с этим были проведены исследования влияния вибрации на форму зависимости $P(U)$.

Исследования проводились в СТМ обычной конструкции [1]. Методика изготовления вольфрамовых острий и образцов, представлявших собой пленки золота, не отличалась от приведенных в [2]. Изображение поверхности получалось в режиме постоянного тока, величина которого составляла 1 нА, при напряжении смещения между острием и образцом 0.1 В. Ширина полосы пропускания обратной связи составляла ~ 5 кГц. Модификация поверхности осуществлялась одиночными электрически-

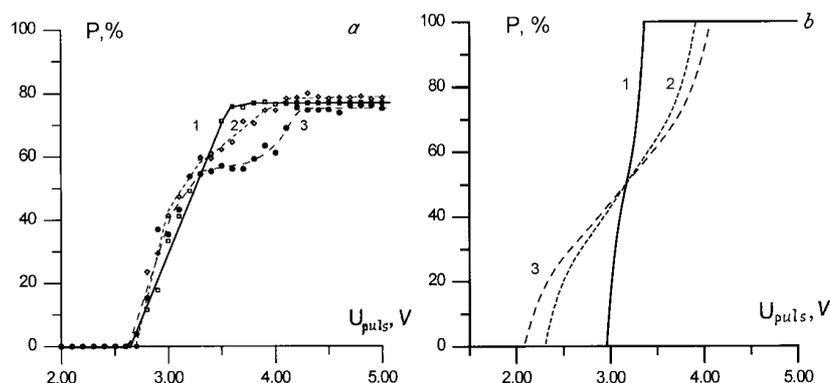


Рис. 1. Зависимость вероятности модификации поверхности золота от величины модифицирующего импульса: *a* — экспериментальные зависимости в отсутствие (1) и при наличии вынужденных колебаний с амплитудой 0.03 нм (2) и 0.04 нм (3); *b* — теоретические зависимости для амплитуды гармонических колебаний 0.01 нм (1), 0.04 нм (2) и 0.05 нм (3).

ми импульсами положительной полярности длительностью $5 \mu\text{s}$ от генератора Г5-54. Обратная связь, с помощью которой поддерживается постоянным ток в режиме изображения поверхности, не отключалась. Вынужденные колебания, сформированные звуковым генератором ГЗ-118, подавались на Z-составляющую пьезоманипулятора. Частота вынужденных колебаний подбиралась из соображений превышения полосы пропускания обратной связи и не кратности собственной частоте колебаний пьезоманипулятора ($\sim 50 \text{ kHz}$) и составляла 20 kHz .

Как неоднократно отмечалось, при воздействии импульса напряжения на поверхности золота возникают холмы диаметром $10\text{--}20 \text{ nm}$ и высотой $2\text{--}3 \text{ nm}$. Полученные зависимости вероятности модификации для различных значений амплитуды вынужденных колебаний острия приведены на рис. 1, *a*. Каждая из точек на приведенных кривых получена в результате 30 попыток модификации.

Наличие вынужденных колебаний не приводит к изменению вероятности модификации в насыщении. Видно также, что практически не изменяется и напряжение U_0 , при котором величина P принимает ненулевое значение. Последнее, видимо, связано с тем, что при наличии

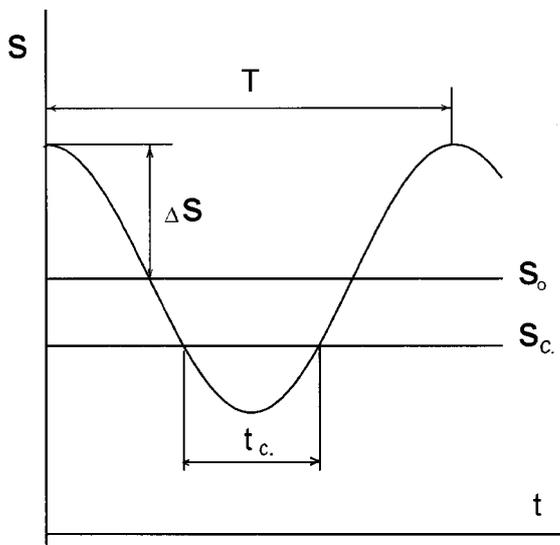


Рис. 2. Модель движения острия при наличии гармонических колебаний.

вибраций должно увеличиваться среднее расстояние между острием и образцом. Причиной является экспоненциальная зависимость туннельного тока от расстояния, вследствие чего наибольший вклад в ток имеет место тогда, когда острие находится на минимальном расстоянии от поверхности образца. Однако наблюдается существенное смещение величины порогового напряжения и соответствующее расширение переходного участка, причем оно тем больше, чем больше амплитуда колебаний острия.

В [3,4] была предложена модель модификации поверхности, в которой предполагалось, что причиной начала процесса является нагрев острия за счет энергии ε , выделяемой при эмиссии электронов за счет эффекта Ноттинггама. Можно полагать, что до некоторого значения ε она компенсируется потерями за счет излучения и теплопроводности острия. Начиная же с некоторой критической ε_c происходит лавинообразный разогрев вершины, вызывающий ее тепловое расширение и уменьшение туннельного промежутка. Это приводит к увеличению туннельного тока и, следовательно, к дальнейшему разогреву острия вплоть до

образования контакта. Очевидно, что ε_c должна быть однозначно связана с величиной туннельного промежутка S и напряжением между острием и образцом U . Это означает, что при заданном напряжении должна иметься некоторая критическая величина промежутка S_c . Если в момент подачи импульса $S < S_c$, то должна происходить модификация поверхности. Предположим, что острие совершает гармонические колебаний около среднего положения S_0 (рис. 2). Для простоты будем считать, что длительность модифицирующего импульса незначительна по сравнению с периодом колебаний острия. Тогда время в пределах одного периода колебаний, в течение которого острие находится при расстояниях, при которых возможна модификация поверхности, можно определить из следующего соотношения:

$$t = \frac{2}{\omega} \arccos \frac{S_0 - S_c}{\Delta S},$$

где ΔS — амплитуда колебаний, а ω — циклическая частота.

При таких предположениях вероятность модификации имеет простой вид: $P = t/T$, где T — период колебания острия.

Очевидно, что величина ε_c должна быть линейно связана с критической удельной мощностью, выделяемой за счет эмиссии электронов:

$$W_c = j_c \varepsilon_N / e,$$

где j — плотность эмиссионного тока, ε_N — средняя энергия, выделяемая при эмиссии электронов вследствие эффекта Ноттинггама. Поскольку величина U в интересующем нас интервале не превышает работу выхода, то в дальнейших расчетах использовались выражения, полученные для трапециевидного потенциального барьера [5]. В этом случае имеем:

$$\ln W_c = 3 \ln \frac{U}{S [\varphi^{1/2} - (\varphi - U)^{1/2}]} - A_0 \frac{S}{U} [\varphi^{3/2} - (\varphi - U)^{3/2}] + \text{const},$$

где $A_0 = 0.683 \text{ eV}^{-1/2} \cdot \text{A}^{-1}$. При таком рассмотрении величина U_0 должна соответствовать $S_c = S_0 - \Delta S$ и, считая известной U_0 , можно построить зависимости $P(U)$, задавшись значениями S_0 и ΔS . Рассчитанные кривые приведены на рис. 1, *b*. Можно считать, что качественно они неплохо согласуются с экспериментальными.

При сопоставлении следует иметь в виду, что в случае вынужденных колебаний на колебания, вызываемые внешним источником, накладываются собственные колебания, синхронизация между которыми отсутствует. Кроме того, в нашем случае длительность модифицирующего импульса не была оптимальной, поскольку она была только лишь в несколько раз меньше периода собственных колебаний острия.

Таким образом, полученные результаты подтверждают предположение, что плавный переход вероятности модификации от нулевого до максимального значения может быть связан с механическими колебаниями острия. Поэтому ни U_0 ни U_{thr} , строго говоря, не являются характеристиками процесса, на них существенное влияние оказывают технические характеристики используемого оборудования.

Список литературы

- [1] *Адамчук В.К., Ермаков А.В., Любинецкий И.В.* // ПТЭ. 1990. № 1. С. 230–235.
- [2] *Владимиров Г.Г., Дроздов А.В., Дмитриев В.К.* // Письма ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 11. С. 24–27 Tech. Phys. Lett. 1995. V. 21 (6). P. 406–407.
- [3] *Владимиров Г.Г., Баскин Л.М., Дроздов А.В.* // Письма ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 11. С. 66–71.
- [4] *Vladimirov G.G., Baskin L.M., Drozdov A.V.* // Surface Science. 1996. V. 369. N 1–3. P. 385–392.
- [5] *Vladimirov G.G., Drozdov A.V., Linkov N.E.* // Phys. Low-Dim. Struct. 1996. V. 7/8. P. 127–135.