

РЕЖИМ ПРОТЕКАНИЯ ТОКА ПРИ ПОВЫШЕНИИ НАПРЯЖЕНИЯ МЕЖДУ ИГЛОЙ И ОБРАЗЦОМ В ТУННЕЛЬНОМ МИКРОСКОПЕ

© *И.А.Дорофеев, В.Я.Косыев, А.А.Петругин*

В исследованиях поверхности твердого тела с помощью сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) широко используются методы туннельной спектроскопии; при этом богатую информацию дают вольт-амперные характеристики (ВАХ) туннельного контакта микроскопа. Следует ожидать, что при повышении напряжения ВАХ может приобрести автоэмиссионный характер. Высокая плотность автоэмиссионного тока является причиной нагрева и разрушения как иглы туннельного микроскопа, так и исследуемой поверхности. Совокупность различных факторов приводит в итоге к локальному изменению свойств поверхности образца под иглой СТМ, о чем сообщалось в многочисленных работах.

В нашей работе представлены результаты экспериментального исследования зависимости тока, протекающего между иглой и образцом СТМ, от приложенного напряжения различной амплитуды, длительности и формы. Показано, что полученные зависимости удовлетворительно описываются в небольшом интервале напряжений теоретическими формулами для автоэлектронной эмиссии при малой эффективной работе выхода. Высказано предположение, что причиной кажущейся малой величины работы выхода может быть резонансное туннелирование электронов через немонотонный туннельный барьер между электродами СТМ. Образование такого барьера возможно из-за окисных или адсорбционных пленок на поверхностях иглы и образца. На основе экспериментальных данных сделан вывод о том, что в результате нагрева и термического расширения происходит контакт между иглой и образцом, сопротивление которого измерено экспериментально.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Формирователь импульсов 1 включал в себя генератор импульсов прямоугольной формы, позволяющий изменять их длительность в пределах 10^{-5} –1 с и амплитуду до 10 В и интегрирующую цепь с постоянной времени 10^{-5} с для сглаживания крутого фронта импульсов генератора. При работе с

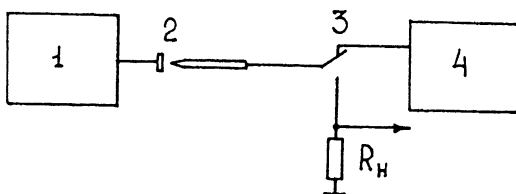


Рис. 1. Схема эксперимента.

большой нагрузкой использовался дополнительный усилитель мощности, с выхода которого импульс напряжения подавался на туннельный промежуток 2 СТМ. Для формирования импульсов треугольной формы использовалась схема на основе интегратора со сбросом, вырабатывающая линейно нарастающее напряжение на туннельном промежутке от нуля до 10 В, при этом длительность развертки можно было регулировать в диапазоне от 10^{-4} до 10 с. Протекающий ток регистрировался с помощью осциллографа по сигналу на нагрузочном сопротивлении R_n . Измерения производились следующим образом. При заданных U_t и I_t игла СТМ устанавливалась на определенном расстоянии от поверхности образца, после этого разрывалась цепь обратной связи с одновременной фиксацией напряжения на Z-двигателе микроскопа и переключением реле 3 с входа предусилителя СТМ 4 на нагрузочное сопротивление. Сигнал с R_n в зависимости от его уровня подавался либо сразу на вход запоминающего осциллографа, либо через усилитель с полосой пропускания 60 кГц.

В качестве образцов использовались пленка хрома толщиной 500\AA , нанесенная на полированную кремниевую подложку, и трехслойная структура углерод-никель-углерод также на кремниевой подложке с толщинами слоев 25, 30 и 25\AA соответственно. Пленки наносились методом лазерного напыления в вакууме, аналогично тому, как это делалось в [1]. В работе использовались иглы из вольфрамовой проволоки, приготовленные стандартным способом электрохимического травления в растворе щелочи. Эксперименты проводились на воздухе при атмосферном давлении, в обычных лабораторных условиях.

Проводимость туннельного промежутка увеличивается с ростом напряжения при неизменном расстоянии между электродами микроскопа, т. е. является переменной величиной. При выбранных $U_t = 0.1\text{ В}$ и $I_t = 1\text{ нА}$ начальное сопротивление туннельного контакта R_t порядка 10^8 Ом . На рис. 2 представлена зависимость амплитуды сигнала U_n на нагрузочном сопротивлении R_n от его величины, при пода-

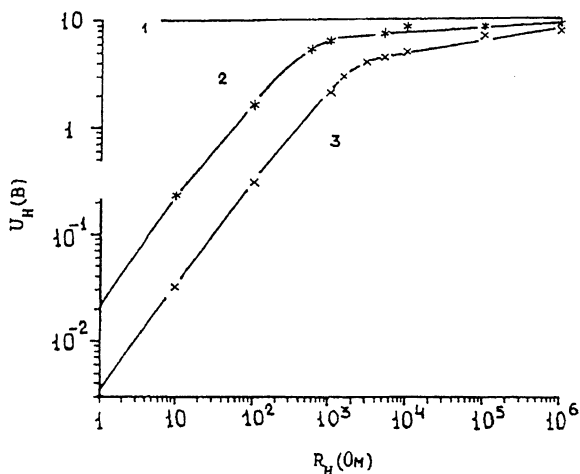


Рис. 2. Зависимость амплитуды сигнала U_H на нагрузочном сопротивлении от величины R_H .

че импульса напряжения длительностью 10^{-3} с и амплитудой десять вольт. Кривая 1 этого рисунка соответствует короткозамкнутому контакту между электродами, кривая 2 получена при работе с пленкой хрома и кривая 3 — с трехслойной углерод-никелевой структурой при начальном расстоянии между электродами, соответствующем значениям $U_t = 0.1$ В и $I_t = 1$ нА. Как видно из этого графика, существует некоторое характерное сопротивление R^* , определяющее перегиб на кривых. Очевидно, что при $R_H < R^*$ все напряжение падает на туннельном контакте и наоборот, при обратном соотношении между R_H и R^* . По-видимому, R^* — это сопротивление контакта игла-образец к концу действия импульса, для пленки хрома имеем $R^* \approx 420$ Ом и для трехслойной структуры $R^* \approx 2000$ Ом. Таким образом, в процессе импульсного воздействия сопротивление промежутка меняется на пять-шесть порядков. Отметим, что характер кривых и значение R^* не менялись при работе с импульсами любой длительности в диапазоне 10^{-5} –1 с.

Реальная электрическая схема предвзрывательного усилителя туннельного микроскопа, с помощью которого проводились эксперименты по модификации многослойных структур в [1,2], такова, что эквивалентное сопротивление $R_H = 10^6$ Ом. С таким значением нагрузочного сопротивления снималась вольт-амперная характеристика туннельного контакта, образованного вольфрамовой иглой и трехслойной структурой при $U_t = 0.1$ В и $I_t = 1$ нА. На рис. 3 представлена зависимость тока от амплитуды импульса на-

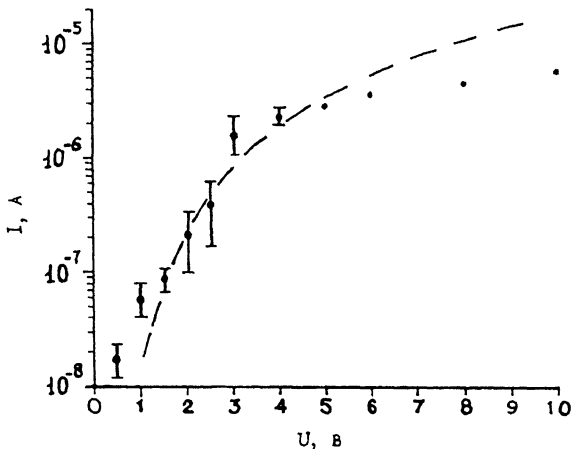


Рис. 3. Зависимость величины максимального тока I , протекающего через туннельный промежуток, от амплитуды импульса напряжения U . Точки — экспериментальные значения, штриховая линия — расчет по формуле Фаулера-Нордгейма.

пряжения длительностью 10^{-3} с, подаваемого на туннельный контакт. Каждый раз измерение проводилось при локализации иглы микроскопа над новой областью поверхности многослойной структуры. Статический разброс значений, указанный на графике, соответствует попаданию в данный диапазон с вероятностью 96%. Как следует из наших измерений, при типичных амплитудах импульса напряжения, при которых происходит локальная модификация многослойных металл-углеродных структур, максимальный ток не превышает значения 10^{-5} А с указанной нагрузкой.

Аналогичная зависимость снималась при подаче на туннельный промежуток импульса треугольной формы или линейной развертки напряжения от нуля до десяти вольт различной длительности. На рис. 4 представлены рисунки осциллограмм сигнала с нагрузочного сопротивления (сплошная линия) и формы импульса напряжения длительностью 10^{-3} с на выходе формирователя импульсов (пунктир) при взаимном положении иглы и образца, соответствующем $U_t = 0.1$ В и $I_t = 1$ нА. Осциллограмма (рис. 4, а) получена при работе с трехслойной структурой и, очевидно, полностью соответствует ВАХ рис. 3. В начале развертки наблюдается резкий, экспоненциальный рост тока с дальнейшей сменой характера протекания в конце развертки. Иногда наблюдались осциллограммы, подобные представленной на рис. 4, б, в этом случае сброс сигнала происходил раньше, чем заканчивалась развертка напряжения

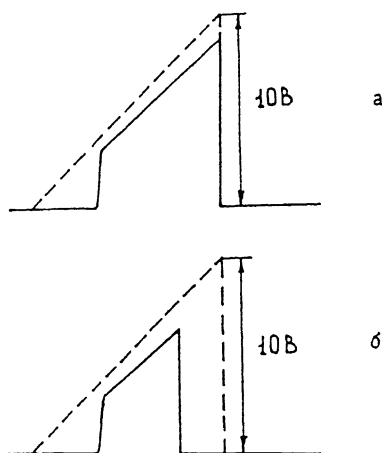


Рис. 4. Рисунки осциллограмм сигнала на нагрузочном сопротивлении.

на контакте. Возможно, это связано со случайным отскоком иглы от поверхности образца.

Полученные ВАХ в небольшом интервале напряжений удовлетворительно описываются теоретическими зависимостями для случая автоэлектронной эмиссии при малых величинах работы выхода. В частности, на рис. 3 штриховой линией проведена кривая, построенная по формуле Фаулера-Нордгейма при расстоянии между электродами, равном $5 \cdot 10^{-7}$ см, площади эмиссионного контакта 10^{-14} см² и работе выхода 0.2 эВ. Качественное совпадение экспериментальных и теоретических ВАХ при малых величинах работы выхода отмечалось в литературе неоднократно. Одно из объяснений такого факта может быть дано на основе явления резонансного туннелирования через немонотонный барьер, когда производная от потенциальной энергии от координаты меняет свой знак больше, чем один раз. Такой барьер образуется адсорбированными и окисными пленками, отдельными атомами и молекулами. В некоторых диапазонах энергии электронов прозрачность барьера многократно увеличивается. Расчет вероятности прохождения электроном такого барьера выполнен достаточно подробно (см., например, [3]). В нашем случае из-за конечного радиуса кривизны иглы в различных местах эмитирующей поверхности форма барьера может быть неодинакова. При суммировании полного тока это приведет к сглаживанию пиков, соответствующих максимумам прозрачности. Результирующая ВАХ будет соответствовать теоретической кривой для простого барьера при малой эффективной работе выхода. От-

метим, что в наших экспериментах в отдельных случаях максимумы на ВАХ хорошо различались, что свидетельствовало в пользу данной качественной модели характера потенциального барьера между иглой и образцом в обычных лабораторных условиях. Общий вид кривых рис. 3 и 4 говорит о том, что в конце импульса происходит контакт иглы и образца. Это возможно из-за их термического нагрева и расширения, что подтверждается нашими расчетами с использованием результатов [4,5]. Как уже отмечалось, определенное по перегибу нагрузочных кривых сопротивление контакта для пленки хрома составило 420 Ом. Используя найденное значение сопротивления контакта и величину погонного сопротивления исследованного образца, можно оценить размер контакта в шарвиновском приближении [6]. По нашим оценкам размер контакта равен 10–30 Å.

Таким образом, в нашей работе приведены экспериментальные результаты по исследованию режима протекания тока между электродами СТМ в условиях, характерных для локальной модификации тонких пленок. Показано, что при импульсном воздействии возможен контакт между иглой и образцом, размер которого оценен в шарвиновском приближении. ВАХ в небольшом диапазоне напряжений могут быть удовлетворительно описаны зависимостями, соответствующими автоэлектронной эмиссии с малой величиной работы выхода.

Авторы признательны Н.Н. Салащенко за обсуждение результатов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 95-02-03595.

Список литературы

- [1] *Ахсагалян А.Д., Гапонов С.В., Дорофеев И.А. и др. // ЖТФ. 1994. Т. 64. В. 4. С. 144–155.*
- [2] *Волгунов Д.Г., Дорофеев И.А., Салащенко Н.Н., Токман М.И. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 8. С. 39–44.*
- [3] *Бом Д. // Квантовая теория. М.: Наука, 1965. 728 с.*
- [4] *Дорофеев И.А. // ЖТФ. 1995. Т. 10. С. 99–110.*
- [5] *Gratzke U., Simon G. // Phys. Rev. B. 1995. V. 52. N 11. P. 8535–8540.*
- [6] *Шарвин Ю.В. // ЖЭТФ. 1965. Т. 48. В. 3. С. 984–985.*

Институт физики
микроструктур РАН
Нижний Новгород

Поступило в Редакцию
5 августа 1996 г.