

11;12

Туннельный контакт под действием импульса напряжения наносекундной длительности

© И.А. Дорофеев, В.Я. Косыев

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

Поступило в Редакцию 27 марта 1997 г.

Исследована начальная стадия протекания тока через туннельный промежуток при короткоимпульсном воздействии, динамика контакта иглы с поверхностью образца под действием импульсов длительностью от 1 мкс до 1 с.

Как известно, локальную модификацию поверхности твердого тела можно производить путем импульсного повышения напряжения на туннельном промежутке [1,2]. Для разработки механизма изменения свойств поверхности материала необходимо иметь информацию о динамике туннельного контакта в течение действия импульса напряжения. В ряде работ, например в [3–5], экспериментально исследовано поведение туннельного контакта под действием импульсов длительностью от 1 мкс до 1 с, показано, что при увеличении амплитуды импульсов возрастает вероятность механического контакта между иглой и образцом. В данной работе приводятся результаты экспериментов по исследованию прохождения через туннельный контакт коротких импульсов с длительностью от 20 нс до 1 мкс.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. С генератора импульсов (1) (Г5-60) прямоугольные импульсы амплитудой до 10 В и фронтом ~ 10 нс подавались непосредственно на туннельный контакт. Регистрация импульсов (2 — цифроаналоговый преобразователь) проводилась при замкнутой обратной связи туннельного микроскопа. Импульсный ток протекал через образец, туннельный промежуток и с входа предварительного усилителя (3) микроскопа потупал на усилитель (4) ВЧ сигнала, который минимизировал искажения формы сигнала, согласуя сопротивление цепи с коаксиальной линией.

Полоса пропускания схемы регистрации определялась снизу частотой входного фильтра высоких частот и сверху граничной частотой

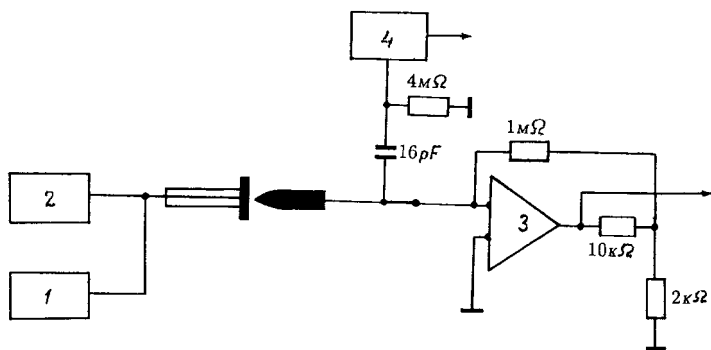


Рис. 1.

осциллографа. Двухкаскадный усилитель ВЧ мощности выполнен на полевых транзисторах с изолированным затвором типа КП 905, КП 907 с граничной частотой усиления 1.5 ГГц. Первый каскад усилителя представляет собой широкополосный усилитель напряжения, собранный по схеме с общим истоком. Гальванически не связанный с первым, второй каскад является истоковым повторителем с сопротивлением нагрузки пятьдесят ом. Соединения элементов схемы проводились коаксиальным кабелем с волновым сопротивлением 50 Ом.

В работе исследовались следующие образцы: массивное серебро и железо, пленки хрома и никеля толщиной 500 \AA , нанесенные на полированную кремниевую подложку или стекло, трехслойные структуры углерод–никель–углерод на кремниевой подложке с толщинами слоев $25 \text{ \AA}/30 \text{ \AA}/25 \text{ \AA}$ и $25 \text{ \AA}/500 \text{ \AA}/25 \text{ \AA}$ соответственно. Пленки наносились методом лазерного напыления в вакууме. В работе использовались иглы из вольфрамовой проволоки, приготовленные способом электрохимического травления в растворе щелочи. Массивные металлические образцы перед измерениями обрабатывались в 40%-м растворе кислоты HF с последующей тщательной промывкой в дистиллированной воде. Эксперименты проводились на воздухе при атмосферном давлении.

Качество всего радиотехнического тракта проверялось следующим образом. Игла микроскопа вдавливалась в массивный металлический образец, затем на этот короткозамкнутый контакт подавался импульс напряжения, который, пройдя всю схему регистрации, записывался

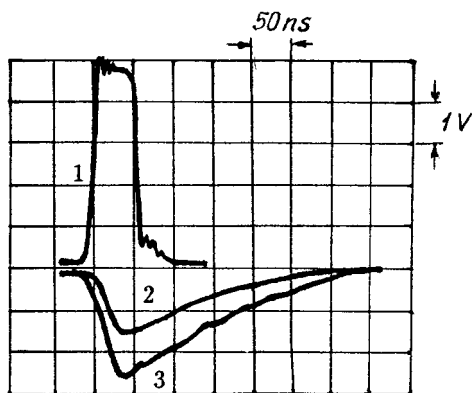


Рис. 2.

на осциллографе. На рис. 2 осциллограмма 1 характеризует качество сигнала, прошедшего короткозамкнутый контакт, образованный вольфрамовой иглой и массивным металлическим образцом. Такой же сигнал наблюдался при прохождении короткозамкнутого контакта, образованного вольфрамовой иглой и 500 Å пленкой металла на стекле. Отметим, что эти импульсы практически не отличались от импульсов той же длительности на выходе генератора. Нижние осциллограммы показывают изменение формы импульса при прохождении туннельного контакта между иглой и трехслойной структурой (25 Å/30 Å/25 Å) при $I_t = 1$ нА, $U_t = 0.1$ В — кривая 2 и короткозамкнутого контакта между вольфрамовой иглой и трехслойной структурой — кривая 3. Все кривые одной полярности, но для удобства сравнения кривые 2 и 3 приведены инвертированными. Из сравнения кривых 2 и 3 этого рисунка видно, что значительные изменения формы, длительности и амплитуды импульса связаны не только с наличием туннельного промежутка, но могут определяться свойствами структуры и подложки. Исследования показали, что определяющий вклад давала кремниевая подложка (тип КДБ, сопротивление, измеренное контактным способом — 20 мОм/см). Мы считаем, что это связано с транспортом электронов через барьер Шоттки на контакте металл–полупроводник в месте крепления образца к столику микроскопа и в зоне взаимодействия иглы и образца при протекании тока. Заметим, что форма и амплитуда прошедшего туннельный

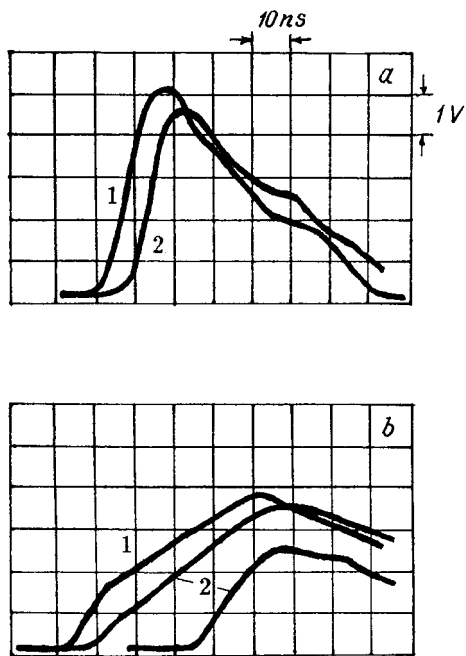


Рис. 3.

контакт импульса при заданных U_t и l_t (кривая 2) зависит от места локализации иглы над структурой и от ее параметров.

В наших экспериментах во всем исследованном диапазоне длительностей импульсов наблюдалось увеличение вероятности механического контакта между иглой и образцом с увеличением амплитуды импульса. Причиной контакта, по-видимому, является тепловое расширение иглы и образца из-за нагрева протекающим током. В следующих экспериментах измерялось время, за которое игла преодолевала туннельное расстояние, или время, за которое сопротивление туннельного контакта уменьшалось на несколько порядков. По нашим оценкам, сопротивление, например туннельного контакта вольфрам-трехслойная структура, падало на шесть порядков, с 10^8 Ом при заданных U_t и l_t до 10^2 Ом, включая погонное сопротивление структуры. Об этом, очевидно, может свидетельство-

вать задержка фронта прошедшего через туннельный контакт импульса относительно фронта импульса, прошедшего короткозамкнутый контакт.

На рис. 3, *a* приведена осциллограмма импульса, прошедшего короткозамкнутый контакт вольфрамового острия с массивным металлическим образцом — кривая 1 и осциллограмма импульса, прошедшего туннельный контакт — кривая 2. На рис. 3, *b* показаны подобные сигналы, полученные при работе с трехслойной $C(25 \text{ \AA})/Ni(30 \text{ \AA})/C(25 \text{ \AA})$ — структурой. Кривые 2 на этом рисунке отражают разброс задержки фронта импульса, прошедшего туннельный контакт в зависимости от места локализации иглы над исследуемой поверхностью. Туннельный контакт в обоих случаях формировался при $U_t = 0.1 \text{ В}$ и $I_t = 1 \text{ нА}$. Из проведенных экспериментов следует, что вакуумный зазор между вольфрамовой иглой и этими образцами уменьшается до нуля (вплоть до механического контакта) за время $8 \div 30 \text{ нс}$ при $U_t = 0.1 \text{ В}$ и $I_t = 1 \text{ нА}$. Здесь мы не будем подробно обсуждать вопрос о том, что такое микроскопический механический контакт, однако по нашим измерениям его линейный размер порядка или меньше длины свободного пробега электрона, если воздействие осуществлялось импульсами с амплитудой в несколько вольт.

Отметим, что задержка импульса, прошедшего туннельный контакт, растет с увеличением расстояния между иглой и образцом, в частности с увеличением U_t .

Таким образом, в нашей работе исследована начальная стадия протекания тока через туннельный промежуток при короткоимпульсном воздействии. При увеличении напряжения на туннельном промежутке резко возрастает ток через туннельный контакт, что приводит к росту тепловыделения в острие иглы и в образце. При низких (комнатных) температурах острия и образца основной механизм выделения тепла связан с эффектом Ноттингама. При температурах вблизи температуры инверсии эффекта Ноттингама начинает доминировать джоулево тепловыделение. Повышение температуры неизбежно сопровождается расширением материалов, уменьшением туннельного зазора и дальнейшим ростом тока с дополнительным нагревом иглы и образца. Тем самым процесс приобретает характер термодинамической неустойчивости, время развития которой мы и зафиксировали в наших экспериментах. После замыкания промежутка, потенциал на игле растет практически до той же величины, что и на образце, как это следует из сравнения с осциллограммами сигналов, прошедших короткозамкнутый контакт.

Часть напряжения, очевидно, падает на тонкой пленке, комплексное сопротивление которой велико для высокочастотных компонент коротких импульсов с крутыми фронтами. Нужно отметить, что исходное расстояние между иглой и образцом, задаваемое значениями U_t и I_t , определяется также эмиссионными характеристиками поверхности различных образцов, даже при работе с одной и той же иглой. Поэтому исходная величина туннельного зазора в общем случае будет разной для различных образцов, как и время замыкания промежутка.

Работа частично поддержана РФФИ.

Список литературы

- [1] *Guntherodt H.J., Weisendanger R.* Scanning Tunneling Microscopy I, II, III. Berlin Heidelberg, 1992.
- [2] *Владимиров Г.Г., Грязев А.А.* // Вестник СбПГУ. 1993. Сер. 4. N 1. С. 24–40.
- [3] *Chang C.S., Su W.B., Tsong Tien T.* // Phys. Rev. Lett., 1994. V. 72(4). P. 574–576.
- [4] *Владимиров Г.Г., Дроздов А.В., Резанов А.Н.* // Письма в ЖТФ. 1996, Т. 22. В. 18. С. 67–71.
- [5] *Дорофеев И.А., Косыев В.Я., Петрухин А.А.* // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 23. С. 30–35.