

ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ ДЕФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ  
СОПРОТИВЛЕНИЕ МИКРОМОСТИКОВ

А.Б. В о л к о в, В.К. Н е в о л и н

В микромостиках, сформированных на подложках из различных металлов с помощью туннельного зонда, наблюдаются нелинейные симметричные ВАХ, в том числе и  $S$ -образные, объясняемые эффектом кулоновского барьера.

Качество микромостиков можно существенно повысить, если использовать туннельный зонд сканирующего туннельного микроскопа (СТМ). С помощью туннельного зонда, представляющего собой игольчатый электрод с радиусом острия 10–20 нм (обычно из вольфрама), возможно между иглой и подложкой создавать электрические поля до  $10^8$  В/см при напряжениях на электродах не более 10 В и пропускать электрические токи плотностью до  $10^9$  А/см<sup>2</sup> в обычных атмосферных условиях. Это позволяет, в частности, провести локальную пластическую деформацию подложки и изменять свойства среды, находящейся между иглой и подложкой [1].

Были использованы подложки из титана, меди, нержавеющей стали и золота. Длина микромостиков достигала до 0.1 мкм. ВАХ исследуемого участка генерировались непрерывно от внешней развертки с частотой 400 Гц. Процесс формирования микромостиков заключался в удалении иглы от подложки. Для измерения тока использовался резистивный шунт  $R_o=1$  кОм. При увеличении зазора от момента касания между подложкой и иглой последовательно фиксировались линейные характеристики, затем характеристики с ярко выраженной нелинейностью (рис. 1) и, наконец, перед самым обрывом микромостиков наблюдались ВАХ с отрицательным дифференциальным сопротивлением (рис. 2). Микромостики на нелинейном участке ВАХ подвергались вибрационным испытаниям, путем подачи переменного небольшого напряжения на пьезопривод с частотами до  $10^5$  Гц. Мостики проявляли устойчивость к амплитудам раскочки до 2–3 нм, при этом отсутствовали какие-либо изменения ВАХ.

Микромостики с нелинейными ВАХ можно было зафиксировать посредством отверждения в капельке эпоксидной смолы, затем извлечь их вместе с подложкой и наблюдать вновь нелинейные и  $S$ -образные ВАХ, поместив микромостики в термостат и нагревая их на несколько градусов выше комнатной температуры.

Результаты по наблюдению нелинейных ВАХ, близкие к нашим, описаны в [2], где в качестве среды туннелирования использовался адсорбат, находящийся в межэлектродном зазоре и на поверхностях подложки и игольчатого электрода в вакуумируемом объеме. Нами ранее также исследовались нелинейные и другие свойства мостиков

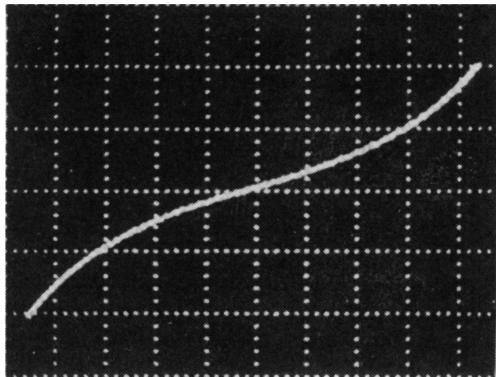


Рис. 1. Нелинейная ВАХ. Подложка из нержавеющей стали. Ток по оси ординат 0.5 мА/дел. Напряжение по оси абсцисс 0.2 В/дел.

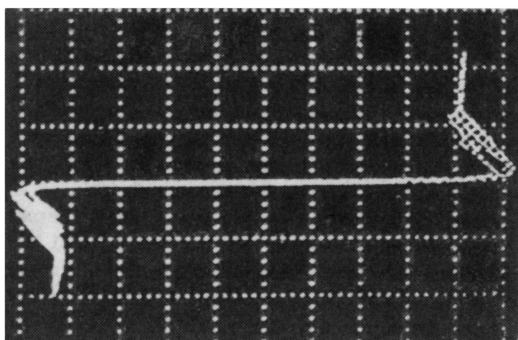


Рис. 2. S-образная ВАХ. Подложка из нержавеющей стали. Ток по оси ординат 0.5 мА/дел. Напряжение по оси абсцисс 0.2 В/дел.

из адсорбата воздуха, формируемых в СТМ между иглой и подложкой [3], Напряжение смещения линейного участка ВАХ в отличие от [2] составляло единицы вольт, поскольку мостики из адсорбата были более чем на порядок длиннее. Однако, во всех экспериментах наблюдаемые токи были малы и не возникали S-образные ВАХ.

Было предположено, что и в микромостиках, формируемых из материала подложек может иметь место пространственная дискретизация зарядов, переносящих ток. В процессе формирования мостиков, в наиболее узкой их части возможно возникновение мезоструктуры с диэлектрическими свойствами и локальными состояниями, которые могут заполняться зарядами протекающего тока. В результате пространственный заряд, ограничивающий ток, обуславливает нелинейные ВАХ, в том числе и S-образные, связанные с опустошением локальных состояний. Находя асимптотики экспериментальных кривых при больших токах (рис. 1), получаем  $R = 100 \text{ Ом}$ ,  $V_f = 0.6 \text{ В}$ , где

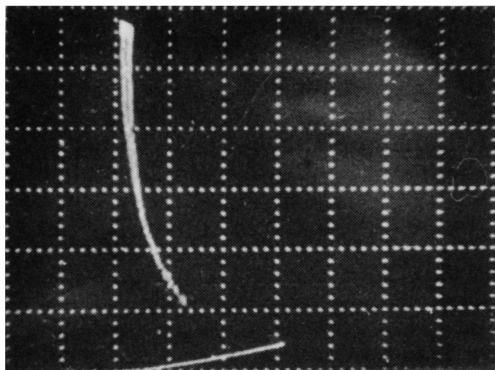


Рис. 3. S-образная ВАХ (положительная ветвь). Подложка из золота. Ток по оси ординат 0.5 мА/дел, напряжение по оси абсцисс 0.1 В/дел.

$R$  – сопротивление микромостика на линейном участке,  $V_t$  – напряжение смещения линейного участка. При увеличении длины микромостика возрастает  $V_t$  (рис. 2),  $V_t = 1.0$  В, а сопротивление  $R$  микромостика остается практически неизменным. Не отклоняя положения о том, что адсорбат воздуха может дополнительно влиять на шейку микромостика, например, проокислив ее полностью и переводя тем самым в диэлектрическое состояние, эксперименты с микромостиками, сформированными на золотой подложке (рис. 3), показывают, что S-образные ВАХ на этих подложках выражены еще более определеннее.

В заключение отметим, что нелинейные характеристики и отрицательное дифференциальное сопротивление, наблюдающееся при миллиамперных токах, на микромостиках, сформированных на подложках из различных металлов, имеют повышенный прикладной интерес.

Авторы выражают благодарность Першакову В.Т., Дубровскому Ю.В., сотрудникам ИПТМ за полезные обсуждения.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Неволин В.К., Хлебников Ю.Б., Шермергорр Т.Д. // Электронная техника, сер. 3. Микроэлектроника. 1989. В. 5(134). С. 3–9.
- [2] Verthel R., Halbritter J. // Phys. Rev. В. 1991. V. 43. N 9. P. 6880–6884.
- [3] Вернер В.Д., Дьяков Ю.И., Неволин В.К. // Электронная промышленность. 1981. № 3. С. 33–36.

Поступило в Редакцию  
17 января 1992 г.