

УДН 539.211

АНОМАЛЬНОЕ ПОВЕДЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОСЛОЙКОЙ В СИЛЬНО НЕРАВНОВЕСНЫХ УСЛОВИЯХ

В. В. Зорченко, В. П. Сапелкин, А. А. Удовенко

На вольт-амперных характеристиках Ni-контактов, разделенных тонким слоем SiO, при комнатной температуре обнаружены скачки тока при напряжениях, кратных 65 мВ, причем на «омических» участках контактанс образцов близок к одной из величин ν (e^2/h), где $\nu = p/q$ (p и q — целые числа).

В последние годы заметно возрос интерес к свойствам туннельных переходов, в которых проявляются эффекты дискретности электрического заряда. Начальным толчком послужила работа [1], в которой было продемонстрировано, что в системе металлические контакты — оксидный слой с металлическими включениями (островковая пленка) при низких температурах емкость системы является осциллирующей функцией приложенного к контактам напряжения. Эта ситуация теоретически исследовалась в [2], и было показано, что в подобных системах возможны не только осцилляции емкости, но и осцилляции сопротивления. Эффект обусловлен электростатической энергией взаимодействия гранулы с контактами, возникающей при переходе одиночных электронов с контакта на гранулу. При достаточно малых размерах гранул и низких температурах заметный ток между контактами должен появиться при напряжениях выше порогового. Эти идеи получили дальнейшее развитие в ряде работ (см., например, [3, 4]) по свойствам туннельных переходов малых размеров, для которых предсказан эффект последовательного туннелирования одиночных электронов (о первом наблюдении данного явления сообщалось в [5]). Этот эффект может служить основой для разработки нового поколения устройств микроэлектроники [6].

В теории Кулика и Шехтера [2] рассматривался случай, когда можно пренебречь взаимодействием между гранулами в туннельном переходе. Именно такая ситуация была реализована в экспериментах [1]. Однако в системах, где взаимодействие гранул существенно, можно ожидать качественных изменений в поведении ВАХ контактов. Исходя из этого, в настоящей работе исследовалась система — никелевые контакты с тонкой прослойкой SiO, в которую замуровывался слой островков Ni.

Образцы приготавливались конденсацией в вакууме $\sim 10^{-2}$ Па. Сначала на ситалловую подложку наносились пленки Ni толщиной 100—150 нм в виде широких полос, на которые напылялся слой SiO (≥ 4 нм). После этого конденсировался островковый слой Ni, который закрывался сверху слоем SiO (от 4 до 12 нм). Затем через маску напылялся верхний никелевый электрод, имевший форму круга диаметром 3 мм, к которому серебряной пастой крепились тонкая серебряная проволочка. Толщина отдельных слоев контролировалась кварцевым резонатором с точностью $\pm 5\%$. Конденсация SiO и островков Ni проводилась при комнатной температуре подложки со скоростью $0.1 \text{ нм} \cdot \text{с}^{-1}$ (термическое испарение из алундовых тиглей).

Разность потенциалов между нижним и верхним электродами U измерялась при атмосферном давлении и комнатной температуре компенсационным методом с помощью компаратора напряжения Р 3003 с точностью 10^{-2} %. Поскольку источник поддерживал стабильный уровень напряжения от 2 до 9 В, разность потенциалов на образце регулировалась делителем напряжения, который в полностью введенном состоянии имел сопротивление 800 Ом. Сопротивление образцов измерялось с точностью не хуже 0.3—0.1 % (вклад сопротивления нижнего электрода в общее сопротивление системы составлял менее 3 Ом).

Электронно-микроскопическое исследование образцов показало, что исходные пленки SiO однородны и не содержат включений (например, островков Si) с размерами более 1 нм (в пределах разрешающей способ-

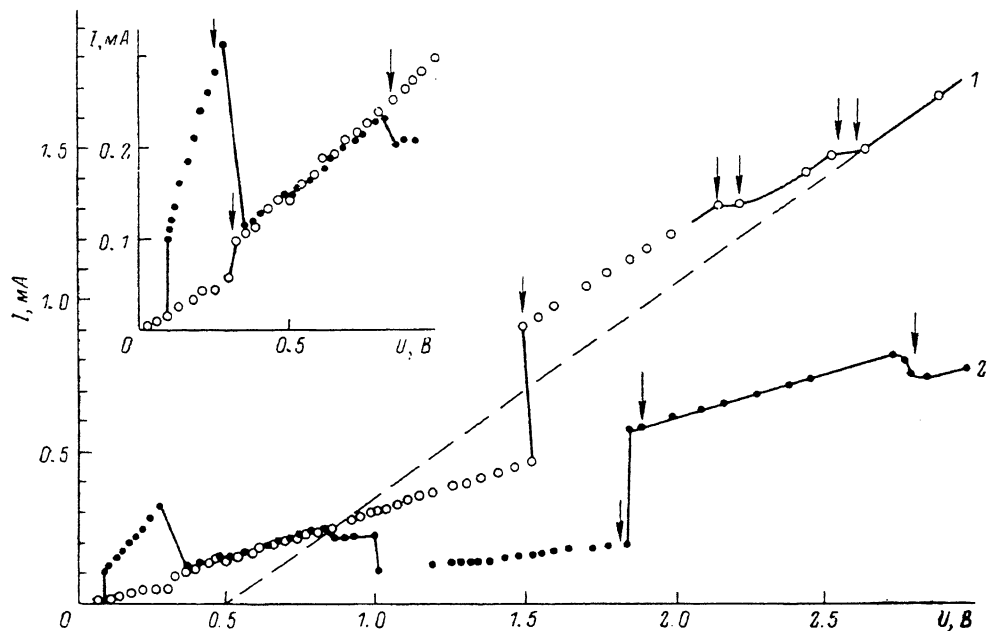


Рис. 1. ВАХ образца $40 \text{ \AA} \text{ SiO}-40 \text{ \AA} \text{ Ni}-80 \text{ \AA} \text{ SiO}$.

1, 2 соответствуют отрицательному и положительному потенциалам верхнего электрода. Начальные участки ВАХ показаны на вставке. Стрелки указывают напряжения, кратные 65 мВ.

ности микроскопа). Островки Ni на SiO имеют округлую форму, и их средний размер порядка удвоенной эффективной толщины h_{Ni} пленки Ni (т. е. толщины, которую имела бы сплошная пленка), а зазоры между островками в 3—5 раз меньше их диаметра. Слой SiO с эффективной толщиной более или порядка h_{Ni} полностью покрывал островки таким образом, что они не контактировали с верхним металлическим электродом.

ВАХ образцов в общем случае были нелинейными и представляли собой набор почти линейных участков со скачкообразными переходами между ними. Типичный вид ВАХ одного из образцов приведен на рис. 1 (для удобства отдельные ветви ВАХ соединены прямыми линиями). Скачки тока совершаются самопроизвольно по мере медленного повышения напряжения на образце. Перед скачками возникает сильная неустойчивость тока, приводящая в конце концов к переходу. Скачки происходят при разности потенциалов на электродах $U = nU_0$, где $U_0 = 65 \text{ мВ}$, n — целое число, во всем исследованном нами интервале напряжений (до 9 В). Как видно из рис. 1, ВАХ образцов содержит два вида линейных участков. Одни из них при продолжении в область низких напряжений проходят через начало координат (омические участки), другие (участки с отсечкой) пересекают ось абсцисс в точках U^* , кратных U_0 (экстраполяция одного из таких участков показана на рис. 1 пунктирной линией, $U^* = 520 \text{ мВ}$).

Гораздо реже скачки тока происходят при значениях $U=(n+l/4)U_0$, где $l=1, 2, 3$ (для первого скачка тока на рис. 1, кривая 2 $n=1, l=2$). То же относится и к величинам U^* .

Если построить кондуктанс образцов $G=I/R$ ($R=U/I, I$ — ток через образец) как функцию напряжения, то оказывается, что величины G на омических участках близки к значениям $G=vG_0$, где $G_0=e^2/h, v=p/q$ (p и q — целые числа), причем q принимает значения 1, 2, 3, 5, 7, 9; p — произвольной четности (рис. 2). Для некоторых образцов отличие G от указанных значений лежит в пределах погрешности измерений (не более $3 \cdot 10^{-3}$). В общем случае кондуктанс образцов осциллирует вблизи указанных значений с амплитудой до нескольких процентов с периодом

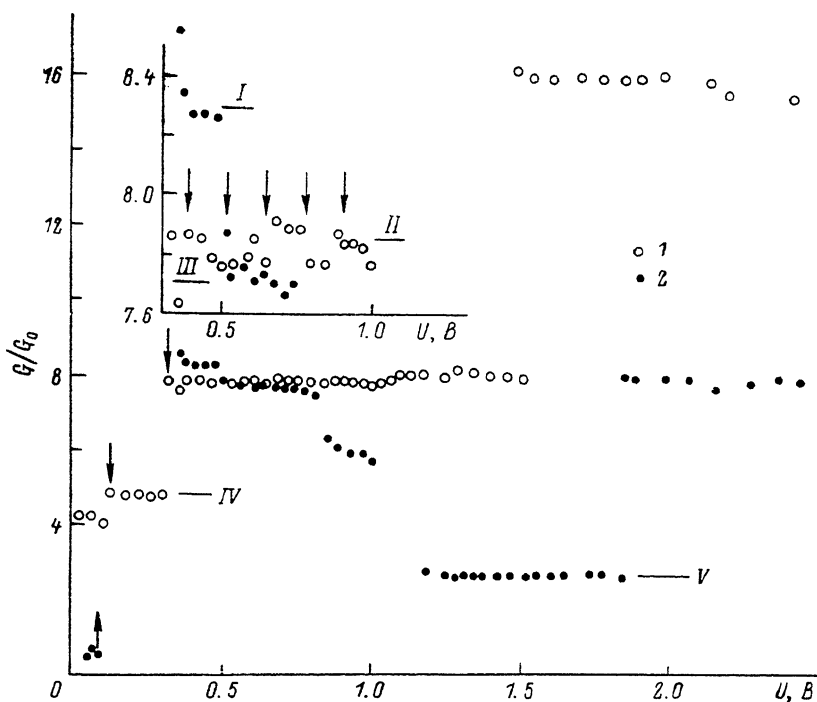


Рис. 2. Кондуктанс образца, ВАХ которого приведены на рис. 1, в единицах G_0 .

1, 2 — отрицательный и положительный потенциалы на верхнем электроде. На вставке отдельно показан участок, на котором ВАХ при противоположных полярностях близки. v : I — 58/7, II — 55/7, III — 54/7, IV — 24/5, V — 8/3.

65 или 130 мВ. В отдельных случаях размах осцилляций в определенных областях напряжений настолько велик, что нельзя уже говорить о приближенной линейности ВАХ на этих участках. Отметим также тот факт, что эффективные наклоны $G^*=I/(U-U^*)$ участков с отсечкой практически равны одной из величин v^*G_0 ($v^*=p/q^*$).

Исследование контактов Ni—SiO—Ni без промежуточного слоя островков показало, что и в этой системе в диапазоне толщин от 4 до 8—9 нм проявляется качественно подобное поведение ВАХ, однако общая картина значительно беднее, скачки тока выражены не столь ярко. На рис. 3 (кривая 1) приведена ВАХ одного из образцов, содержащая множество линейных участков. Видно, что линейные участки как бы разбросаны вокруг монотонной нелинейной кривой, которая условно проведена штрихами. Первому линейному участку на рис. 3 соответствует $G/G_0=1/5$, а последующим четырем участкам — значения G^*/G_0 , равные 3/7, 1, 3/2, 3/2 соответственно (величины «отсечек» U^* равны 260, 1040, 1365, 1495 мВ). ВАХ образцов с толщиной слоя SiO более 8—9 нм монотонны и нелинейны (рис. 3, кривая 2). При нагреве образцов до 250 °C в вакууме мелкомасштабные осцилляции размываются, но не исчезают полностью.

Следует отметить, что ВАХ образцов, снятые при подъеме и сбросе напряжения на контактах, в общем случае не совпадают. Нет совпадения и при многократных измерениях ВАХ одного и того же образца. Не так уж редко наблюдается ситуация, когда в процессе изменения напряжения образец внезапно переключается в высокоомное состояние (десятки и сотни МОм). При уменьшении U образец чаще всего остается в состоянии с высоким сопротивлением вплоть до $U=0$. Через некоторое время (до десятков минут) сопротивление образца восстанавливается до исходного уровня. Такие явления обычно наблюдаются при достаточно больших напряжениях (≥ 1 В).

Начальные участки ВАХ образцов как с островками, так и без них имеют особенности, формально похожие на особенности туннельных ВАХ сверхпроводящих контактов. Такие же нулевые аномалии наблюдались ранее на ВАХ контактов с островками олова в диэлектрике [7]. В наших экспериментах величина «щели» составляла десятые доли мВ для образцов

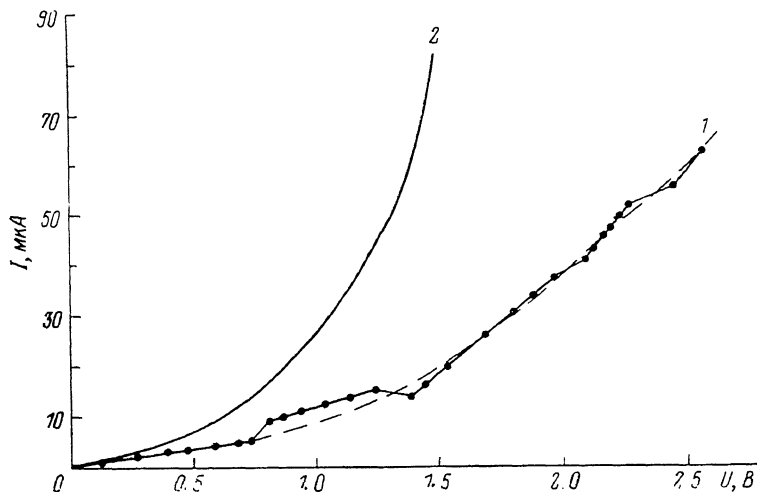


Рис. 3. ВАХ образцов без островков с толщинами изолятора 60 (1) и 80 Å (2).
Кривая 2 растянута по оси ординат в 80 раз.

с островками и единицы—десятки мВ для образцов без островковой прослойки (систематического исследования данного вопроса не проводилось).

Приведенные результаты соответствуют пленкам SiO₂, близким к стехиометрическому составу. Для нестехиометрических пленок удельное сопротивление снижается на 3—4 порядка. При использовании таких пленок в качестве прослоек ($R \sim 10^3$ — 10^4 Ом) наблюдаются скачки тока и напряжения (на величину, кратную U_0). Однако в этом случае не удастся достаточно точно установить соотношение между G и G_0 .

Если зафиксировать напряжение источника и параметры внешней цепи и наблюдать поведение тока через образец во времени (низкоомные образцы без островков Ni), то при определенных начальных напряжениях на образце, близких к величинам, кратным U_0 , через некоторое время возникают осцилляции тока, причем всплески тока сопровождаются скачками напряжения на образце на величину $(n+1/4)U_0$. После одной из наиболее сильных флуктуаций тока может произойти переход образца в состояние с другим средним уровнем сопротивления, соответствующим другому среднему значению U , кратному U_0 . Пример такого поведения показан на рис. 4. Форма и амплитуда осцилляций тока даже для одного и того же образца могут резко отличаться при различных уровнях U . В некоторых случаях проявляются отдельные всплески или группы всплесков тока. Наблюдались также медленные квазипериодические пилообразные осцилляции напряжения (при практически постоянном уровне тока) с характерными временами 10—20 мин. В состоянии осцилляций образцы

весьма чувствительны даже к относительно слабым внешним электромагнитным возмущениям, которые могут индуцировать переход в состояние с другим средним уровнем U .

Предварительные эксперименты с контактами без островковой прослойки, в которых Ni был заменен на Al и Bi, показали качественно аналогичное поведение.

Обнаруженные эффекты оказались совершенно неожиданными. Они не похожи на предсказываемые теорией [2] осцилляции сопротивления, а также на хаотические флуктуации ВАХ микромостиков [8] или на одноэлектронные осцилляции тока в туннельных контактах малых размеров [3-5]. Формально они напоминают квантовый эффект Холла, но в отличие от последнего не требуют для своего проявления низких температур и сильных магнитных полей. Для исследованных образцов получены следующие значения ν и ν^* . Образцы с островковой прослойкой: $\nu=2, 8, 16$;

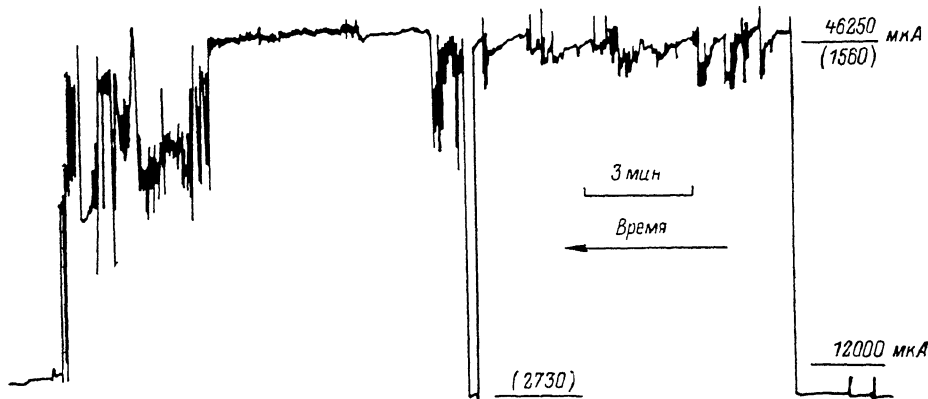


Рис. 4. Пример временных осцилляций тока через низкоомный образец. В скобках указаны средние уровни напряжения (в мВ).

$1/2, 3/2; 4/3, 8/3; 6/5, 11/5, 24/5; 2/7, 12/7; 10/9; \nu^*=5/2; 15/7, 23/7, 32/7$. Для образцов без островков: $\nu=10, 12; 1/2; 1/5, 1/6; 10/7; 4/9, 13/9; \nu^*=1; 3/2; 2/5; 3/7; 3/8; 2/9$. Заметим, что для образцов без островков встречаются значения q и q^* , равные 6 и 8. Характерно, что на ВАХ образцов могут сосуществовать участки с целыми и дробными ν (или ν^*).

По поводу полученных значений ν и ν^* следует отметить, что нами было измерено приблизительно 40 образцов с островками и 30 образцов без них. Все эти образцы проявляли сходное поведение ВАХ, и их кондактанс осциллировал вокруг целых или дробных кратных G_0 . Из их числа были отобраны образцы, имевшие линейные участки, на которых амплитуда осцилляций кондактанса не превосходила 0.3 % от среднего уровня (приблизительно по 20 образцов с островками и без них). Приведенные значения ν и ν^* соответствуют именно таким образцам. Кроме того, следует учитывать, что истинное сопротивление структуры измеряется в сумме с сопротивлением подводящих контактов, поэтому даже в случае прецизионных измерений истинное сопротивление перехода между контактами не может быть определено с точностью лучше 0.1 % (для типичного образца с сопротивлением $\sim 10^3$ Ом).

Независимость величины U_0 от материала контактов естественно наводит на мысль о возможной «универсальности» данного параметра. Разность потенциалов $U_0/4$ можно представить в виде e/r^* , где r^* — некоторая длина. Оказывается, что $1/r^*$ превосходит величину $R_\infty = me^4/4\pi\hbar^2\epsilon^2 c$ (R_∞ — постоянная Ридберга) всего на ~ 2.8 %. Если это не случайное совпадение (ошибка в измерении U_0 не превосходит 0.1 %), то величина $U_0/4$ равна $eR_\infty f$, где множитель f близок к единице. В другой записи $U_0/4 = (mc^2)(\alpha^3/4\pi\epsilon) f$ ($\alpha = e^2/\hbar c$ — постоянная тонкой структуры), по-

этому, вероятно, можно считать f функцией α . При аппроксимации $f \approx 1 + 4\alpha$ отличие $U_0/4$ от указанного произведения не более 0.1 %. Однако окончательные выводы делать рано.

По нашему мнению, обнаруженные явления вызваны сильным отклонением от равновесия и межэлектронным взаимодействием, проявляющимся по мере накопления захваченных ловушками (или островками) в барьере зарядов. Возможно, происходит некоторое пространственное упорядочение электронной плотности в области между контактами. Не исключен также механизм самосогласованного резонансного туннелирования, при котором электроны могут с заметной вероятностью находиться в диэлектрическом барьере [9] (в сильных полях в пленках SiO возможно образование мелких островков Si). Наконец, возможно возникновение системы микроканалов из металла, соединяющего два электрода (в этом случае, естественно, не должно быть особого различия в поведении систем с островковой прослойкой и без нее). Материал контактов, вероятно, не играет решающей роли (при достаточно высокой концентрации электронов). Ситуацию могут прояснить лишь эксперименты, выполненные в широком интервале температур на образцах с различными сочетаниями материалов электродов и диэлектрической прослойки. Целесообразно использовать контакты достаточно большой площади, учитывая относительно высокий уровень сопротивления образцов.

Л и т е р а т у р а

- [1] *Lambe J., Jaklevic R. C.* Phys. Rev. Lett., 1969, vol. 22, N 25, p. 1371—1374.
- [2] *Кулик И. О., Шехтер Р. И.* ЖЭТФ, 1975, т. 68, № 2, с. 623—640.
- [3] *Аверин Д. В., Лихарев К. К.* ЖЭТФ, 1986, т. 90, № 2, с. 733—744.
- [4] *Аверин Д. В.* ЖЭТФ, 1986, т. 90, № 6, с. 2226—2232.
- [5] *Кузьмин Л. С., Лихарев К. К.* Письма в ЖЭТФ, 1987, т. 45, № 8, с. 389—390.
- [6] *Лихарев К. К.* Микроэлектроника, 1987, т. 16, № 3, с. 195—209.
- [7] *Zeller H. R., Giaver I.* Phys. Rev., 1969, vol. 181, N 2, p. 789—799.
- [8] *Ларкин А. И., Хмельницкий Д. Е.* ЖЭТФ, 1986, т. 91, № 5 (11), с. 1815—1819.
- [9] *Ricco B., Azbel M. Ya.* Phys. Rev., 1984, vol. B29, N 4, p. 1970—1981.

Харьковский политехнический
институт им. В. И. Ленина
Харьков

Поступило в Редакцию
6 ноября 1987 г.
В окончательной редакции
23 февраля 1988 г.