

НАБЛЮДЕНИЕ ОДНОЭЛЕКТРОННЫХ КУЛОНОВСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ТОРЦЕВЫХ ТУННЕЛЬНЫХ ПЕРЕХОДАХ

Л.С.Кузьмин, М.В.Сафронов

На вольт-амперных характеристиках торцевых туннельных переходов субмикронной площади ($S = 0,01 \div 3 \text{ мкм}^2$) наблюдается сдвиг асимптот и периодические осцилляции, характерные для коррелированного одноэлектронного туннелирования через промежуточный электрод. Кратко обсуждены возможные механизмы подобного поведения.

Недавно развитая теория процессов в туннельных переходах малых размеров (см., например, ^{1, 10}) предсказывает целый ряд новых одноэлектронных явлений: кулоновскую блокаду туннелирования при малых напряжениях, когерентные одноэлектронные колебания, чувствительность туннельного тока к субэлектронным изменениям электрического заряда и т.п. К настоящему времени уверенное подтверждение предсказаний теории получено лишь для двойных туннельных переходов ²⁻⁴, хотя и в одиночных переходах наблюдались изменения вольт-амперной характеристики (ВАХ) типа кулоновской блокады ^{5, 6}. Целью настоящей работы явилось выяснение возможности наблюдения одноэлектронных кулоновских явлений в одиночных туннельных переходах очень малой площади.

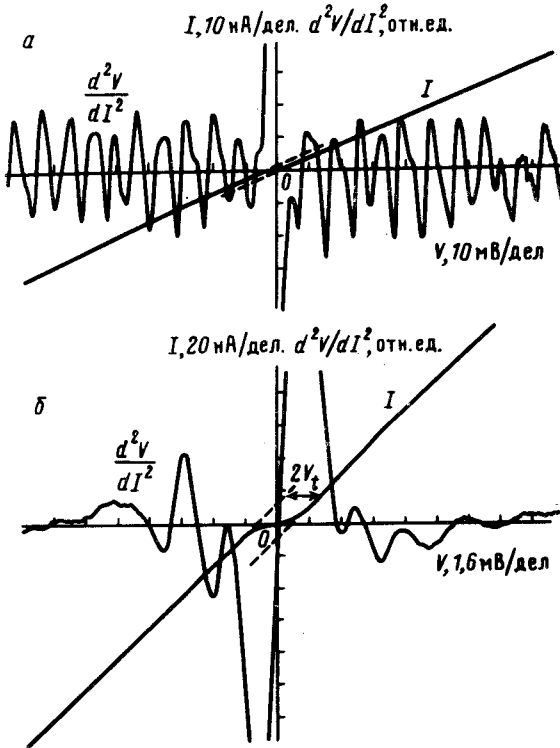


Рис. 1. ВАХ торцевых туннельных переходов Al - Al₂O₃ - PbSb площади $S = 0,06 \text{ мкм}^2$ (а) и $S = 2 \text{ мкм}^2$ (б) и их вторные производные при $T = 4,2 \text{ К}$

Для этой цели нами изготавливались торцевые туннельные переходы как "малой" ($S = 0,014 \div 0,06 \text{ мкм}^2$), так и "большой" ($S = 0,7 \div 3 \text{ мкм}^2$) площади, которая определялась произведением толщины нижнего электрода Al или NbN ($h = 7 \div 30 \text{ нм}$) на ширину верхнего электрода PbSb ($W = 2 \div 3 \text{ мкм}$ или 100 мкм). Нижний электрод формировался либо методом сухого травления в ВЧ разряде (для случая Al), либо методом взрывной литографии с окислением в ВЧ разряде (для NbN). Из сравнения режимов формирования туннельного барьера и его сопротивления с опубликованными данными ⁶ следует оценка толщины барьера $d \approx 20 \text{ \AA}$.

При гелиевых температурах ВАХ как малых (рис. 1а), так и больших (рис. 1б) переходов имели характерный сдвиг асимптот $2V_f$ величиной от единиц до десятков мВ. Кроме того, на ВАХ малых переходов часто проявлялись сильные гармонические осцилляции с шагом по напряжению ΔV порядка $5 \div 20$ мВ (рис. 1а, 2а). На больших переходах такие осцилляции наблюдались не всегда и, как правило, быстро затухали с ростом V (рис. 1б).

После воздействия на переход импульса напряжения или временного отогрева до комнатной температуры вся периодическая структура иногда сдвигалась по оси напряжений в одну сторону на малую долю периода.

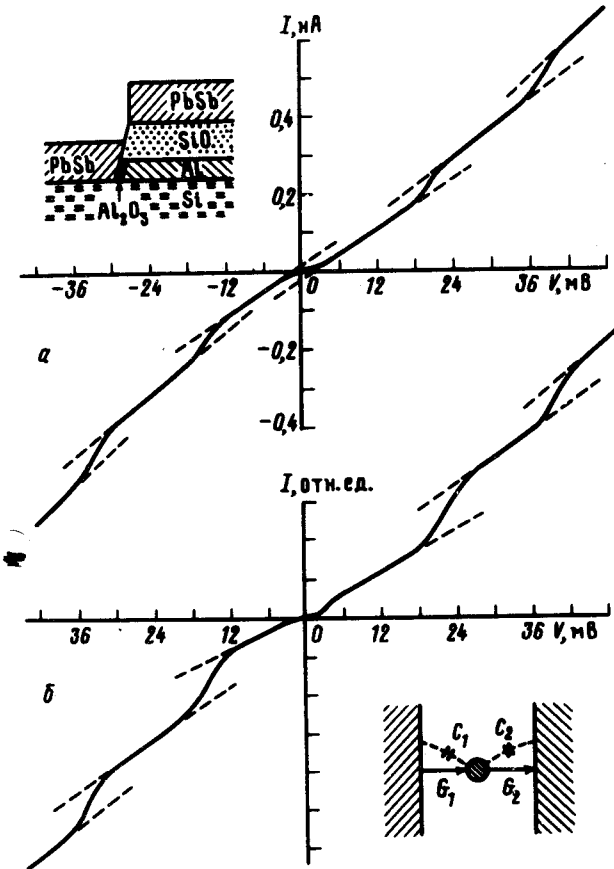


Рис. 2. ВАХ торцевого туннельного перехода $Al - Al_2O_3 - PbSb$ площади $S = 0,06 \text{ мкм}^2$ (а) и теоретическая ВАХ для модели одноэлектронного коррелированного туннелирования через двойной переход (б) с параметрами $C_1 = C_2 = 2 \cdot 10^{-17} \text{ Ф}$, $R_2 = 0,05R_1$, $T = 4,2 \text{ К}$, $Q_0 = 0,35e$

Возможно несколько объяснений перечисленных эффектов: 1) кулоновская блокада туннелирования за счет емкости самого туннельного перехода¹. Такая гипотеза⁵ однако, приводит к значительно (по крайней мере, на порядок) меньшим значениям $2V_f$, чем наблюдаемая на эксперименте. Кроме того, такая гипотеза не объясняет наблюдаемых осцилляций на ВАХ; 2) одноэлектронное коррелированное туннелирование через отдельное металлическое включение в туннельном барьере. Теоретические ВАХ, следующие из такой модели¹ (рис. 2б) довольно хорошо согласуются с экспериментальными. Наблюдавшиеся сдвиги периодической структуры также объясняются в теории малыми ($|\Delta Q| \ll e$) изменениями заряда, индуцированного на включение заряженными примесями внутри туннельного барьера за счет их диффузии. Отличие экспериментальных кривых от теоретических состоит в том, что период осцилляций, который захватывает начало координат несколько больше остальных. Кроме того, после каждого скачка происходит некоторое увеличение дифференциальной проводимости перехода (рис. 2а). Последнее отличие может быть объяснено подавлением туннельного барьера для прямого туннелирования электронов на участках, прилегающих к металлическому включению при его перезарядке. Правда, оценка размеров включения ($D \gg$

$\gg 10$ нм), следующая из оценки емкости C_1 по периоду осцилляций и табличного значения $\epsilon \approx 10$, плохо согласуется с приведенной выше оценкой толщины окисла.

Несмотря на это противоречие, другие объяснения сходных эффектов ^{7, 8} для наших переходов явно не подходят. Исходя из анализа всей совокупности результатов, можно сделать вывод, что наблюдаемые явления связаны с одной из разновидностей одноэлектронных кулоновских эффектов. Отметим, что похожий сдвиг асимптот $2V_T$ наблюдался и рядом других авторов ^{5, 6} и, возможно, также был связан с туннелированием через включения в барьере. Более того, периодические особенности на ВАХ, подобные описанным здесь, наблюдались нами ⁹ и другими авторами (см. ссылки в ⁶) в точечных контактах туннельного типа с высокотемпературными сверхпроводниками. Эти особенности в ряде случаев интерпретировались как следствие сложной щелевой структуры этих материалов. В свете представленных здесь результатов такая интерпретация представляется неадекватной.

Авторы благодарны К.К.Лихареву, Т.А.Пономаренко и Ю.В.Масленникову за помощь в работе и полезные обсуждения.

Литература

1. *Likharev K.K.* IBM J. Res. and Dev., 1988, 32, 144.
2. *Кузьмин Л.С., Лихарев К.К.* Письма в ЖЭТФ, 1987, 45, 387.
3. *Fulton T.A., Dolan G.J.* Phys. Rev. Lett., 1987, 59, 109.
4. *Ruggiero S.T., Barner J.B.* Phys. Rev. B, 1987, 36, 8870.
5. *Van Bentum P.G.M., van Kempen H., van de Leemput L.E.C., Teunissen P.A.A.* Phys. Rev. Lett., 1988, 65, 369.
6. *Barner J.B., Ruggiero S.T.* IEEE Trans. on Magn., 1988, MAG-23, 854.
7. *Янсон И.К., Веркин Б.И., Островский Л.И. и др.* Письма в ЖЭТФ, 1971, 14, 40.
8. *Hickmott J.W., Solanov P.M., Fang F.F., Stern F.* Phys. Rev. Lett., 1984, 52, 2053.
9. *Варлашкин А.В., Васильев А.Л., Иваненко О.М. и др.* Письма в ЖЭТФ, приложение, 1987, 46, 59.
10. *Аверин Д.В., Лихарев К.К.* ЖЭТФ, 1986, 90, 733.