

НЕПОСРЕДСТВЕННОЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ДИСКРЕТНОГО КОРРЕЛИРОВАННОГО ОДНОЭЛЕКТРОННОГО ТУННЕЛИРОВАНИЯ

Л.С.Кузьмин, К.К.Лихарев

Периодические осцилляции, наблюдающиеся на вольт-амперных характеристиках гранулированных туннельных переходов, хорошо описываются теорией коррелированного туннелирования одиночных электронов. Эффект может быть использован для сверхчувствительной (субэлектронной) электрометрии.

Недавнее предсказание ¹ когерентных "одноэлектронных" колебаний с частотой $f = I/e$, которые должны возбуждаться постоянным током I в туннельных переходах малой площади при низких температурах, вновь возбудило интерес к явлению, лежащему в их основе – коррелированному дискретному туннелированию одиночных электронов. Ранее это явление наблюдалось ^{2,3} лишь косвенно, по его влиянию на коллективные характеристики систем из большого числа металлических гранул. Цель настоящей работы – сообщить о непосредственном наблюдении коррелированного туннелирования в системе из двух переходов, образованных единичной металлической гранулой субмикронных размеров.

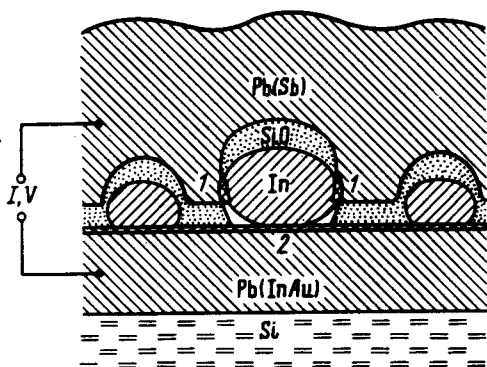


Рис. 1. Схема поперечного сечения изучавшихся структур

Рис. 2. Зависимости напряжения V и производной dV/dI от тока I или от V : *a* – эксперимент (образец M147-B). Средний наклон зависимостей $R_d(I)$ и их сдвиг при проходе в разные стороны – аппаратного происхождения; *b* – три эксперимента с тем же образцом при $T = 4,2$ К, чередующихся с циклами его отогрева до $T \approx 300$ К; *в* – теоретический расчет: 1 – $Q_0/e = 0$; 2 – 0,25; 3 – 0,5; 4 – 0,75; при $C_2/C_1 = 1$

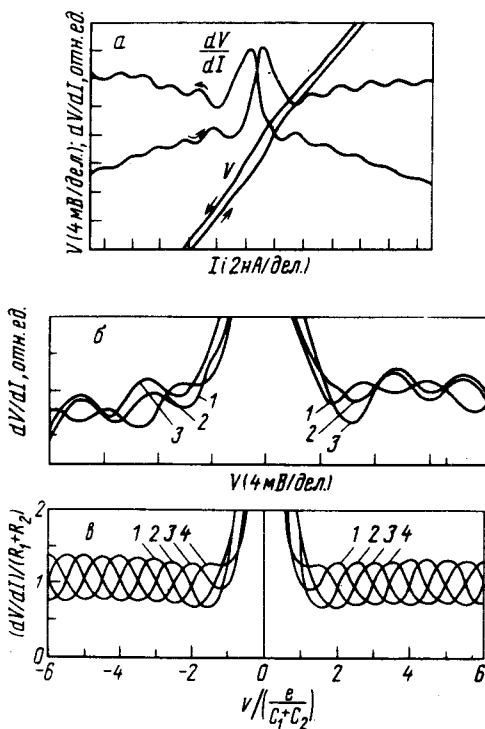


Рис. 2

Мы исследовали тонкопленочные структуры площадью 20×20 мкм² с поперечным сечением, схематически показанным на рис. 1. Гранулы In со средним диаметром порядка 100 нм формировались между двумя сплошными пленками из сплавов Pb таким образом, что от нижней пленки они были отделены туннельным барьером из In_2O_3 с удельной проводимостью около 10^6 Ом⁻¹·см⁻¹. От верхней пленки гранулы были отделены таким же барьером, и, кроме этого, изолирующим слоем SiO толщиной около 50 нм, который полностью покрывает

вал большинство гранул. Из-за этого примерно половина образцов была практически непронизывающей (сопротивление $R \gtrsim 10^7$ Ом), а остальные имели сопротивление $R \gtrsim 10^5$ Ом, соответствующее проводимости через небольшое число ($1 - 10^2$) гранул. При гелиевых температурах такие образцы показывали характерное подавление туннельного тока (т. е. максимум производной $R_d \equiv dV/dI$) в диапазоне $|V| < V_\Sigma$, ширина которого $2V_\Sigma$ была заметно больше значения $2V_g \cong \cong 2\Delta_{\text{Рb}}(T)/e$, связанного со сверхпроводимостью сплошных пленок. Кроме того, при увеличении тока зависимости $V(I)$ выходили на практически линейные асимптоты, сдвинутые как раз на величину $2V_t = 2V_\Sigma - 2V_g$ (рис. 2, а). Этот эффект, наблюдавшийся и раньше², естественно объясняется¹⁻⁵ "блокадой" туннелирования, возникающей из-за электростатических эффектов. При этом в соответствии с², у большинства образцов зависимости $I(V)$ и $R_d(V)$ были монотонными.

Однако, у небольшого числа образцов на этих зависимостях четко проявлялись большие ($\Delta R_d/R_d$ до $\pm 10\%$) осцилляции с периодом ΔV , строго постоянным для данного образца, и амплитудой, медленно спадающей с ростом V (рис. 2, а). При гелиевых температурах этот эффект был полностью воспроизводим. Однако, после отогрева образца до комнатной температуры и нового охлаждения фаза осцилляций часто сдвигалась относительно начала координат (при точном сохранении периода ΔV).

Именно такое поведение предсказывается^{4,5} теорией дискретного одноэлектронного туннелирования для случая, когда в проводимости системы доминирует туннелирование через два перехода (1 и 2 на рис. 1), соединяющих электроды через единичную гранулу. При этом каждый период осцилляций соответствует изменению среднего заряда гранулы на e , а величина периода по напряжению равна $\Delta V = e/C_1$, где C_1 — емкость перехода с наименьшей проводимостью ($G_1 \ll G_2$). При этом, согласно теории, моменты туннелирования электрона через переходы 1 и 2 являются взаимно коррелированными, хотя последовательные акты туннелирования через один из переходов могут быть и не коррелированы. На рис. 2, в показана зависимость $R_d(V)$, вычисленная по теории⁵ для экспериментальных значений параметров $C_1 = e/\Delta V = 3,17 \cdot 10^{-17}$ Ф; $T = 4,2$ К; $\Delta(T) = 1,2$ мэВ, при единственном подгоночном параметре C_2/C_1 , для ряда значений параметра Q_0 , имеющего смысл дробной части некомпенсированного электрического заряда гранулы^{4,5}. Сравнение рис. 2, б и в вряд ли оставляет место сомнениям в правильности приведенной выше интерпретации.

Более того, наши структуры дают возможность изучать субэлектронные изменения величины Q_0 , связанные, видимо, с перемещением в туннельных барьерах одиночных примесей с некомпенсированными зарядами на расстояния порядка межатомных³. Предварительные исследования показали, что при гелиевых температурах Q_0 постоянно с точностью по крайней мере не хуже $3 \cdot 10^{-2} e$ в течение десятков минут при воздействии напряжений в десятки милливольт, однако при комнатных температурах Q_0 может быстро меняться на величины порядка e под действием напряжений всего в доли милливольт. Оба эти результата весьма благоприятны для возможных практических приложений данного эффекта⁵.

Авторы благодарны А.Г.Одинцову за помощь в изготовлении образцов.

Литература

1. Аверин А.В., Лухарев К.К. ЖЭТФ, 1986, 90, 733.
2. Zeller H.R., Giaever I. Phys. Rev., 1969, 181, 789.
3. Lambe J., Jaklevic R.C. Phys. Rev. Lett., 1969, 22, 1371.
4. Кулик И.О., Шехтер Р.И. ЖЭТФ, 1975, 68, 623.
5. Лухарев К.К. Препринт № 2/1986, Физический фак-т МГУ.