

## ОДНОЭЛЕКТРОННОЕ ТУННЕЛИРОВАНИЕ ЧЕРЕЗ КЛАСТЕРНУЮ МОЛЕКУЛУ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

А.А.Зубилов, С.П.Губин, А.Н.Коротков, А.Г.Николаев,  
Е.С.Солдатов, В.В.Ханин, Г.Б.Хомутсов, С.А.Яковенко

В настоящее время общеизвестно, что влияние заряда одиночных электронов приводит к корреляциям туннельных событий в туннельных структурах субмикронных размеров, в частности, в системе двух последовательно соединенных туннельных переходов ("одноэлектронный транзистор") [1]. Эти корреляции приводят к тому, что проводимость двойного перехода существенно подавлена в области малых напряжений ("кулоновская блокада"), а вольт-амперная характеристика (ВАХ) имеет периодические особенности ("кулоновская лестница"). В экспериментальных исследованиях этой структуры используют ее реализации с помощью узких металлических пленок, квантовых точек в полупроводниковых гетероструктурах. Однако наблюдение эффекта возможно лишь при весьма низких температурах ( $k_B T \ll e^2/C$ , где  $C$  — емкость туннельного перехода) 100 мК [1].

В то же время реализация этих структур с помощью скавирующего туннельного микроскопа (СТМ), где изучается туннелирование в системе "подложка — металлическая графитовая игла СТМ", дает возможность использования относительно высоких для одноэлектронной температур (выше 4.2 К), а уменьшение размера гранулы (в пределе — переход к кластеру атомов) увеличивает допустимую температуру [2,3] и позволяет надеяться на применение в молекулярной электронике.

В данной работе с помощью СТМ исследуется туннелирование электронов через одиночные карборановые кластерные молекулы, встроенные в молекулярные пленки стеариновой кислоты при температурах 77 и 300 К.

Исследуемые образцы представляют собой молекулярные слои стеариновой кислоты с инкорпорированными в них металлосодержащими карборановыми кластерами  $1.7-(\text{CH}_3)_2-1.2-\text{C}_2\text{B}_{10}\text{H}_9\text{Tl}(\text{OSOCF}_3)_2$  (размером порядка 10Å), нанесенные на свежие сколы подложек из высокоориентированного пиролитического графита методом Шеффе-

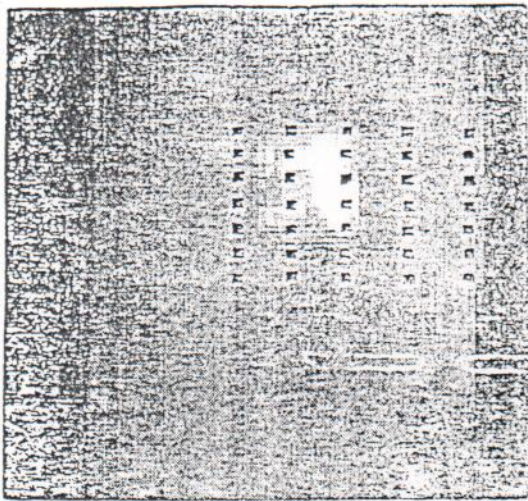


Рис. 1. Фрагмент СТМ изображения кластера (вид сверху). Точки показаны места съема ВАХ.

ра [4,5]. После получения изображения поверхности образца с помощью СТМ в режиме заданного тока (ток 500 пА при напряжении 500 мВ, воспроизводимость изображений была хорошей) и выбора участка с одиночным кластером в нескольких точках в окрестности кластера (рис. 1) снималась серия ВАХ.

ВАХ, снятые в различных точках плоского участка поверхности стеариновой кислоты (далеко от кластера) (кривая 1 на рис. 2, а), не имеют существенных особенностей.

ВАХ, снятые в области кластера, существенно отличаются от ВАХ на плоском участке. На большинстве таких ВАХ наблюдается отчетливый блокадный участок в окрестности начала координат, на котором проводимость сильно (до 10 раз и более) подавлена (кривые 2 и 3 на рис. 2, 1 и 2 на рис. 2, б). Кроме этого, на большинстве ВАХ кластеров присутствуют четко выраженные особенности, в частности — ступеньки длиной порядка сотни милливольт (кривая 2 на рис. 2, а; кривые 1, 2 на рис. 2, б), а также изломы ВАХ (кривая 3, на рис. 2, а). При этом в большинстве случаев положение ступенек характеризуется значениями напряжений

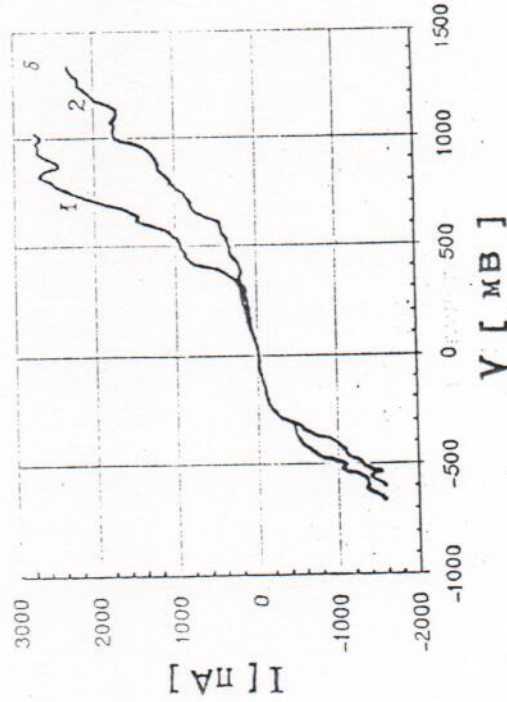
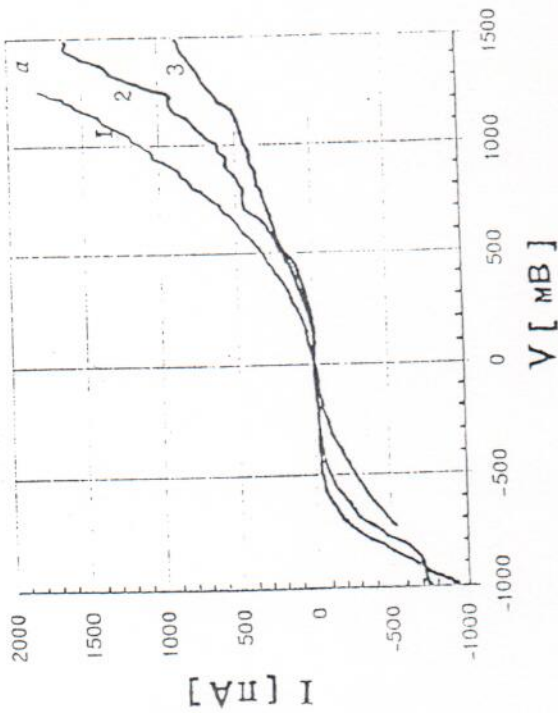


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики системы "острие СТМ — монослой — подложка"; а — снятые при  $T = 77$  К; 1 — ВАХ монослоя чистой стеариновой кислоты без кластеров; 2, 3 — ВАХ системы при расположении острей СТМ над кластером; б — снятые при  $T = 300$  К на двух разных образцах (острие над кластером).

около 0.5, 0.8 и 1.1 В, а положение углов ломаной по напря-

женио примерно совпадает с положением одной из ступеней. Общей чертой подавляющего большинства ВАХ является несимметрия при изменении полярности напряжения и увеличение проводимости при возрастании напряжения.

В основном ВАХ измерялись при комнатной температуре. Измерения при  $T = 77$  К качественно дают те же результаты, однако особенности на ВАХ кластеров (особенно блокада) при этом выражены значительно четче (ср. рис. 2, 3 на рис. 2, а (77 К) и кривые 1, 2 на рис. 2, б (300 К)).

Воспользуемся "ортодоксальной" теорией [1] двойного туннельного перехода для объяснения особенностей ВАХ. Разумеется, она лишь частично справедлива для случая кластера, в частности, кулоновская лестница не должна быть строго периодической, а также существует эффект подавления туннельных барьеров полем [7].

Оценка "емкости" кластера как шара с радиусом 10 А в среде с  $\epsilon \sim 3$  дает величину  $C \sim 3 \cdot 10^{-19}$  Ф. При этом даже для комнатной температуры параметр  $kBT/(\epsilon^2/2C)$  порядка 0.1, что достаточно для реализации коррелированного (одноэлектронного) туннелирования [1].

Оценка величины участка кулоновской блокады  $\epsilon/C$  дает значение порядка 0.5 В, что согласуется с экспериментальными результатами (рис. 2). Наличие ступеней на ВАХ также свидетельствует в пользу одноэлектронной зарядовой природы наблюдаемых эффектов. При этом ломаная структура ВАХ может быть одной из форм кулоновской лестницы (на это указывает близость характерных напряжений особенностей ступенчатых и ломаных ВАХ).

Компьютерное моделирование с помощью "ортодоксальной" теории с учетом подавления барьеров [1] при использовании приведенных выше оценок параметров системы дает ВАХ, близкие по форме к экспериментальным, что позволяет объяснить наблюдаемую несимметрию ВАХ сильным подавлением туннельного барьера электрическим полем.

Таким образом, с помощью СТМ при температурах 300 и 77 К экспериментально исследовано туннелирование электронов перепек мономолекулярного слоя стеаринового электролита с включенными в него карборановыми кластерами и обнаружены особенности на ВАХ, которые согласуются с выводами существующей теории одноэлектронного туннелирования. Тем самым получено экспериментальное свидетельство устойчивой, воспроизводимой реализации одноэлектронного режима туннелирования при комнатной температуре в искусственно созданной стабильной молекулярной структуре, что может служить основой работ по созданию молекулярных электронных схем, основанных на одноэлектронном туннелировании [8].

#### Список литературы

- [1] Averin D.V., Likharev K.K. In: Mesoscopic Phenomena in Solids / Ed. by B. Altshuler et al. Elsevier, 1991. P. 173-271.
- [2] Neoph H., Aono M. // Jap. J. Appl. Phys. 1993. V. 32. P. 532-535.
- [3] Schonberger C., van Houten H., Donkersloot H.C. // Europhys. Lett. 192. V. 20. P. 249-251.
- [4] Langmuir L., Shaefer V.J. // J. Amer. Chem. Soc. 1938. V. 60. P. 1351-1359.
- [5] Чесляк О.В., Николаев Е.Н. // ПТЭ. 1991. В. 4. С. 19-29.
- [6] Губин С.П. Химия кластеров. М.: Наука, 1987. 263 с.
- [7] Korotkov A.N., Nazarov Yu.V. // Physica B. 1991. V. 173. P. 217-222.
- [8] Лихарев К.К. // Микроэлектроника. 1987. Т. 16. В. 3. С. 195-209.

Поступило в Редакцию  
6 января 1994 г.