

06.1;11

©1994

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.Хомутов, 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 сканирующего туннельного микроскопа (СТМ), где изучается туннелирование в системе “подложка — металлическая гранула — игла СТМ”, дает возможность использования относительно высоких для одноэлектроники 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 мономолекулярные пленки стеариновой кислоты при температурах 77 и 300 К.

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

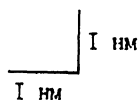
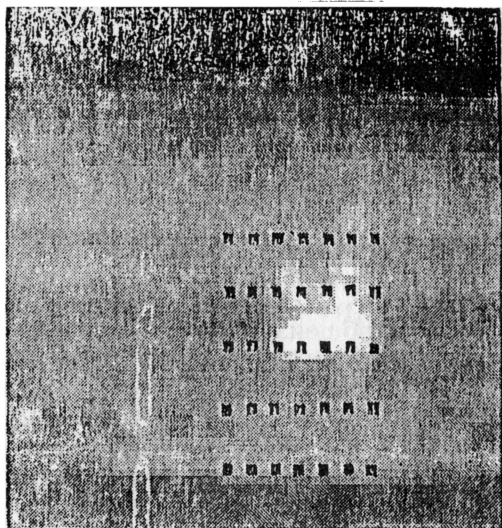


Рис. 1. Фрагмент СТМ изображения кластера (вид сверху). Точками показаны места съема ВАХ.

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 напряжения

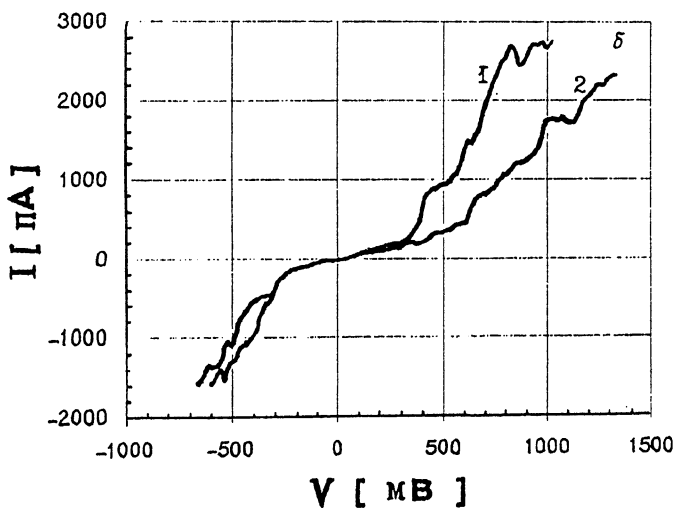
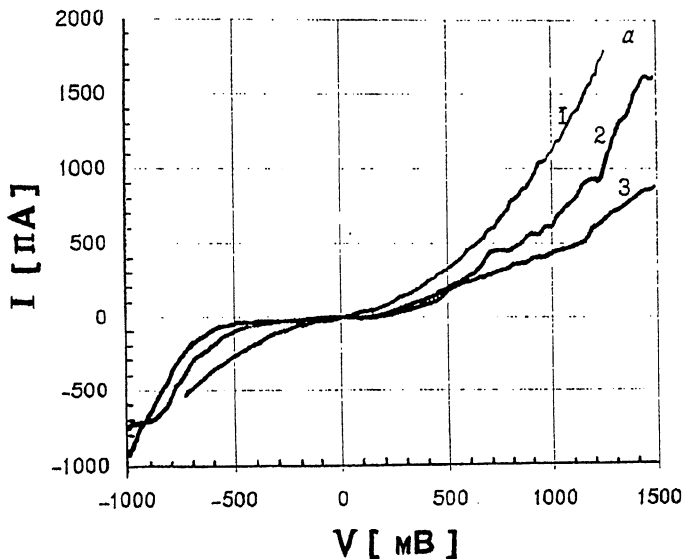


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики системы “острие СТМ — монослой — подложка”;

a — снятые при $T = 77$ К; 1 — ВАХ монослой чистой стеариновой кислоты без кластеров; 2, 3 — ВАХ системы при расположении острия 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-

жению 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. кривые 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 существенен 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 $k_B T / (e^2 / 2C)$ порядка 0.1 , что достаточно для реализации коррелированного (одноэлектронного) туннелирования [1].

Оценка величины участка кулоновской блокады e/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 [7] 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 пеперек мономолекулярного слоя стеариновой кислоты 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] *Nejoh H., Aono M.* // *Jap. J. Appl. Phys.* 1993. V. 32. P. 532-535.
- [3] *Schonenberger 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] *Чечель 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] *Лизарев К.К.* // *Микроэлектроника.* 1987. Т. 16. В. 3. С. 195-209.

Поступило в Редакцию
6 января 1994 г.
