

## ОДНОЭЛЕКТРОННЫЙ ТРАНЗИСТОР НА ОСНОВЕ ОДИНОЧНОЙ КЛАСТЕРНОЙ МОЛЕКУЛЫ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

*Е.С.Солдатов<sup>1)</sup>, В.В.Ханин, А.С.Трифонов, С.П.Губин\*, В.В.Колесов<sup>+</sup>,  
Д.Е.Преснов, С.А.Яковенко, Г.Б.Хомутов*

*Физический факультет Московского государственного университета  
119899 Москва, Россия*

*\*Институт общей неорганической химии им. Н.С.Курнакова РАН  
117907 Москва, Россия*

*+Институт радиоэлектроники РАН  
103907 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 18 сентября 1996 г.

Реализован молекулярный одноэлектронный транзистор при комнатной температуре на основе стабильной лангмюровской мономолекулярной пленки из смеси стеариновой кислоты и карборановых кластеров. Зарегистрирован при комнатной температуре эффект управления туннельным током при помощи независимого источника напряжения, проведено сравнение результатов с "ортодоксальной" теорией одноэлектроники.

PACS: 73.23.Nk

Одним из чрезвычайно интересных явлений как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения является коррелированное туннелирование электронов в туннельных системах с малой емкостью (т.н. одноэлектроника). К настоящему времени этот эффект детально изучен в пленочных нанопереходах с размерами около 0.1 мкм и емкостью около 0.1 фемтофарады. В них убедительно подтверждена теория одноэлектроники [1], зарегистрирован ряд интереснейших фундаментальных явлений [2], продемонстрированы уникальные прикладные возможности одноэлектронных систем [3]. Сейчас ведутся исследования по созданию квантового стандарта тока [4]. Однако, существенным препятствием для изучения, а тем более – для многообещающих применений этого эффекта (см., например, [5]) является необходимость работать при сверхнизких температурах  $\sim 100$  мК даже при рекордно малых размерах пленочных структур.

В то же время уменьшение размеров перехода (и, соответственно, емкости) примерно пропорционально повышает верхнюю границу температурной области наблюдаемости эффекта [1]. Если размеры перехода уменьшить до  $\sim 1$  нм, то есть до размеров средней молекулы, то основные проявления этого эффекта можно наблюдать даже при комнатной температуре [6]. В течение последних лет такие наблюдения были сделаны в нескольких группах. Однако, при этом туннельные системы представляли собой простые двухпереходные структуры без управления, которые формировались либо из хаотически разбросанных слабо закрепленных молекул [6,7], либо из случайных наногранул металла [7], что обуславливает невозпроизводимость характеристик таких систем. Для достижения стабильности и воспроизводимости молекулярных систем нами ранее

<sup>1)</sup>e-mail: esold@eryo.phys.msu.su.

[8] была реализована методика фиксации подходящих молекул в диэлектрической матрице на подложке, что позволило устранить невоспроизводимость характеристик.

В настоящей работе мы сообщаем о создании стабильной молекулярной транзисторной (трехэлектродной) одноэлектронной системы и регистрации в ней при комнатной температуре эффекта управления туннельным током при помощи независимого источника напряжения, то есть о демонстрации одноэлектронного молекулярного транзистора при комнатной температуре.

В качестве основы молекулярной туннельной системы были использованы молекулы из семейства металлоорганических кластеров [8–10]. Перспективность их для создания молекулярных одноэлектронных систем обусловлена тем, что такая молекула фактически представляет собой готовую "элементарную ячейку" туннельной системы (электронный резервуар + туннельная оболочка) с фиксированными параметрами и ее использование существенно упрощает решение известной проблемы обеспечения малого разброса параметров в множественных системах переходов. Для создания матрицы была использована методика Ленгмюра–Блоджетт [11], которая позволяет контролируемо создавать регулярные мономолекулярные слои из смеси разных молекул, обеспечивая при этом их прочное закрепление на подложке.

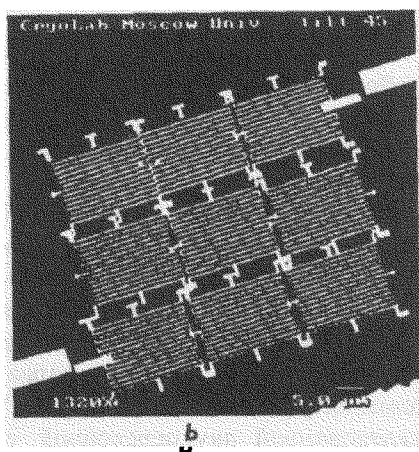
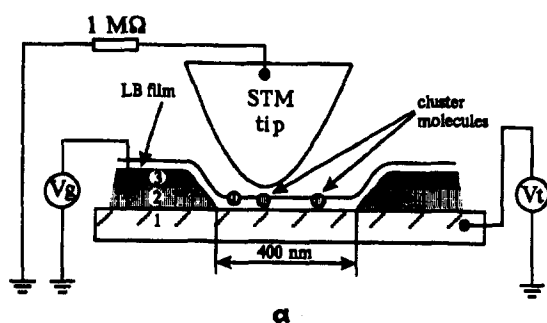


Рис.1. а – Схематическое изображение изучаемого одноэлектронного транзистора; 1 – подложка из высокоориентированного пиролитического графита, 2 – слой изолятора  $\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной 50 нм, 3 – пленка электрода управления из золота толщиной 50 нм. б – Изображение управляющего электрода в растровом электронном микроскопе

Строение образцов схематически показано на рис.1а. На атомарно гладкую поверхность пиролитического графита с предварительно сформированным управляющим электродом методом Шефера [11] осаждалась смешанная пленка стеариновой кислоты с включенными в нее наиболее устойчивыми металлоорганическими кластерами-карборановыми ( $1, 7-(\text{CH}_3)_2-1, 2-\text{C}_2\text{V}_{10}\text{H}_9\text{Ti}(\text{OCOCF}_3)_2$ ), имеющими размер 2 нм [8]. Электрод в виде "змейки" из тонких двуслойных (50 нм Au на 50 нм  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) полосок шириной  $\sim 400$  нм при таком же расстоянии между ними (рис.1б) формировался методами электронной нанолитографии. Исследование характеристик объектов размером порядка нанометра возможно

лишь при помощи сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) [12]. Используемый нами СТМ Nanoscope позволял изучать топографию объекта и электрически воздействовать на объект с разрешением порядка 1Å. Если расположить иглу СТМ над кластером, то при этом образуется трехэлектродная (транзисторная) система, в которой электрическое поле управляющего электрода может влиять на ток через туннельную систему "игла СТМ – молекула кластера – подложка" (рис.1а).

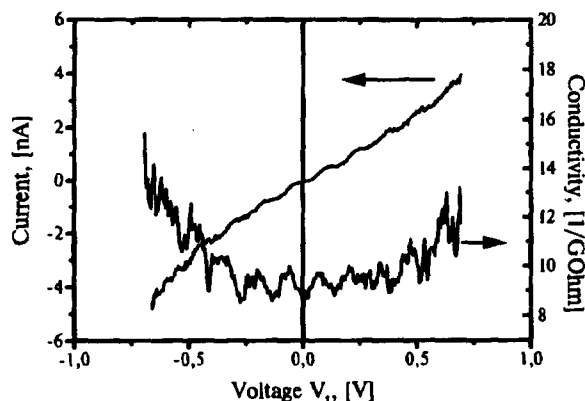


Рис.2. Вольт-амперная характеристика и зависимость проводимости от туннельного напряжения одноэлектронного молекулярного транзистора при фиксированном (нулевом) напряжении управления  $V_g$

Все измерения проводились при комнатной температуре. Снятие СТМ – изображений поверхности образца показало, что они полностью воспроизводимы, то есть кластеры действительно жестко закрепляются на подложке в матрице стеариновой кислоты. При исследовании электронного транспорта сначала снимались серии ВАХ в разных участках подложки, в том числе для сравнения – и над ровными (без кластеров) участками поверхности. При расположении иглы над кластером были зарегистрированы "ступенчатые" ВАХ (рис.2), а на ровных участках – гладкие, без особенностей (см. также [8]). Ступеньки на ветвях ВАХ оказались эквидистантными по току и по напряжению, что совпадает с предсказаниями теории (так называемая "кулоновская лестница") [1] и является характерной деталью ВАХ резко несимметричного одноэлектронного транзистора. Такой вид ВАХ указывает на реализацию в исследованной двухпереходной туннельной структуре "игла-молекула кластера-подложка" режима коррелированного туннелирования электронов.

После съема ВАХ снимались серии сигнальных характеристик, то есть зависимостей туннельного тока двухпереходной структуры от напряжения на управляющем электроде в фиксированной рабочей точке ВАХ. Они показали, что при монотонном изменении управляющего напряжения на электроде ток через изучаемую молекулярную транзисторную структуру изменяется, причем не монотонно, а периодически с периодом  $(700 \pm 50)$  мВ (рис.3а). Такое поведение, согласно теории [1], характерно для одноэлектронного транзистора, причем период соответствует изменению эффективного заряда кластера на один заряд электрона. Сигнальные характеристики, снятые для контроля на участках без кластера, показывали отсутствие какого-либо влияния управляющего напряжения на туннельный ток (рис.3б).

Оценка электрометрической чувствительности системы из максимальной крутизны сигнальной характеристики и реально наблюдаемого шума с ам-

плитудой  $\sim 150$  пА, обусловленного, в основном, механическими вибрациями в СТМ, составляет  $7 \cdot 10^{-4} e/\sqrt{Hz}$ , что близко к типичным значениям для традиционных тонкопленочных одноэлектронных систем [3].

Используя измеренные значения величины участка кулоновской блокады, размера "ступенек", и максимальной крутизны сигнальной характеристики, разными способами по теории одноэлектроники [1] были рассчитаны емкости переходов транзистора, которые оказались равными  $C_1 \approx C_2 \approx 10^{-18}$  Ф, что согласуется с оценкой на основе измеренных размеров кластерной молекулы (см. также [8]). Значение емкости "затвора"  $C_g$  ("молекула-электрод управления"), полученное из периода сигнальной характеристики, оказалось меньше емкости перехода  $C_g \approx 2 \cdot 10^{-19}$  Ф. Такое соотношение между ними качественно согласуется с реальной геометрией туннельной системы. Изменение амплитуды сигнальной характеристики от положения рабочей точки также оказалось в качественном согласии с теорией одноэлектроники [1].

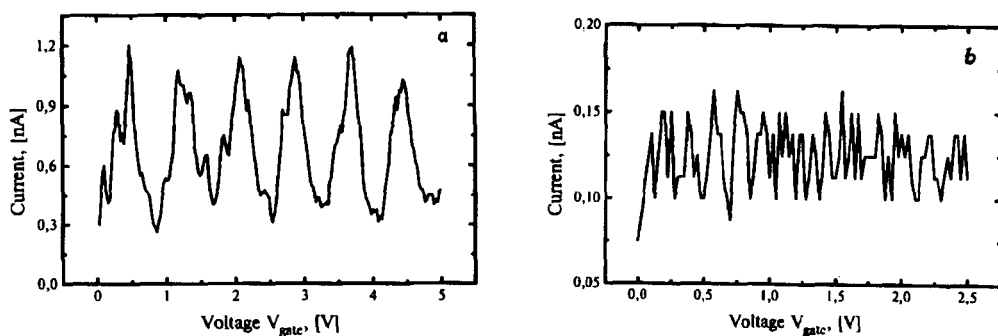


Рис.3. Сигнальные характеристики системы: а – при расположении иглы СТМ над кластером (молекулярный транзистор); б – при расположении иглы СТМ над ровным (без кластера) участком пленки

Согласие наших экспериментальных данных для системы с центральным электродом в виде одиночной кластерной молекулы и "ортодоксальной" теорией [1], написанной для металлических электродов, свидетельствует, очевидно, о том, что поведение электронов при транспорте через кластер в сильной степени аналогично поведению электрона в наночастице металла. Это может быть вызвано тем, что кластер имеет спектр электронных состояний, в миниатюре похожий на спектр металла [13], особенно при высоких температурах, когда тепловое размытие уровней велико, и поэтому при малых токах кластер ведет себя подобно грануле металла. Это объясняет пригодность полуклассической теории [1] для описания коррелированного туннелирования электронов через такие сугубо квантовые объекты, как одиночные молекулы кластеров.

Итак, нами впервые реализован молекулярный одноэлектронный транзистор при комнатной температуре. Это экспериментально подтверждает реальность построения одноэлектронных схем молекулярной электроники а также, учитывая возможности создания регулярных кластерных структур [9, 10], показывает конкретный путь формирования таких схем.

Данная работа была частично поддержана ГНТП "Перспективные технологии и устройства микро- и нанoeлектроники" (проект 5-029/26/1-3), МНТП

"Физика твердотельных наноструктур" (проект 1-091/4) и Российским фондом фундаментальных исследований (проект 96-03-33766а).

1. D.V.Averin, K.K.Likharev, in: *Mesoscopic Phenomena in Solids*, Ed. by B.L.Altshuler, P.A.Lee, R.A.Webb (Elsevier, 1991) p.173.
2. M.Tinkham, *Physica B*, **204**, 176 (1995).
3. D.Esteve, in: *Single Charge Tunneling*, Ed. by H.Grabert and M.H.Devoret, (Plenum Press, New York, 1992) p.109.
4. J.M.Martinis, M.Nahum, and H.D.Jensen, *Phys. Rev. Lett.* **72**, 904 (1994).
5. D.V.Averin and K.K.Likharev, in: *Single Charge Tunneling* Ed. by H.Grabert and M.H.Devoret (Plenum, New York, 1992), p.311.
6. H.Nejoh, *Nature* **353**, 640 (1991).
7. C.Schonenberger, K. van Houten and H.C.Donkersloot, *Europhys. Lett.* **20**, 249 (1992).
8. А.А.Зубилов, С.П.Губин, Е.С.Солдатов и др. Письма в ЖТФ **20**, 41 (1994).
9. S.A.Iakovenko, A.S.Trifonov, E.S.Soldatov et al., *Thin Solid Films*, to be published.
10. С.А.Яковенко, С.П.Губин, Е.С.Солдатов и др., Неорг. материалы, в печати.
11. G.L.Gaines, *Insoluble Monolayers at Liquid-Gas Interfaces*. N.Y.: Wiley-Interscience Publ., 1966.
12. В.С.Эдельман, ПТЭ 1989, №5, с.25.
13. С.П.Губин, "Химия кластеров", Наука 1987, с.53.