

06

Модуляция проводимости квазиодномерных молекулярных микропроводников

© И.И. Бобринецкий, В.К. Неволин, С.В. Хартов, Ю.А. Чаплыгин

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)
E-mail: vkn@miee.ru

Поступило в Редакцию 7 июня 2005 г.

Созданы и исследованы планарные молекулярные проводники между двумя углеродными нанотрубками в полимерной матрице. Показано, что проводимость токового канала модулируется поперечным электрическим полем. С помощью резкого изменения поперечного электрического поля возможно выключение молекулярного канала проводимости с последующим включением полем по токовому каналу. Для объяснения наблюдаемых свойств необходимо обращение к микромеханике молекул во внешних электрических полях.

Создание и исследование квазиодномерных проводников (квантовых проволок) привлекает внимание тем, что на их основе возможен существенный прогресс в создании функциональных элементов наноэлектроники [1] и новых наноразмерных чувствительных элементов различных физико-химических полей [2]. Одним из перспективных направлений является использование в качестве квазиодномерных проводников отдельных полимерных молекул, в том числе углеродных нанотрубок [3].

Нами ранее в туннельном микроскопе были созданы двухэлектродные элементы с квазиодномерными полимерными микропроводниками вертикального типа, обладающие уникальными свойствами [4]. Эти проводники проявляли спонтанное квантование проводимости при комнатных температурах. При этом квант сопротивления, определяемый в эксперименте, отличался от теоретического не более чем на 20%. Через полимерный микропроводник можно было пропускать токи до 200 мА, поскольку имел место баллистический транспорт носителей тока. Это

были, по-видимому, первые изделия, созданные методами зондовой нанотехнологии.

Для создания квазиодномерных молекулярных каналов проводимости за счет диполь-дипольного взаимодействия молекул во внешнем электрическом поле необходимо выполнение нескольких условий. Энергия диполь-дипольного взаимодействия должна превышать тепловую энергию „разваливания“ проводящего канала. Иначе говоря, существует критическое поле формирования. Далее необходима „канальная“ организация электрического поля, такая, чтобы на оси канала продольное поле было максимальным и быстро спадало по радиусу. Необходимо, чтобы по возможности линейные макромолекулы имели на концах активные образования для „самосборки“ в длинные каналы проводимости. Такие условия были созданы между плоской поверхностью металлической подложки и вольфрамовым зондом с радиусом закругления менее 20 nm. Отвод туннельного зонда от подложки позволял наращивать молекулярный проводник вертикального типа [5].

Для формирования планарного молекулярного проводника в качестве электродов, обеспечивающих выполнение вышеуказанных условий, использовались многостенные углеродные нанотрубки (или их пучки), которые располагались между проводящими дорожками и подвергались механическому либо электрическому разрезанию зондом атомно-силового микроскопа (рис. 1). Величины зазоров изменялись от 20 до 500 nm. В таких зазорах легко организовывалось электрическое поле „канального“ типа. Далее наносилась микрокапля эпоксидной диановой смолы ЭД-20. Этот жидкий диэлектрик отличается большой вязкостью, наличием достаточно линейных удлиненных молекул (молекулярная масса $M = 400 \dots 900$) с двумя бензольными кольцами на мономер, и остаточным объемным сопротивлением $10^{10} \Omega \cdot \text{см}$. При подаче разности потенциалов между углеродными нанотрубками до 10 V возникал электрический ток — в межэлектродном зазоре образовывался молекулярный канал проводимости. В силу планарности канала, составляющие его макромолекулы подвергаются ориентирующему влиянию поверхности подложки, что обуславливает сохранение стабильности созданного молекулярного канала в условиях отсутствия напряжения сток-исток. Поскольку диаметр нанотрубных электродов порядка 10 nm, а прикладываемые напряжения составляют единицы вольт, то на концах этих электродов концентрируются электрические поля порядка $10^8 \dots 10^9 \text{ V/m}$, достаточные для автоэлектронной эмис-

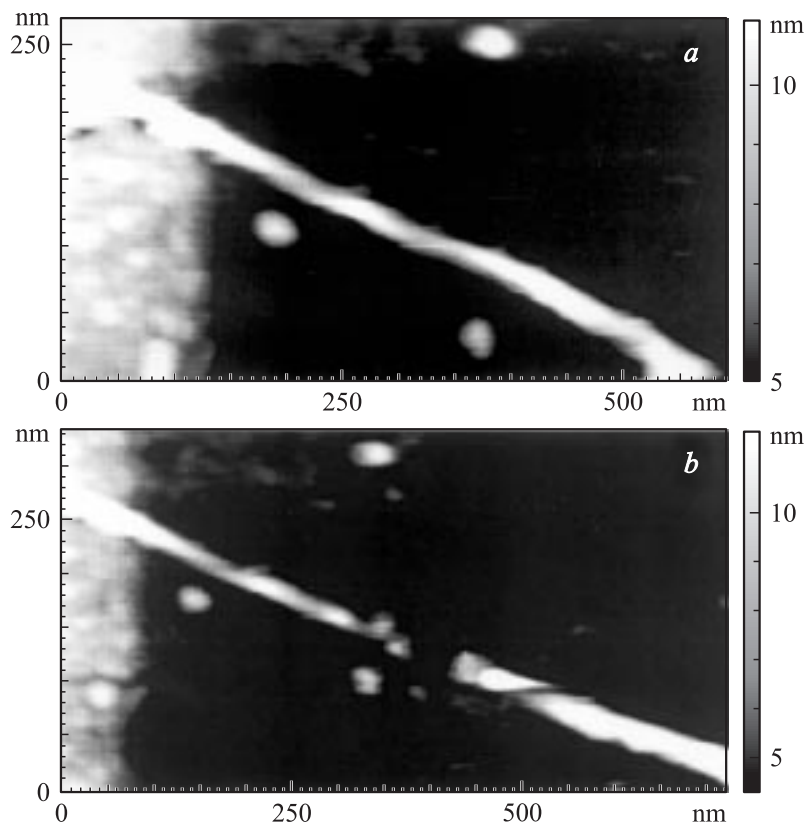


Рис. 1. АСМ изображения многостенной углеродной нанотрубки до (а) и после (b) операции разрезания (слева видна одна из проводящих дорожек).

сии с большими плотностями токов. При энергии эмитируемых электронов, превышающей 5 eV, возможен разрыв связей молекул эпоксидной смолы с образованием их фрагментов. Таким образом, нельзя исключать участие в молекулярном канале фрагментов молекул эпоксидной смолы, а также присутствующих остаточных примесей.

Проводимостью сформированного канала можно было управлять с помощью третьего электрода, расположенного под слоем оксида

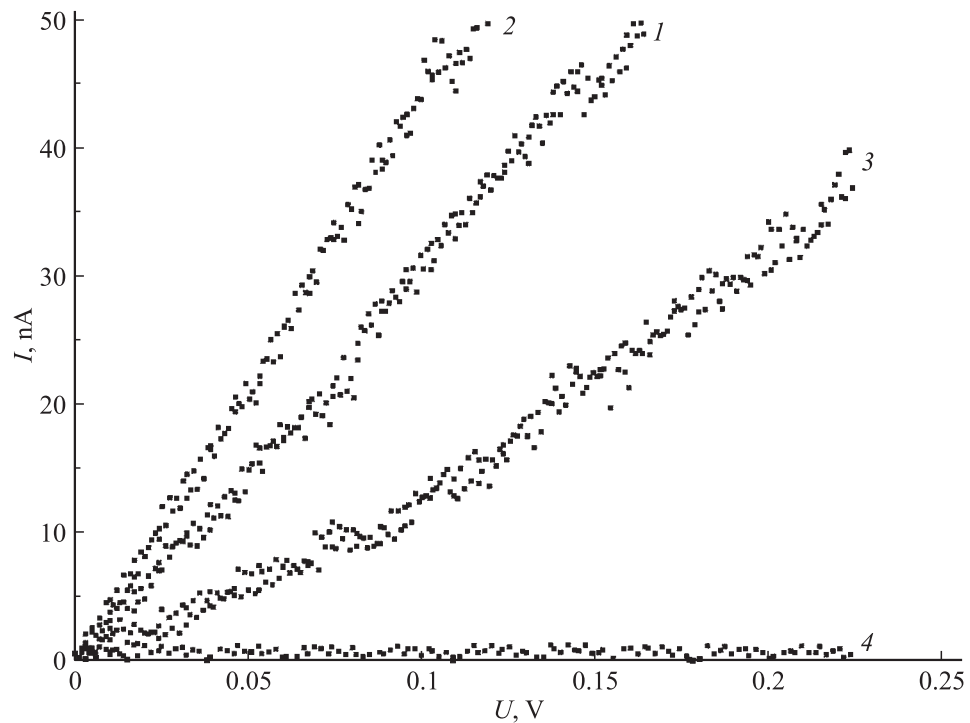


Рис. 2. ВАХ цепи с молекулярным проводником при различных напряжениях затвора: 1 — $U_g = 0$ V; 2 — $U_g = -20$ V; 3 — $U_g = 20$ V. Кривая 4 соответствует молекулярному проводнику в „выключенном“ состоянии, вызванном резким изменением поперечного электрического поля.

кремния на подложке. На рис. 2 приведены статические вольт-амперные характеристики участка цепи, содержащего проводящие дорожки, многостенные нанотрубки и молекулярный канал. Значительный вклад в сопротивление цепи вносят области контакта нанотрубок с дорожками. Можно видеть, что проводимость молекулярного канала модулируется управляющим полем и экспериментальное устройство проявляет свойства полевого транзистора (необходимо отметить, что многостенные углеродные нанотрубки, играющие роль электродов, сами по себе не проявляли сколько-нибудь заметной управляемости). При резком изменении управляющего поля (переключении напряжения затвора с -20 на $+20$ V, со временем переходного процесса порядка 0.1 ms) проводимость канала исчезала. Для восстановления проводимости канала необходимо было вновь подать напряжение сток-исток около 10 V. В этих режимах экспериментальное устройство проявляло свойства энергонезависимой ячейки памяти.

Наблюдаемые экспериментальные результаты, по-видимому, можно объяснить микромеханикой молекул во внешних электрических полях. В то время как продольное электрическое поле сток-исток ориентирует макромолекулы в линейные молекулярные мостики (о достаточной степени линейности последних свидетельствует выполнение условий баллистического транспорта в аналогичной вертикальной структуре [4]), поперечное поле затвора должно вызывать частичную переориентацию молекул. Однако вопрос конкретного механизма модуляции проводимости молекулярного канала остается открытым.

Список литературы

- [1] Неволин В.К. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 21. С. 57–60.
- [2] Snow E.S., Perkins F.K., Houser E.J. et al. // Science. 2005. V. 307. N 5717. P. 1942–1945.
- [3] Tsukagoshi K., Yagi I., Aoyagi Y. // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 85. N 6. P. 1021–1023.
- [4] Неволин В.К., Бессольцев В.А. // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 1989. № 3. С. 58–61.
- [5] Неволин В.К., Бессольцев В.А. Патент РФ № 4905010 с приоритетом от 24.01.1991 г.