

Молекулярная электроника на нанотрубках

Одним из наиболее привлекательных направлений использования нанотрубок является наноэлектроника. Благодаря малым размерам, разнообразным электрическим, оптическим и магнитным свойствам, механической прочности и химической стабильности нанотрубки являются уникальным материалом для производства рабочих элементов электронных устройств. Рассмотрим, как работает нанотрубка в нанодиоде и нанотранзисторе.

Нанодиод

Цилиндрические неизогнутые нанотрубки образуются из повторяющихся углеродных шестиугольников. Если два углеродных шестиугольника заменить пятиугольником и семиугольником, как показано на рис. 1, нанотрубка изогнется. С разных сторон относительно изгиба ориентация углеродных шестиугольников оказывается различной. Но с изменением ориентации шестиугольников по отношению к оси нанотрубки меняются ее электрические свойства. Как показывают квантовомеханические расчеты и эксперимент, для приведенного на рис. 1 случая, слева относительно изгиба нанотрубка должна быть металлической, а справа - полупроводниковой. Таким образом, эта изогнутая нанотрубка должна представлять собой, так называемый, гетеропереход металл-полупроводник молекулярного размера. Если рассматривать данные куски нанотрубки изолированно, с разных сторон относительно изгиба электроны обладают разной энергией. На стыке из-за нарушения регулярного повторяющегося чередования химических связей возникает барьер для движения электронов.

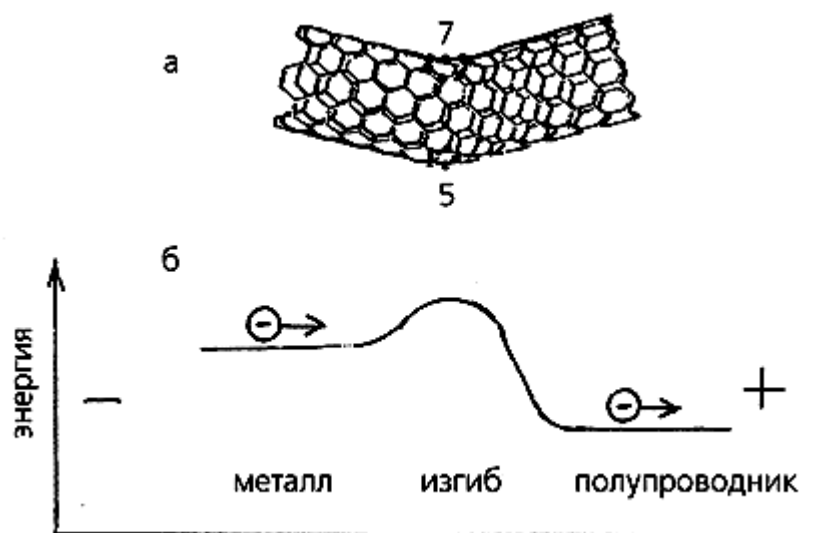


Рис. 1. Влияние дефекта семиугольник-пятиугольник на геометрию нанотрубки (а) и энергию подвижных электронов (б).

Электрический ток в таком переходе течет только в том случае, если электроны перемещаются из области нанотрубки с большей энергией в область с меньшей энергией. Иначе говоря, ток может течь только в одном направлении. «Одностороннее» прохождение тока через нанотрубку с изгибом используется для создания выпрямляющего диода – одного из основных элементов электронных схем (рис. 2). В таком диоде нанотрубка лежит на непроводящей (кварцевой) подложке в контакте с двумя сверхтонкими проводами из золота или платины. Вольтамперная характеристика для такой системы – нелинейная. Ток через нанотрубку резко возрастает после достижения порогового значения напряжения смещения V , равного +2 В, приложенного к полупроводниковому концу гетероперехода, а при изменении полярности напряжения смещения ток через систему не идет (рис. 3). Если к подложке, приложить положительное напряжение V_g , пороговое значение напряжения смещения возрастет, а при отрицательном V_g – уменьшится. В целом, изменение V_g сопровождается смещением вольтамперной характеристики по оси V . Наилучшим образом такая система работает как диод при $V_g = -4$ В.

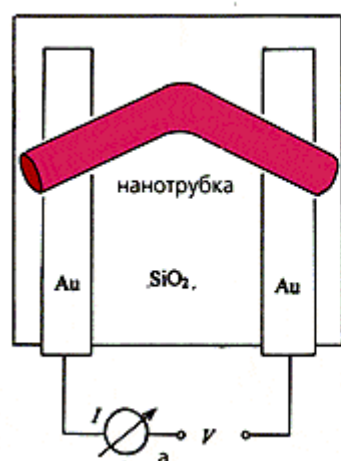


Рис. 2. Схема работы выпрямляющего диода на изогнутой нанотрубке со структурным дефектом пятиугольник-семиугольник. Нанотрубка лежит на непроводящей (кварцевой) подложке в контакте с двумя сверхтонкими проводами.

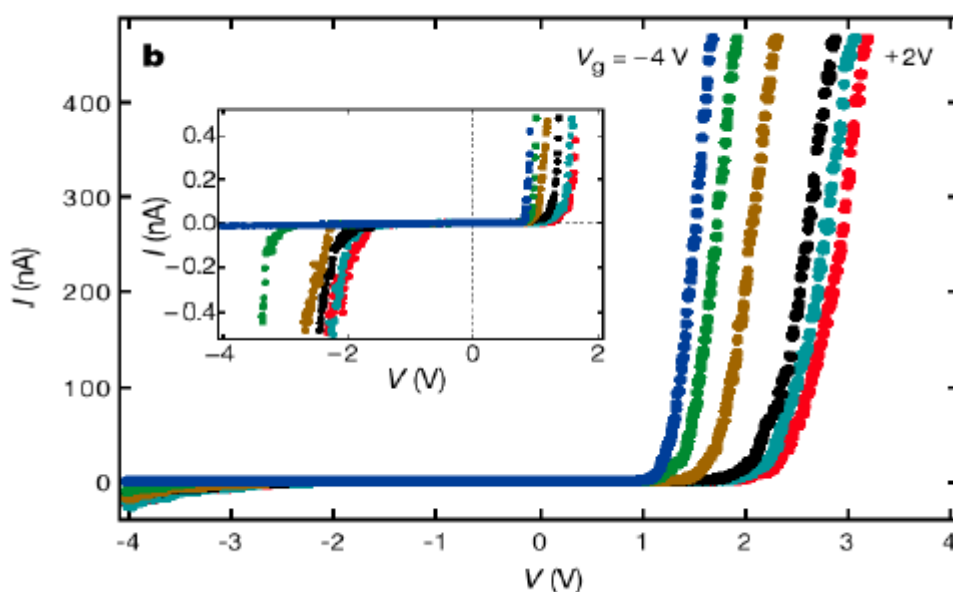


Рис. 3. Вольтамперная характеристика диода на изогнутой нанотрубке [1].

На основе соединения двух нанотрубок можно конструировать и нанорезисторы. Например, при соединении двух металлических нанотрубок с сопротивлением при комнатной температуре 56 и 101 кОм выпрямляющий диод не образуется, но получается нанотрубка со значительно большим сопротивлением 608 кОм и сильной температурной зависимостью сопротивления; оно возрастает на порядок при понижении температуры до

50 К.

Транзистор

На основе полупроводниковых и металлических нанотрубок удалось сконструировать транзисторы, работающие при комнатной и сверхнизкой температуре. Транзисторы (триоды) – электронные устройства, на перенос заряда через которые оказывает сильное влияние внешнее управляющее электрическое поле, что используется в усилителях электрического сигнала, переключателях и т.п.

Обсудим транзистор на полупроводниковой нанотрубке (рис. 4). В таком транзисторе электрическое поле управляет концентрацией носителей в зонах делокализованных состояний.

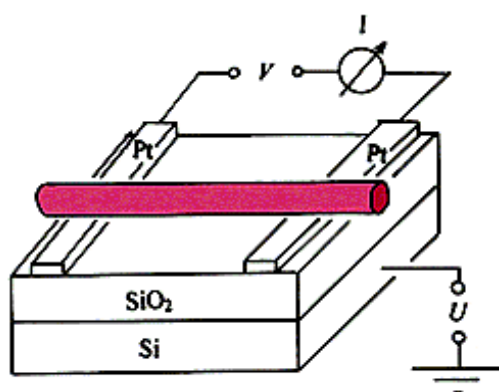


Рис. 4. Схема транзистора. Нанотрубка лежит на непроводящей (кварцевой) подложке в контакте с двумя сверхтонкими проводами, в качестве третьего электрода (затвора) используется кремниевый слой.

В полупроводниковой нанотрубке занятые электронные состояния отделены от незаполненных проводящих электронных состояний энергетической щелью – запрещенной зоной. Из-за наличия этой щели при обычных условиях концентрация носителей в зонах мала, и нанотрубка обладает высоким сопротивлением. При подаче на третий электрод (затвор)

электрического потенциала V_g в области нанотрубки возникает электрическое поле, и ширина щели меняется. Включение отрицательного потенциала затвора V_g приводит к возрастанию, а положительного – к убыванию тока через нанотрубку. При V_g около -6 В нанотрубка становится металлической. При $V_g = +6$ В ток через нанотрубку равен нулю. При комнатной температуре проводимость полупроводниковой одностенной нанотрубки при варьировании V_g меняется на шесть порядков.

Профессор, доктор химических наук

П.Н.Дьячков

1. Z. Yao, H. W. Ch. Postma, L. Balents, and C. Dekker, Carbon nanotube intramolecular junctions, Nature (London), 402, 273-276 (1999).
2. S. J. Tans, A. R. M. Verschueren, C. Dekker, Room temperature transistor based on a single carbon nanotubes, Nature (London) 393, 49–51 (1998).
3. П.Н.Дьячков. Углеродные нанотрубки: строение, свойства, применения. Москва, Издательство Бином, Лаборатория знаний, 2006, 293 с.