

Наноструктуры и нанотехнологии в электронике

УДК 621.382.3

В.А. Москалюк, канд. техн. наук, В.И. Тимофеев, д-р техн. наук

Перспективные наноструктуры и наноконпоненты электроники

В статье рассмотрены перспективные материалы и наноразмерные структуры для создания электронных компонентов. Проведен анализ физических процессов и приведены примеры реализации наноструктур для создания сенсоров, транзисторов, ячеек памяти, пассивных элементов наноинтегральных схем и др.

In the article perspective materials and nanoscale structures for creation of electronic components are considered. The analysis of physical processes is conducted and the examples of realization of nanostructures for creation of touch-controls, transistors, memory cells, passive elements of nano integrated circuits are resulted.

Введение

В настоящее время широкий интерес представляют физические эффекты в перспективных материалах и наноразмерных структурах для создания компонентов электронной техники. Такими структурами, в первую очередь, являются двумерные структуры в виде слоев наноскопических размеров, одномерные – квантовые нити или провода, и нульмерные – квантовые точки.

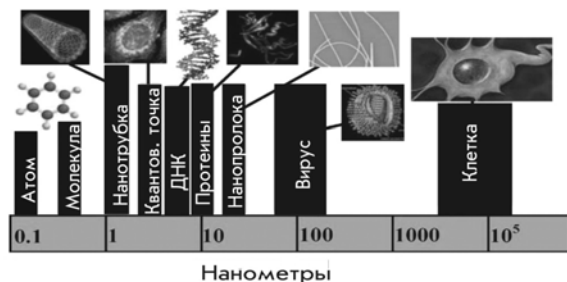


Рис. 1. Сравнительные размеры наноструктур и нанообъектов

В качестве современных наноконпонентов электроники могут использоваться различные по своим физическим и химическим свойствам структуры и наноматериалы. Это, как правило, различные по составу вещества, имеющие различные химические связи и строение кристаллической решетки, а также некристаллические соединения и биообъекты – нуклеиновые кисло-

ты, протеины, вирусы, клетки (рис. 1). Для создания электронных компонентов современные наноструктуры используют различные сочетания приведенных материалов. Уже известны практические структуры наносенсоров, использующие свойства молекул изменять проводимость канала полевого транзистора на основе нанопроводника [1]. Более подробное представление о свойствах нанообъектов дает таблица 1.

В таблице представлены характеристики частиц, молекул, их сочетаний, а также различные механизмы изменения их состояний. Интерес представляет анализ скоростных свойств (времен и энергий переключения), влияния шумов (термальной ошибки и различного рода флуктуаций), плотности компоновки структур, мощности рассеяния, методы модуляции и др.

Известно, что в электронных компонентах, использующих эффект поля, ограничивающими факторами являются: конечное время релаксации энергии (около 1 пс), термальные эффекты и квантовые эффекты. При этом «пороговая энергия» составляет $3k_B T \ln 2$ (около 0,05 эВ). К классу спинтронных компонентов могут быть отнесены структуры, использующие прецессию спина одиночного электрона, релаксационные процессы спиновой монообласти или спиновые волны, возникающие под воздействием магнитного поля. В первом случае время переключения ограничивается граничной частотой прецессии спина электрона, во втором – временем релаксации спина домена (около 10 пс), а в последнем (до 10 пс) – максимальной частотой изменения магнитного поля. Третья группа представленных в таблице 1 возможных для реализации компонентов использует физические и молекулярные изменения – движение молекул (одной из перспективных представляется молекула ротаксана [2]), вращение молекул, фазовые изменения в материалах.

Скорость переключения в таких структурах ограничивается частотой вибрации молекул, которая для первого и второго случая составляет около 0,1 пс, а для случая фазовых изменений – 0,1 пс. Поскольку физические размеры молекул существенно больше электронных и спинтронных структур требуются более существен

Таблица 1. Характеристики частиц и нанобъектов [2]

объект	электрон	электронный спин			физические молекулярные изменения		
		одиночный	спиновая монообласть	спинволна	движение молекул	вращение молекул	фазовые изменения
скорость переключения	1 пс время релаксации энергии	1пс частота прецессии	10 пс, время релаксации домена	10 пс, внешнее магнитное поле	0,1 пс, частота вибрации	0,1 пс, частота вращения	1 нс, частота вибрации
энергия переключения	0,05 эВ 1 электрон	0,05 эВ 1 спин	0,05 эВ	0,03 эВ	0,8 эВ 521 атом	0,7 эВ 115 атомов	3 эВ, 54 атома
вероятность термальной ошибки	0.6	0.6	0.6	0.75	0,0001	0,0001	0,0001
плотность компоновки элем./см ²	10 ¹⁴	10 ¹⁴	10 ¹¹	10 ⁹	10 ¹²	10 ¹²	10 ¹³
мощность рассеяния	мВт/см ²	мВт/см ²	кВт/см ²	Вт/см ²	мВт/см ²	мВт/см ²	100 кВт/см ²
масштаб. фактор ограничения	температ. и квантовые эффекты	температ. и квантовые эффекты	сверхпарамагнетизм	скорость распространения	стабильность молекул, размеры, сборка	стабильность молекул, размеры, сборка	рассеяние тепла
метод модуляции	эффект поля	магн. поле, спинорбит. взаимодей.	магн. поле, спинорбит. и магн.-электр. взаимодей.	электрическое притяжение	фотоны, тепло, электроны	фотоны, тепло, электроны	джоулево тепло
преимущественный материал	Si, A ³ B ⁵ и др.	неизвестно	ферромагнетики	ферромагнетики	ротаксан	металлоуглероды	калгониды

ные энергетические затраты («энергия переключения» вырастает на порядки), связанные с модуляцией характеристик молекулярных структур, при этом, однако, возможно получение более мощных компонентов. Следует также отметить, что вероятность термальной ошибки у таких компонентов на несколько порядков меньше, чем у электронных и спинтронных структур.

Существуют физические факторы масштабных ограничений для наноструктур с различными механизмами модуляции характеристик. Для электронных структур и структур с «одиночным электронным спином» это температурные и квантовые эффекты, для структур со спиновой монообластью и спинволнами – это проявление эффекта сверхпарамагнетизма и ограничение скорости распространения спиновых волн. Для молекулярных структур это проблемы стабильности молекул и сборки (технологии получения структур с повторяемыми характеристиками), а

для структур, использующих фазовые изменения – проблема отвода тепла. Технологической проблемой является также проблема компоновки и сборки нанокомпонентов интегральных схем с существенно различными свойствами – это могут быть полупроводники и углеродные материалы (фуллерены), ферромагнетики, молекулы органических и неорганических соединений, металлоуглероды, калгониды и др.

Молекулярные структуры

В работе [3] приводятся результаты экспериментальных исследований контакта «органическая молекула – металлическая поверхность». Как предполагается, имеет место химический механизм взаимодействия между молекулой и металлическим электродом, связанный с изменением электронной плотности и появлением молекулярного электростатического по-

тенциала. Рассматривается система из двух связанных атомов углерода, соединенных с кольцами фенила (рис. 2). При взаимодействии происходят изменения в геометрии молекулы, что характерно для химически связанных элементов, которые могут происходить на расстоянии около 1 нм. Рассмотренные модели процессов предполагают образование квантово-механических кластеров у поверхности металлического электрода. При этом считается, что волновые функции атомов металла локализуются, т.е. взаимодействие определенного слоя металла не изменяет волновых функций соседних слоев металлического электрода. Модуляция проводимости контакта «металл-молекула» происходит при изменении электрического смещения на металлической поверхности, что приводит к изменению длины связей и переносу электронов вследствие туннелирования.

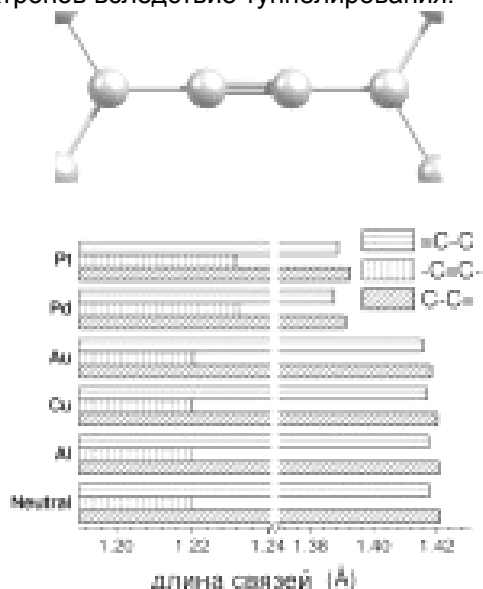


Рис. 2. Длины связей контакта металл-молекула для различных материалов

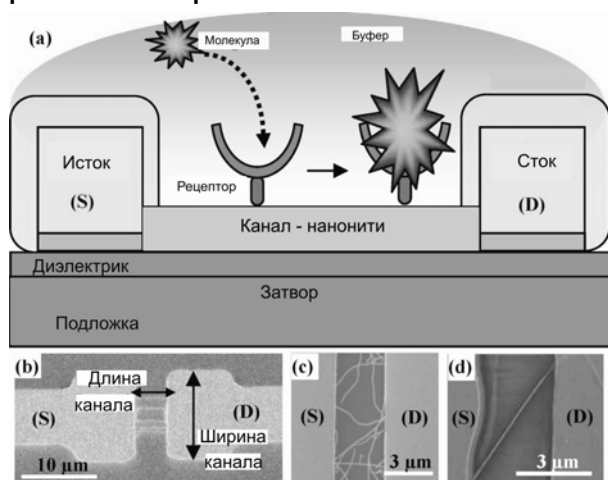


Рис. 3. Принцип работы нанобиосенсора – (а), топология – (в), технологии реализации канала транзистора: на углеродной нанотрубке (с), на нанопроводнике из оксида индия – (д)

Механизм модуляции проводимости вследствие поверхностной поляризации углеродной нанотрубки, представляющей собой канал полевого транзистора, реализован в нанобиосенсоре (рис.3).

При захвате органических молекул на поверхности нанотрубки происходит обеднение (или обогащение) носителями канала транзистора в зависимости от типа проводимости нанотрубки. Такие биосенсоры могут использоваться для исследования протеинов, ДНК, различного вида антител и других биообъектов.

Наноконпоненты, использующие туннельный эффект

Одноэлектронный транзистор с уникальными характеристиками выполненный в структуре «кремний-на-изоляторе» с туннельными переходами и встроенными квантовыми точками представлен в работе [4]. При этом туннельные переходы и квантовые точки существенно меньше поликристаллических кремниевых гребенчатых затворов с длиной около 70 нм, а межэлектродные расстояния составляют около 240 нм. Этапы изготовления, параметры и характеристики транзистора представлены на рис. 4. Данная технология позволяет получать квантовые точки с контролируемыми параметрами. Область под затвором имеет профиль легирования в виде обратного гауссиана, что приводит к созданию потенциального барьера. Эффективная работа транзистора связана с необходимостью превышения энергии кулоновского взаимодействия над энергией термальных флуктуаций. Если за счет теплового движения частица приобрела достаточно большую энергию, она может прорвать кулоновскую блокаду. Поэтому для каждого одноэлектронного устройства существует своя критическая температура, выше которой она перестает работать. Эта температура обратно пропорциональна площади перехода: чем меньше его емкость, тем больше скачок напряжения и тем выше барьер кулоновской блокады. Уникальность рассматриваемого в данной работе транзистора заключается в получении выходных характеристик при комнатной температуре.

Наряду с совершенствованием наноструктур развивается теория для описания физических процессов в них. В работе [5] представлена аналитическая модель для расчета тока кремниевого одноэлектронного транзистора с дискретными квантовыми уровнями энергии и параболическими барьерами туннельных переходов. В модели рассматриваются только три самых вероятных состояния от основного уровня и первый возбужденный уровень для каждого электрона.

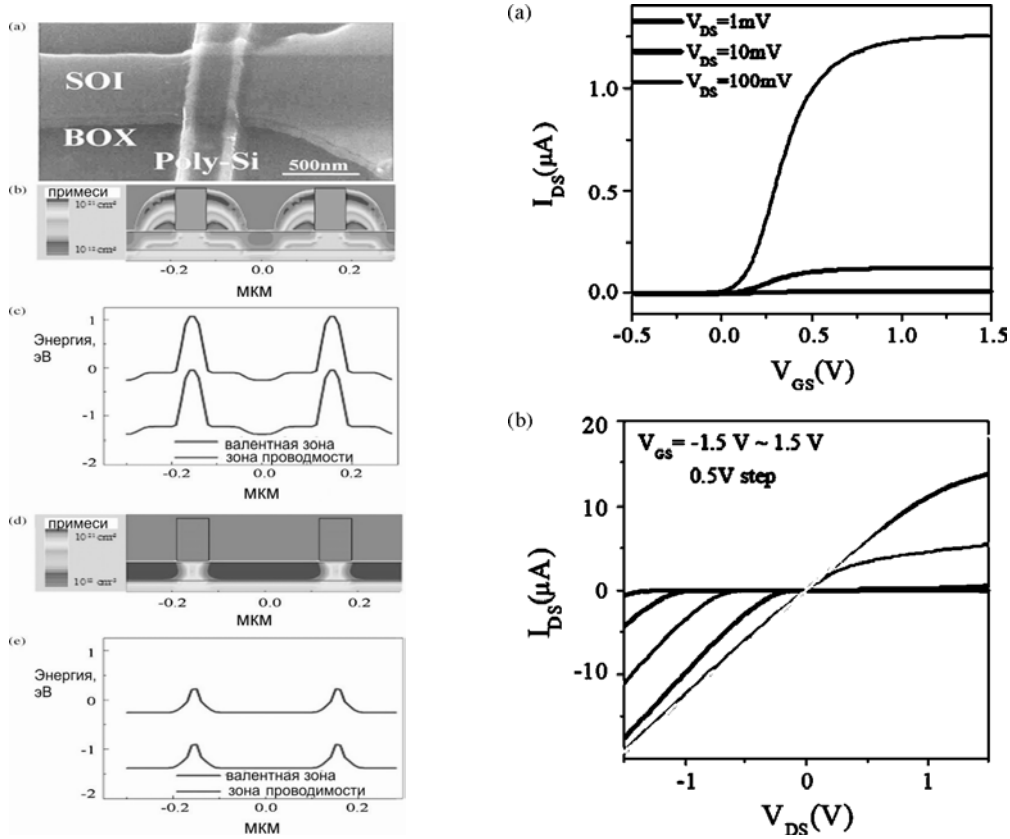


Рис. 4. Топология одноэлектронного транзистора, энергетические диаграммы и вольтамперные характеристики при $T = 300 \text{ K}$

Считается также, что сопротивление туннельного перехода больше, чем квантовое сопротивление $h/e^2 \sim 25,8 \text{ k}\Omega$ и квантовые флуктуации подавляются. Кроме того, отсутствует туннелирование более высокого порядка – «со-туннелирование», при котором сохраняется энергия лишь между начальным и конечным состояниями всего массива переходов, а также не учитывается неупругое туннелирование, которое сопровождается генерацией или рекомбинацией электронно-дырочных пар. Как правило, в упрощенных моделях считается, что время туннелирования пренебрежимо мало по сравнению с другими характерными временами, включая интервалы между туннельными переходами отдельных частиц. Квантовые энергетические уровни дискретны (рис.5) с интервалом $\Delta \epsilon_n$, а электростатическая энергия равна $E_c = e^2/C_\Sigma$, где C_Σ – суммарная емкость транзистора.

Вероятности заполнения каждого из трех рассматриваемых состояний определяются по формулам:

$$P_{G,n} = \frac{\Gamma_{G,(n+1,n)} \cdot \Gamma_{E,(n+1,n)}}{A},$$

$$P_{G,n+1} = \frac{\Gamma_{G,(n,n+1)} \cdot \Gamma_{E,(n+1,n)}}{A},$$

$$P_{E,n+1} = \frac{\Gamma_{E,(n,n+1)} \cdot \Gamma_{G,(n+1,n)}}{A},$$

где

$$A = \Gamma_{E,(n,n+1)} \cdot \Gamma_{G,(n+1,n)} + \Gamma_{G,(n,n+1)} \cdot \Gamma_{E,(n+1,n)} + \Gamma_{G,(n+1,n)} \cdot \Gamma_{E,(n+1,n)}.$$

Здесь Γ — скорость туннелирования электронов из квантовой точки:

$\Gamma = \Gamma_0 \{ [1 + \exp(-\Delta F / k_B T)] [1 + \exp(eU - E / eT_0)] \}^{-1}$, где Γ_0 — начальное значение скорости туннелирования, ΔF — энергия свободного электрона системы, U — высота туннельного барьера, E — энергия электрона, T_0 — кривизна туннельного барьера, k_B — константа Больцмана и T — температура кристалла.

Суммарная скорость туннелирования электронов на электроды истока и стока определяется по формуле $\Gamma_{G,(n,n+1)} = \Gamma_{G,(n,n+1)}^S + \Gamma_{G,(n,n+1)}^D$.

Полный ток стока транзистора определится как

$$I_{DS} = \sum_{k=0}^n I_{DS,k}, \text{ где } I_{DS,n} \text{ — компоненты тока}$$

для каждого n -го электрона в квантовой точке, которые определяются по известным вероятностям и скоростям переходов как

$$I_{DS,n} = \pm [e(P_{G,n} \Gamma_{G,(n,n+1)}^S - P_{G,n+1} \Gamma_{G,(n+1,n)}^S) + e(P_{G,n} \Gamma_{G,(n,n+1)}^D - P_{E,n+1} \Gamma_{E,(n+1,n)}^S)]$$

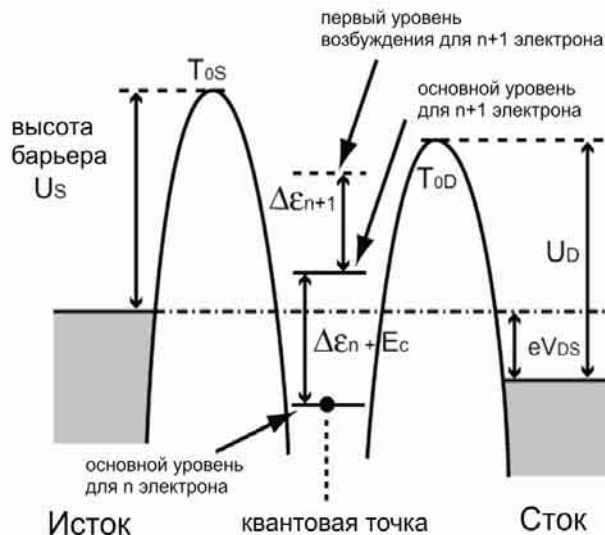


Рис. 5. Энергетическая диаграмма одноэлектронного транзистора

Энергетический зазор ΔF определяется по известным значениям суммарной емкости транзистора при заданных электрических смещениях на затворе и стоке транзистора. Приведенные в работе [5] выходные вольт-амперные характеристики содержат участок с отрицательной дифференциальной проводимостью. Модель транзистора при известных параметрах квантовой точки и туннельного перехода может использоваться в пакете схемотехнического проектирования HSPICE для расчета быстродействующих ключей.

Для создания быстродействующей одноэлектронной структуры необходимо, чтобы сопротивление туннельного перехода было существенно выше квантового сопротивления. При выполнении этого условия можно пренебречь когерентными квантовыми процессами, связанными с одновременными туннельными переходами.

Когда энергия зарядки сравнима с энергией термических флуктуаций может проявляться эффект кулоновской блокады (кулоновской лестницы). Для приборов с размерами квантовой точки (кластера) до 10 нм изменение энергии переходов может достигать 0,1 эВ и одноэлектронные эффекты могут проявляться при комнатных температурах. При туннелировании возможно прохождение дробного заряда (дробного квантования), что может быть связано с тем, что волновая функция электрона может распределяться между электродами, влияя на энергетическую картину. Для моделирования таких приборов недостаточно квазиклассического описания на уровне дрейфово-диффузионных или кинетических моделей — необходимо использование аппарата квантовой механики. Для описания неравновесных процессов необходимо самосогласованно решать уравнения Пуас-

сона и Шредингера, например, с привлечением функций Грина.

Низкоразмерные структуры на основе графена

В последнее время все больший интерес представляет использование уникальных свойств графена. В отличие от металлов, у которых зависимость энергии квазичастиц от импульса при движении в зоне проводимости (закон дисперсии) можно с хорошей точностью считать квадратичным (энергия квазичастиц прямо пропорциональна квадрату импульса), у графена закон дисперсии существенно отличный. Графен нельзя отнести ни к металлам, ни к полупроводникам, ни, тем более, к диэлектрикам. Графен — полуметалл (не единственный, к такому классу веществ принадлежат еще бор, кремний, германий, мышьяк, полоний, графит и др.). Исходя из зонной структуры (рис. 6), графен — это вещество, у которого валентная зона и зона проводимости перекрываются (запрещенная зона отсутствует, как в металлах), но, в отличие от тех же металлов, это пересечение очень мало. Точки соприкосновения зоны проводимости и валентной зоны в графене образуют так называемые точки Дирака. В этих точках закон дисперсии квазичастиц имеет линейный вид: энергия квазичастиц прямо пропорциональна их импульсу. Подобной зависимостью энергии от импульса обладают еще и безмассовые частицы — фотоны, т.е. электроны в графене ведут себя как фотоны, имея нулевую массу и скорость движения v_F порядка 10^6 м/с, соответствующую энергии Ферми. Однако, в отличие от фотонов, электроны в графене еще и обладают зарядом (и полужелым спином, то есть являются фермионами).

Энергия квазичастиц в графене зависит от номера орбиты как \sqrt{n} , поэтому уровни Ландау в нем не эквидистантны, при $n = 0$ энергия квазичастиц в графене равняется 0 даже в присутствии магнитного поля. Квазичастицы в графене формально описываются гамильтонианом дираковского вида, что обусловлено симметрией кристаллической решетки, которая состоит из двух эквивалентных углеродных подрешеток [6]. Такое описание является теоретически строгим в пренебрежении многочастичными эффектами и подтверждено экспериментально измерениями циклотронной массы носителей в графене в зависимости от их энергии.

В графене при положительных энергиях (выше дираковской точки) токонесящие состояния подобны электронам и заряжены отрицательно [6]. При отрицательных энергиях, если валентная зона целиком не заполнена, квазича-

стицы ведут себя как положительно заряженные частицы (дырки) и могут рассматриваться как твердотельный аналог позитронов. В противоположность тому, что электроны и дырки в физике твердого тела описываются уравнениями Шредингера со своими эффективными массами, в графене электроны и дырки оказываются взаимосвязанными, проявляя свойства зарядово-сопряженной симметрии. В графене это обусловлено симметрией его кристаллической решетки и тем, что квазичастицы в графене описываются двухкомпонентной волновой функцией, построенной на основе двух подрешеток.

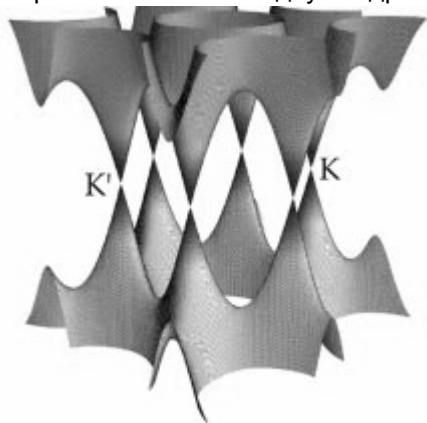


Рис. 6 Зонная структура с точками соприкосновения зоны проводимости и валентной зоны в точках K' и K

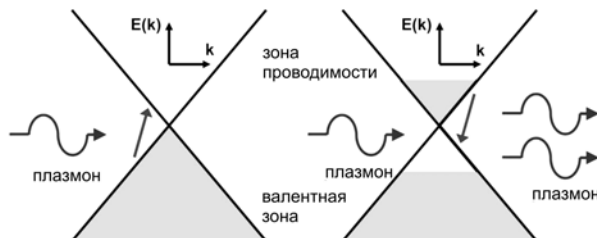


Рис. 7. Энергетические уровни в графене, иллюстрирующие механизм генерации плазмонов

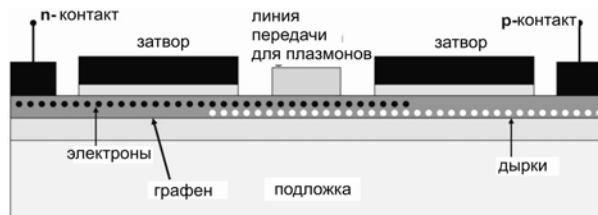


Рис. 8. Волноведущая активная плазменная структура

В работах [7,8] рассматривается использование уникальных физических характеристик графена в структуре с p-n переходом для генерации и передачи плазменных колебаний в терагерцовом диапазоне. Генерация плазмонов в графене подобна оптической генерации в результате стимулированной эмиссии фотонов в лазерах на многодолинных полупроводниках (АЗВ5) в терагерцовом диапазоне (рис.7). Основное отличие заключается в низкой групповой

скорости плазмонов в графене в терагерцовом диапазоне и сильном ограничении электромагнитного поля, связанного с плазмонами, вблизи слоя графена, что дает существенно большие значения усиления, чем в традиционных полупроводниковых лазерах. Энергия электромагнитного поля в графене ограничена вследствие малых поперечных размеров его слоя. Представленная в работе [7] модель распространения плазмонов в графене учитывает внутридолинное рассеяние и плазмонное внутридолинное усиление вследствие стимулированной эмиссии.

Здесь же приводятся результаты моделирования характеристик линии передачи, представляющую собой следующую структуру (рис. 8). Неоднородное распределение электронов и дырок в слое графена обеспечивается как за счет их инжекции из p- и r-контактов структуры, так и за счет внутридолинного туннелирования в графене (при отсутствии запрещенной зоны), а управление осуществляется за счет электростатического смещения на затворах. Плазмонные волны, возникающие в слое графена локализуются в диэлектрической полоске, нанесенной вертикально на слой графена.

В подобной структуре (ширина диэлектрика до 0,5 мкм при длине линии до 5 мкм, электронно-дырочной концентрации 10^{10} см $^{-2}$ и при низких температурах до 77 К), возможно получение усиления сигнала в диапазоне частот 1–6 ТГц.

Наноконпоненты с использованием нанотрубок и нанопроволок

В работе [9] рассматривается применение углеродных нанотрубок с характерными размерами (рис. 9) в качестве дипольной антенны, использующей «пачки» нанотрубок круглой и прямоугольной формы, где радиус пачки R (или высота и ширина для прямоугольной «пачки») имеют размеры десятков нанометров, а длина L — порядка десятков микрометров. Для создания антенных устройств используются нанотрубки типа «кресло» с металлической проводимостью. В таких волноводах можно пренебречь скин-эффектом вплоть до терагерцового диапазона частот, поскольку ток электронов связан с π -зонами атома углерода, подобно тому, как это происходит в графитовом листе. Таким образом, общие потери мощности в описываемых антеннах существенно меньше, чем в традиционных. Одним из недостатков таких антенн является высокий характеристический импеданс (до 100 кОм), что может затруднять согласование со стандартными устройствами с волновым сопротивлением 50 Ом. В работе [9] показано,

что антенны в виде «пачки» углеродных нанотрубок обладают излучательной способностью на 30-40 дБ выше, чем антенны на одиночных нанотрубках.

Продолжают совершенствоваться транзисторные структуры на нанотрубках. В работе [10] предложены оригинальные конструкции полевых транзисторов на нанотрубках с донорным легированием. Полученные химическим путем нанотрубки со ступенчатым профилем легирования (минимум находится в середине нанотрубки) длиной 50 нм встроены в структуру транзистора так, что это позволяет достичь эффективной длины канала до 5 нм.

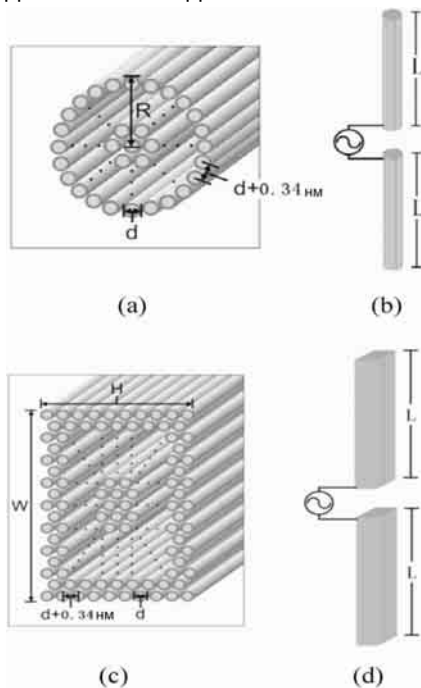


Рис. 9. Дипольные антенны на нанотрубках

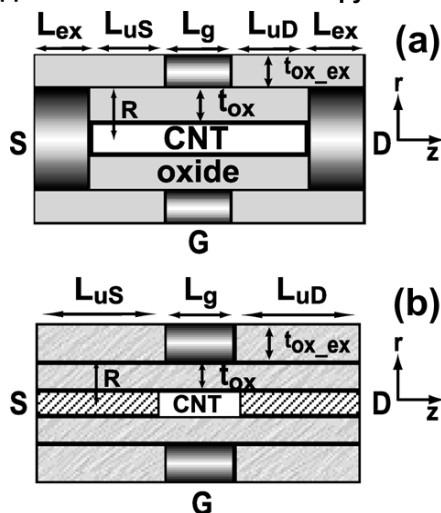


Рис. 10. Структуры полевых транзисторов с каналом на нелегированной а) и ступенчато легированной нанотрубке б)

Приводятся две конструкции транзисторов (рис. 10) с длиной канала 5 и 10 нм (сравни-

тельные характеристики приведены в таблице 2), позволяющие получить уникальные частотные и временные характеристики.

В частности, при достаточно высоких значениях крутизны граничная частота f_T превышает 10 терагерц при времени пролета носителей в канале 22 фс.

В последнее время перспективными как с точки зрения технологии, так и получения привлекательных выходных характеристик являются полевые транзисторы на нанотрубках на кремниевых подложках [11-13].

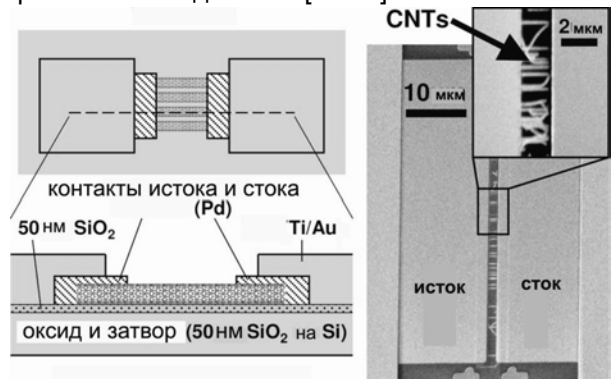


Рис. 11. Транзистор [11] с системой нанотрубок

Система нанотрубок (рис. 11) в транзисторе позволяет увеличить ток через канал и увеличить напряжение отсечки тока стока, а также крутизну ВАХ. Использование палладиевых контактов уменьшает паразитные сопротивления истока и стока. Плотность нанотрубок в канале составляет примерно 1-3 на 1 мкм, однако, на снимке со сканирующего электронного микроскопа обращает на себя внимание неупорядоченность нанотрубок. Дефекты нанотрубок ограничивают повторяемость параметров транзисторов из-за флуктуаций проводимости.

Конструкция, сочетающая легированные и нелегированные нанотрубки в транзисторных структурах приведена в работе [12]. Здесь используется системы легированных нанотрубок для формирования канала транзистора в межэлектродном пространстве и нелегированных нанотрубок диаметром до 2 нм под управляющим затвором длиной около 30 нм и шириной 60 нм. Такая двухзатворная структура (рис. 12) реализует быстродействующий инвертор. Плотность нанотрубок в слое может достигать 250 на 1 мкм.

Критическим параметром для получения стабильных характеристик остается количество дефектных самоорганизованных нанотрубок в системе. Как уже отмечалось, деформации нанотрубок в процессе формирования могут приводить к заметному изменению величины проводимости, а в некоторых случаях и изменению характера проводимости.

Таблица 2

длина затвора (нм)	ширина затвора (нм)	емкость затвора (аФ)	время пролета (фс)	крутизна (мСм)	Граничная частота f_T (ТГц)
5	50	0,7	22	63	14,5
10	100	1,25	32	88	11

Пассивные компоненты наноинтегральных схем: межсоединения, линии передачи, конденсаторы

В работах [14-16] приводятся примеры использования углеродных наноструктур в качестве межсоединений и линий передачи. В работе [14] рассматривается линия передачи в виде «пачки» углеродных нанотрубок, что с характерными размерами схематически показано на рис. 13. При этом используется сочетание металлических и полупроводниковых нанотрубок в пачке, общее их количество может достигать десятков. Изменяя количество и тип нанотрубок добиваются изменения их проводимости, а также емкостных и индуктивных свойств. Здесь же предложена одномерная модель распространения волн в описанной системе нанотрубок, аналогичная уравнениям длинных линий, в предположении отсутствия туннельных переходов электронов между отдельными нанотрубками в пачке, что, как правило, выполняется, поскольку проводимость каждой отдельной нанотрубки существенно больше проводимости между трубками.

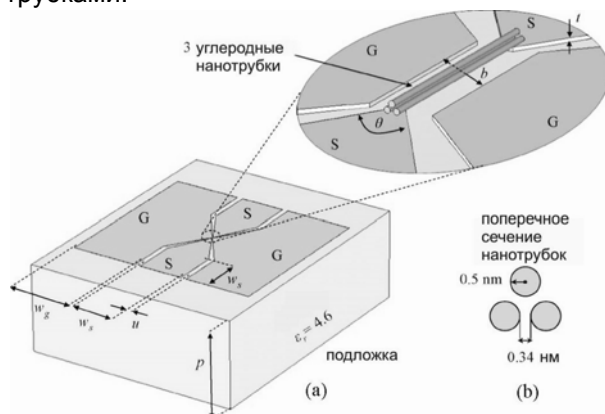


Рис. 13. Структура с линией передачи в виде «пачки» нанотрубок

В работе [15] предложены конструкции межсоединений в виде «пачки» однородных нанотрубок, пригодных, в том числе, для коммутации не только планарных, но и многослойных (вертикальных) наноструктур. Диаметр нанотрубок в такой структуре может достигать десятков нанометров, а высота до сотен микрометров, что

позволяет осуществлять многослойную компоновку наносхем.

В тестовой структуре на рис. 14 среда заполнения вокруг системы нанотрубок между контактами представляет собой полимерный материал бензоциклобутан. Обращает на себя внимание абсолютно линейная вольт-амперная характеристика системы вертикальных нанотрубок. При длинах порядка сотен микрометров характерные значения сопротивления приведенной системы нанотрубок составляют единицы и десятки Ом. Пример использования нановолокон для межсоединений, а также изготовления контактов на кристалле приводится в работе [16].

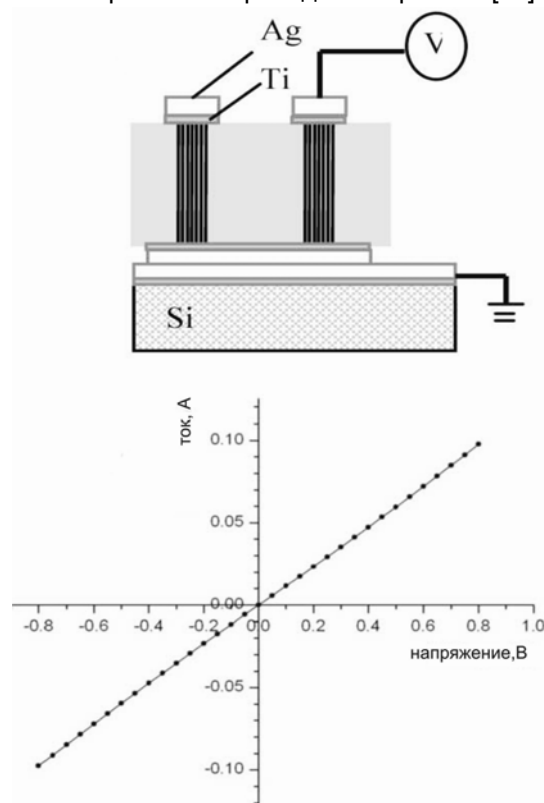


Рис. 14. Тестовая структура в виде вертикальных нанотрубок и ее ВАХ

Принципиальным отличием является использование планарных графитовых структур в виде нановолокон (рис. 15). Одним из основных требований к межсоединениям является постоянство проводимости в широком диапазоне температур. Полученные [16] температурные

зависимости проводимости для четырех тестовых нановолоконных структур на подложке из окиси кремния демонстрируют монотонный рост до примерно 150K и относительное ее постоянство до 350K. Тестовые структуры изготовлены методом плазмо-химического выпаривания. Нановолокно может быть получено в виде слоя титана толщиной 30-40 нм, напыленного на кремниевую подложку.

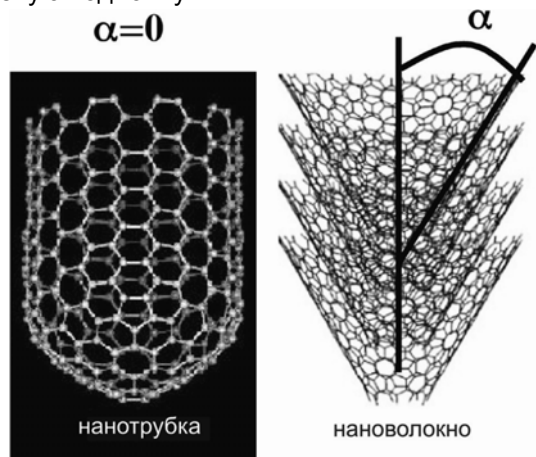


Рис. 15. Структурные отличия углеродной нанотрубки и нановолокна

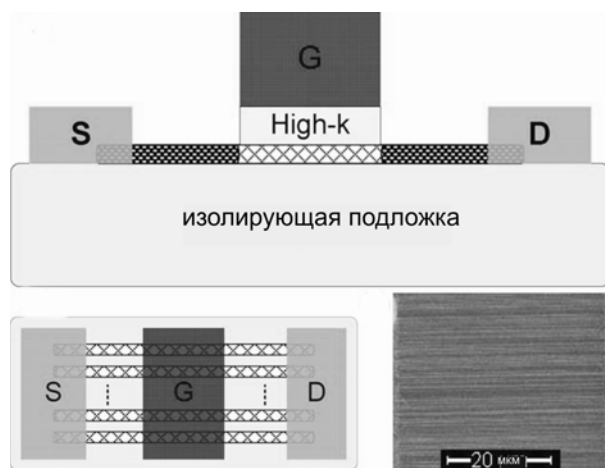


Рис. 16. Структура квантового конденсатора

В работе отмечается, что в качестве физической модели в подобных структурах может использоваться прыжковый механизм проводимости. Двумерная матрица из нановолокон по температурным характеристикам демонстрирует преимущества по сравнению с межсоединениями на нанотрубках и нанонитях.

В работе [17] приводятся примеры использования углеродных нанотрубок в качестве квантового конденсатора для нелинейных цепей терагерцового диапазона. Квантовые конденсаторы представляют собой структуру (рис. 16), подобную транзисторной. Компонировка структуры предполагает размещение на полужоке до 100 углеродных нанотрубок. Посредством управляющего электрода имеется возможность

реализовать перестраиваемый конденсатор (варактор) с широким диапазоном питающих напряжений различной полярности. Приводятся данные [17] о возможности перестройки емкости конденсатора в аттофарадах почти на порядок при изменении электрического смещения от -2 до 2 В.

Отличительными особенностями конденсаторов являются малые тепловые потери и высокие скорости переключения вследствие баллистического переноса электронов в нанотрубке, однако остается проблема минимизации паразитных параметров структуры. Технологически этому способствует применение так называемых "high-k"-материалов – диэлектриков, которые имеют диэлектрическую проницаемость больше, чем у оксида кремния ($\epsilon = 3,9$). К таким материалам относятся Al_2O_3 , Ti_2O_3 , ZrO_2 , Ta_2O_5 , HfO_2 и др.

Спинтронные структуры

В отличие от электроники, использующей свойства электрона как заряженной частицы, спинтроника (от SPIN-TRansport electrONICS) базируется на использовании квантово-механической характеристики электронов – спина. В компонентах спинтроники ток создается электронами с однонаправленными спинами (спиновый ток), для получения которого необходимо поляризовать спины, упорядочив их в одном направлении. При этом необходимо, чтобы время жизни спина было достаточно большим для передачи его на нужные расстояния. Чаще эти свойства связаны с ферромагнетиками, в которых собственное (внутреннее) магнитное поле может в сотни и тысячи раз превосходить вызвавшее его внешнее магнитное поле. Это может быть связано с существованием так называемого обменного взаимодействия, связанного с перекрытием волновых функций электронов, принадлежащих соседним атомам кристаллической решетки, а также нескомпенсированных спиновых магнитных моментов валентных электронов. Компоненты спинтроники могут обладать свойствами памяти, высокой скоростью переключения (несколько пикосекунд) и малым потреблением энергии, так как переворот спина практически не требует затрат энергии, а в промежутках между операциями спинтронное устройство может отключаться от источника питания. В компонентах спинтроники может быть использован эффект гигантского магнитосопротивления (Giant Magnetoresistance-GMR), наблюдающийся в искусственных тонкопленочных материалах, составленных из чередующихся ферромагнитных и

немагнитных слоев, а также явление магнитного туннельного перехода (Magnetic Tunnel Junction - MTJ), проявляющееся в элементах из двух слоев ферромагнетика, разделенных изолятором. Толщина изолятора (обычно окись алюминия) настолько мала - меньше 2 нм, что электрон может туннелировать через этот барьер, и его сопротивление может изменяться с помощью внешнего магнитного поля. На рис. 17 показаны трехслойные пленки с эффектом GMR и механизм спинового рассеивания, приводящий к различной проводимости для параллельной (а) и антипараллельной (б) ориентации векторов намагничивания [18].

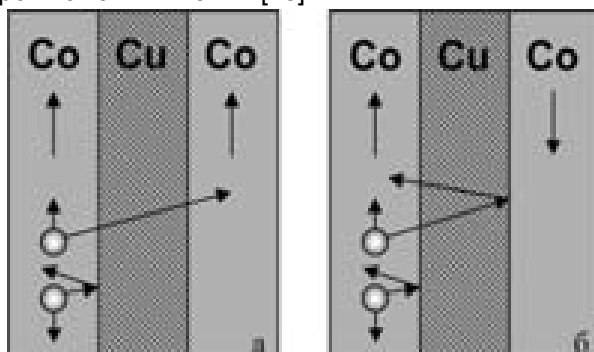


Рис.17. Механизм проводимости в многослойных магнитных пленках

Применяя различные материалы и структуры, можно использовать эффект управления потоком электронов, различающихся по спину. Механизм спинового эффекта Холла иллюстрирует рис. 18,а): в присутствии электрического поля E_x , когда электронное распределение Ферми смещено вдоль x , спины электронов с $\sigma > 0$ поворачиваются вверх, а с $\sigma < 0$ вниз [19]. Спин-орбитальное взаимодействие (рис. 18,б) позволяет «сортировать» поток электронов по спину: электроны со спином «вверх» рассеиваются на дефектах и примесях кристаллической решетки преимущественно влево, а электроны со спином «вниз» – вправо по ходу движения.

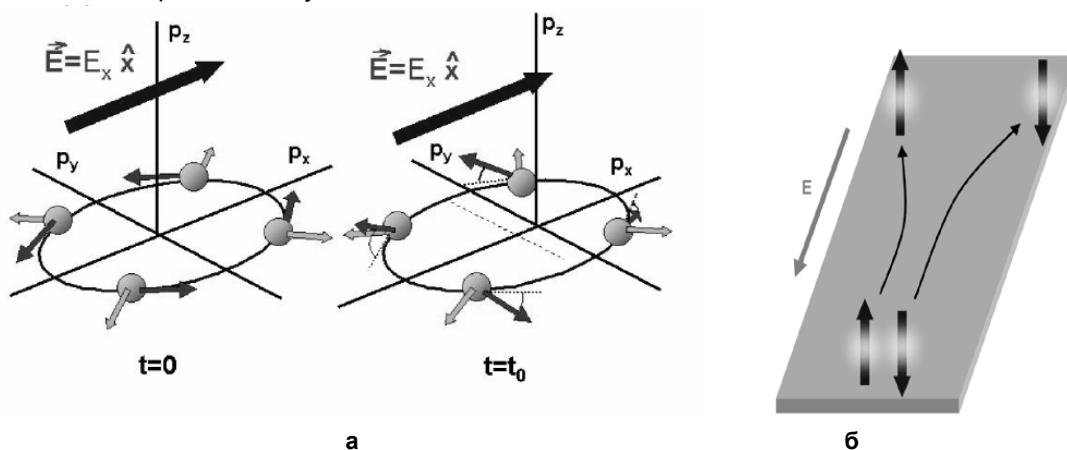


Рис. 18. Механизмы спинового эффекта Холла и «сортировки» электронов по спину

Развитие спинтроники связано с поиском материалов, которые обладали бы как свойствами ферромагнетиков, так и полупроводников, что затруднительно из-за большого различия в кристаллической структуре и характере химических связей. Ферромагнитные полупроводники, с одной стороны, были бы источниками спинполяризованных электронов, а с другой – легко интегрировались бы с традиционными полупроводниковыми устройствами. Идеальный ферромагнитный полупроводник должен иметь точку Кюри (температура, при которой ферромагнетик теряет свои свойства) выше комнатной температуры и допускать создание зон с n - и p -проводимостью в одном монокристалле.

Задача изменения магнитного момента электрона с помощью электрического поля без приложения магнитных полей в полупроводниках была решена в работе [20] для GaAs с толщиной пленки несколько микрон при температуре около 30 К. Это открывает возможности создания нового элемента для преобразования информации, когда намагниченность изменяется при приложении электрического напряжения и обратно. Развитие работ привело к обнаружению эффекта Холла [21] в пленках толщиной 1,5 мкм в полупроводнике ZnSe, легированного атомами хлора при комнатных температурах.

Магнитные свойства магнитных атомов обусловлены d -орбиталями, в то же время полупроводники образуются из атомов с внешними s - или p -орбиталями. Поэтому создание полупроводников со свойствами ферромагнетика затруднено вследствие того, что помещение магнитных атомов в кристаллическую решетку полупроводника резко ухудшает их магнитные характеристики. Для создания гибридного спин-электронного устройства [22] можно использовать структуру, показанную на рис.19.

Электроны, инжектируемые из эмиттера сквозь слой магнитного материала F входят в кремний уже поляризованными по спину. В коллектор электроны попадают, проходя сквозь еще один слой магнитного вещества, который играет роль спинового анализатора: электрическое сопротивление перехода резко возрастает, если спиновая поляризация электронов противоположна направлению намагниченности в анализаторе.

Таким образом, для создания спинового транзистора необходимо использовать три основных элемента: эмиттер для электрического инжектирования спин-поляризованных электронов в полупроводник, управляющее спиновым током в полупроводнике внешнее напряжение и прецизионный анализатор результирующего спинового тока.

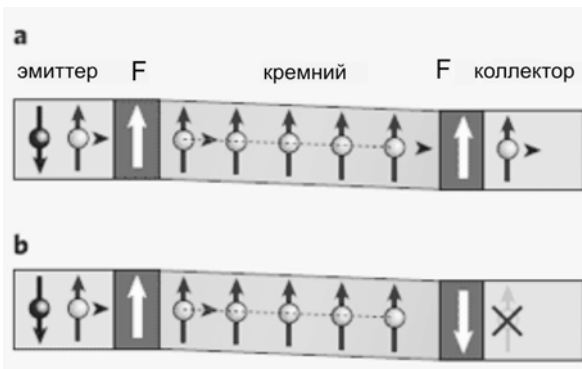


Рис. 19. Инжекция спиновых токов в кремнии. F – слои магнитного вещества, действующие как спиновые поляризатор и анализатор.

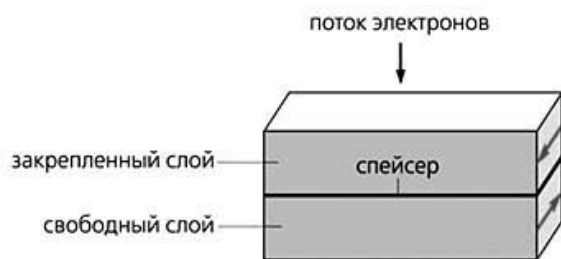


Рис. 20. Схема спинового вентиля. Стрелками показано направление намагниченности в слоях

В работах [23, 24] объектом исследования является так называемый спиновый вентиль (spin valve) (рис. 20). В простейшем случае он состоит из двух ферромагнитных слоев, разделенных сверхтонким промежутком - спейсером - из немагнитного металла или диэлектрика. Спейсер необходим, чтобы предотвратить прямое обменное взаимодействие между ферромагнитными слоями: в случае металлического спейсера перенос электронов через него происходит в баллистическом (бесстолкновительном) режиме, в случае диэлектрического - в режиме туннелирования через потенциальный барьер. Один из ферромагнитных слоев (он именуется

свободным, *free*) обладает малой энергией анизотропии и легко меняет направление своей намагниченности под действием внешнего магнитного поля соответствующей ориентации или при протекании тока. Другой ферромагнитный слой (его называют закрепленным, *pinned*) имеет существенно большую энергию анизотропии и переключается (меняет направление намагниченности) в гораздо более сильных полях.

Когда поток электронов течет из закрепленного слоя в антипараллельно ориентированный свободный, последний при превышении указанного порога скачком перемагничивается с возникновением параллельной конфигурации [24]. Это проявляется в скачкообразном уменьшении сопротивления магнитного перехода, что при заданной величине тока означает также скачкообразное понижение напряжения на переходе. Перенос электронов при протекании электрического тока в ферромагнитном проводнике сопровождается переносом потока спинового момента количества движения и связанного с ним потока магнитного момента. В таком потоке направление спинового магнитного момента электронов параллельно направлению магнитного момента решетки, поскольку это соответствует минимуму энергии *sd*-обменного взаимодействия. При переходе электронов из одного ферромагнитного слоя спинового вентиля в другой, имеющий иную ориентацию магнитного момента решетки, параллельность нарушается и электрону приходится менять ориентацию спина. Параллельность восстанавливается на малом расстоянии от границы раздела между ферромагнетиками, в слое толщиной ~1 нм. Этот процесс сопровождается передачей спинового момента количества движения от электронов к решетке.

Системное изложение физических процессов и моделей в спинтронных элементах изложено в работе [25].

Важным этапом в развитии спинтроники стало изучение туннельного магнетосопротивления в магнитных туннельных переходах, образованных ферромагнитными электродами с различными электрическими сопротивлениями в случаях параллельной и антипараллельной ориентаций магнитных моментов. Магнитные туннельные переходы, способные перемагничиваться за счет переноса спина, могут служить основой для перспективной магнитной памяти с малыми временем доступа и энергопотреблением. Развитие полупроводниковой электроники связано [25] с разработкой гибридных структур, объединяющих ферромагнитные металлы с немагнитными полупроводниками, получением

ферромагнитных полупроводников (в частности, $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$, который, однако, обладает низкой температурой Кюри – 170K), а также структур, использующих спиновый эффект Холла в немагнитных проводниках.

Одной из проблем спинтроники является вопрос о времени спиновой когерентности, так как, если это время слишком мало, то разориентация спинов приводит к потере информации, переносимой каждым спином [26]. Измерения времени спиновой когерентности при комнатной температуре показали, что в полупроводниках оно на несколько порядков больше (> 100 нс), чем в металлах (0.1–20 нс), обычно используемых в спиновых мультислоях. В настоящее время идет активная работа над созданием DMS (Diluted Magnetic Semiconductors — разбавленных магнитных полупроводников). Несмотря на выигрыш во времени спиновой когерентности, большинство исследуемых DMS имеют весьма низкие температуры Кюри, что ограничивает их практическое применение. Этот недостаток может быть устранен при переходе к наноструктурам DMS. Наноструктурирование полупроводника увеличивает растворимость примеси переходных металлов в его кристаллической решетке до желаемых 1–2%, обеспечивающих магнитоупорядоченное состояние.

Как уже отмечалось в работе [2] можно использовать в качестве спинтронных компонентов сочетание полупроводниковых и молекулярных структур. В качестве бистабильной (a)

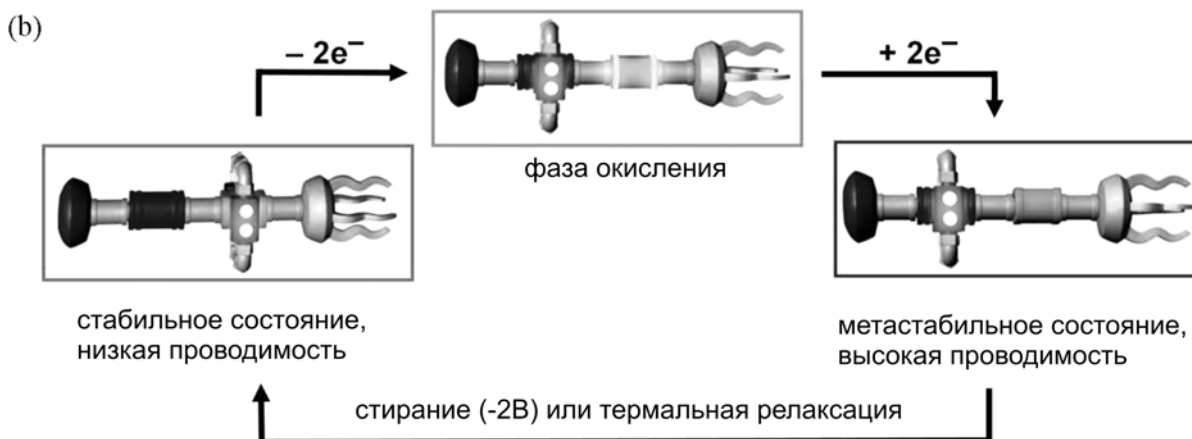
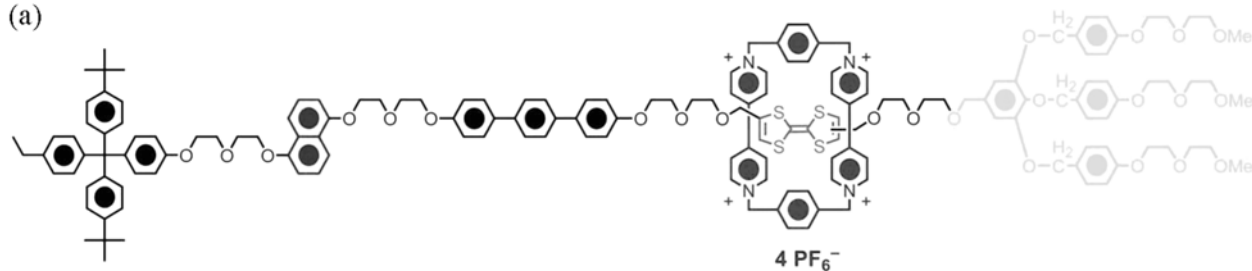


Рис. 21. Механизм переключения молекулы ротаксана

системы может использоваться молекула ротаксана (рис. 21), структура которой может рассматриваться как аналог нанопроводника. В середине молекулы имеется одномерная компонента с π -связью, связанная с кольцом. Механизм переключения предполагает обмен двумя электронами и переход через фазу окисления из стабильного состояния (с низкой проводимостью) в состояние с высокой проводимостью. При этом вследствие кулоновского отталкивания происходит перемещение кольца. Процессы переключения могут стимулироваться, например, внешним электрическим полем.

Минимальное электрическое смещение, стимулирующее процессы переключения составляет 0,8 В, а время – 0,1 пс. Существует, однако, множество ограничений, препятствующих созданию подобных наноконструкций, среди которых – влияние температурных и паразитных эффектов при встраивании молекул ротаксана в функциональные устройства.

Ячейки памяти на наноконструкциях

Как уже отмечалось, одноэлектронный транзистор может находиться в двух состояниях. Одно из них связано с кулоновской блокадой, второе – с протеканием тока. Это позволяет рассматривать их как перспективные ячейки быстродействующей и энергетически экономичной памяти для электронных вычислительных систем.

Ячейка памяти на двойных одноэлектронных транзисторах описывается в работе [27]. Структура ячейки памяти на одноэлектронных транзисторах, реализующих три квантовых бита (*qubits*) показана на рис. 22. В такой структуре три одноэлектронных транзистора соединены последовательно, а их затворы управляют электронным состоянием квантовых островков и, соответственно, переключением их в состояния «0» или «1», поскольку каждая пара островков имеет два устойчивых состояния (две поляризации). При этом ток переключения составляет 0,1-0,5 нА, при уровнях управляющих воздействий около 1 В. Рассмотренные квантовые системы [21] выполнены по технологии «кремний на изоляторе». Однако, надежные характеристики достигаются при очень низких температурах (4 К).

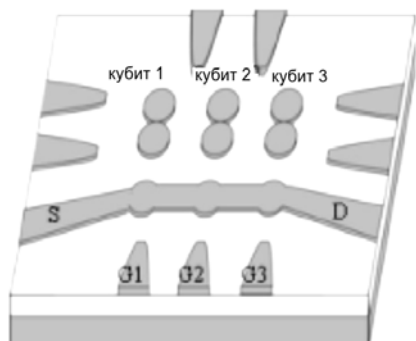


Рис. 22 Структура ячейки памяти (3 кубита) на одноэлектронных транзисторах

Вентильные свойства одноэлектронных структур проявляются для различных сочетаний материалов и значений температур [28]. Однако, процессы одноэлектронного туннелирования имеют случайную природу и зависят от множества факторов, включая процессы термализации электронов (в том числе при приложении внешнего электрического поля), что при построении квантовых ячеек памяти ограничивает надежность их переключения.

Наряду с поисками перспективных квантовых структур памяти, продолжается совершенствование субмикронных структур «кремний-на-изоляторе». В частности, разработана полуизолированная однотранзисторная ячейка памяти [29], стабильно работающая в широком диапазоне температур.

Ячейка памяти [30] в виде вертикального МДП транзистора на основе нитрида кремния с длиной активной области 0,1 мкм позволяет получать времена переключения в области наносекунд при токе потребления около 10 микроампер. Приведенные примеры ячейки памяти на традиционных транзисторных структурах позволяют получать матрицы быстродействующей памяти большой емкости при сравнительно небольших

технологических затратах для электронных устройств широкого применения.

Выводы

Рассмотренные в работе структуры не исчерпывают весь возможный спектр компонентов, которые могут быть созданы на основе применения современных нанотехнологий. Однако, представленные структуры различной размерности позволяют выделить группу физических эффектов, на основе которых уже в ближайшем будущем возможна реализация и массовое изготовление наноконструкций для широкого применения. Приобретают актуальность вопросы разработки теории и моделирования приборных характеристик и параметров новейших наноконструкций, а появление новых функциональных элементов приведет к пересмотру технической базы во многих областях электроники.

Литература

1. Curreli M., Zhang R., Ishikawa F.N., Chang H.K., Cote R.J., Zhou C., Thompson M.E. Real-Time, Label-Free Detection of Biological Entities Using Nanowire-Based FETs // IEEE Transactions on Nanotechnology. – 2008 – Vol. 7, No 6. P. 651–668.
2. K.Galatsis, A.Khitun, R. Ostroumov, K.L. Wang, W.R. Dichtel, E. Plummer, J.Stoddart, J.Zink, J.Lee, Y-H.Xie, K.W.Kim. Alternate State Variables for Emerging Nanoelectronic Devices// IEEE Transactions on Nanotechnology.–2009– Vol. 8, No1. P.66–75.
3. Tarakeshwar P., Palacios J.J., Kim D.M. Electrode-Molecule Interface Effects on Molecular Conductance //IEEE Transactions on Nanotechnology. – 2009 – Vol. 8, No 1. P. 16–21.
4. Jung Y.C., Cho K.H., Hong B.Y., Son S.Y., Kim D.S., Whang D., Hwang S.W., Yu Y.S., Ahn D. Fabrication and Characterization of Sidewall Defined Silicon-on-Insulator Single-Electron Transistor // IEEE Transactions on Nanotechnology. – 2008 – Vol. 7, No 5. P. 544–550.
5. Miyaji K., Saitoh M. Hiramoto T. Compact Analytical Model for Room-Temperature-Operating Silicon Single-Electron Transistors With Discrete Quantum Energy Levels // IEEE Transactions on Nanotechnology. – 2006 – Vol. 5, No 3. P. 167–173.
6. Морозов С.В., Новоселов К.С., Гейм А.К. Электронный транспорт в графене // Успехи физических наук. 2008–Т.178. №7.– С.776-780.
7. Rana F. Graphene Terahertz Plasmon Oscillators // IEEE Transactions On Nanotechnology.– 2008.–V.7, №1–P.91-99.

8. Ryzhii M., Ryzhii V. Injection and population inversion in electrically induced p-n junction in graphene with split gates // *J. Appl. Phys.* – 2007. –V.101, P.P.L151–L153.
9. Huang Y., Yin W.-Y., Liu Q.H. Performance Prediction of Carbon Nanotube Bundle Dipole Antennas // *IEEE Transactions On Nanotechnology.*–2008.–V.7, №3–P.331–337.
10. Alam K., Lake R. Role of Doping in Carbon Nanotube Transistors With Source/Drain Underlaps // *IEEE Transactions On Nanotechnology.*–2007.–V.6, №6–P.652–658.
11. Lin A., Patil N., Ryu K., Badmaev A., Acro L.G., Zhou C., Mitra S., Wong H.-S.P. Threshold Voltage and On-Off Ratio Tuning for Multiple-Tube Carbon Nanotube FETs // *IEEE Transactions On Nanotechnology.*–2009.–V.8, №1–P.4–9.
12. Patil N., Deng J., Mitra S., Wong H.-S.P. Circuit-Level Performance Benchmarking and Scalability Analysis of Carbon Nanotube Transistors Circuits // *IEEE Transactions On Nanotechnology.*–2009.–V.8, №1–P.37–45.
13. Zhang M., Chan P.C.H., Chai Y., Tang Z.K. Novel Local Silicon-Gate Nanotube Transistors Combining Silicon-on-Insulator Technology for Integration // *IEEE Transactions On Nanotechnology.*–2009.–V.8, №2–P.260–268.
14. Sarto M.S., Tamburrano A., D'Amore M. New Electron-Waveguide-Based Modeling for Carbon Nanotube Interconnects // *IEEE Transactions On Nanotechnology.*–2009.–V.8, №2–P.214–225.
15. Liu Z., Ci L., Kar S., Ajayan P.M., Lu J.-Q. Fabrication and Electrical Characterization of Densefied Carbon Nanotube Micropillars for IC Interconnection // *IEEE Transactions On Nanotechnology.*–2009.–V.8, №2–P.196–203.
16. Ngo Q., Yamada T., Suzuki M., Ominami Y., Cassell A.M., Li J., Meyyappan M., Yang C.Y. Structural and Electrical Characterization of Carbon Nanofibers for Interconnect Via Applications // *IEEE Transactions On Nanotechnology.*–2009.–V.6, №6–P.688–695.
17. D. Akinwande., Nishi Y., Wong H.-S.P. Carbon Nanotube Quantum Capacitance for Nonlinear Terahertz Circuits // *IEEE Transactions On Nanotechnology.*–2009.–V.8, №1–P.31–36.
18. Огнев А.В., Самардак А.С. Спинтроника: физические принципы, устройства, перспективы // *Вестник ДВО РАН.* 2006. № 4 С.70–80.
19. Sinova J., Culcer D., Niu Q., Sinitsyn N.A., Jungwirth T., MacDonald A. H. Universal Intrinsic Spin Hall Effect // *Physical Review Letters.*–2004.–Vol. 92.–126603.
20. Kato Y.K., Myers R.C., Gossard A.C., Awschalom D.D., Observation of the spin Hall effect in semiconductors // *Science.* – 2004.–Vol. 306.–P. 1910.
21. N. Stern. P., Ghosh S., Xiang G., Zhu M., Samarth N., and Awschalom D. D., Current-Induced Polarization and the Spin Hall Effect at Room Temperature // *Physical Review Letters.*–2006.–Vol.97–126603.
22. Huang B., Monsma D.J., Appelbaum I. Coherent Spin Transport through a 350 Micron Thick Silicon Wafer // *Physical Review Letters.*–2007.–Vol.99. –177209.
23. Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Эпштейн Э.М. Как ток спины переносит. Спинтроника многослойных ферромагнетиков // *Успехи физических наук.* 2008.–№4.–Т.178.–С.433–436.
24. Гуляев Ю. В., Зильберман П. Е., Панас А. И., Эпштейн Э. М. Спинтроника: обменное переключение ферромагнитных металлических переходов при малой плотности тока // *Успехи физических наук.*–2009.–№4.–С.359–368.
25. Ферт А. Происхождение, развитие и перспективы спинтроники // *Успехи физических наук.*–2008.–№12.–Т.178. С.1336–1348.
26. Моргунов Р.Б., Мушенок Ф.Б., Дмитриев А.И., Kazakova O.L., Tanimoto Y. Электронный спиновый резонанс в ориентированных нанопроволоках $\text{Ge}_{0.99}\text{Cr}_{0.01}$ // *Физика твердого тела*, 2009.–Т.51. Вып. 8.–С.1613–1618.
27. Y. Kawata., Tsuchiya Y., Oda S., Mizuta H. Study of Single-Charge Polarization on a Pair of Charge Qubits Integrated Onto a Silicon Double Single-Electron Transistor Readout // *IEEE Transactions On Nanotechnology.*–2008.–V.7, №1–P.617–623.
28. Логосов В.В., Васютин Е.В., Курбацкий В.П., Бабич А.В., Коротун А.В. Одноэлектронные эффекты в точечных структурах // *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии*, 2007.–Т.5.–С.39–74.
29. Bae D., Kim S., Choi Y.-K. Low-Cost and Highly Heat Controllable Capacitorless PiFET (Partially Insulated FET) 1T DRAM for Embedded Memory // *IEEE Transactions On Nanotechnology.*–2009.–V.8, №1–P.100–105.
30. Jeong H., Song K.-W., Park I., Kim T.-H., Lee Y., Kim S., Seo J., Cho K., Lee K., Shin H., Lee J., Park B.-G. New Capacitorless 1T DRAM Cell: Surrounding Gate MOSFET With Vertical Channel (SGVC Cell) // *IEEE Transactions On Nanotechnology.*–2007.–V.6, №3–P.352–357.