

УДК 81+31.15.00+ 29.19.00+539.2

Ю.В. Земцова, С.А. Безносок, М.С. Жуковский

Физико-химические основы создания нанослоевых спинтронных переходов

Ключевые слова: спин электрона, кремний, ферромагнитные материалы, спиновый ток, спиновая электроника.

Вторую половину XX в. без преувеличения можно назвать эрой микроэлектроники. В течение этих 50 лет мир был свидетелем технологической революции, ставшей возможной благодаря цифровой логике и базирующимся на ней информационным технологиям. Однако в любых устройствах, от первого транзистора до современных поражающих своими вычислительными возможностями микропроцессоров, микроэлектроника в основном использует только одно свойство электрона – его заряд. В то же время электрон имеет еще одну, правда, сугубо квантово-механическую характеристику – собственный угловой момент, или спин (и связанный с ним магнитный момент), которая вплоть до недавнего времени не пользовалась особым вниманием разработчиков и исследователей. Сегодня ситуация меняется, и на авансцену выходит новая технология, получившая название «спинтроника» (spintronics – от spin transport electronics или spin-based electronics). Достаточно молодая область современной физики – спиновая электроника, или спинтроника, – притягивает всё больше исследователей многообещающими практическими применениями.

Спинтронный транзистор. Принцип работы.

Спин электрона (собственный момент количества движения) – это внутренняя характеристика электрона, имеющая квантовую природу и не зависящая от движения электрона. Спин электрона может находиться в одном из двух состояний – либо «спин-вверх» (направление спина совпадает с направлением намагниченности магнитного материала), либо «спин-вниз» (спин и намагниченность разнонаправлены) (рис. 1). Обычно электроны в веществе в среднем неполяризованы – электронов со спином вверх и со спином вниз примерно поровну. Орудием спинтроники является ток, создаваемый электронами с однонаправленными спинами (спиновый ток). Для получения достаточно сильного тока необходимо поляризовать спины, упорядочив их в одном направлении (рис. 2). Важно, чтобы еще и время жизни спина (время, в течение которого направление спина не меняется) было достаточно большим для передачи его на нужные расстояния.

В чём секрет повышенного интереса к спинтронике? Во-первых, спиновые приборы будут многофункциональны – они позволят совмещать на одном

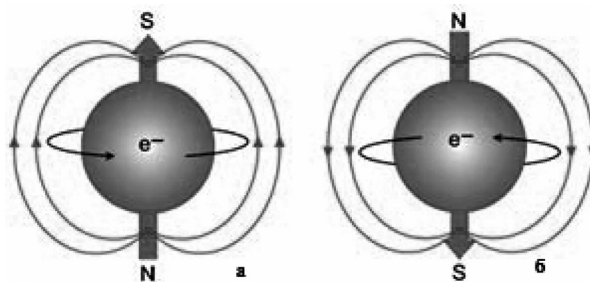


Рис. 1. Спин электрона:
а) «спин-вверх»; б) «спин-вниз»

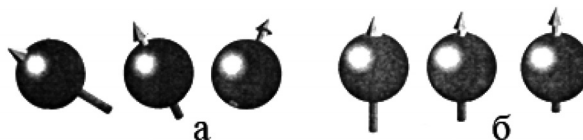


Рис. 2. Возможные направления ориентации спинов:
а) собственные моменты частиц ориентированы хаотично;
б) спины электронов выстроены параллельно

чипе функции накопителя для хранения информации, детектора для ее считывания, логического анализатора для ее обработки и коммутатора для последующей ее передачи к другим элементам чипа [1, р. 840].

Во-вторых, такие устройства будут обладать высокой скоростью реагирования на управляющий сигнал и потреблять значительно меньше энергии, чем устройства традиционной электроники. Это объясняется тем, что переворот спина, в отличие от перемещения заряда, практически не требует затрат энергии, а в промежутках между операциями спинтронное устройство отключается от источника питания. При изменении направления спина кинетическая энергия электрона не меняется, и, значит, тепла почти не выделяется. Скорость же изменения положения спина очень высока: эксперименты показали, что переворот спина осуществляется за несколько пикосекунд [2, р. 323].

Эти преимущества позволят спинтронным устройствам стать основой для ЭВМ нового поколения – квантовых компьютеров. Но чтобы это стало возможно, необходимо создать ключевые элементы «спиновых микросхем» – спиновые транзисторы, т.е.

устройства, в которых можно усиливать, ослаблять или выключать спиновый ток.

В спиновом транзисторе состояния «включен» и «выключен» зависят от направления спинов электронов, участвующих в токе. Любое спин-электронное устройство, в том числе и спиновый транзистор, должно содержать три основных элемента:

1) механизм для электрического инжектирования (проще говоря, «впрыска») спин-поляризованных (то есть выстроенных в выбранном направлении) электронов в полупроводник (будем называть этот механизм «инжектор»);

2) средства для управления спиновым током в полупроводнике (например, приложенное напряжение, заставляющее двигаться электроны);

3) электрическая схема для прецизионного детектирования (измерения) результирующего спинового тока (будем называть ее «детектор»).

Но наличия этих трех кирпичиков недостаточно, чтобы построить конечное устройство. Нужно еще добиться высокой эффективности электрической инжекции спинов в полупроводник и достаточной длины диффузии (перемещения) спина.

Сегодня с уверенностью можно сказать, что создан первый в мире спин-электронный транзистор, удовлетворяющий всем перечисленным выше критериям. Причем он создан на базе кремния, которому пророчили позицию аутсайдера в современной электронике.

Исследователи показали, что кремний уже сейчас может быть использован для совершения многочисленных манипуляций над спином на масштабе в несколько сот микрометров и в течение времени, достаточного для осуществления нескольких тысяч логических операций (десятки наносекунд), тем самым открывая широкую дорогу для спин-электронных систем на базе кремния. Соединив в единую схему сотни или даже тысячи созданных спиновых чипов, можно получить сверхбыстродействующее устройство для обработки информации, по своей эффективности превышающее современные процессоры в десятки раз!

Методика экспериментов вкратце такова. Вначале авторы изготовили слоистую структуру, составленную из слоя ферромагнетика, слоя чистого кремния, затем второго слоя ферромагнетика, но уже другого, и наконец, слоя кремния с примесями. К разным слоям этой структуры прикладывается специально подобранное напряжение, управляющее течением электронов. Поток электронов на входе неполяризован, но после прохождения ферромагнитной прослойки он приобретает поляризацию, т.е. становится спиновым током. Эти электроны попадают в прослойку из чистого кремния, проходят достаточно большую дистанцию, затем попадают во второй ферромагнитный слой и выходят наружу [3].

Эксперименты показали, что при движении через кремний поляризация электронов частично сохраняется. Благодаря этому, изменяя взаимную ориентацию

Параметры связей кремния с ферромагнетиками

Связь атомов	Длина связи, нм	Энергия связи, кДж/моль
Fe – Si	0,239	– 206,49
Co – Si	0,225	– 271,70
Ni – Si	0,225	– 315,59

магнитных полей в двух слоях ферромагнетика, можно включать или выключать спиновый ток на выходе. Это позволяет для осуществления сверхбыстрых логических операций над информацией использовать два устойчивых состояния прибора, при которых ток либо есть (логическая «1»), либо нет (логический «0»), по аналогии с традиционным транзистором, для осуществления сверхбыстрых логических операций над информацией.

На первом этапе при приложенном напряжении неполяризованные электроны инжектируются из алюминиевого эмиттера (источника) в ферромагнитный слой $\text{Co}_{84}\text{Fe}_{16}$. Благодаря спин-зависимому рассеиванию электронов в магнитном слое, электроны с выделенным направлением спина (например «спин-вниз») отсеиваются, так как направление намагниченности слоя $\text{Co}_{84}\text{Fe}_{16}$ не совпадает с направлением спинов. Отобранные электроны с однонаправленными спинами туннелируют через тонкий слой Al_2O_3 . В данном случае туннельный барьер проходят только «горячие» электроны (с энергией, достаточно высокой для преодоления энергетических барьеров), создавая эмиттерный ток (ток источника). «Горячие» электроны нужны для увеличения эффективности прибора.

Пройдя через барьер Шоттки (потенциальный барьер, возникающий на границе металл – полупроводник) в беспримесный монокристаллический слой кремния, электроны занимают свободные места в зоне проводимости полупроводника и под действием приложенного к нему напряжения начинают упорядоченное движение. При этом возникает коллекторный ток (ток на детекторе). После прохождения через 350-микрометровый слой кремния спин-поляризованные электроны детектируются вторым спиновым транзистором [4, p. 295]. Ферромагнитный слой $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ регистрирует спины электронов, которые инжектируются в кремний *n*-типа (то есть кремний, основными носителями тока в котором являются электроны) для увеличения чувствительности детектора (в зоне проводимости кремния *n*-типа есть избыточные электроны, которые усиливают спиновый ток), создавая коллекторный ток. Спиновый ток зависит от относительной намагниченности обоих ферромагнитных слоев.

На рисунке 3 показан механизм работы детектора. В случае параллельного направления намагниченностей в слоях $\text{Co}_{84}\text{Fe}_{16}$ и $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (рис. 3 а) ток выше, чем при антипараллельном направлении намагниченностей (рис. 3 б). Первый режим функционирования

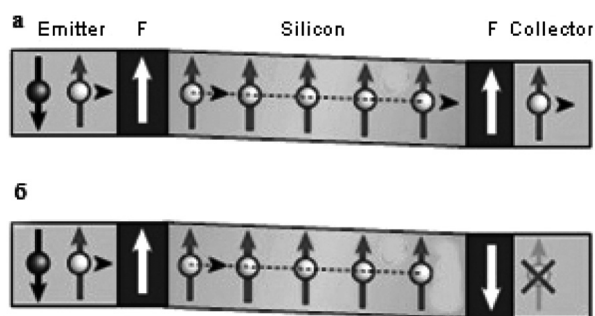


Рис. 3. Механизм работы инжектора и детектора:
 а – слои $\text{Co}_{84}\text{Fe}_{16}$ и $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ намагничены параллельно;
 б – антипараллельно (emitter – источник тока;
 F – первый и второй ферромагнитные слои
 соответственно; silicon – кремниевая прослойка;
 collector – приемник спинового тока)

детектора можно сравнить с футбольным матчем без вратаря: все мячи, посланные в сетку ворот, оборачиваются голом. Второму же режиму соответствует игра с очень хорошим голкипером, отражающим все летящие в ворота мячи.

Элементная база спинтроники. Использование Fe, Co, Ni обусловлено следующими аспектами:

1. Если использовать чистое железо, то на границе с кремнием образуются силициды, которые препятствуют движению электронов (точнее, происходит разупорядочение спинов). При введении Co и Ni кремний в первую очередь взаимодействует с ними, это следует из энергий связи между кремнием и Fe, Co, Ni, указанных в таблице. Эти данные были получены на основании расчетов, проведенных с помощью метода нелокального функционала плотности [5, с. 72–77].

2. Co и Ni являются более слабыми ферромагнетиками, что обеспечивает как бы разность потенциалов и способствует прохождению электронов.

3. Использование Co в качестве эмиттера обуславливается большим числом свободных электронов, чем в атоме Ni.

4. Co и Ni имеют близкие кристаллохимические радиусы с Fe, что обеспечивает большую идеальность образованным твердым растворам.

Следует отметить, что при комнатной температуре транзистор всё же имеет не очень высокую эффективность работы. Хорошие результаты работы прибор показал при температуре $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$ (150 K).

Таким образом, устройства, созданные на основе спинтроники, обещают решить многие и существующие, и ожидаемые в ближайшем будущем проблемы традиционной микроэлектроники: энергозависимость, уменьшение энергопотребления, увеличение плотности логических элементов и скорости обработки данных. Современные устройства микроэлектроники основаны на токе зарядов. Возможно, в будущем будут созданы аналогичные устройства на токе спинов. Представить чистый спиновый ток без тока зарядов можно таким образом. Пусть в одну сторону бегут электроны со спином, ориентированным вверх, а в другую сторону движется столько же электронов со спином вниз. Предполагается, что устройства спинтроники будут иметь большую скорость и меньшую энергию переключения. Эта область нанотехнологий обещает привести к созданию миниатюрных электронных устройств, принципиально отличных от нынешних, обладающих высоким быстродействием, малыми размерами и малым энергопотреблением.

Библиографический список

1. Ohno, H. Toward Functional Spintronics / H. Ohno // Science. – 2001. – V. 291.
2. Žutić, I. Das Sarma S. Spintronics: Fundamentals and applications / I. Žutić, O. Fabian // Rev. Mod. Phys. – 2004. – V. 76.
3. Huang, B. Coherent Spin Transport through a 350 Micron Thick Silicon Wafer / B. Huang, D.J. Monsma, I. Appelbaum // Physical Review Letters 99, 177209 (2007).
4. Appelbaum, I. Electronic measurement and control of spin transport in silicon / I. Appelbaum, B. Huang, D.J. Monsma // Nature. – 2007. – V. 447.
5. Безносюк, С.А. Многоуровневое строение, физико-химические и информационные свойства вещества / С.А. Безносюк, А.И. Потекаев, М.С. Жуковский, Т.М. Жуковская, Л.В. Фомина. – Томск, 2005.