

Спинтроника.

Куда двигаться дальше?

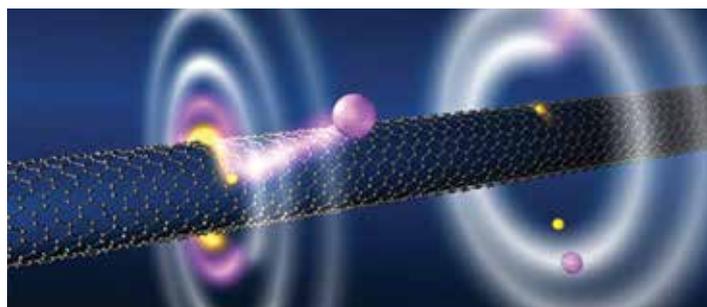


Текст: Евгений Борисов

Введение. Что такое спинтроника?

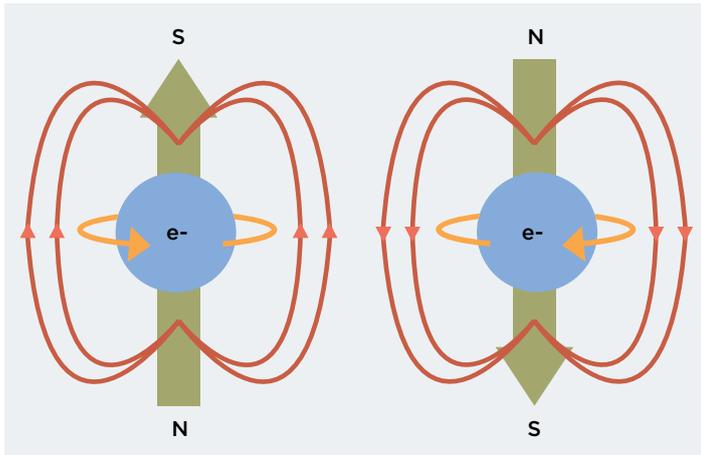
В представлении многих современная электроника основана на использовании эффекта переноса заряда или, проще говоря, на использовании электрического тока. Но искушенный читатель знает, что электроны, создающие ток в электрической цепи, обладают собственным магнитным моментом. До недавнего времени данное свойство в практических целях никак не использовалось, но на рубеже XX-XXI веков появилась новая отрасль науки — магнитоэлектроника или, как теперь принято ее называть, спинтроника (от англ. spintronics — SPIN TRansport electrONICS, то есть «электроника на основе переноса спина»). В ее основу заложено понятие спина электрона. Согласно принципу квантования проекции спина на выбранную ось, электроны разделяют на два типа носителей тока: электроны со спином вверх и электроны со спином вниз ($\frac{1}{2}$ или $-\frac{1}{2}$) рис 1. По сути, в природе имеется уже готовый переносчик двоичной информации, кодирующий в направлении спина либо 1, либо 0.

В наше время спинтроника изучает магнитные и магнитооптические взаимодействия в металлических и полупроводниковых наногетероструктурах, динамику и когерентные свойства спинов в конденсированных средах, а также квантовые магнитные явления в струк-



турах нанометрового размера. Наряду с ранее известными магнетиками по мере развития спинтроники появляются новые: магнитные полупроводники, вещества, в которых можно контролировать магнитные, полупроводниковые и оптические свойства.

Экспериментальная техника спинтроники включает в себя магнитооптическую спектроскопию с высоким (фемтосекундным) временным разрешением, микромеханическую магнитометрию, атомно- и магнитосиловую сканирующую микроскопию субатомного разрешения, спектроскопию ядерного магнитного резонанса и многое другое. Химические, литографические и молекулярно-кластерные технологии позволяют создавать для спинтроники разнообразные наноструктуры с необходимыми магнитными свойствами.



1 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)

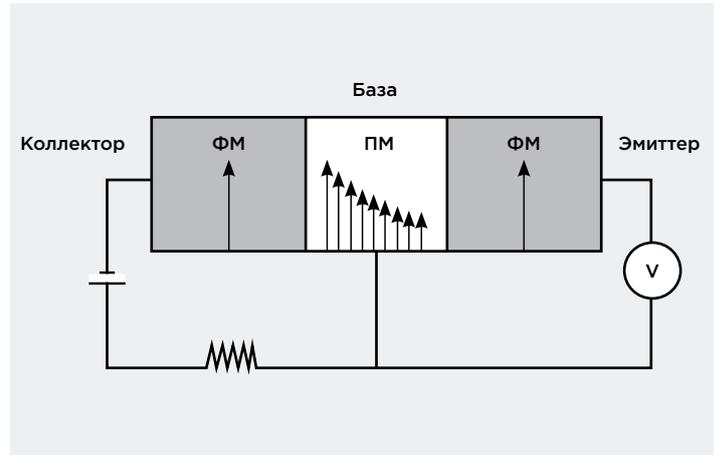
Спинтронная технология обладает многими достоинствами. Одни из важнейших — быстрота и экономичность. Спин электрона можно переключать из одного состояния в другое за много меньшее время, чем требуется на перемещение заряда по схеме, и с меньшими затратами энергии. Плюс к этому, при смене спина не меняется кинетическая энергия носителя, а, следовательно, почти не выделяется тепло.

В совокупности все эти особенности технологии позволяют создавать на базе спина и спиновых токов (поток электронных спинов единой полярности) новые транзисторы, ячейки логики и памяти, которые заменят собой обычные транзисторы в интегральных микросхемах. А это, в свою очередь, позволит придерживаться тенденции к миниатюризации, которая наблюдается на протяжении всей микроэлектронной эпохи. Рассмотрим несколько примеров использования идей спинтроники для изготовления компонентов микроэлектроники.

Магнитные полупроводники и спиновые нанотранзисторы

Одна из основных задач спинтроники — это интеграция магнитных систем в полупроводниковую микроэлектронику. Легкое управление спинами электронов в полупроводниках уже сегодня позволяет создавать два новых класса гибридных материалов: магнитные полупроводники (гибридная структура ферромагнетик/полупроводник) и спин электронные нанотранзисторы.

Широкие перспективы использования наногетероструктур обусловлены тем, что электронные спины полупроводника можно использовать в качестве детектора, реагирующего на изменения магнитного состояния



2 Схема спинового транзистора Джонсона

в ферромагнетике. Так, при инжекции сквозь контакт ферромагнетика и полупроводника, электроны полупроводника приобретают неравновесный спин, содержащий информацию о спине электронов в ферромагнетике. Для определения спиновой ориентации электронов в полупроводнике можно использовать как оптические, так и электрические методы детектирования.

Спиновый транзистор Джонсона

Развитие микроэлектроники способствовало быстрому переходу от двухконтактных спин электронных устройств к трехконтактным системам. Эти системы состоят из двух ферромагнитных слоев, разделенных парамагнитной прослойкой, и проявляют эффект гигантского магнитосопротивления. Такое устройство было названо транзистором Джонсона в честь его изобретателя, который подключил третий контакт к парамагнитному слою **рис 2**.

Если говорить на языке биполярных транзисторов, то транзистор Джонсона состоит из базы (парамагнетик), эмиттера и коллектора (ферромагнетика). Если на коллектор подается потенциал, в цепи эмиттер–база происходит накопление электронов с ориентацией спинов вверх/вниз. Ток коллектора теперь будет зависеть от того, параллелен ли его магнитный момент или антипараллелен намагниченности эмиттера. Ферромагнитный эмиттер в данном случае играет роль поляризатора для накапливающихся спинов. Понятно, что для изменения потенциала в цепи эмиттер–база необходимо приложить внешнее магнитное поле, которое «переключит» вектор магнитного момента либо коллектора, либо эмиттера на противоположное направление.

Гибридная спинтроника

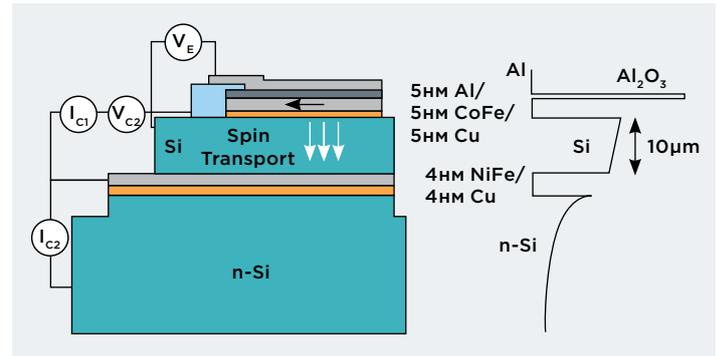
Транзистор Джонсона имеет некоторые ограничения в использовании. Измеряемые значения напряжения очень малы, и увеличить их без привлечения дополнительных устройств не представляется возможным. Основной недостаток подобных структур состоит в том, что все контакты между слоями — омические (так как все компоненты структуры металлические). Другими словами, перед исследователями встал вопрос о создании нового класса структур — гибридных спин электронных устройств. Такие устройства представляют собой интеграцию магнитных материалов с полупроводниками. Ферромагнетики поляризуют спины, а полупроводники позволяют использовать эффекты блокировки напряжения, токовой диффузии и туннелирования.

Транзистор Монсма

Первым гибридным спин электронным устройством был транзистор Монсма, который представлял собой спин вентиль, заключенный между слоями кремния. Два контакта присоединены к слоям кремния (эмиттер и коллектор), а третий — к спин вентилю (база) **рис 3**.

Спин вентиль в данной структуре может состоять из многократно повторяющихся магнитных и немагнитных металлических слоев. В интерфейсах между кремнием и металлом формируются барьеры Шоттки, которые поглощают напряжения смещения, приложенные между парами контактов. Барьер Шоттки коллектора является обратно смещенным, а эмиттера — с опережающим смещением. Это позволяет инжектировать неполяризованные «горячие» электроны от полупроводникового эмиттера в металлическую базу с энергией выше энергии Ферми. Возникает вопрос: смогут ли горячие электроны пройти сквозь спин вентиль и сохранить достаточно энергии для преодоления барьера Шоттки коллектора (в противном случае они остаются в базе и перемещаются во внешнюю цепь)? Изменяя магнитную конфигурацию базы, можно установить, сколько энергии теряют «горячие» электроны при проходе сквозь базу. Если магнитные моменты смежных слоев спин вентиля выстроены антиферромагнитно, то оба типа спинов испытывают одинаковое рассеивание на магнитных слоях. Если к спин вентилю приложить внешнее магнитное поле, которое выравнивает все магнитные моменты слоев, то один тип спинов (спины вниз или «минорные») рассеивается сильно, в то время как второй (спины вверх или «мажорные») проходит без рассеивания через всю магнитную структуру. Плотность таких электронов в зависимости от расстояния показана на **рис 4**.

Таким образом, видно, что при ферромагнитном выстраивании магнитных моментов большее число спинов с энергией выше энергии барьера коллектора проходит

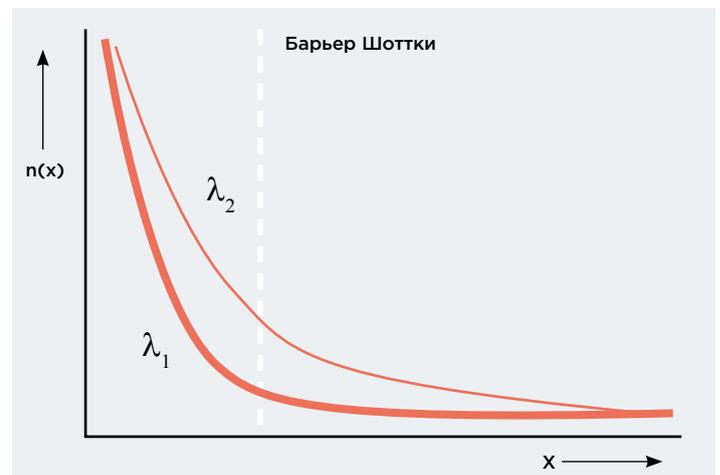


3 Спин вентильный транзистор

через базу. То есть, как и в случае с транзистором Джонсона, мы имеем дело с транзистором, электрическими характеристиками которого можно управлять, меняя магнитное поле. Но в транзисторе Монсма рабочее напряжение и чувствительность к магнитному полю гораздо выше, что сильно расширяет его практическое использование. Транзистор Монсма стал важным шагом в эволюции спинтронике. Это первая комбинация спин электронных устройств с полупроводниками. Следует заметить, что полупроводники используются только для создания энергетических барьеров и экранирования спин зависимой части устройства от электрических полей. Для раскрытия всего потенциала гибридных устройств необходимо задействовать и полупроводниковые слои в процессе спин зависимого транспорта.

SPICE-транзистор

Новый шаг в спинтронике — создание SPICE-транзистора (spin-polarized-injection current emitter transistor), т.е. транзистора с инжектированием спин



4 Плотность состояний для «мажорных» спинов «горячих» электронов, энергия которых выше, чем энергия барьера Шоттки, как функция местоположения в базе. Толстая линия соответствует антиферромагнитному состоянию спин вентиля, а тонкая — ферромагнитному

поляризованного тока эмиттера в электрически экранированную область устройства рис 5.

В итоге получено устройство с предварительным усилением мощности. Электрическими характеристиками SPICE-транзистора можно управлять, меняя внешнее магнитное поле. Дизайн SPICE-транзистора может быть разным. К примеру, межфазные границы эмиттера и коллектора могут быть реализованы p-n-переходами, барьерами Шоттки либо спин туннельными переходами.

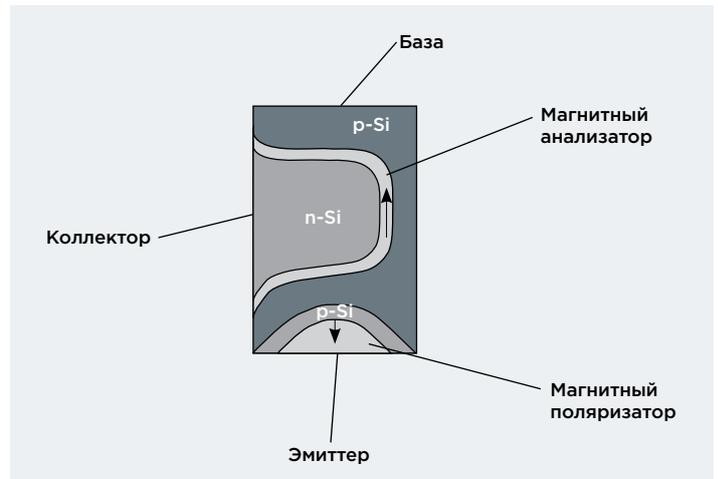
Спин полевой транзистор Датта-Даса (spin-field-effect transistor — SFET)

В 1990 году Суприйо Датта (Supriyo Datta) и Бисуоджит Дас (Biswajit Das) рассмотрели возможность создания спинового полевого транзистора, основанного на релятивистском эффекте. Устройство имеет конструкцию, подобную обычному полевому транзистору с контактами истока и стока (ферромагнетики) и затвором (полупроводник). Спин поляризованные носители покидают исток со спинами, параллельными намагниченности ферромагнетика, и прецессируют при движении благодаря эффекту Рашба рис 6.

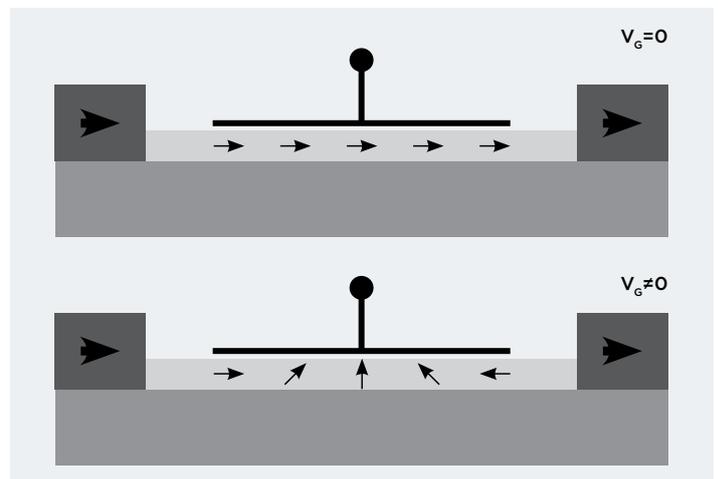
При этом электроны должны двигаться со скоростью, составляющей 1% от скорости света в вакууме. При достаточной величине напряженности магнитного поля (скорость движения электронов в данном случае весьма существенна) спины электронов изменяют ориентацию на противоположную. В результате сопротивление канала возрастает и ток уменьшается. При варьировании потенциала на затворе можно изменять проводимость устройства. Данное устройство ведет себя как обычный полевой транзистор с той особенностью, что дифференциальная намагниченность его контактов (и, следовательно, его электрических характеристик) чувствительна к внешнему магнитному полю.

Перспективы развития

Потенциал спинтроники не исчерпывается уже разработанными и освоенными технологиями, описанными выше. Несмотря на то, что работы в этом направлении ведутся уже более двух десятков лет, существует очень много нерешенных научных и технических проблем. Например, сейчас для изменения намагниченности участка ферромагнетика используется магнитное поле. Так как мы умеем создавать магнитное поле только при помощи электрического тока (постоянные магниты не в счет), то встает проблема локализации этого магнитного поля в ограниченном участке пространства. Чем меньше этот участок, тем более высокую плотность хранения информации на магнитном носителе можно получить (конечно, остаются еще вопросы подбора со-



5
SPICE-транзистор



6
Принцип действия спин полевых транзисторов SFET

ответствующих магнитных материалов). Сравнительно недавно сотрудниками Лабораторий физики твердого тела (Цюрих) и Стэнфордского университета был поставлен эксперимент, который показывает возможность изменения намагниченности материала при помощи потока электронов с определенным спином (про такие электроны говорят, что они спин поляризованы). При помощи фотоэмиссии из полупроводникового катода, вызванной поляризованным светом, был получен пучок спин поляризованных электронов. Этот пучок был пропущен через магнитную пленку толщиной несколько нанометров. При пролете электронов через пленку спин электронов изменяется (это явление называется прецессией). Так как ничто в природе не проходит бесследно, то и спины электронов в магнитной пленке также изменяются, что и означает изменение намагниченности вещества. Если число пролетевших электронов сравнимо с количеством атомов вещества, то изменение намагниченности пленки будет весьма заметно. Эффект может быть использован как для записи информации, так и для считывания (при меньшей интенсивности пуч-

ка электронов). Потенциально данная технология может обеспечивать скорости перемагничивания (то есть фактически чтения-записи информации) до десятков гигагерц, но до этого исследователям придется пройти еще очень длинный путь.

Другой интересный эффект состоит в получении чисто спинового потока электронов без переноса заряда. В эксперименте были сформированы два встречных потока электронов с противоположно направленным спином. Этот удивительный эффект достигнут при помощи двух импульсных поляризованных лазеров, частота одного из которых вдвое меньше, чем другого. Таким образом, достигнута передача спинового заряда без наличия разности потенциалов. Пока это явление наблюдается на расстояниях порядка нескольких десятков нанометров, но дальнейшие исследования в этом направлении продолжаются.

Одна из проблем спинтроники связана с используемыми материалами. Дело в том, что для спинтроники необходимы ферромагнетики, магнитные свойства которых и вызывают к жизни разнообразные эффекты с участием спинов электронов. Но ферромагнетики являются металлами, а современная электроника основана на полупроводниках. Именно свойства полупроводников позволяют усиливать электрический ток в транзисторах — в металлах такой эффект невозможен. Поэтому для того, чтобы создать эффективное устройство, которое использует и спин, и заряд электрона, необходим ферромагнетик, являющийся полупроводником. На первый взгляд, задача неразрешимая — что-то вроде соленого сахара или сухой воды. Но нет преград для пытливых умов ученых.

В Северо-Западной тихоокеанской национальной лаборатории (США) был создан новый полупроводник, который не теряет своих магнитных свойств даже при комнатной температуре. Это вещество представляет собой оксид титана с примесью кобальта и выращивается в виде нанометровых пленок методом молекулярной эпитаксии. В глубоком вакууме пучки атомов в нужном соотношении направляются на кристаллическую поверхность, где формируют необходимую кристаллическую структуру. К сожалению, данный метод пригоден

только для создания тонких пленок. Зато по своим свойствам он является весьма заманчивым материалом для создания новых спинтронных устройств. Другой подобный материал — это эпитаксиальная пленка из чередующихся прослоек соединений галлия: GaSb, GaMn. Магнитные свойства данного полупроводника сохраняются вплоть до 130°C, этого достаточно для нужд современной техники.

Еще одним перспективным направлением является использование органических соединений. И в этом направлении есть интересные открытия. В Калифорнийском университете (Риверсайд) синтезировали соединение, которое изменяет свои оптические, электрические и магнитные свойства одновременно, в зависимости от температуры. При температуре около 62°C вещество из прозрачного (в инфракрасном спектре) изолятора-парамагнетика превращается в непрозрачный проводник-диамагнетик. Такие уникальные свойства делают его привлекательным не только для спинтроники, но и для других перспективных направлений, например, фотоники. Правда, рабочая температура перехода несколько высока для использования, но ученые надеются уменьшить ее вариацией состава вещества.

В университете штата Огайо был исследован пластик — тетрацианоэтанид ванадия. Несмотря на свою органическую природу, он имеет и магнитные свойства, сохраняющиеся вплоть до 130°C. Кроме того, пластик гораздо технологичнее, чем другие материалы, что позволит в будущем создавать дешевую пластиковую память.

В перспективе спинтроника позволит осуществлять обработку и хранение информации в рамках одних и тех же устройств, что приведет как к росту быстродействия, так и к снижению энергопотребления. Создание быстродействующей энергонезависимой памяти MRAM поможет создавать компактные устройства, сочетающие большое время автономной работы с высокой производительностью. Интеграция достижений электроники и спинтроники может значительно продлить жизнь закону Мура и раскрыть новые горизонты в развитии современных компьютеров.

В современном мире производства изделий микроэлектроники стабильного и устойчивого положения на рынке может добиться лишь тот, кто не заикливается на решении сиюминутных проблем, а смотрит на перспективы развития отрасли на несколько лет вперед. Чтобы определить, куда же должен быть направлен вектор развития предприятия, очень важно обладать актуальной информацией о современных тенденциях в производстве, ведь будущее создается сегодня.

А вы планируете свое будущее? 