

УДК 004.3

И.Д. ВОЙТОВИЧ*, В.М. КОРСУНСКИЙ*

СПИНТРОНИКА И ЕЕ ВКЛАД В ЭЛЕМЕНТНУЮ БАЗУ ИНФОРМАТИКИ. Ч. 1

*Институт кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины, Киев, Украина

Анотація. У статті описані такі важливі внески спінтроники в елементну базу інформатики, як магніторезистивні зчитувальні голівки й енергонезалежна магніторезистивна оперативна пам'ять, такі основні поняття спінтроники, як спін-поляризований електричний струм, спін-струм, а також явище спін-транспортного перемагнічування.

Ключові слова: магнітний спін-струм, магніторезистивна зчитувальна голівка, магніторезистивна пам'ять, спін-поляризований електричний струм, спін-транспортне перемагнічування.

Аннотация. В статье описаны магниторезистивные считывающие головки, магниторезистивная память, такие основные понятия спинтроники, как спин-поляризованный электрический ток, спин-ток, а также явление спин-транспортного перемагничивания.

Ключевые слова: магнитный спиновый ток, магниторезистивная считывающая головка, магниторезистивная память, спин-поляризованный электрический ток, спин-транспортное перемагничивание.

Abstract. The paper describes such important contributions of spintronics to element base of computer science as magnetoresistive read heads and non-volatile magnetoresistive random-access memory, such basic concepts of spintronics as spin-polarized electric current, spin current and spin-transport phenomenon of reversal magnetization.

Keywords: magnetic spin-current, magnetoresistive read head, magnetoresistive memory, spin-polarized electric current, spin-transport reversal magnetization.

Будущая информатика рождается сегодня

1. Введение

Физики уже свыше 80 лет знают, что электроны проводимости, перемещаясь, переносят не только свой электрический заряд, но и свой спин, с которым связаны собственный магнитный момент и механический момент вращения электрона. Однако электроника свыше 100 лет игнорировала данный факт сначала потому, что не знала об этом, а затем потому, что в обычных (не ферромагнитных) металлах и полупроводниках одновременно перемещается множество электронов с разными случайными ориентациями спина. Поэтому суммарный среднестатистический перенос спина практически равен нулю. И специалисты по электронике просто не замечали ни этот перенос, ни спиновую зависимость его характеристик. Даже в не намагниченных ферромагнитных металлах, в которых магнитные моменты разных доменов сориентированы хаотически, перенос спина был незаметным. Лишь после открытия гигантского, туннельного, колоссального и экстраординарного магниторезистивных эффектов „лед тронулся”. Возник и начал быстро развиваться новый раздел электроники – спинтроника или спиновая электроника (англ. spintronics, spin-electronics).

Специалисты дают разные определения спинтроники. В наиболее широком понимании к спинтронике следует отнести все разделы и направления электроники, в которых учитывается и используется наличие у электронов спина.

Для информатики спинтроника обещает многое. Ведь переворот спина не связан со значительными затратами энергии и происходит очень быстро – за несколько пикосекунд

(10^{-12} с). Кинетическая энергия электрона при изменении направления спина не изменяется, так что это практически не приводит к выделению тепла. Поэтому и ожидают, что спинтронные элементы информатики и построенные из них устройства и системы будут иметь высокое быстродействие при затратах значительно меньшей энергии, чем в обычных электронных элементах и узлах. Наличие у электронов спина позволяет управлять ими с помощью не только электрического, а и магнитного поля, расширяет функциональные возможности спинтронных устройств.

Опубликовано уже немало аналитических статей и книг, посвященных физическим основам и применениям спинтроники [1–7]. Однако рассчитаны они в основном на специалистов в областях физики, материаловедения или на любознательных малоподготовленных читателей. Цель данной статьи – ознакомить с этим новым направлением в электронике специалистов по вычислительной и информационной технике, показать тот вклад, который спинтроника уже внесла в элементную базу информатики, и те реальные перспективы, которые она уже открыла.

Статья состоит из трех частей. В части 1 мы знакомим Вас с такими вкладами спинтроники в наноэлектронную элементную базу информатики, как магниторезистивные считывающие головки и магниторезистивная «универсальная» память, с основными понятиями спинтроники (спин-поляризованный электрический ток и магнитный спин-ток) и с явлением спин-транспортного перемагничивания (СТП) ферромагнетиков. В части 2 мы ознакомим Вас с основанным на использовании СТП вторым поколением магниторезистивной памяти, а также с разными видами спинтронной логики. В части 3 расскажем о вкладе спинтроники в создание нейрокомпьютеров и квантовых процессоров.

2. Магниторезистивные считывающие головки

Строго говоря, почти забытая ферритовая память [8] и вся прежняя «магнитоэлектроника» уже были спинтронными. Но этого в то время еще не понимали. Поэтому первым ощутимым вкладом спинтроники в элементную базу информатики стали магниторезистивные считывающие головки.

Магниторезистивный эффект («магнетосопротивление») заключается в том, что электрическое сопротивление проводника зависит от напряженности магнитного поля, в котором находится проводник. Этот эффект присущ всем веществам. Однако в обычных металлах и полупроводниках его относительная величина не превышает 0,1% и даже в ферромагнитных металлах составляет лишь порядка 1%. Поэтому данное явление практически не применялось.

В конце 80-х и в начале 90-х годов XX в. во многослойных структурах был открыт «гигантский» магниторезистивный (ГМР) эффект: электрическое сопротивление структуры изменялось в магнитном поле уже на много десятков процентов. За это открытие А. Ферту и П. Грюнбергу в 2007 г. присуждена Нобелевская премия по физике ([9, 10] – оригинальные статьи об открытии эффекта). Многослойные структуры получали периодическим напылением в глубоком вакууме ферромагнитных пленок толщиной около 3 нм и хрома толщиной порядка 1 нм. Направление намагниченности ферромагнитных пленок периодически изменяется. Немагнитная прослойка хрома нужна для того, чтобы магнитно «развязать» друг от друга ферромагнитные слои. Эта прослойка должна быть настолько тонкой, чтобы при прохождении сквозь нее электроны не успевали потерять ориентацию своих спинов.

Для объяснения физической причины ГМР эффекта как раз и пришлось учесть наличие и ориентацию спинов у электронов проводимости (рис. 1).

По законам квантовой механики во внешнем магнитном поле спин электрона может иметь лишь две базовые ориентации: в направлении магнитного поля или против него. Эти базовые ориентации принято обозначать «↑» (спин «вверх», собственный магнитный мо-

мент электрона ориентирован вдоль направления магнитного поля) и «↓» (спин «вниз», собственный магнитный момент электрона ориентирован против направления магнитного поля). В «обычных», не ферромагнитных металлах (хром и является таким) электрическое сопротивление не зависит от направления спина электронов проводимости. Другое дело – в ферромагнетиках. В намагниченных областях электроны проводимости с магнитным моментом, ориентированным вдоль направления намагниченности, рассеиваются значительно слабее, чем электроны с магнитным моментом, ориентированным против направления намагниченности. Но важнее то, что концентрация первых (n_{\uparrow}) намного больше концентрации вторых (n_{\downarrow}). В результате отношение $\alpha = \rho_{\downarrow} : \rho_{\uparrow}$ удельных сопротивлений ферромагнетика для электронов проводимости со спином, ориентированным против и вдоль направления намагниченности, может достигать значений порядка 10 и выше.

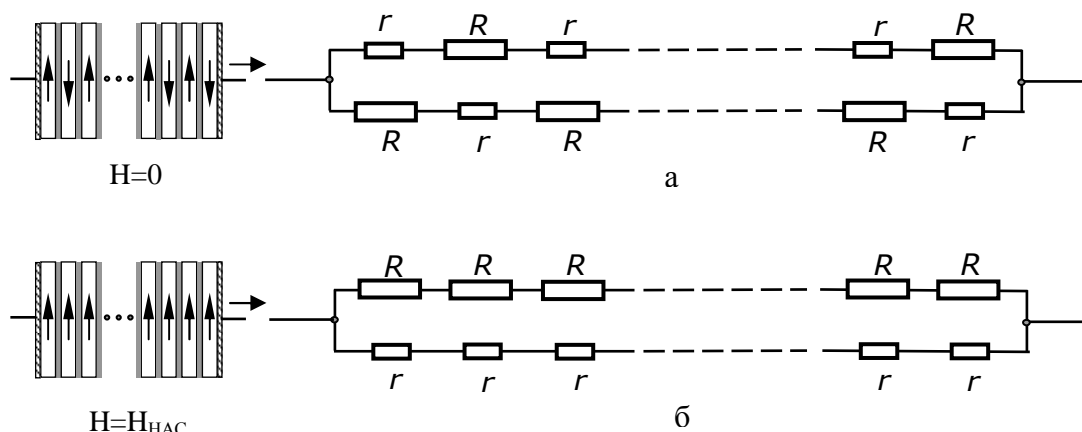


Рис. 1. Эквивалентная схема прохождения электрического тока сквозь структуру из многих нанослоев ферромагнетика и обычного металла: а – при слабом внешнем магнитном поле, б – при наличии внешнего насыщающего магнитного поля

Прохождение электрического тока сквозь многослойную структуру, изображенную на рис. 1а слева, при слабом внешнем магнитном поле можно объяснить в виде эквивалентной электрической схемы, показанной справа. Здесь r – это относительно малое электрическое сопротивление одного ферромагнитного нанослоя для электронов проводимости со спином «вверх», а R – относительно большое электрическое сопротивление такого нанослоя для электронов проводимости со спином «вниз». Электрическим сопротивлением тонкого слоя хрома пренебрегают, так как оно мало. Вертикальными стрелками слева показано направление намагниченности ферромагнитных слоев, серым цветом выделены прослойки хрома. Протекающий ток состоит из двух параллельных «потоков»: один переносится электронами проводимости со спином, ориентированным «вверх», а второй – электронами проводимости со спином «вниз». Расчет схемы на рис. 1а показывает, что при слабом внешнем магнитном поле общее сопротивление

$$R_{\text{общ}} = n(R + r)/4, \quad (1)$$

где n – число ферромагнитных слоев. При наличии сильного внешнего магнитного поля намагниченность всех слоев ферромагнетика ориентируется в направлении этого поля. Эквивалентная электрическая схема приобретает вид, показанный на рис. 1б. В этих условиях общее сопротивление

$$R_{\text{общ}} = \frac{nRr}{R + r}. \quad (2)$$

Если $R = \alpha r$, то при отсутствии магнитного поля $R_{\text{общ}} = nr(\alpha + 1)/4$, а при нали-

чий насыщающего внешнего магнитного поля $R_{Общ} = nr\alpha/(\alpha+1)$, то есть сопротивление уменьшается в $\frac{(\alpha+1)^2}{4\alpha} \approx \frac{\alpha+2}{4}$ раз.

Вскоре был обнаружен и „туннельный” магниторезистивный эффект (англ. tunnel magnetoresistance – TMR). Если в структуре, показанной на рис. 1 слева, вместо прослойки хрома нанести пленки диэлектрика, то физической причиной протекания тока становится квантово-механическое туннелирование свободных носителей заряда сквозь сверхтонкий (0,5–3 нм) потенциальный барьер, созданный для них пленкой диэлектрика. Профиль потенциальной энергии в такой структуре показан на рис. 2. Вдоль горизонтали здесь отложено расстояние в направлении, перпендикулярном ферромагнитным слоям, вдоль вертикали – значение потенциальной энергии электронов проводимости. В левом ферромагнитном слое (ФМ1) показан уровень энергии Ферми для этого слоя (E_{Φ_1}), в правом (ФМ2) – уровень энергии Ферми E_{Φ_2} . Он сдвинут относительно первого вниз на величину, пропорциональную приложенному электрическому напряжению ΔU (e – электрический заряд электрона). В области диэлектрика (Д) уровень потенциальной энергии проходит значительно выше.

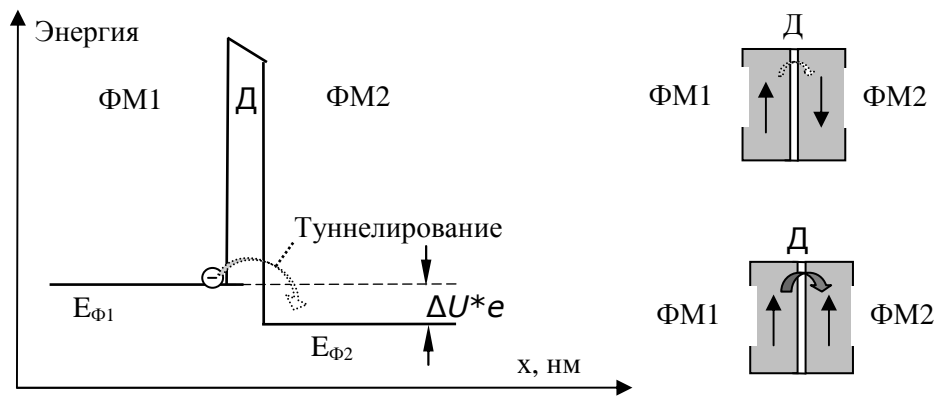


Рис. 2. Профиль потенциальной энергии для электронов проводимости в структуре из нанослоев ферромагнетика (ФМ1 и ФМ2) с пленкой диэлектрика (Д) между ними. Справа показаны 2 случая туннелирования (при отсутствии и при наличии внешнего магнитного поля)

Интенсивность туннелирования в такой структуре оказалась «спин-зависимой»: вероятность туннельного перехода в область, намагниченную противоположно ориентации собственного магнитного момента электрона, оказалась намного меньше, чем в область, намагниченную в одном направлении с магнитным моментом электрона.

Поэтому в слабом внешнем магнитном поле, когда соседние ферромагнитные слои намагничены в противоположных направлениях, сопротивление структуры протеканию электрического тока довольно велико. При наличии сильного внешнего магнитного поля все ферромагнитные слои намагничиваются в направлении этого поля. Интенсивность туннелирования электронов проводимости заметно возрастает, и электрическое сопротивление структуры значительно уменьшается. Например, в туннельных структурах CoFe/MgO/CoFe электрическое сопротивление в сильном магнитном поле уменьшается при комнатной температуре в 6 раз и более [11].

Открытие и исследование гигантского, туннельного, а затем также «колоссального» (англ. Colossal magnetoresistance – CMR) [12, 13] и «экстраординарного» (англ. Extraordinary magnetoresistance) [14, 15] магниторезистивных эффектов позволили создать намного более чувствительные головки для считывания информации с магнитных дисков. Принцип их действия показан на рис. 3. На рис. 3а пунктиром показаны линии магнитной индукции, возникающие вокруг намагниченного участка каждого бита, на рис. 3б – ход

линий магнитной индукции на стыке „битов”, намагненных навстречу северными полюсами, а на рис. 3в – на стыке „битов”, намагненных навстречу южными полюсами. Над местом стыка северных полюсов вектор результирующей магнитной индукции B_{PE3} направлен вверх, а над местом стыка южных полюсов – вниз. Поэтому, когда магнитная дорожка (рис. 3г) пробегает под считывающей головкой, то при изменении направления намагненности битов электрический ток, протекающий сквозь считывающую головку, возрастает. Это является сигналом изменения записи на магнитной дорожке с „0” на „1” или наоборот. Так выполняют считывающие головки с гигантским и туннельным магнетосопротивлением. Соответственно их называют ГМР- и ТМР-головками (или GMR- и TMR).

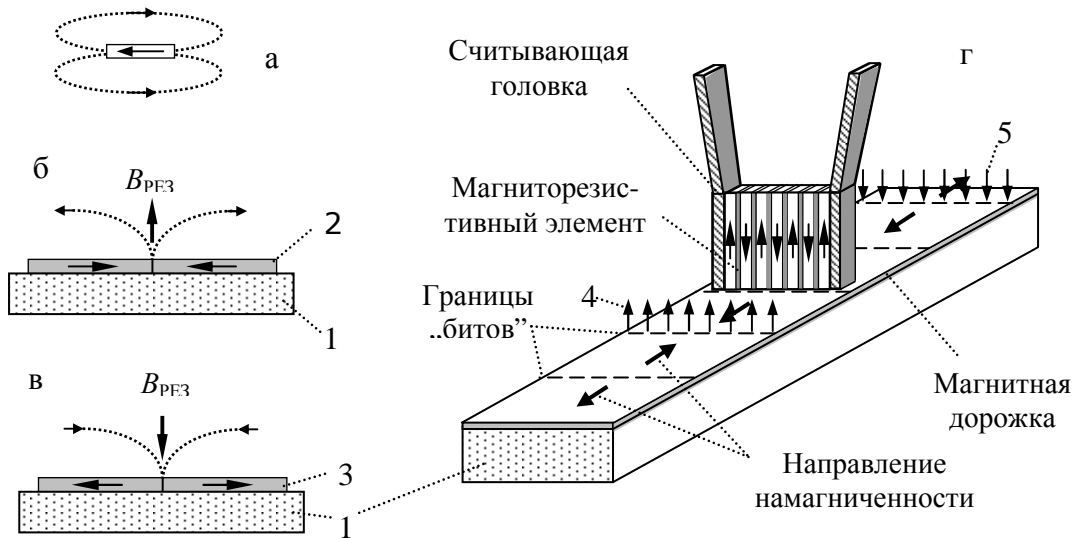


Рис. 3. Принцип работы магниторезистивной головки: 1 – подложка; 2 – участки „битов”, намагненных навстречу северными полюсами; 3 – участки „битов”, намагненных навстречу южными полюсами; 4 – направление магнитной индукции на стыке участков 2; 5 – направление магнитной индукции на стыке участков 3

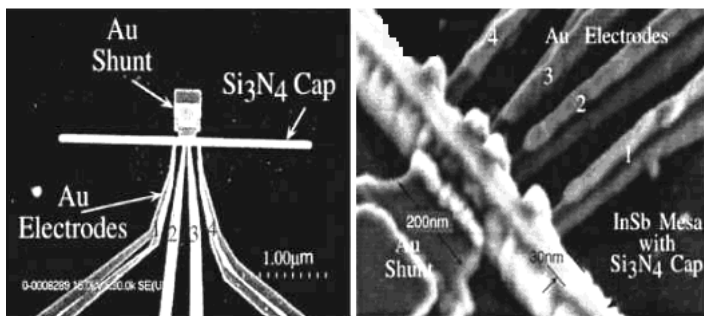


Рис. 4. Считывающая EMR-головка фирмы NEC, снимок в растровом электронном микроскопе; слева – вид в плане, справа – вид под углом 30° в увеличенном масштабе

масштаба в 5 раз. Размер чувствительного элемента головки, изготовленной с помощью нанолитографии, составляет около 200 нм.

Применение магниторезистивных головок значительно ускорило темпы роста плотности записи информации на магнитные диски. Это можно увидеть на графике (рис. 5), где показана динамика увеличения плотности записи информации на магнитные диски, начиная от первого такого накопителя (1956 г.). На протяжении 50 лет плотность в среднем возрастала приблизительно вдвое за каждые 2 года. Но происходило это не совсем равно-

На рис. 4 показаны изображения современной миниатюрной считывающей головки, созданной японской фирмой NEC на основе экстраординарного магниторезистивного эффекта (EMR) в полупроводниковом материале InSb.

Изображения эти получены с помощью растрового электронного микроскопа: слева – вид головки сверху, справа – вид под углом 30° с увеличением

мерно. Накануне перехода к „наноэлектронному” этапу развития элементной базы информатики наблюдалась некоторая задержка роста.

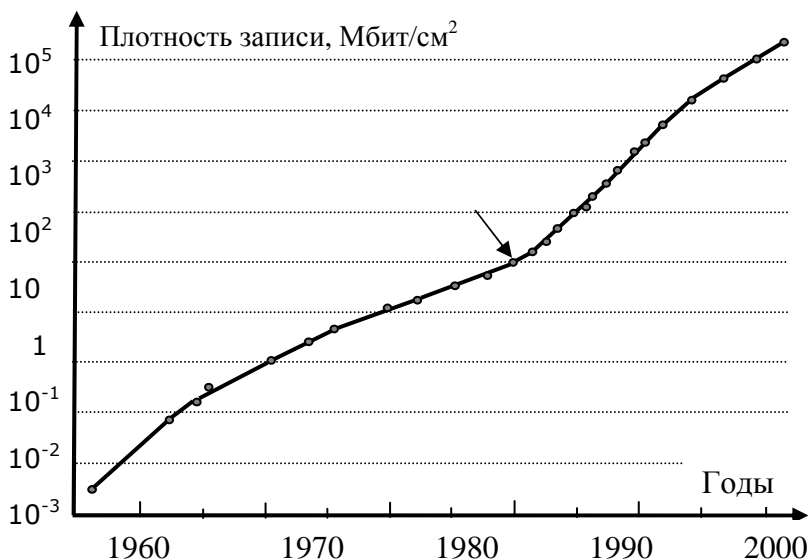


Рис. 5. Рост плотности записи информации на магнитные диски за 50 лет. Стрелкой отмечено время появления магниторезистивных головок

Время появления магниторезистивных головок отмечено стрелкой. Четко видно, что именно эти головки позволили значительно ускорить процесс совершенствования накопителей информации на магнитных дисках и тем самым оказали содействие прогрессу всей информатики.

3. Магниторезистивная оперативная память

Следующим ощутимым вкладом спинтроники в элементную базу информатики стала магниторезистивная оперативная память [16–19]. Элементарной ячейкой такой памяти является многослойная структура (рис. 6), в которой объединены ферромагнитный запоминающий элемент и туннельный магниторезистивный датчик (англ. MTJ cells).

Ферромагнетик запоминающего слоя, хотя и имеет коэрцитивную силу, достаточную для того, чтобы долго сохранять записанную информацию, все же может быть перемагничен достаточно сильным внешним магнитным полем. Его называют „свободным” ферромагнитным слоем (англ. free layer). А магнито жесткий слой выполняет функцию постоянного магнита, его коэрцитивная сила намного больше, и направление намагниченности остается неизменным. Соответственно его называют „фиксированным” или „закрепленным референтным” ферромагнитным слоем (англ. pinned reference layer).

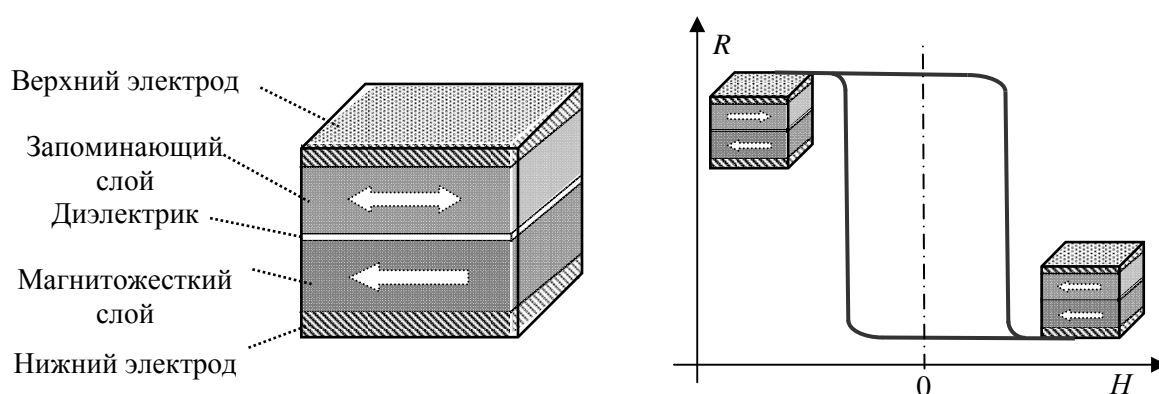


Рис. 6. Слева – устройство элементарной ячейки магниторезистивной оперативной памяти с произвольным доступом; справа – типичная зависимость ее электрического сопротивления от внешнего магнитного поля

На графике справа приведена типичная зависимость электрического сопротивления такой ячейки от напряженности внешнего магнитного поля. Когда запоминающий («свободный») слой намагничен противоположно референтному ферромагнитному слою, то

электрическое сопротивление ячейки велико. Когда же внешнее магнитное поле превышает его коэрцитивную силу и запоминающий слой перемагничивается, то электрическое сопротивление ячейки резко падает и остается низким и после исчезновения внешнего магнитного поля. Это позволяет в любой момент проверить, в каком состоянии („0” или „1”) находится запоминающий элемент ячейки.

Оперативную память, построенную из таких ячеек, в англоязычных источниках называют MRAM (magnetoresistive random-access memory), у нас – магниторезистивным оперативным запоминающим устройством или магниторезистивным ОЗУ (МРОЗУ).

Магниторезистивные ячейки типа показанной на рис. 6 могут быть очень малы (вплоть до 10 нм) и довольно плотно упакованы. Наибольшую плотность упаковки обеспечивает матричная организация, когда ячейки памяти размещают на пересечениях двух взаимно перпендикулярных систем шин-электродов (рис. 7 слева).

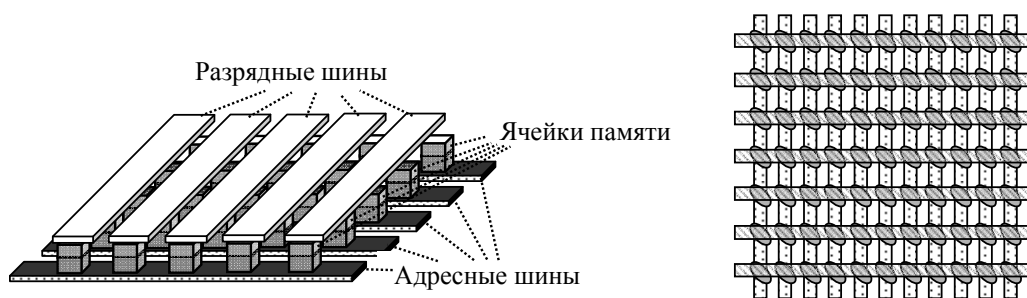


Рис. 7. Слева – организация матрицы магниторезистивного ОЗУ, справа – ориентация оси легкого намагничивания ячеек памяти

Одну из этих систем шин («адресные» шины) подключают к выходам дешифратора адреса слова. Для адресной записи информации в ячейки памяти важна ориентация оси легкого намагничивания запоминающего слоя под углом 45° (рис. 7 справа). Принципиальная схема формирования выходных сигналов в режиме считывания показана на рис. 8.

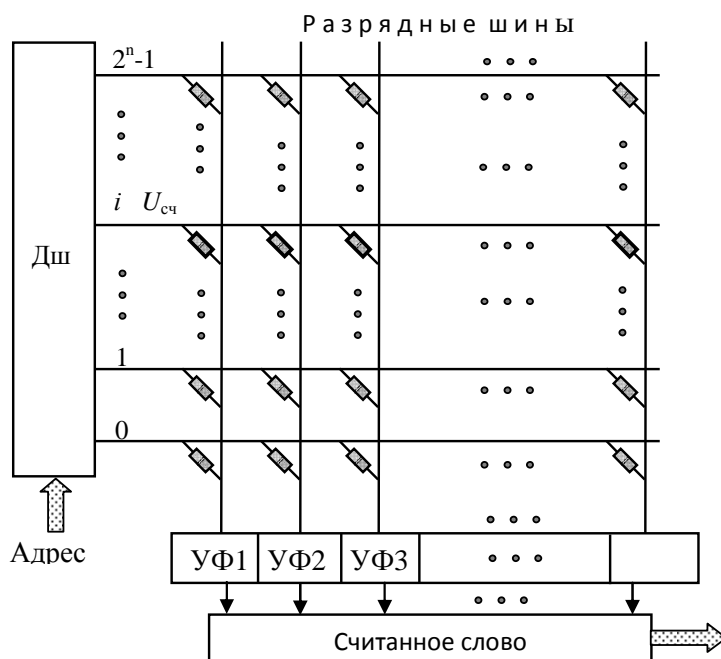


Рис. 8. Принципиальная схема считывания информации с матрицы магниторезистивного ОЗУ

На дешифратор Дш подается n -разрядный двоичный адрес слова, в соответствии с которым Дш „выбирает” одну из 2^n шин, например, i -ю адресную шину и подает на нее напряжение считывания $U_{сч}$. Не выбранные в данном такте шины отсоединяются как от источника напряжения, так и от „земли”. Величина электрического тока, который течет при этом в каждую разрядную шину, зависит от записанной в соответствующий разряд информации. Через те ячейки памяти, сопротивление которых велико, течет меньший ток, а через те, сопротивление которых мало, – больший ток. Каждая разрядная шина соединена со своей схемой усиления и формирования сигнала считыва-

ния (УФ1, УФ2, УФ3, ... , УФm), с выходов которых параллельно считывается записанное в памяти m -разрядное двоичное слово.

Запись информации происходит по разрядам. Принципиальная схема записи показана на рис. 9. На дешифратор Дш подается n -разрядный двоичный адрес, а в регистр записываемого слова – его двоичный код. В соответствии с адресом Дш „выбирает” одну из 2^n шин, например, i -ю адресную шину и открывает соответствующий клапан (например, МДП транзистор). Через него в шину выбранного слова подается импульс электрического тока $I_{\text{зап}}$ от источника тока записи ИТЗ. Направление этого тока определяется тем, какой бит («0» или «1») надо записать.

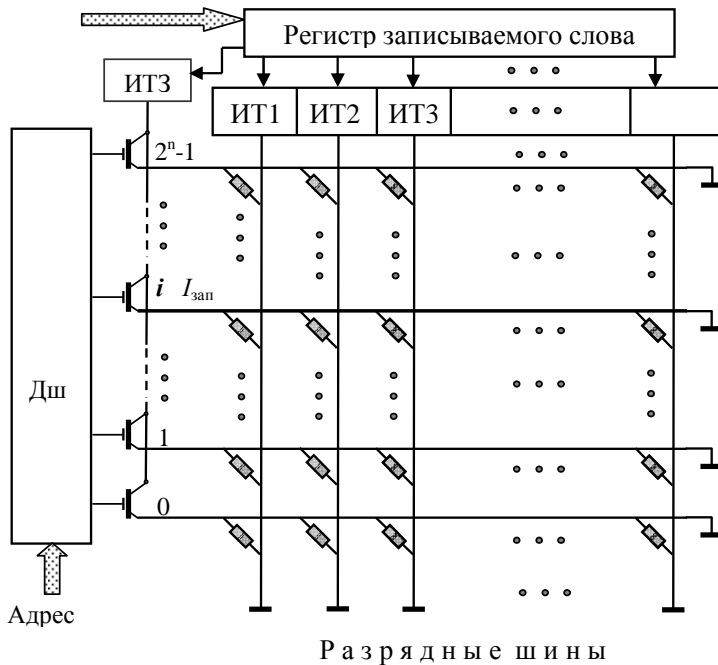


Рис. 9. Принципиальная схема записи информации в матрицу магниторезистивного ОЗУ

Штриховыми линиями условно показаны силовые линии магнитного поля соответствующих токов. На выбранную ячейку памяти эти магнитные поля действуют одновременно. Векторы их напряженности \vec{H}_B и $\vec{H}_{\text{сл}}$ взаимно перпендикулярны. На рис. 10б показан результат сложения этих векторов (\vec{H}_Σ) в месте расположения запоминающего слоя при противоположных направлениях тока (вид сверху). Через \vec{B} обозначено направление намагниченности магнитоупорядоченного слоя ячейки.

Усложняющим обстоятельством является то, что к каждой адресной шине подключены еще $(m-1)$ не выбранных ячеек, а к каждой разрядной шине – еще (2^n-1) не выбранных ячеек. И эти наборы ячеек соединяются между собой через остальные $(2^n-1)(m-1)$ не выбранных ячеек.

Это приводит к тому, что заметная часть токов записи вытекает через „паразитные” связи из выбранных шин.

Чтобы избежать от указанных

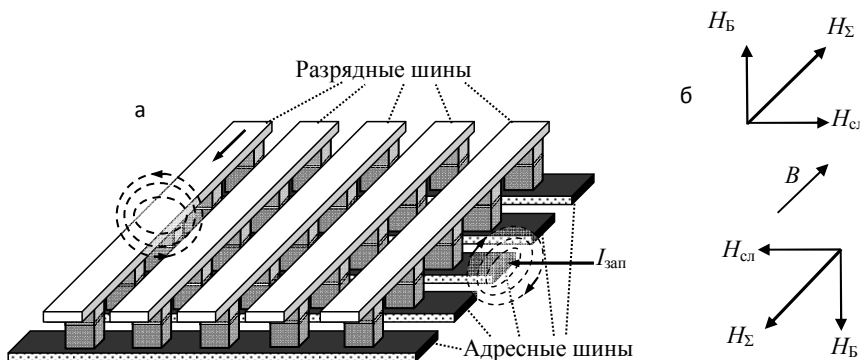


Рис. 10: а – запись информации в выбранную ячейку памяти МРОЗУ, б – векторное сложение магнитных полей при записи "0" и "1"

недостатков, разработчики пошли на усложнение ячеек памяти, включив в каждую из них еще и МДП транзистор, и на гальваническую изоляцию адресных шин записи (рис. 11).

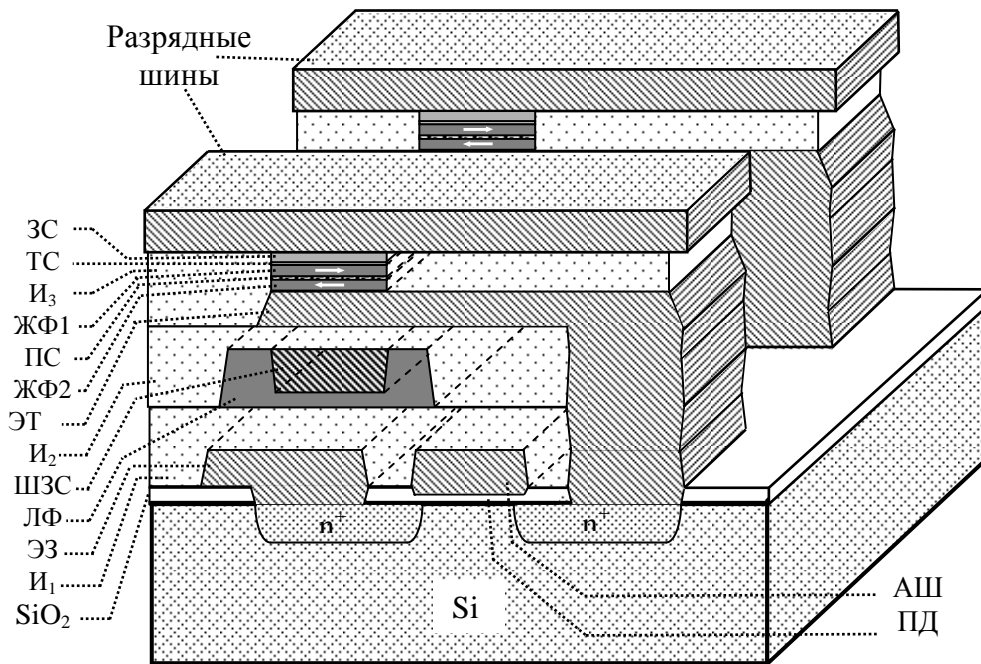


Рис. 11. Оптимизированная структура ячейки магниторезистивного ОЗУ

Опишем структуру оптимизированной матрицы магниторезистивной памяти вместе с основными шагами технологии ее изготовления. Сначала в слое кремния (Si) со слоем окисла (SiO_2) на поверхности формируют области (n^+) истока и стока МДП транзистора. Потом формируют тонкий слой подзатворного диэлектрика (ПД). Наносят слой металлизации, в котором формируют электрод „земли” (ЭЗ), электроды к истокам МДП транзисторов и адресные шины (АШ). Эти шины проходят по поверхности окисла перпендикулярно к плоскости фронтального сечения и одновременно играют роль электродов затвора МДП транзисторов. Поверх первого (нижнего) слоя металлизации наносят первый слой изолятора (I_1) и открывают в нем отверстия для контактов к истокам МДП транзисторов. Наносят слой магнитомягкого ферромагнетика, в котором формируют магнитное ложе (ЛФ). Дальше наносят второй слой металлизации, в котором формируют шины записи слова (ШЗС) и электроды к истокам транзисторов. ШЗС тоже проходят перпендикулярно плоскости фронтального сечения параллельно адресным шинам. Наносят второй слой изолятора (I_2) и открывают в нем отверстия для контактов к истокам МДП транзисторов. После этого наносят третий слой металлизации, в котором формируют электроды (ЭТ) для связи со стоками соответствующих транзисторов. Наносят третий слой изолятора (I_3) и открывают в нем отверстия для формирования магниторезистивных элементов.

Формирование магниторезистивных элементов начинают с нанесения слоя магнитожесткого ферромагнетика (ЖФ2), постоянно намагниченного в плоскости пленки вдоль диагоналей матрицы памяти. Дальше наносят тонкий промежуточный слой (ПС) и слой магнитожесткого ферромагнетика (ЖФ1), постоянно намагниченный в противоположном направлении, или слой антиферромагнетика. В такой структуре хорошо замыкаются магнитные потоки, и области фиксированной намагниченности оказываются особенно стабильными. Промежуточный слой позволяет эффективно снять внутренние механические напряжения. Поверх него наносят очень тонкую пленку изолятора (ТС, обычно MgO), которая образует туннельный переход магниторезистивных элементов. А уже на нее наносят запоминающий слой ферромагнетика (ЗС). С помощью нанолитографии всю эту много-

слоистую структуру (ЗС – ТС – ЖФ1 – ПС – ЖФ2) разделяют на массив отдельных магниторезистивных элементов, которые обычно имеют форму эллипсов, вытянутых вдоль оси легкого намагничивания доменов. В завершение наносят четвертый слой металлизации, в котором формируют разрядные шины.

Описанная структура ячеек памяти усложняет технологию, но значительно упрощает и делает надежным функционирование памяти в режимах записи и считывания. Размеры элементов и шин матрицы памяти зависят от уровня технологии изготовления. В частности, размеры МДП транзисторов сейчас доведены до 100–200 нм. На рис. 12 показан вид сечения элементарной ячейки, полученный с помощью сканирующего туннельного микроскопа с разрешающей способностью 1 нм. На рис. 13 показано полученное в электронном микроскопе изображение магниторезистивной ячейки, сформированной по одной из лучших современных технологий.

В образцах МРОЗУ, выполненных по технологии с уже хорошо освоенной проектной нормой 90 нм, удельная площадь, которую занимает 1 бит, сведена до 1,4 мкм². На площади 5 x 7 мм² размещается 25 Мбит.

Созданы также конструкции, в которых МДП транзистор включается не в каждую ячейку памяти, а используется один на 8–16 ячеек. Это позволяет значительно уменьшить среднюю площадь ячейки.

В режиме записи информации импульсы электрического тока заданных величины и направления подаются на выбранную шину записи слова (ШЗС) и отдельно на каждую разрядную шину.

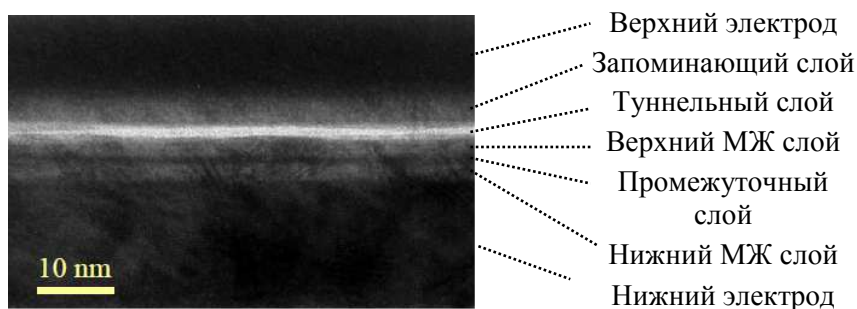


Рис. 12. Сечение ячейки магниторезистивного ОЗУ (увеличение в 1,5 млн раз)

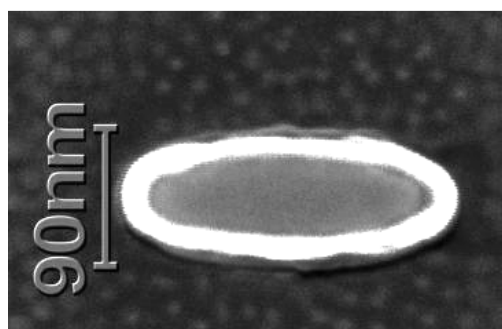


Рис. 13. Магниторезистивная ячейка, сформированная по технологии с проектно-технологической нормой 30 нм.

Снимок сделан в электронном микроскопе

Запись происходит в два этапа: сначала параллельно записываются все „нули” заданного слова. Потом направление тока в ШЗС изменяется на противоположное, и параллельно записываются все „единицы” этого слова. Ложе из ферромагнетика (ЛФ), в которое погружена ШЗС, концентрирует создаваемое током магнитное поле вблизи поверхности проводника. Благодаря этому, напряженность магнитного поля в зоне выбранных ячеек памяти возрастает, а поле „рассеивания”, действующее на ячейки памяти соседних числовых шин, значительно ослабляется.

При появлении магнитного поля записи начинается прецессия магнитных моментов доменов вокруг направления этого поля, которая некоторое время продолжается и после отключения поля. Это так называемый „магнитный звон” („спин-эхо”). Следующую запись нельзя было начинать до тех пор, пока „звон” не закон-

чится. Поэтому период записи не удавалось сделать ниже 2 нс. Однако вскоре был найден способ обхода этого ограничения [20, 21]. Оказалось, что, если ток записи подавать в разрядные шины с определенной задержкой относительно тока, подаваемого в шину записи слова, то от магнитного «звона» можно избавиться. Благодаря этому, продолжительность цикла записи удалось сократить до 500 пс и менее.

В режиме считывания информации на адресную шину (АШ) подается повышенный потенциал, в результате чего все транзисторы этого слова открываются. На входе каждой разрядной шины параллельно тестируются электрические сопротивления соответствующих ячеек памяти и формируется выходной сигнал считывания слова.

Для хранения информации в МРОЗУ потребление электрического тока не требуется. Информация надежно хранится и при отключенном питании. В этом заключается значительное преимущество магниторезистивной памяти перед обычными видами оперативной памяти, в которых информация при отключении питания теряется. Из-за этого при включении компьютеров мы вынуждены некоторое время ждать "загрузки" их программного обеспечения из дисковой памяти в оперативную. При применении МРОЗУ такого нет. Как только компьютер включается, все программы и файлы, задействованные в предыдущем сеансе работы, сразу же готовы к продолжению работы.

Преимуществами перед флеш-памятью является неограниченность числа циклов перезаписи, меньшее энергопотребление в процессе работы, широкий диапазон рабочих температур (от -40 до $+150^{\circ}\text{C}$), повышенная радиационная стойкость и более длительный срок хранения данных – теоретически не ограниченный. Поэтому МРОЗУ заслуживает названия «универсальной» памяти, так как может использоваться и как постоянная, и как оперативная, и как перезаписываемая, и как долговременная энергонезависимая память.

Одна из серийных микросхем МРОЗУ детально описана, например, в [22]. Сейчас серийно выпускаются или готовятся к выпуску намного более совершенные микросхемы магниторезистивной памяти.

Когда размеры ячеек МРОЗУ стали приближаться к 10 нм, для обеспечения стабильности записанной информации пришлось переходить на магнитные материалы с большей коэрцитивной силой и остаточной магнитной индукцией. Такие материалы найдены, однако для записи потребовались настолько сильные магнитные поля, что их трудно получить с помощью пропускания электрического тока сквозь шины. Выход был найден благодаря тому, что перед записью выбранная ячейка памяти путем пропускания сквозь нее импульса электрического тока на короткое время нагревается до такой температуры, при которой коэрцитивная сила запоминающего слоя резко уменьшается. Тогда для записи информации оказались достаточными обычные магнитные поля. Соответствующую технологию записи называют *thermally-assisted magnetic recording (TAR)*, а соответствующие МРОЗУ – *Thermally assisted MRAM (TA-MRAM)* [23–25].

Магниторезистивная память со скоростью считывания и записи порядка 0,5–1 нс стала уже настолько перспективной, что российская компания РОСНАНО создает у себя совместное предприятие для выпуска микросхем такой памяти с французской компанией *Crocus Technology* [26, 27].

Если присмотреться к структуре МРОЗУ на рис. 11 и к описанной технологии ее изготовления, то легко понять, что она хорошо сочетается с технологией производства КМДП схем. Поэтому ведущие мировые фирмы уже сейчас работают над разработкой новых комбинированных микросхем КМДП/МРОЗУ с объемной интеграцией, в которых «на первом этаже» (под поверхностью и на поверхности кристалла кремния) формируются КМДП логические схемы и процессорные блоки, а над ними, «на втором этаже» того же кристалла, формируется быстрая энергонезависимая магниторезистивная память. Расстояния между логикой и оперативной памятью становятся кратчайшими, что позволяет повысить системное быстродействие. Наличие «встроенной» энергонезависимой оперативной

памяти значительно расширяет возможности программной настройки и перенастройки логики и процессорных блоков на нужные режимы работы.

Появилась возможность реализации новых адаптивных архитектур процессоров на кристалле, их «специализации» под нужды конкретных пользователей [28–31].

4. Спин-поляризованный электрический ток и спин-ток

Объяснение физических механизмов магниторезистивных эффектов, их детальное исследование и практика применения в магниторезистивных считывающих головках и для построения МРОЗУ привели к формированию нового понятия „спин-поляризованного” электрического тока. Это – электрический ток, который одновременно с электрическим зарядом переносит и спин. Такой ток характеризуют „степенью спин-поляризации” или просто „степенью поляризации”:

$$P = \frac{i_{\uparrow} - i_{\downarrow}}{i_{\uparrow} + i_{\downarrow}} * 100\% , \quad (3)$$

где i_{\uparrow} – составляющая электрического тока, которая переносится электронами со спином, ориентированным «вверх» (их магнитный момент параллелен магнитному полю), i_{\downarrow} – составляющая, которая переносится электронами со спином, ориентированным «вниз», $i = i_{\uparrow} + i_{\downarrow}$ – суммарный электрический ток. Степень спин-поляризации может быть как положительной (когда $i_{\uparrow} > i_{\downarrow}$), так и отрицательной (при $i_{\uparrow} < i_{\downarrow}$). Когда электрический ток переносится лишь электронами со спином, ориентированным «вверх», $P = 100\%$, а когда лишь электронами со спином, ориентированным «вниз», то $P = -100\%$. В ферромагнитных металлах типа железа, кобальта, никеля степень спин-поляризации при комнатной температуре составляет 10–50%.

В дальнейшем стало формироваться и понятие „спин-тока” или «спинового тока». До сих пор его называли «спиновым транспортом» (англ. spin transport) и избегали давать определение, аналогичное определению электрического тока. Мы (и не только мы, см., например, монографию [32]) считаем, что уже пришло время ввести понятие спин-тока и определить его как суммарный спин, который переносится через поперечное сечение проводника в единицу времени:

$$i_s = \frac{\Delta S}{\Delta t} . \quad (4)$$

Для современных применений спинтроники в первую очередь важным является то, что одновременно со спином переносится и магнитный момент. Поэтому более важным для практики является понятие магнитного спин-тока, который определяется как магнитный момент, переносимый через поперечное сечение проводника за единицу времени:

$$i_{MS} = \frac{\Delta M}{\Delta t} . \quad (5)$$

Здесь ΔM – магнитный момент, переносимый через поперечное сечение проводника за время Δt . Поскольку единицей магнитного момента в системе СИ является «Дж/Тл», то единицей магнитного спин-тока является «Дж/(Тл*с)» или «Вт/Тл».

Можно вывести соотношение между спин-поляризованным электрическим током i со степенью поляризации P и соответствующим ему магнитным спин-током i_{MS} . В самом деле, ток i_{\uparrow} означает, что через поперечное сечение проводника каждую секунду проходят

$$n_{\uparrow} = -\frac{i_{\uparrow}}{e} \quad (6)$$

электронов с магнитным моментом, ориентированным вдоль магнитного поля (e – электрический заряд электрона, а знак «минус» означает, что поток электронов противоположен направлению тока). Каждый из них переносит магнитный момент μ_B (так называемый магнетон Бора). Поэтому электрическому току i_{\uparrow} соответствует магнитный спин-ток

$$i_{MS\uparrow} = n_{\uparrow}\mu_B = -\frac{i_{\uparrow}}{e}\mu_B. \quad (7)$$

Аналогично, электрическому току i_{\downarrow} соответствует магнитный спин-ток

$$i_{MS\downarrow} = -\mu_B n_{\downarrow} = \frac{i_{\downarrow}}{e}\mu_B. \quad (8)$$

Суммарный магнитный спин-ток, соответствующий спин-поляризованному току $i = i_{\uparrow} + i_{\downarrow}$, равен

$$i_{MS} = i_{MS\uparrow} + i_{MS\downarrow} = -\frac{i_{\uparrow} - i_{\downarrow}}{2e}. \quad (9)$$

Из формулы (3) следует, что $i_{\uparrow} - i_{\downarrow} = iP/100\%$. Получаем следующее соотношение между спин-поляризованным электрическим током i со степенью поляризации P и соответствующим ему магнитным спин-током i_{MS} :

$$i_{MS} = \frac{-i\mu_B P}{e * 100\%}. \quad (10)$$

Если подставить известные значения e и μ_B , то в системе СИ получаем

$$1,7254 * 10^4 i_{MS} = -i P / 100\%, \quad (11)$$

где электрический ток задают в амперах, а магнитный спин-ток – в единицах «Вт/Тл».

Спин-поляризованный электрический ток переносит одновременно и электрический заряд, и спин. А возможен ли „чистый” спин-ток, который переносит только спин, но не переносит электрический заряд? Один из вариантов получения такого тока показан на рис. 14. Это изображение ферромагнитной структуры в плане. Светло-серым цветом показаны участки «свободного» ферромагнетика. Более темные квадратики – это участки «фиксированного» ферромагнетика, нанесенные поверх «свободного». Между ферромагнитными слоями созданы туннельные переходы из сверхтонкого диэлектрика.

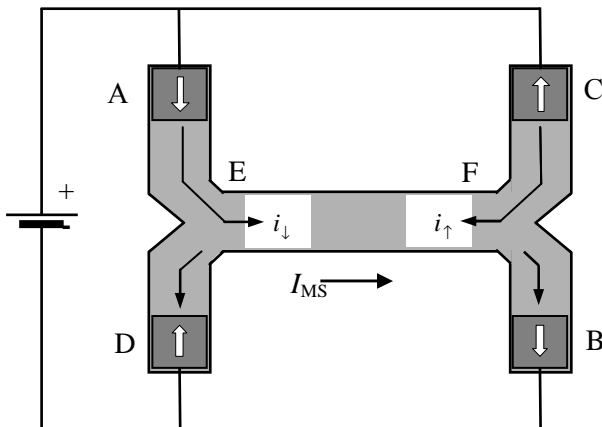


Рис. 14. Схема пропускания через участок EF "чистого" спин-тока: А, В, С, D – магнитные туннельные переходы

Направления фиксированной намагниченности показаны белыми стрелками. Если на магнитные туннельные переходы подать электрическое напряжение, то сквозь них течет электрический ток: i_{\downarrow} –

от участка А к участку В и i_{\uparrow} – от участка С к участку D, так как для этих токов туннель-

ные переходы „открыты”. А вот для тока i_{\downarrow} от участка А к участку D туннельный переход закрыт (из-за противоположной намагниченности участка D). Аналогично закрыт туннельный переход к участку В для тока i_{\uparrow} от участка С. Поскольку все элементы схемы идентичны, то по абсолютной величине эти токи одинаковы, но противоположно направлены ($i_{\uparrow} = -i_{\downarrow}$; $|i_{\uparrow}| = |i_{\downarrow}| = i$). Поэтому на участке EF суммарный электрический ток равен нулю ($i_{\uparrow} + i_{\downarrow} = 0$). А вот спин-токи сонаправлены. Току i_{\uparrow} соответствует магнитный спин-ток $i_{MS\uparrow} = -\frac{i_{\uparrow}}{e}\mu_B$, а току i_{\downarrow} – спин-ток $i_{MS\downarrow} = \frac{i_{\downarrow}}{e}\mu_B$. Суммарный магнитный спин-ток (если считать направление направо положительным)

$$i_{MS} = i_{MS\uparrow} - i_{MS\downarrow} = -\frac{i}{e}\mu_B. \quad (12)$$

Следовательно, через участок EF протекает „чистый” спин-ток, который переносит магнитный момент от F к E, но не переносит электрический заряд.

Рассмотрим ситуацию с другой стороны. Поскольку на участке EF электрический ток равен нулю, то от туннельного перехода А электрический ток течет в туннельный переход D. Электроны движутся в противоположном направлении. Из туннельного перехода D в участок AD проходят электроны с магнитными моментами, направленными в основном вверх, а через туннельный переход А из этого же участка выходят электроны с магнитными моментами, направленными в основном вниз. В результате в окрестности точки E концентрация электронов со спином «вверх» возрастает, а концентрация электронов со спином «вниз» уменьшается. Аналогичные, но противоположные, процессы происходят и на участке BC. В результате в окрестности точки F концентрация электронов со спином «вверх» уменьшается, а концентрация электронов со спином «вниз» возрастает. Это приводит к тому, что от точки E к точке F происходит диффузия электронов со спином «вверх», а в противоположном направлении диффундируют электроны со спином «вниз». Отсюда следует вывод: „чистый” спин-ток возникает тогда, когда в ферромагнитном проводнике появляется перепад или градиент концентрации спин-ориентированных электронов.

Разность в концентрации спин-ориентированных электронов по аналогии с понятием электродвижущей силы (ЭДС) можно назвать „спин-движущей силой” (СДС). Как и ЭДС, СДС может стационарно поддерживаться лишь за счет работы какой-то „сторонней силы”. В примере на рис. 14 СДС поддерживается за счет внешнего источника напряжения и протекания электрического тока через туннельные контакты А, В, С, D.

Приведем еще один интересный пример возникновения СДС (рис. 15).

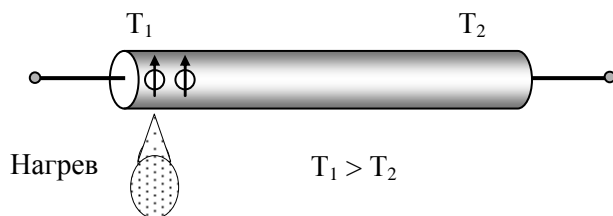


Рис. 15. Возникновение спин-движущей силы и спин-тока в ферромагнитном проводнике при нагревании одного из его концов

Если взять намагниченную ферромагнитную палочку и нагреть один ее конец, то диффузия электронов с нагретого конца будет активной, чем диффузия с холодного конца. В обычном проводнике это приводит к возникновению термо-ЭДС. Но в ферромагнитном проводнике магнитные моменты электронов ориентированы преимущественно в направлении намагниченности. Поэтому во

время диффузии электронами переносится не только электрический заряд, но и спин. В результате возле холодного конца концентрация электронов со спинами, ориентированными

ми «вверх», повышается. В силу этого, кроме термо-ЭДС, возникает еще и термо-СДС. В стационарных условиях она поддерживается за счет энергии источника тепла и устанавливается на таком уровне, чтобы спин-ток, вызванный термо-СДС, в точности соответствовал диффузионному потоку электронов из нагретого конца к холодному.

5. Спин-транспортное перемагничивание

Тот факт, что при протекании спин-поляризованного электрического тока одновременно происходит перенос спинов и магнитных моментов, уже использован при разработке МРОЗУ 2-го поколения. Рассмотрим сначала перемагничивание «свободного» ферромагнитного слоя путем пропускания спин-поляризованного электрического тока в симметричной структуре, показанной на рис. 16.

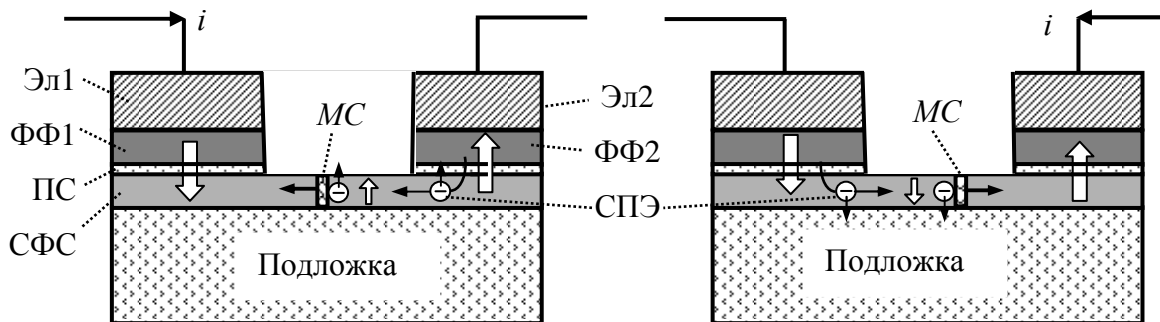


Рис. 16. Схема перемагничивания «свободного» ферромагнитного слоя при пропускании спин-поляризованного электрического тока

Она состоит из нанесенного на подложку «свободного» ферромагнитного слоя (СФС), на левый и правый концы которого нанесены участки «фиксированного» ферромагнитного слоя. Слева этот слой (ФФ1) постоянно намагничен вертикально вниз, а справа (ФФ2) – вертикально вверх. Это показано белыми стрелками. Между «свободным» и «фиксированным» слоями нанесен тонкий промежуточный слой (ПС). Все слои – электропроводящие. Над участками «фиксированного» ферромагнитного слоя сформированы электроды (Эл1 и Эл2). Если со стороны электрода Эл1 пропускать электрический ток i (рис. 16 слева), то отрицательно заряженные электроны будут двигаться навстречу – от электрода Эл2 к электроду Эл1. Большинство спин-поляризованных электронов (СПЭ), выходящих из электрода Эл2 и из слоя ФФ2, имеют магнитный момент, направленный вверх. Дойдя до междоменной стенки (МС), они взаимодействуют с магнитными моментами ферромагнетика в этом месте, стараясь повернуть их вверх. И если плотность тока выше некоторого порога и электронов с ориентированными вверх магнитными моментами накапливается достаточно много, то магнитные моменты атомов ферромагнетика поворачиваются тоже вверх. В результате этого близлежащая область «свободного» ферромагнитного слоя намагничивается вверх. Физически это выглядит, как движение влево междоменной стенки МС.

Если же пропускать электрический ток i со стороны электрода Эл2 (рис. 16 справа), то спин-поляризованные электроны (СПЭ), выходящие теперь из ФФ1, имеют магнитный момент, направленный вниз. В результате этого область СФС, близлежащая к междоменной стенке, перемагничивается также вниз. Физически это выглядит, как движение междоменной стенки (МС) вправо.

Такой способ перемагничивания на английском языке называют „spin-torque-transfer” (STT) или Spin Momentum Transfer (SMT). Мы называем его „спин-транспортным перемагничиванием” (СТП).

Перемагничивание методом СТП возможно также при другой геометрии (рис. 17). В этом случае «фиксированный» ферромагнитный элемент (ФФЭ) имеется только возле электрода Эл2, а со стороны электрода Эл1 «фиксированный» ферромагнитный элемент отсутствует. Пусть сначала СФЭ намагничен вниз, и электрическое сопротивление магниторезистивной ячейки велико (состояние „1”). Если сквозь ячейку пропустить электрический ток I_{30} , превышающий критическую величину I_{K0} (рис. 17 а, в), то электроны, выходящие из ФФЭ, переносят вверх магнитный момент, ориентированный вверх. И «свободный» ферромагнитный элемент СФЭ перемагничивается в состояние „0”. При достаточной силе тока это может произойти за время порядка 1 нс. Достигнуто и рекордное время СТП-100 пс [33]. Если ток I_{30} пропускать сквозь ячейку в состоянии „0”, то состояние ячейки не изменится, так как магнитные моменты в СФЭ уже ориентированы вверх.

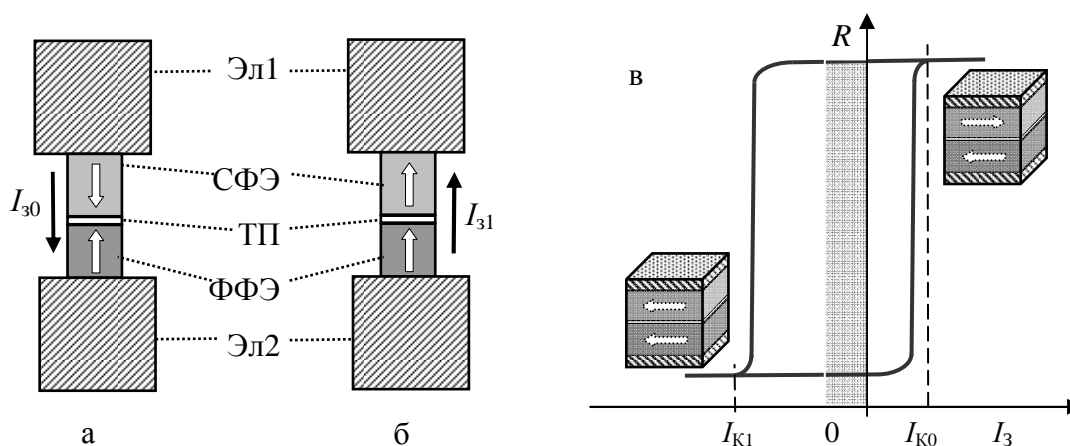


Рис. 17. Схема перемагничивания «свободного» ферромагнитного элемента СФЭ: а – в состоянии „0”; б – в состоянии „1” методом СТП; в – зависимость электрического сопротивления магниторезистивной ячейки от величины пропускаемого сквозь нее тока

Для записи „1” в ячейку, которая находится в состоянии „0”, через нее пропускают ток I_{31} (рис. 17б). Электроны, которые в этом случае выходят из электрода Эл1, имеют магнитные моменты, ориентированные как вверх, так и вниз. Электроны с магнитным моментом, ориентированным вверх, легко проходят сквозь туннельный переход (ТП), а электроны с магнитным моментом, ориентированным вниз, накапливаются. И если их концентрация становится достаточной, ВФЭ перемагничивается в состояние „1”. Пропускание тока записи „1” сквозь ячейку, которая уже находится в состоянии „1”, не изменяет состояние ячейки.

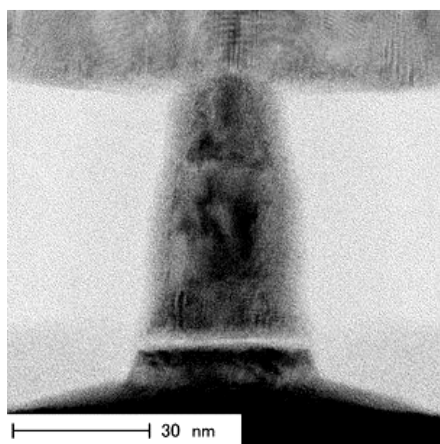


Рис. 18. Наноперефотография поперечного среза магниторезистивной запоминающей ячейки с записью информации методом СТП

На рис. 17в показана зависимость электрического сопротивления магниторезистивной ячейки от величины пропускаемого сквозь нее электрического тока. Зависимость эта асимметрична потому, что для перемагничивания в состояние «1» используются электроны с ориентированным вверх магнитным моментом, которые составляют большинство в ФФЭ, а для перемагничивания в состояние «0» используются электроны с ориентированным вниз магнитным моментом, которые составляют меньшинство в СФС. Поэтому критический ток I_{K1} перемагничивания в состояние «1» в несколько раз больше, чем критический ток I_{K0} перемагничивания в состояние «0».

Наноперефотография поперечного среза подобной магниторезистивной ячейки, изготовленной японской

фирмой Toshiba, показана на рис. 18.

Оказалось, что критический ток, требуемый для перемагничивания методом СТП, уже при размерах ячейки меньше 300 нм становится меньше электрического тока, который надо подавать в адресную и разрядную шины для перемагничивания запоминающего элемента суммарным магнитным полем указанных токов. Ток перемагничивания методом СТП быстро уменьшается с уменьшением размеров ячейки. Поэтому МРОЗУ стали первыми промышленными изделиями, в которых уже широко используют метод СТП.

На рис. 17 в серым прямоугольнике выделена область тех значений тока, которые используют для считывания информации из ячейки памяти. Это совсем малые токи, достаточные для определения, большое или малое сопротивление имеет ячейка, но явно недостаточные для ее перемагничивания.

6. Выводы

1. Спинтроника – новый раздел электроники, учитывающий и использующий наличие у электронов спина, – значительно расширил возможности традиционной электроники, открыл для нее дополнительную «степень свободы».
2. Изучение и объяснение сущности „гигантского”, „туннельного”, „колоссального” и экстраординарного магниторезистивных эффектов позволили создать значительно более чувствительные и компактные головки для считывания информации с магнитных дисков. МР головки ускорили процесс совершенствования накопителей на магнитных дисках и позволили считывать информацию, записанную с плотностью до 30 Гб/см² и выше.
3. Одним из основных понятий спинтроники является понятие „спин-поляризованного” электрического тока, при котором одновременно с электрическим зарядом переносится и спин. Такой ток характеризуют „степенью спин-поляризации”. Формируется также понятие „спин-тока” или „спин-транспорта”. Между спин-поляризованным электрическим током i со степенью поляризации P (%) и соответствующим ему магнитным спин-током i_{MS} существует соотношение $1,7254 \cdot 10^4 i_{MS} = -i P / 100\%$, где электрический ток задают в амперах, а магнитный спин-ток – в единицах «Вт/Тл».
4. Следующим ощутимым вкладом спинтроники в элементную базу информатики стала магниторезистивная оперативная память (МРОЗУ). МРОЗУ со скоростью считывания и записи порядка 1 нс является энергонезависимым, то есть информация в нем сохраняется и при отключенном питании. Компьютеры с такой памятью сразу после включения могут продолжать работу, которая выполнялась в предыдущем сеансе. Преимуществами перед флеш-памятью являются неограниченность числа циклов перезаписи, меньшее энергопотребление в процессе работы, широкий диапазон рабочих температур (от –40 до +150°С), повышенная радиационная стойкость и намного более длительный срок хранения данных – теоретически не ограниченный.
5. Благодаря совместимости технологии изготовления МРОЗУ с КМДП технологией появилась возможность реализации комбинированных МРОЗУ/КМДП микросхем, а с ними – новых адаптивных архитектур процессоров на кристалле, их «специализации» под нужды конкретных пользователей.
6. Перенос магнитного момента при протекании спин-поляризованного электрического тока позволил осуществлять быстрое перемагничивание этим током участков «свободного» ферромагнетика. Изучение явления „спин-транспортного перемагничивания” (СТП) открыло широкие возможности для построения разнообразных устройств информатики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилов Ю.А. Основы спинтроники. Учебное пособие / Данилов Ю.А., Демидов Е.С., Ежевский А.А. – Нижний Новгород, 2009. – 173 с.

2. Tsymbal E.Y. Handbook of Spin Transport and Magnetism / E.Y. Tsymbal, I. Zutic // CRC Press. – 2011. – 808 p.
3. Ziese M. Spin Electronics / M. Ziese, M.F. Thornton (eds.). – Berlin: Springer, 2001. – 493 p.
4. Ферт А. Происхождение, развитие и перспективы спинтроники / А. Ферт // Успехи физических наук. – 2008. – Т. 178, № 12. – С. 1336 – 1348.
5. Zutic I. Spintronics: Fundamentals and applications / I. Zutic, J. Fabian, S. Das Sarma // Rev. Mod. Phys. – 2004. – Vol. 76, N 2. – P. 323 – 410.
6. Spin electronics – a review / J.F. Gregg, I. Petej, E. Jouguelet [et al.] // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2002. – Vol. 35. – P. R121 – R155.
7. Морозов А.И. Магнитоэлектроника: учебное пособие / Морозов А.И. – М.: Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет), 2011. – 61 с.
8. Ферритовое запоминающее устройство машины УМШН / Н.К. Бабенко, А.Д. Бех, И.Д. Войтович [и др.] // Сборник научных трудов "Магнитные элементы". – Киев: Наукова думка, 1964. – 72 с.
9. Fert A. Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices / A. Fert // Phys. Rev. Lett. – 1988. – Vol. 61. – P. 2472 – 2475.
10. Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange / G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach [et al.] // Phys. Rev. B. – 1989. – Vol. 39. – P. 4828 – 4830.
11. Tunnel magnetoresistance of 604% at 300 K by suppression of Ta diffusion in CoFeB/MgO/CoFeB pseudo-spin-valves annealed at high temperature / S. Ikeda, J. Hayakawa, Y. Ashizawa [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2008. – Vol. 93 (8). – doi: 082508.
12. Ramirez A. P. Colossal magnetoresistance / A. P. Ramirez // J. Phys.: Condens. Matter. – 1997. – Vol. 9. – P. 8171 – 8199.
13. Dagotto E. Nanoscale Phase Separation and Colossal Magnetoresistance / E. Dagotto // Springer-Verlag. – 2003. – 468 p.
14. Extraordinary magnetoresistance effect in a microstructured metal-semiconductor hybrid structure / C.H. Moller, O. Kronenwerth, D. Grundler [et al.] // Applied Physics Letters. – 2002. – Vol. 80, Is. 21. – P. 3988 – 3990.
15. Hewett T.H. Extraordinary Magnetoresistance in Hybrid Semiconductor-Metal Systems / T.H. Hewett, F.V. Kusmartsev // International Journal of Modern Physics B (IJMPB). – 2009. – Vol. 23, Is. 20–21. – P. 4158 – 4169.
16. Progress and Outlook for MRAM Technology / S. Tehrani, J.M. Slaughter, E. Chen [et al.] // IEEE Trans. On Magnetics. – 1999. – Vol. 35. – P. 2814 – 2819.
17. Design considerations for MRAM / T.M. Maffitt, J.K. DeBrosse, J.A. Gabric [et al.] // IBM Journal of Research and Development. – 2006. – Vol. 50, N 1. – P. 25 – 39.
18. Magnetic Random Access Memories / B. Dieny, R.C. Sousa, J.-P. Nozières [et al.] // Nanoelectronics and Information Technology. – Wiley-VCH, 2011. – 178 с.
19. Magnetic RAM (MRAM) and Spintronics Memory / Memory Strategies International, 16900 Stockton Drive, Leander, TX, USA. – 2012. – 230 p.
20. U.S. Patent 6,545,906 B1 Method of writing to scalable magnetoresistance random access memory element / Savtchenko L., Engel B. N., Rizzo N. D. [et al.] – U.S. Patent 6,545,906 B1, 2003.
21. Smandek B. MRAM speichern Daten ohne Strom – und jetzt auch extrem schnell [Электронный ресурс] / B. Smandek. – Режим доступа: <http://www.braunschweig.ihk.de/geschaeftsfelder/innovation-umwelt/i-u-nachrichten-2011/april-2011/technologietrends/mram-speichern-daten-ohne-strom.html>.
22. 256K x 16-Bit 3.3-V Asynchronous Magnetoresistive RAM MR2A16A / Freescale Semiconductor Data Sheet. – Document Number: MR2A16A. – 2007. – Rev. 6, N 11.
23. Thermally assisted MRAMs / I.L. Prejbeanu, S. Bandiera, J. Alvarez [et al.] // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2013. – Vol. 46. – doi: 070301.
24. Sub-nanosecond precessional switching in a MRAM cell with a perpendicular polarizer / Souza Marins de Castro, B. Lacoste, R.C. Sousa [et al.] // Proc. of the 4th IEEE International Memory Workshop. – 2012. – doi: 6213651.
25. Thermally assisted mram / I.L. Prejbeanu, M. Kerekes, R.C. Sousa [et al.] // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2007. – Vol. 19 (16). – doi: 165218.

26. MRAM – магниторезистивная оперативная память. Crocus Technology SA (Франция) и ООО «Крокус Нанoeлектроника» (Россия) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rusnano.com/projects/portfolio/crocus-technology>.
27. Пионеры MRAM удваивают финансирование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rusnano.com/about/press-centre/20130718-pionery-mram-udvaivayut-finansirovanie>.
28. 45nm low power CMOS logic compatible embedded stt MRAM utilizing a reverse-connection 1t/1mtj cell. / C. Lin, S. Kang, Y. Wang [et al.] // Electron Devices Meeting (IEDM). IEEE International. – 2009. – P. 258 – 259.
29. A 64mb MRAM with clamped-reference and adequate-reference schemes / K. Tsuchida, T. Inaba, K. Fujita [et al.] // Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC), IEEE International. – 2010. – P. 258 – 259.
30. Wang J.-P. Programmable spintronic logic devices for reconfigurable computation and beyond – history and outlook / J.-P. Wang, X. Yao // Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics. – 2008. – Vol. 3. – P. 12 – 23.
31. CMOS/Magnetic Hybrid Architectures / G. Prenat, G. El Baraji, Guo Wei [et al.] // Electronics, Circuits and Systems, 2007. ICECS 2007. 14th IEEE International Conference. – 2007. – P. 190 – 193.
32. Spin Current / [S. Maekawa, S.O. Valenzuela, E. Saitoh, T. Kimura]. – Oxford University Press, 2012. – 464 p.
33. 100 ps precessional spin-transfer switching of a planar magnetic random access memory cell with perpendicular spin polarizer / C. Papusoi, B. Delaet, B. Rodmacq [et al.] // Applied Physics Letters. – 2009. – Vol. 95, N 7. – doi: 072506.

Стаття надійшла до редакції 11.11.2013