

Наноэлектроника

Лекция 5

к.т.н., доц. Марончук И.И.

Спиновая электроника (спинтроника)

Во второй половине прошлого века в микроэлектронике выделилось две ветви - магнитная электроника, использующая магнитные материалы и оптоэлектроника, использующая интегрированные оптические схемы на миниатюрных лазерах и волокнах.

Постепенно научное сообщество пришло к осознанию того факта, что старые термины уже не вполне отражают физические идеи, лежащие в основе этих новых направлений, ведь в магнитной электронике носителем информации является спин электрона, а в оптоэлектронике - частицы света. Так появились два новых термина: спинтроника и фотоника.

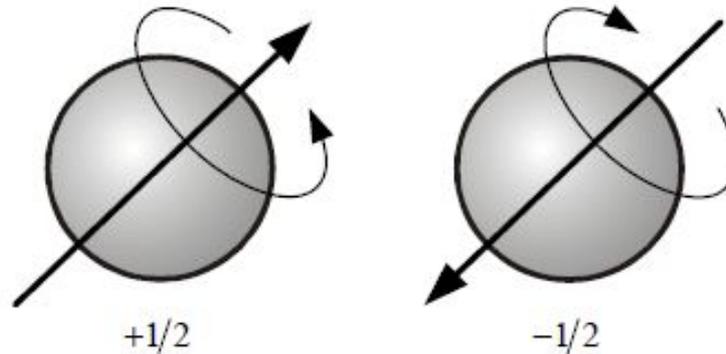
Электроника, как известно, область науки и техники занимающаяся проблемами обработки, передачи и хранения информации с использованием электрического заряда электрона.

О спинтронике можно сказать дословно то же самое, но на месте заряда электрона будет стоять спин электрона.

СПИНовая элекТРОНИКА - СПИНТРОНИКА

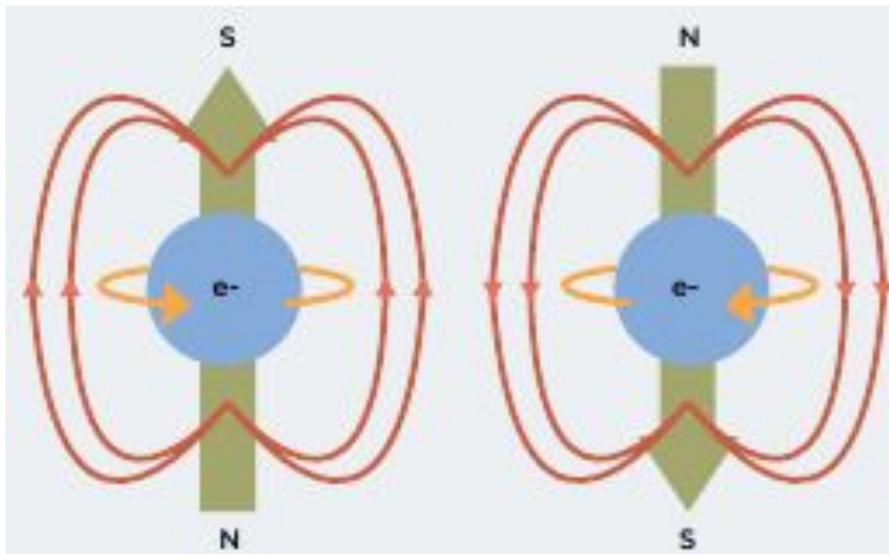
- направление нанoeлектроники, в котором для представления и обработки информации наряду с зарядом используется спин электрона

Как известно, спин электрона — это специфическое свойство электрона, присущее ему наравне с массой порядка 10^{-31} кг и зарядом порядка 10^{-19} Кл. Спин — это момент импульса электрона на некоторую ось Z , т.е. проекция на эту ось какого-то движения электрона относительно нее. При этом электроны могут иметь две одинаковые проекции, но с разными знаками. В любом энергетическом состоянии могут находиться два электрона, но обязательно с разными спинами.



Схематическое изображение электронов с различными спинами

Согласно принципу квантования проекции спина на выбранную ось, электроны разделяют на два типа носителей тока: электроны со спином вверх и электроны со спином вниз (S или $-S$) РИС . По сути, в природе имеется уже готовый переносчик двоичной информации, кодирующий в направлении спина либо 1, либо 0.



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)

Как спин может быть использован в электронике?

Спин $S = \frac{1}{2}$ имеет две проекции на ось квантования:
 $S_z = \pm \frac{1}{2}$ ($\downarrow \uparrow$) – основа для бинарной записи информации

ПРОБЛЕМА – выбранная проекция электронного спина сохраняется при комнатной температуре очень короткое время – измеряется в наносекундах (нсек)

ВЫВОД - электронным спином можно манипулировать в **МАГНИТНЫХ НАНОСТРУКТУРАХ** – гетероструктурах с характерными размерами, на которых электроны **СОХРАНЯЮТ СВОЙ СПИН**

Спинтроника

- В наше время спинтроника изучает магнитные и магнитооптические взаимодействия в металлических и полупроводниковых структурах, а также квантовые магнитные явления в структурах нанометрового размера.
- Спинтроника – устоявшийся термин, но существуют разные его толкования: электроника переноса спина (*spin transport electronics*), электроника, основанная на спине (*spin-based electronics*), или просто спин-электроника (*spin-electronics*).
- Термин спинтроника (*spintronics*) появился впервые в 1998 г. в совместном проекте лабораторий Белла и Йельского университета, в котором была сформулирована задача создания устройств, сохраняющих информацию в атомах вещества, где биты кодировались бы электронными спинами.

В Агентстве перспективных исследований министерства обороны США спинтронику определяют как спин-транспортную электронику.

- Согласно другим определениям спинтроника – это наука, для которой принципиальное значение имеет взаимосогласованное поведение заряда и спина электрона; «это электроника на электронных спинах, в которой не заряд электрона, а его спин является передатчиком информации, что формирует предпосылки для создания нового поколения приборов, объединяющих стандартную микроэлектронику и спин зависимые эффекты»;
- «это наука об управлении электрическим током в полупроводниках и гетероструктурах за счет изменения ориентации электронных и ядерных спинов в магнитных и электрических полях»;
- «это новая ветвь микроэлектроники, где спин и заряд электрона представляют собой активный элемент для хранения и передачи информации, интегральных и функциональных микросхем, многофункциональных магнитооптоэлектронных устройств».

• Основные направления развития спинтроники

- Спинтроника развивается по следующим основным направлениям:
- 1) изготовление магнитных наноструктур, получение новых материалов, тонких пленок и гетероструктур, а также многофункциональных материалов;
- 2) магнетизм и спиновый контроль магнитных наноструктур, теории описания ферромагнитного обмена в разбавленных магнитных полупроводниках, туннельных эффектов и спиновой инжекции, транспорта и детектирования магнетизма;
- 3) магнитоэлектроника и приборы на основе эффекта гигантского магнитосопротивления (ГМС), туннельные устройства, полупроводниковые гетероструктуры для инжекции спинов, их транспорт и детектирование, импульсный ферромагнетизм;
- 4) магнитооптические свойства магнитных полупроводниковых гетероструктур на постоянном токе и с временным разрешением, оптическая спиновая инжекция и детектирование, оптически индуцированный ферромагнетизм, сверхбыстрые магнитооптические переключатели; передача квантовой информации;
- 5) распознавание образов; получение изображений и метрология, включая магнитное распознавание образов;
- 6) приборостроение и прикладные исследования.

Достоинства спинтроники:

- Низкое энергопотребление при работе (отсутствие принципиальных ограничений на энергию переключения - в электронном транзисторе, эта энергия порядка kT на электрон) и энергонезависимость при хранении информации: возможность сохранять информацию в отсутствие питания.
- Высокое быстродействие - определяется, в конечном счете, спиновой прецессией, на частоту которой также нет ограничений.

История

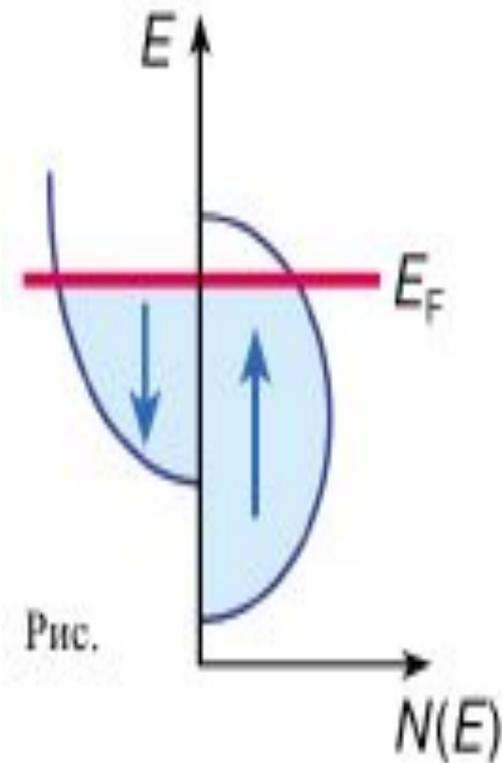
Термин **спинтроника** был введен Стюартом Вольфом в 1996 (Stewart Wolf, research professor at the University of Virginia).

Хотя термин был введен недавно, основы спинтроники были заложены намного ранее. В 1936 году Мотт вводит концепцию спин-поляризованных токов, где степень поляризации определяется формулой:

$$P = \frac{J_{\uparrow} - J_{\downarrow}}{J_{\uparrow} + J_{\downarrow}}$$

Введена Моттом в 1936 (N.F. Mott, Proc. Roy. Soc. A, v. 153, p.699, 1936), он также предсказал, что в ферромагнетиках токи должны быть поляризованы.

Причина такой поляризации не сводится к намагничиванию в магнитном поле, а объясняется с помощью модели Стонера. В магнитном материале энергия электронов зависит от ориентации спинов: спины с ориентацией против поля имеют большую энергию. В результате энергетические диаграммы для противоположных ориентаций расщепляются (рис.) и те электроны, у которых на уровне Ферми оказывается большая плотность состояний, оказываются в большинстве (*majority electrons*, в отличие от остальных называемых *minority*). Далеко не всегда в большинстве оказываются те электроны, у которых спин направлен по полю, как видно из рис., может быть и наоборот (зависимость плотности состояний от энергии – функция не монотонная).



В 1970-х годах эти предсказания были подтверждены экспериментально (P.M. Tedrow et al, PRL., v. 25, p. 1270, 1970). К началу 90-х формируется концепция спиновых поляризаторов - ферромагнитные слои интерпретируются как своего рода поляризаторы, с помощью которых можно поляризовать ток по спину и с помощью которых можно определять поляризацию - т.е. использовать в качестве анализаторов. Поэтому, часто спинтронике определяют как раздел нанoeлектроники, использующий транспортные свойства спин-поляризованных электронов. Однако, если взглянуть на проблему более общо, то спинтроникой можно назвать область нанoeлектроники, основной задачей которой является преобразование информации в форме намагниченности в электрическое напряжение и обратная задача - управление с помощью электрического поля спинами.

Взаимосвязь электричества и магнетизма - один из древнейших вопросов естествознания (еще со времен античности). Ниже в хронологическом порядке представлены различные решения этой задачи. Впервые ее удалось решить Хансу Христиану Эрстеду в 1820 году. Соленоиды до сих пор являются основным способом создания магнитных полей как в сверхмощных установках, так и в головках магнитной памяти.

Обратная задача - преобразования постоянного магнитного поля в напряжение была решена Эдвином Гербертом Холлом в 1880. Датчики Холла используются для детектирования магнитных полей, однако в устройствах спинотроники используют не эффект Холла, а открытый столетием позже Альбертом Фертом и Питером Грюнбергом эффект гигантского магнитосопротивления (Нобелевская премия по физике 2007).

Перемагничивание спиновым током

До недавнего времени считалось, что единственным способом переключения магнитной структуры является воздействие магнитного поля. Соответственно, под переключением с помощью тока понималось единственно ситуация, когда от текущего по проводникам тока возникает вихревое магнитное поле, действие которого на магнитный элемент способно последний перемагнитить. Однако в 1996 году Слончевским (J. Slonczewsky) было предсказано что между током и намагниченностью существует прямое локальное взаимодействие, которое также способно привести к процессам перемагничивания. Это воздействие имеет квантовую природу (обменное взаимодействие) и его можно интерпретировать как передачу момента количества движения от электронов к магнитным моментам решетки. Под действием тока также могут перемещаться границы между доменами (областями однородной намагниченности) - см. рис.

Интерес к этому явлению стимулируется успехами и проблемами в области создания элементов магнитной памяти MRAM и магнитных логических элементов. В настоящее время переключение таких объектов осуществляется с помощью внешнего магнитного поля, что является невыгодным с энергетической точки зрения. Ожидается, что перемагничивание с помощью прямого воздействия тока на намагниченность позволит значительно упростить конструкцию таких элементов.



Рис. Иллюстрация индуцированного током движения доменной стенки, обусловленного механизмом переноса спина. Неравновесная поперечная компонента поляризации носителей (белые стрелки) передается магнитным моментам внутри доменной стенки (черные стрелки); это приводит к движению последней.

Открытие гигантского магнитосопротивления в мультислоях Fe/Cr

in Fe/Cr Multiayers

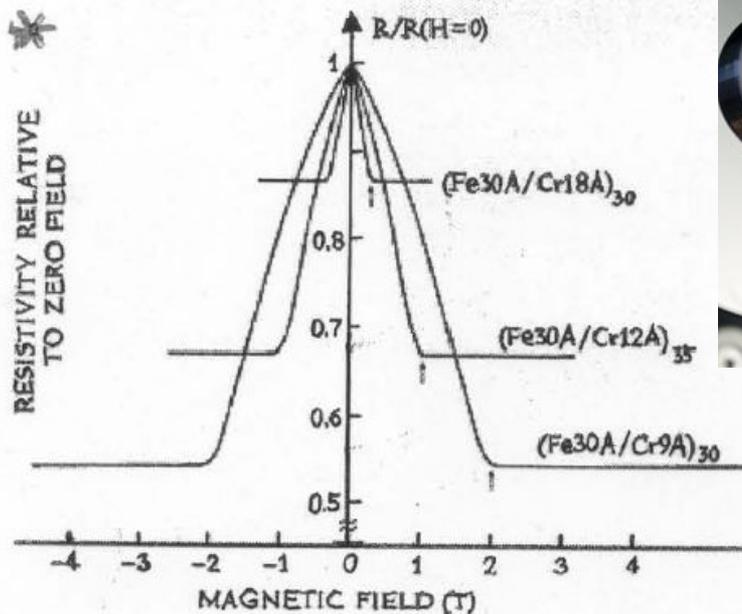
M.N.Baibich *et al*, PRL 61, 2472 (1988)*

G.Binasch *et al*, PRB 39, 4828 (1989)



Проф. A. Fert
(France)

Nobel Prize 2007



Проф. P. Gruenberg
(Germany)

Nobel Prize 2007

Решение Нобелевского комитета вызвало немало вопросов: с точки зрения фундаментальной науки это открытие не являлось высоко значимым. По мнению ряда ученых, оно стоит в ряду многих аналогичных научных достижений. Однако с точки зрения практического использования это открытие оказалось очень перспективным, особенно в компьютерной технике.

В конце 80-х годов (1988 г.) Грюнберг и Фер обнаружили следующий эффект: ультратонкий "пирог" из разных металлов с чередующимися слоями из магнитного железа и немагнитного хрома с толщиной в несколько нанометров в приложенном магнитном поле демонстрировал многократное падение сопротивления кристалла. Снятие поля приводило к резкому увеличению сопротивления. Объяснение - под действием поля магнитные моменты атомов в слоях железа выстраиваются параллельно, а когда его нет - антипараллельно. Это и вызывает столь резкое изменение сопротивления.

В общем, можно сказать, что в данном случае Нобелевскому комитету удалось соблюсти дух и букву завещания изобретателя динамита. Ведь нередко премии по физике присуждаются вразрез с волей Альфреда Нобеля, завещавшего награждать ученых, "принесших наибольшую пользу человечеству": из многих открытий физиков довольно сложно извлечь практическую пользу, во всяком случае сразу. Работа Альбера Фера и Петера Грюнберга вполне соответствует этому завету.

Магнитосопротивлением называется эффект изменения электропроводности материала при помещении его в магнитное поле.

- Первые свидетельства того, что электрическое сопротивление зависит от магнитного состояния вещества были получены еще в 1856 году лордом Кельвином, но относительные изменения сопротивления незначительны (в железе составляет 0.03%).
- Гигантское магнитосопротивление (10% и более) было получено в многослойных материалах - ферромагнитных пластинах, разделенных слоем немагнитного вещества. Сопротивление изменяется при изменении взаимного направления намагниченностей в магнитных слоях. Мера магнитосопротивления выражается в процентах и определяется как отношен

$$GMR = \frac{R_{\downarrow\uparrow} - R_{\uparrow\uparrow}}{R_{\uparrow\uparrow}}$$

где GMR - гигантское магнитосопротивление (giant magnetoresistance), $R_{\downarrow\uparrow}$ - сопротивление при противонаправленном расположении намагниченности в слоях, $R_{\uparrow\uparrow}$ - сопротивление при сонаправленном расположении намагниченности в слоях.

Гигантское магнитное сопротивление - это квантово-механический эффект, наблюдаемый в тонких металлических пленках, состоящих из чередующихся ферромагнитных и проводящих немагнитных слоев. Эффект состоит в существенном изменении электрического сопротивления такой структуры при изменении взаимного направления намагниченности соседних магнитных слоев. Направлением намагниченности можно управлять, например, приложением внешнего магнитного поля. В основе эффекта лежит рассеяние электронов, зависящее от направления спина.

Эффект гигантского магнитосопротивления (ГМС)

- **ГМС наблюдается в:**
- многослойных структурах, содержащих нанослои из ферромагнитных материалов и их сплавов Fe, Ni, Co, чередующихся с нанослоями из благородных металлов Cu, Ag, Au;
- многослойных спин-вентильных (два тонких магнитных слоя, разделенных тонким (25-30 Å) слоем Cu) и спин-туннельных структурах (два тонких ферромагнитных металлических слоя, разделенных тонким диэлектрическим слоем);
- магнитных сендвичах - спин-вентильные структуры без пиннингового слоя;
- гранулированных пленках, изготовленных из несмешивающихся магнитных и немагнитных полупроводников;
- Кроме величины магнитосопротивления материалы характеризуются еще двумя параметрами, важными для практического использования: полем насыщения (магнитное поле, при котором магнитосопротивление достигает максимального значения) и чувствительностью (изменение сопротивления в полях, меньших поля насыщения).

Типичные значения основных параметров материалов с большими значениями магнитосопротивления

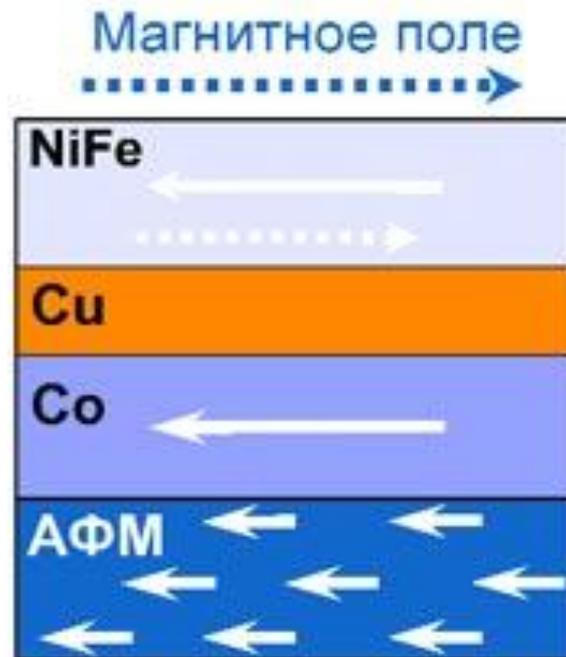
Магнитные среды и структуры	Магнитосопротивление, %	Поле насыщения, Э	Чувствительность, % / Э
Многослойные структуры	10-80	100-2000	0.1
Гранулированные пленки	8-40	800-8000	0.01
Спиновые вентили	5-10	5-50	1.0
Спин-туннельные структуры	10-25	5-25	2.0
Сендвичи	5-8	10-40	0.5
Материалы с эффектом КМС (манганиты - LaSrMnO_3 , LaCaMnO_3 и др.)	100 при $T < 300 \text{ K}$	1000	0.1
Монокристаллические пленки Bi толщиной 20 мкм	250 при 300K 380000 при 5K		0.2 при 300K

- Рассмотрим более подробно материалы, в которых наблюдаются гигантские магниторезистивные эффекты.

- **Спин-вентили**

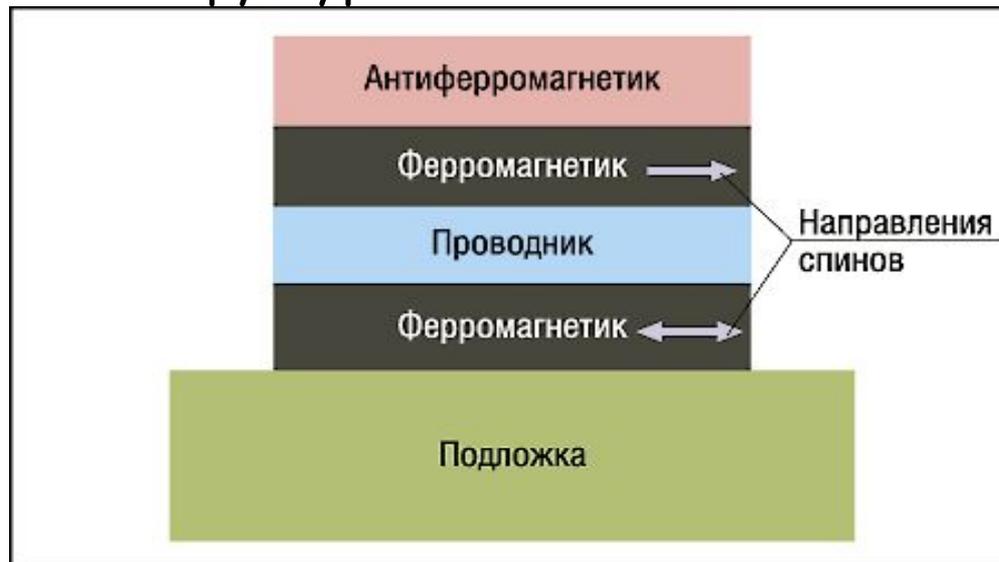
- Очередным шагом на пути совершенствования структур с ГМС стали спиновые вентили (СВ). Они также состоят из двух магнитных слоев, разделенных немагнитной прослойкой, но магнитный момент одного из слоев закреплен антиферромагнитным слоем (АФМ) с фиксированным направлением магнитного момента. В то же время намагниченность второго слоя может свободно изменяться под действием внешнего магнитного поля.

- Например, спиновые вентили имеют структуру: пермаллой (NiFe)/медь (Cu)/ кобальт (Co) (см. рисунок). Когда мы помещаем этот "сэндвич" даже в слабое магнитное поле, верхний "свободный" слой легко изменяет конфигурацию магнитных моментов вслед за полем, выстраивая ее антипараллельно нижнему слою. А если есть такой переход, то будет и гигантское магнитосопротивление.



Спиновые вентили (клапаны)

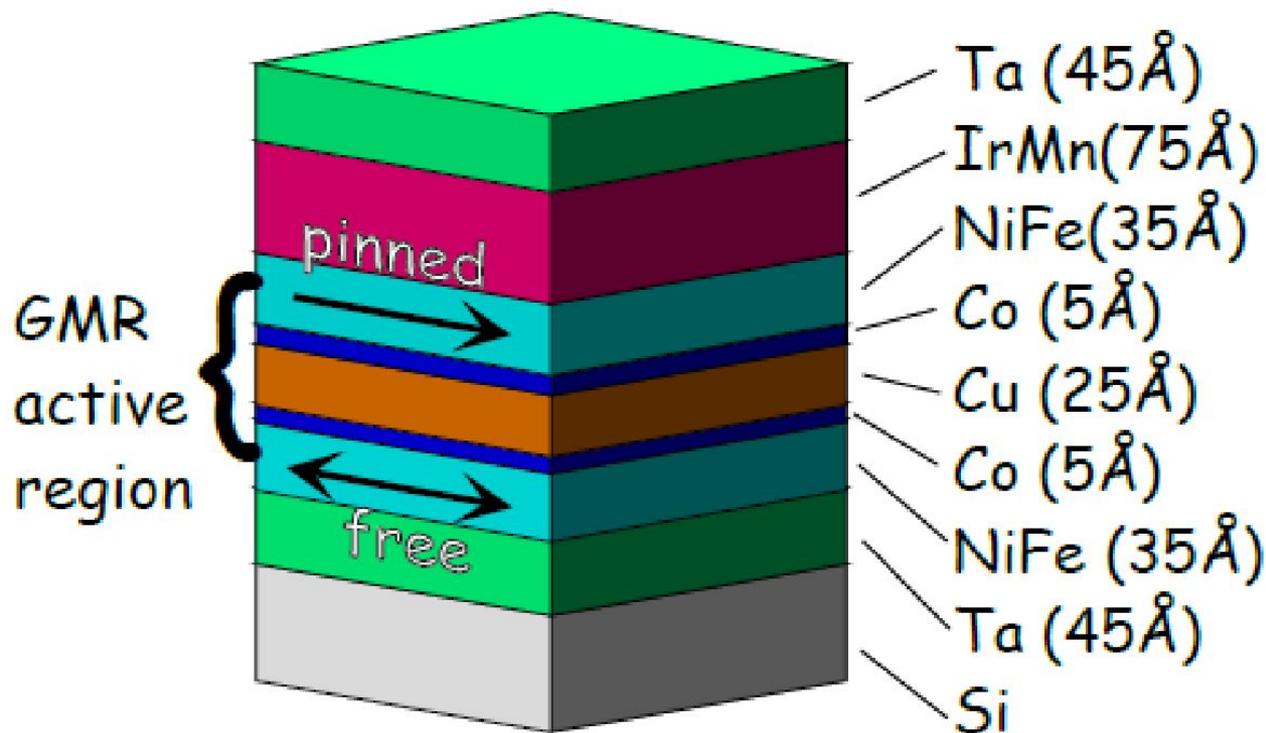
- Структура спинового вентиля



Состоит из двух слоев ферромагнетика (сплавы Ni, Co, Fe), разделенных слоем немагнитного металла (обычно Cu). В одном из слоев ферромагнетика магнитное поле "закреплено" плотно прилегающим слоем антиферромагнетика. Образующаяся граница раздела между пленками препятствует изменению намагниченности в ферромагнетике. Другой слой ферромагнетика является "свободным" - его намагниченность может быть изменена внешним полем относительно малой напряженности. Сопротивление спинового вентиля при антипараллельных магнитных полях в ферромагнетиках на 5 - 10 % выше, чем при параллельных.

Спиновые вентили (клапаны)

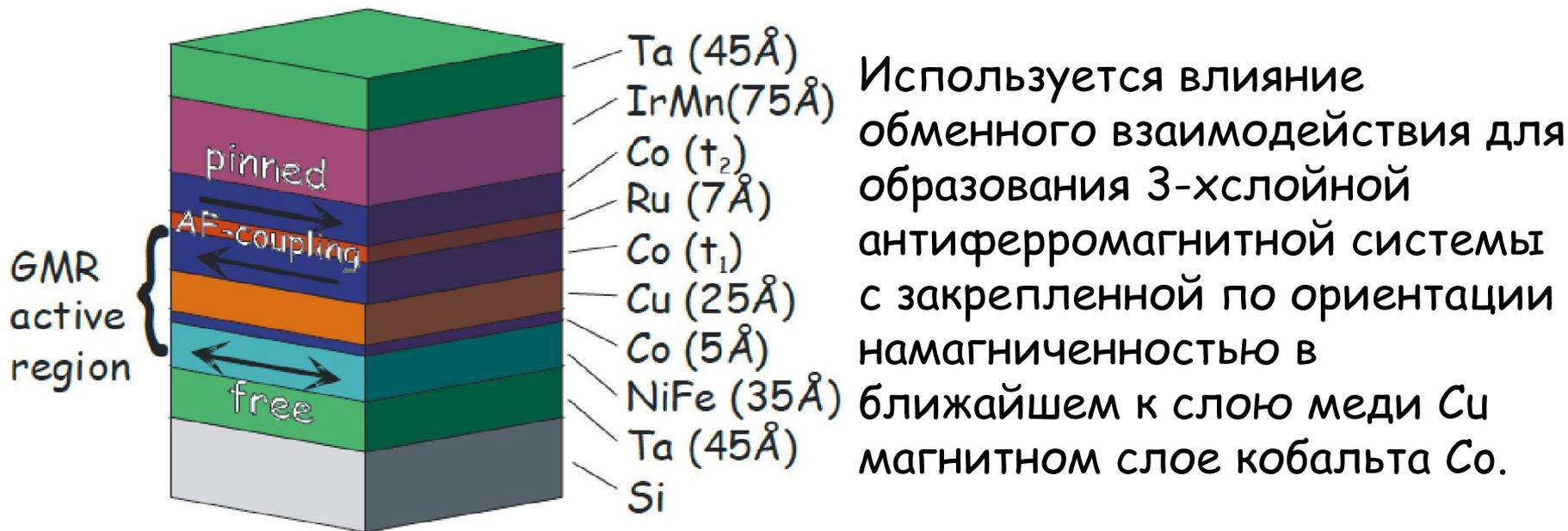
- Структура спинового вентиля



Используется влияние обменного взаимодействия со стороны дополнительного закрепляющего ориентацию намагниченности антиферромагнитного слоя, чтобы сдвинуть петлю гистерезиса в закрепленном ферромагнитном слое.

Спиновые вентили (усложненные системы)

Спиновые вентили с межслоевой обменной связью

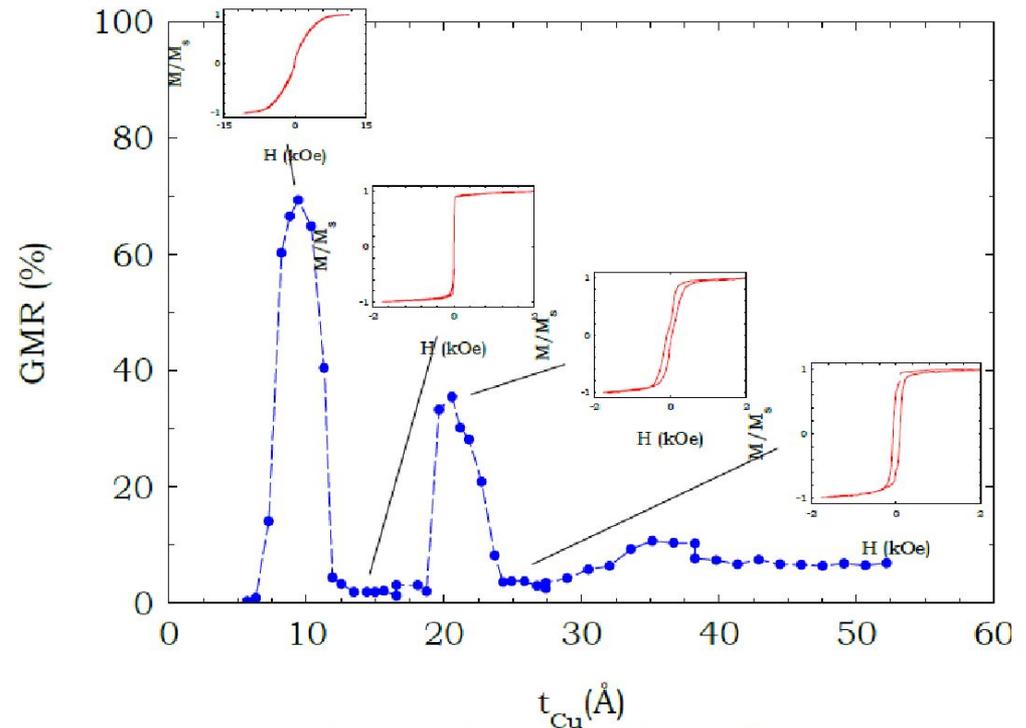
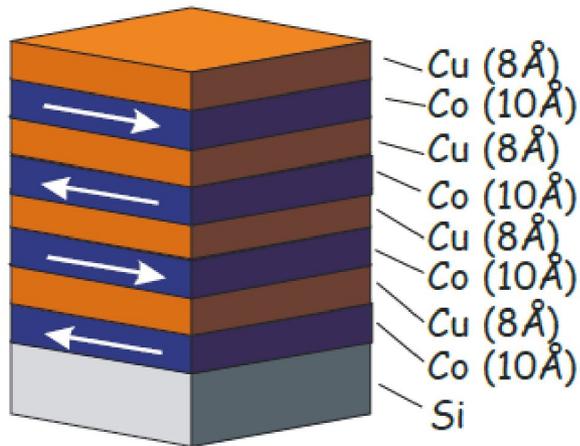


Антиферромагнитная межслоевая связь была открыта еще Грюнбергом для структуры из Fe/Cr мультислоев (Grunberg et.al., Phys.Rev.Lett.,1986)

Межслоевая обменная связь с осциллирующим характером и периодом ~ 1 нм была выявлена в мультислоях Fe/Cr, Co/Cr, Co/Ru

Спиновые вентили с межслоевой обменной связью

- Межслоевая обменная связь с осциллирующим характером и периодом $\approx 8 \text{ \AA}$ была выявлена в мультислоях Co/Cu с ГМС на пиках



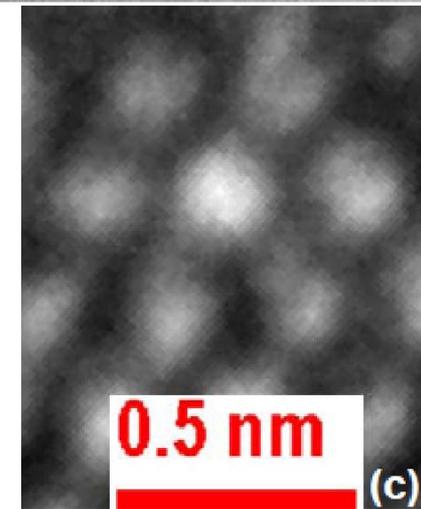
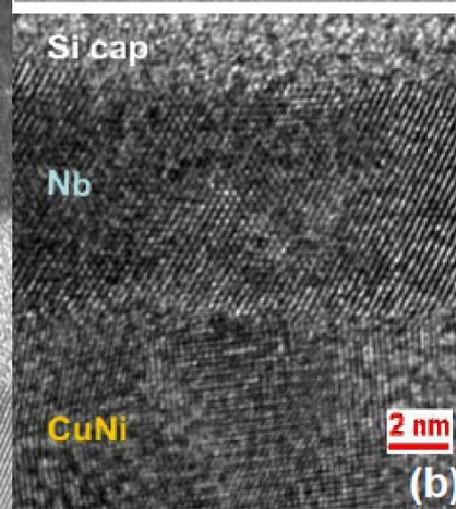
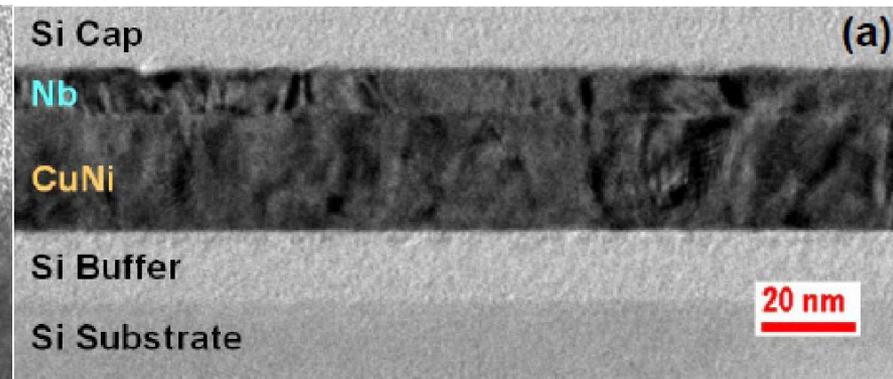
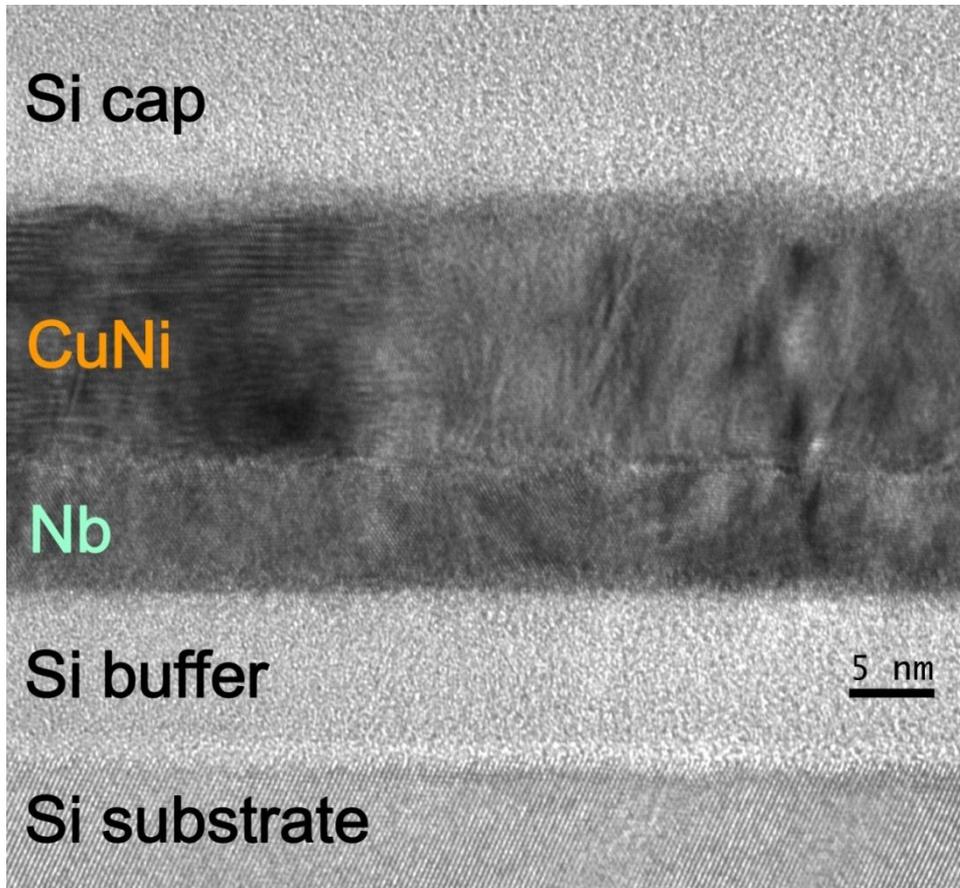
Marrows *et al.*, J. Phys. CM (1999)

Головки считывания жестких дисков (спиновой клапан)

Головки считывания жестких дисков работают на эффектах *гигантского магнитосопротивления* и *туннельного магнитосопротивления* (*GMR* и *TMR*). Основу головки считывания составляют три слоя: магнитомягкий, немагнитный, магнито жесткий. Намагниченность жесткого материала зафиксирована, а магнитомягкого материала – может меняться в зависимости от внешнего поля (поля, создаваемого доменом, намагниченным в определенном направлении – битом информации).

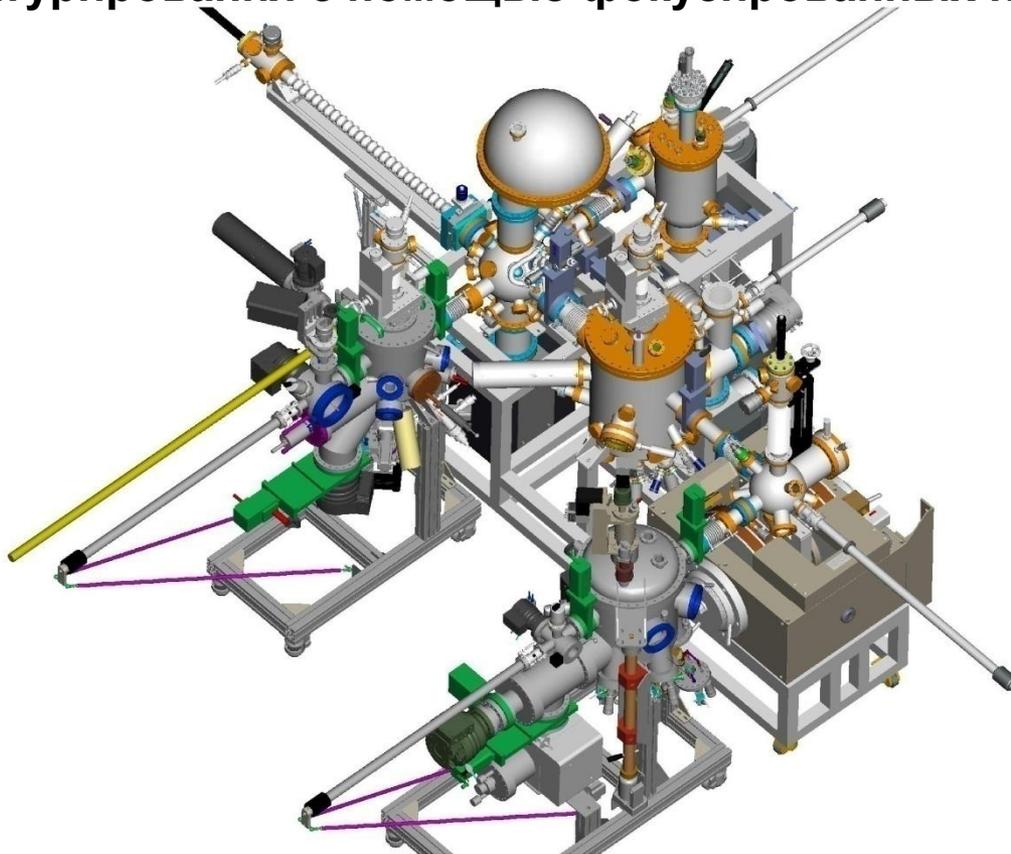


Сверхпроводящие спиновые клапаны: что это такое «в разрезе»

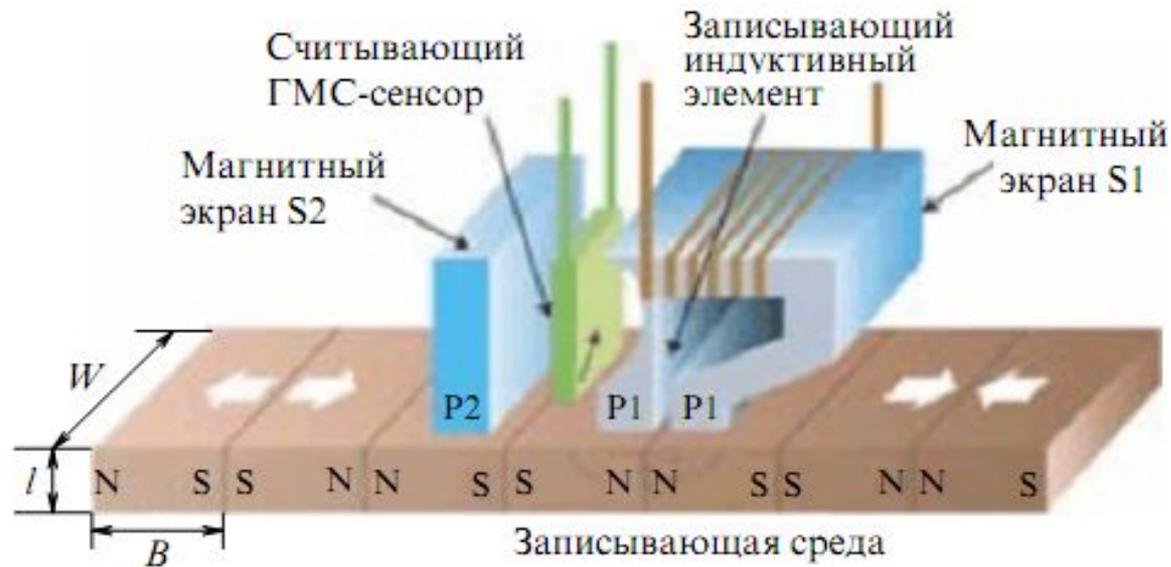


Сверхпроводящие спиновые клапаны: на чем это делается

Новая высоковакуумная система
для молекулярно-лучевой эпитаксии, магнетронного напыления
и наноструктурирования с помощью фокусированных ионных пучков



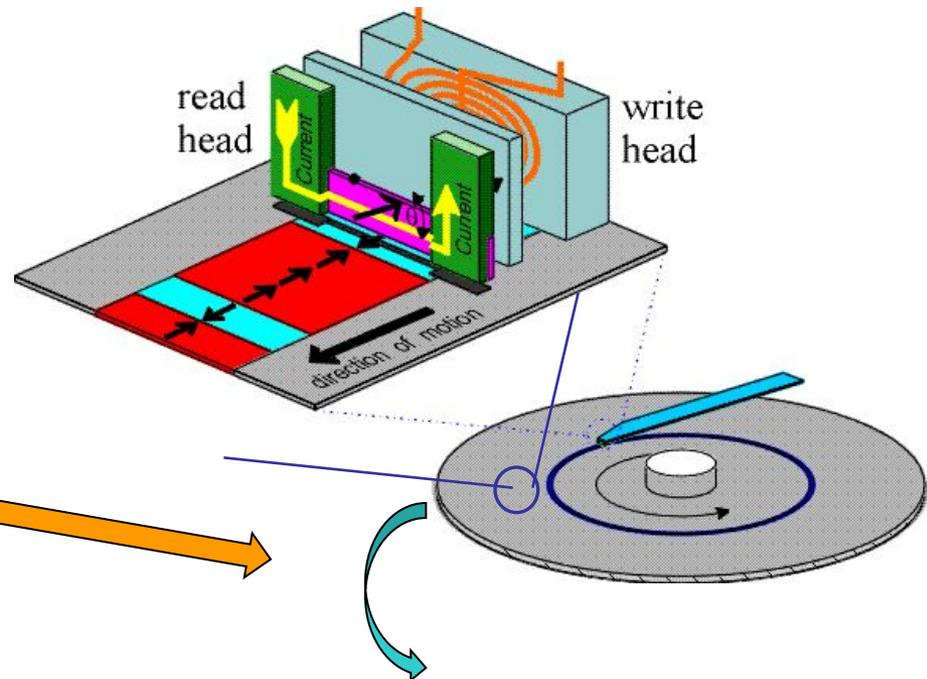
На основе таких элементов созданы считывающие магниторезистивные головки в жестких дисках с плотностью записи более 100 Гбайт/кв. дюйм.



Применение гигантского магнетосопротивления в магнитной записи информации – **сегодняшний день**

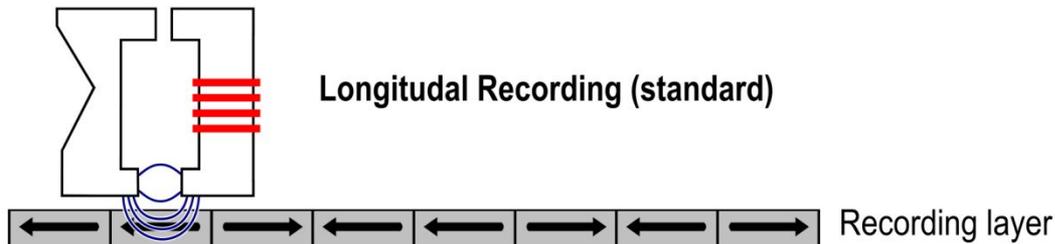
Среды для магнитной записи – ферромагнитные металл. пленки, плотность записи – до 3 Гигабит/см²
(1 Гигабит = 1 миллиард бит)
(1 нанометр = 1 миллиардная метра)

Головки записи-чтения на эффекте *гигантского магнетосопротивления* в ферромагнитных мультислоях – ширина дорожки записи – 200 нм, длина записи бита – 100 нм

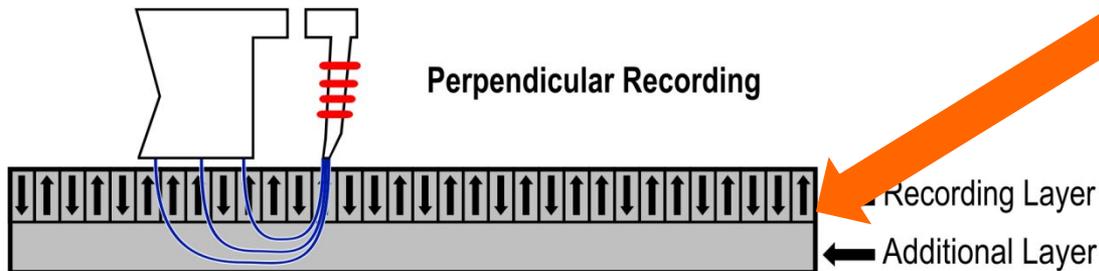


Параллельная и перпендикулярная запись информации – **сегодняшний день**

"Ring" writing element



"Monopole" writing element



- В конце 90-х годов средняя емкость жесткого диска составляла примерно 20 Гбайт, что соответствовало плотности записи информации около 4,1 Гбайт/кв. дюйм. Однако сегодня емкость жестких дисков возросла до 1000 Гбайт, а плотность записи достигла 300 Гбайт/кв. дюйм. С чем связан такой стремительный рост?
- Технологический прорыв обеспечил эффект гигантского магнитосопротивления (ГМС) открытый в 1988 г.
- В 1997 г. компанией IBM были созданы считывающие головки для жестких дисков, основанные на явлении ГМС. Они обладали высокой чувствительностью к магнитному полю при малом геометрическом размере, что позволило значительно увеличить емкость носителей.

HDD ноутбука

**HDD 160 Gb IDE Seagate Momentus (ST9160821A) 2.5"
UDMA100 5400 rpm 8Mb**



Производитель	Seagate
Модель	160 Гб Momentus 5400.3
Технология перпендикулярной записи	Да
Скорость обмена между носителем и контроллером	До 352 Мбит/сек
Головки	4 TGMR
Число дисков	2

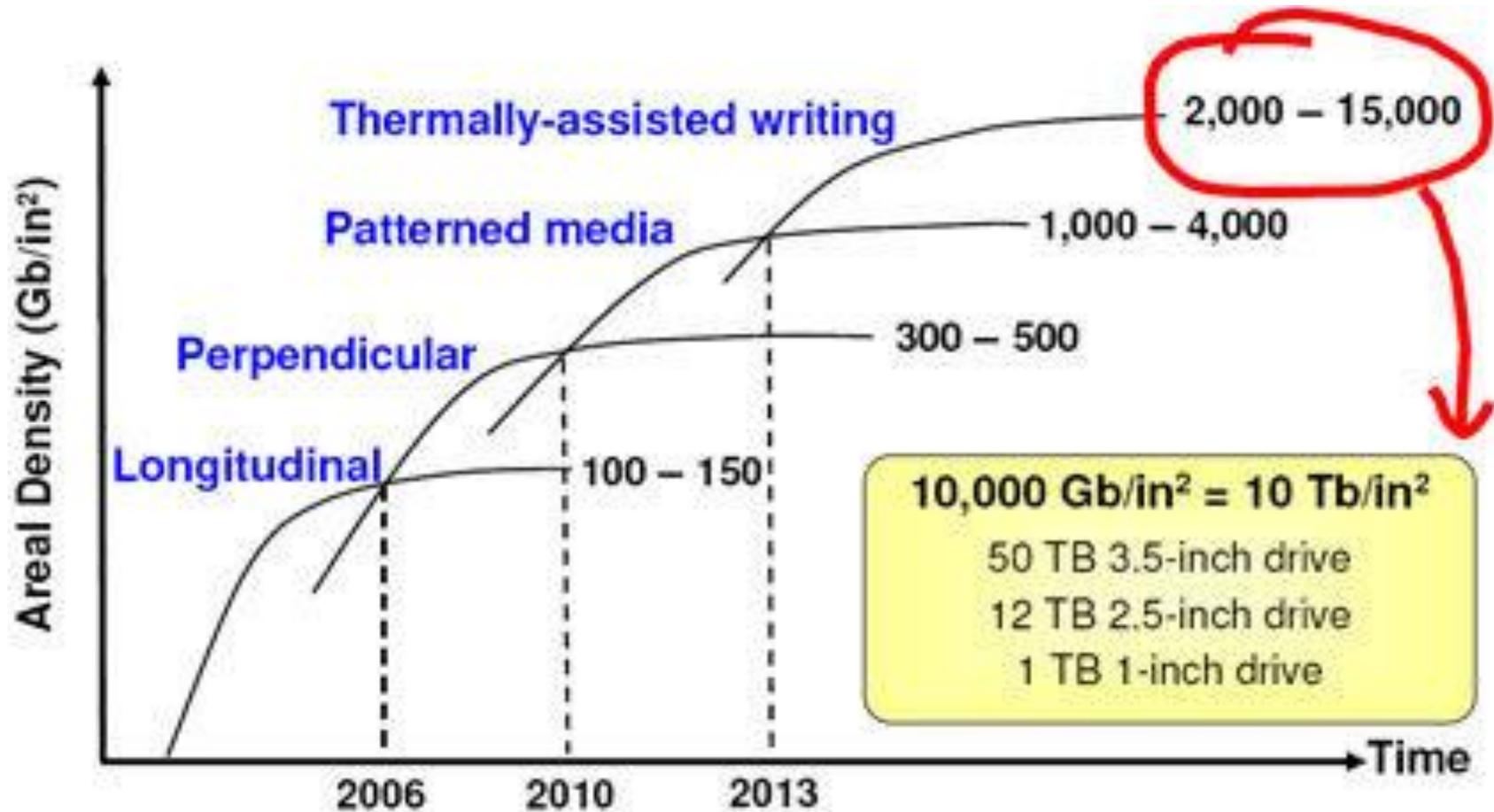
КАТАЛОГ
НИКС.RU
WWW.NIX.RU

Артикул: #55842 Наличие на складе: Есть в наличии

Положить в корзину : Розница: 83.00 у.е. Опт: 79.00 у.е.

**Серия - 2006 год
2010 – ВСЕ производители
выпускают 500 млн./год**

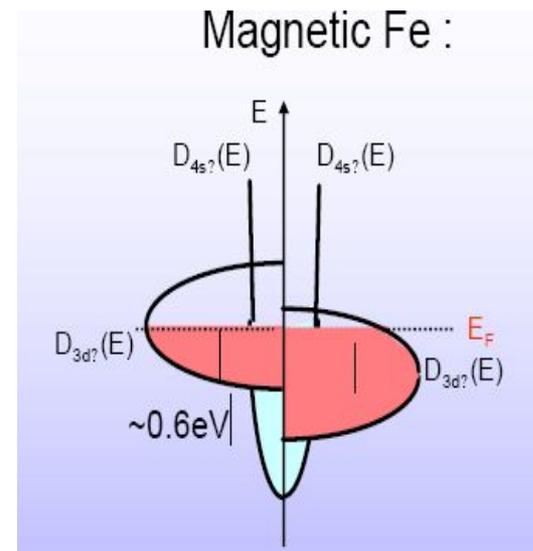
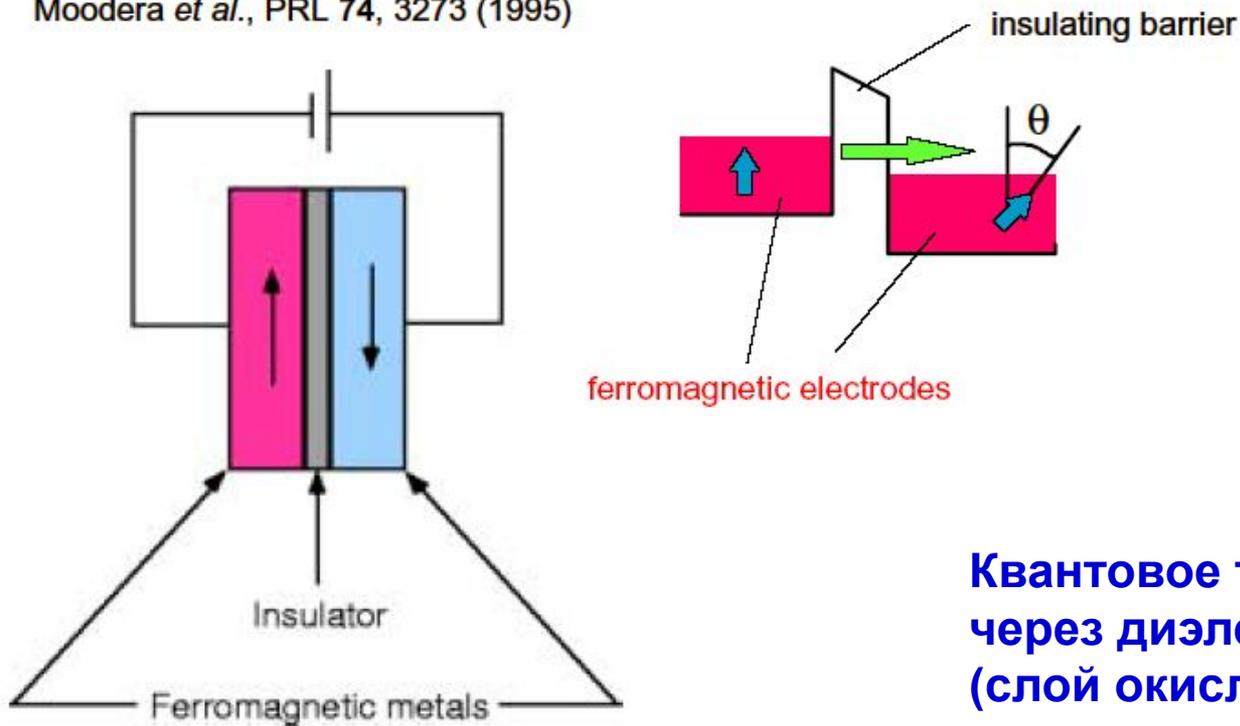
Ближайшее будущее технологии записи



Туннельное магнитосопротивление (TMR или TGMR)

Туннельное магнитное сопротивление очень похоже на GMR, только вместо немагнитного металла средний слой является диэлектриком. В таком случае, если слой диэлектрика достаточно тонкий, проявляется туннельный эффект. Вероятность туннелирования электрона через потенциальный барьер сильно зависит от взаимной ориентации намагниченностей слоев. Спинзависимое туннелирование позволяет получать большие величины GMR.

Jullière, Phys. Lett. 54A, 225 (1975)
Moosera et al., PRL 74, 3273 (1995)



**Квантовое туннелирование
через диэлектрический барьер
(слой окисла в 1-2 нанометра)**

- Наиболее важные с практической точки зрения результаты были достигнуты при исследовании спинового транспорта в **металлических мультислойных структурах**. Аналогичный спин-зависимый эффект, что и гигантское магнитосопротивление, наблюдается в структурах с **магнитным туннельным переходом** (Magnetic Tunnel Junction, MTJ) типа ферромагнетик - диэлектрик - ферромагнетик. Такие структуры могут приводить к большому туннельному магнитосопротивлению, ТМС (Tunnel Magnetoresistance, TMR).
- Наноразмерные магнитные структуры с эффектами ГМС и ТМС нашли широчайшее применение в сенсорах магнитного поля, считывающих головках жестких дисков и энергонезависимой магниторезистивной памяти (Magnetic Random Access Memory, MRAM).

Магнитный туннельный переход

К следующему поколению спинтроники относят структуры, принцип действия которых основан на явлении магнитного туннельного перехода.

Магнитный туннельный переход происходит в структуре, состоящей из двух слоев ферромагнетика, разделенных изолятором (обычно это оксид алюминия Al_2O_3).

Причем толщина изолятора так мала (менее 2 нм), что электрон может просачиваться через него - этот процесс называется туннелированием.

Классический потенциальный барьер

Преодоление шариком горки

Потенциальная энергии частицы на «вершине горки»

$$U = mgh$$

Если $E_{\text{кин}} > U$ - частица перекатится (преодолеет барьер). Если $E_{\text{кин}} < U$ - частица вкатится только на часть «склона горки» и покатится назад (отразится от барьера).

Квантовый потенциальный барьер

Электроны имеют энергию, недостаточную для его преодоления барьера.

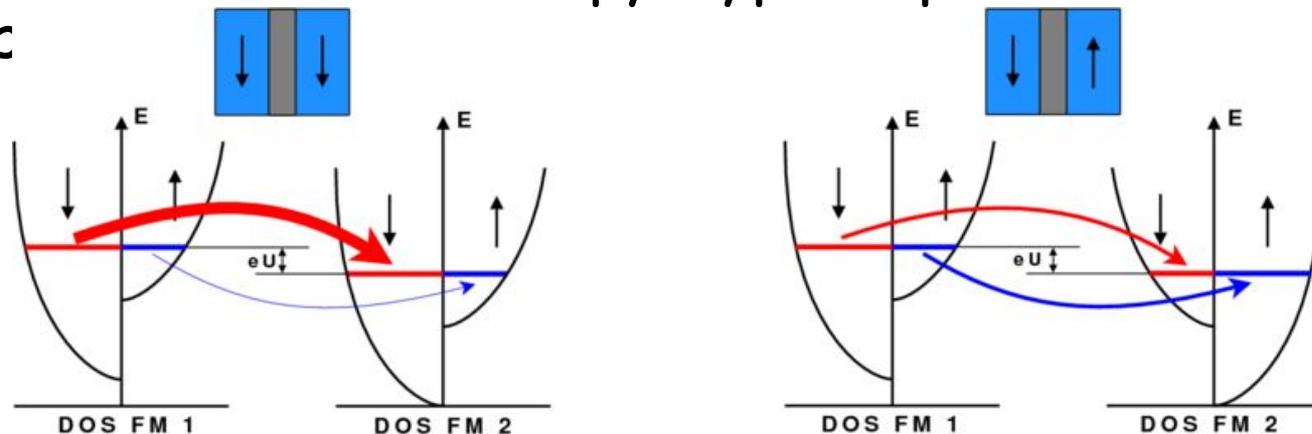
Несмотря на это, в случае если размер барьера составляет несколько атомных слоев, часть потока электронов способна проникнуть за барьер. Данный эффект получил название **туннелирования** - прохождение электрона как бы сквозь туннель в барьере.

- Эффект туннелирования имеет исключительно квантовую природу и связан с волновыми свойствами электрона. Чем «тоньше» барьер геометрически и чем меньше разность между высотой барьера U и E_k квантовой частицы, тем больше шансов у электрона пройти этот барьер. В соответствии с гипотезой де Бройля частице с массой m и скоростью v соответствует длина волны $\lambda_b = 2\pi\hbar/mv$. Например, для электрона, имеющего скорость 10^6 м/с (такую скорость он приобретет в вакууме за счет разности потенциалов в 3 В) λ_b составит несколько межатомных расстояний. Если ширина барьера d меньше или равна λ_b , то случай перехода частицы через барьер становится возможным.
- Туннельный эффект в интересующем нас простейшем случае означает следующее. Если квантовая частица находится по одну сторону потенциального барьера U , то существует возможность ее проникновения по другую сторону барьера, даже если ее полная энергия меньше U . **Туннелирование, волновые свойства частиц, спин и квантование уровней энергии – все это проявления квантовой природы.**

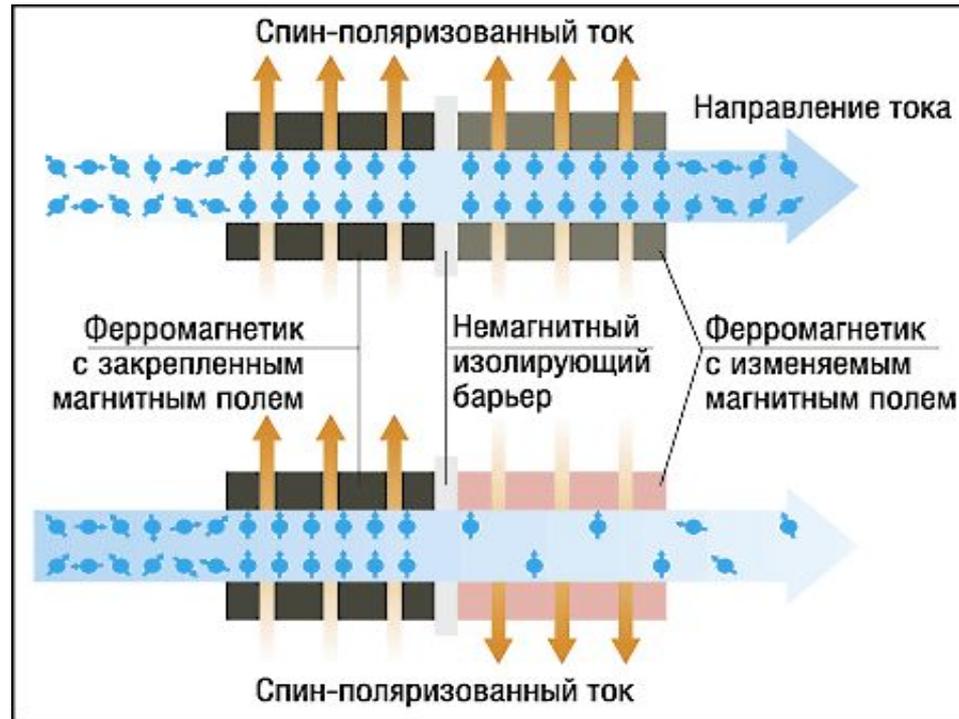
Магнитный туннельный переход

В ферромагнитном материале энергия электронов со "спин-вверх" и "спин-вниз" различная, поэтому и вероятность их туннелирования будет отличаться. Если магнитные моменты смежных слоев направлены параллельно, проводимость магнитного туннельного перехода велика, а если намагниченности антипараллельны, то вероятность туннелирования мала, то есть электросопротивление большое. Возникает эффект ГМС.

Максимальная величина магниторезистивного эффекта, наблюдаемого в таких структурах при комнатной темпер

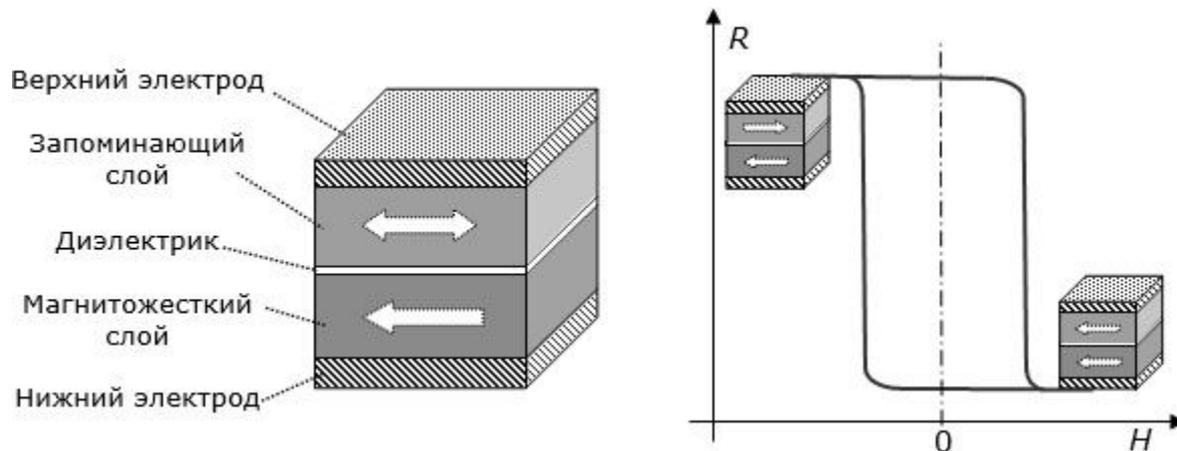


Спин-туннельные структуры



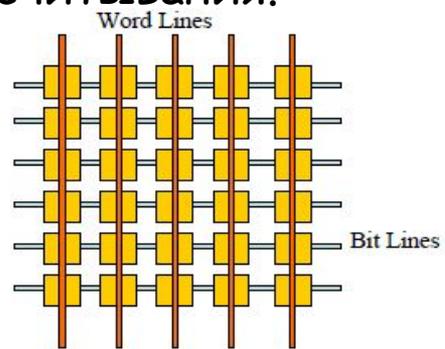
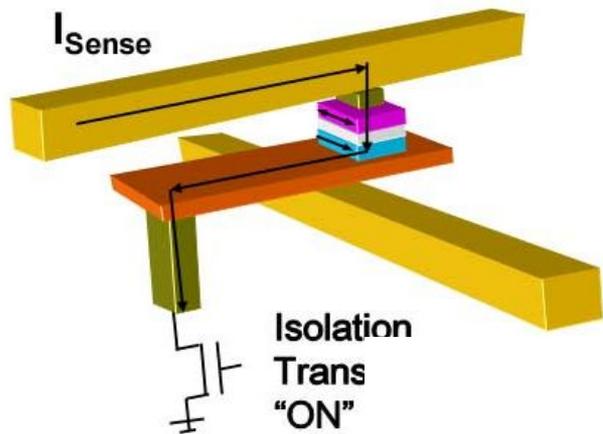
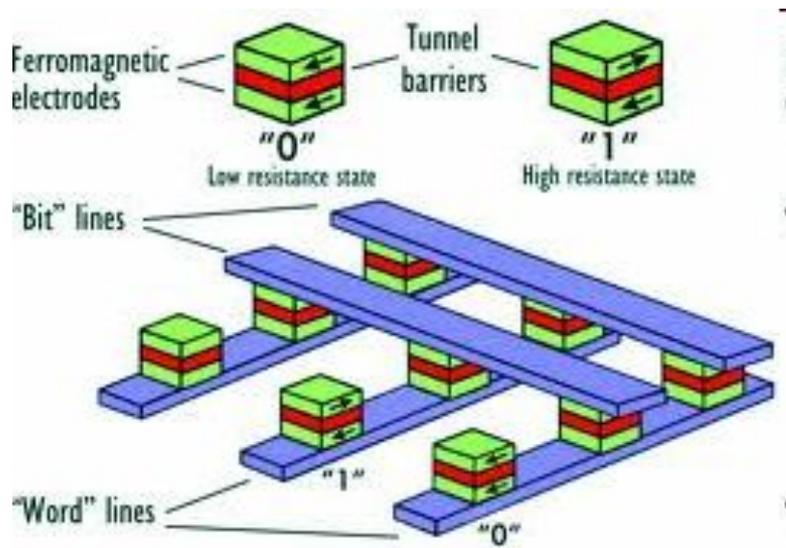
Состоит из закрепленного и свободного ферромагнитных слоев, которые разделены тонким слоем изолятора нанометровой толщины, обычно это окись алюминия. Сопротивление изменяется с помощью внешнего магнитного поля точно таким же способом, как и для спин-вентилей. При антипараллельных магнитных полях в ферромагнетиках значение сопротивления увеличивается на 20 - 40%.

Структуры с магнитным туннельным переходом применяются в качестве считывающих головок в жестких дисках, а также для создания элементарных ячеек магниторезистивной оперативной памяти (MRAM). Когда запоминающий слой намагничен противоположно к фиксированному ферромагнитному слою, то электрическое сопротивление ячейки велико. Когда же внешнее магнитное поле превышает коэрцитивную силу запоминающего слоя, то он перемагничивается, электрическое сопротивление ячейки резко падает, оставаясь таким же низким и после исчезновения внешнего магнитного поля. Это и позволяет в любой момент проверить, в каком состоянии ("0" или "1") находится запоминающий элемент ячейки.



MRAM и архитектура cross-point

Ячейки памяти расположены на пересечении токоведущих шин. Адресация к определенному биту информации осуществляется подачей импульсов записи/считывания на соответствующую шину слов и шину битов. При записи по шинам проходят импульсы тока, магнитное поле которых оказывается достаточным, чтобы перемагнитить магнитомягкий слой. При считывании состояние бита определяется с помощью эффекта гигантского магнитосопротивления, путем пропускания небольших токов считывания.

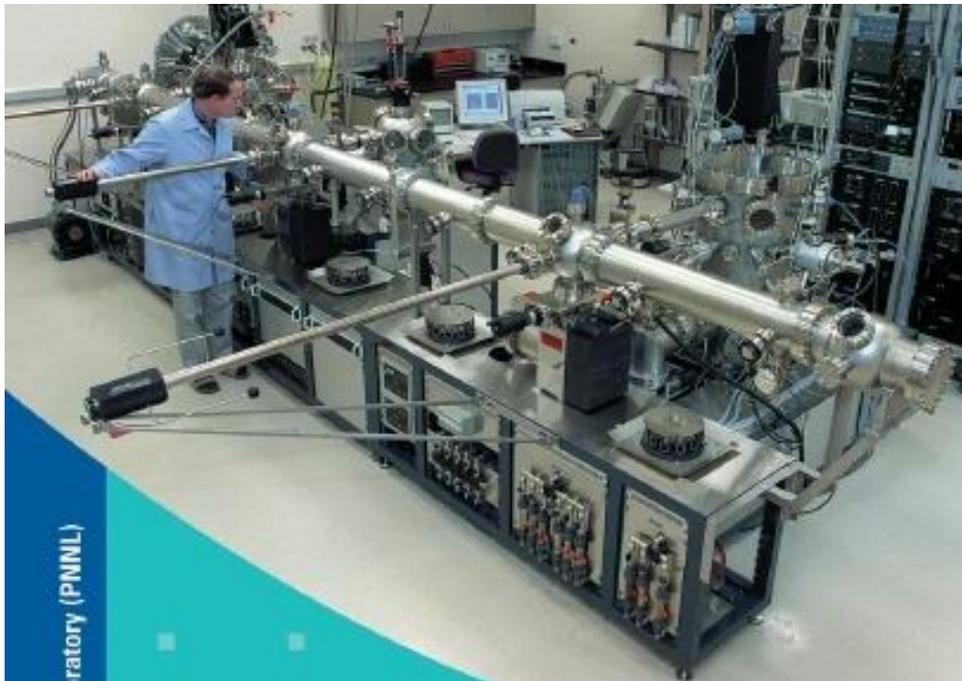


Ячейка MRAM, размер около 200x200 нм

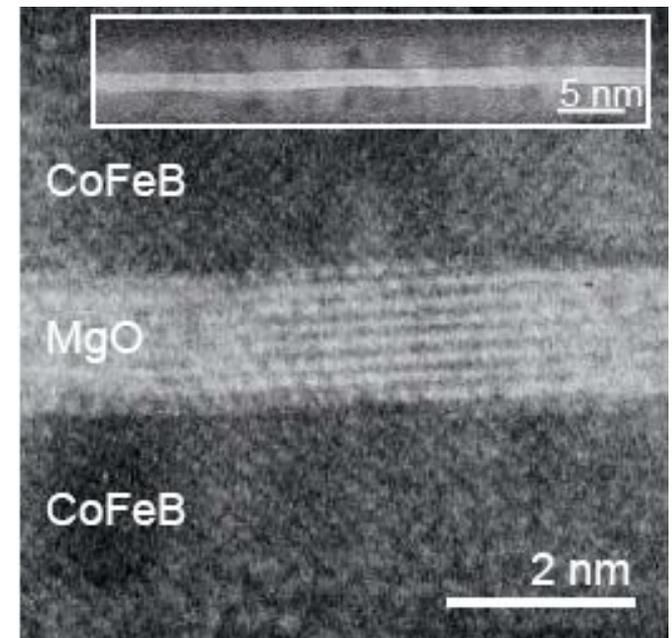
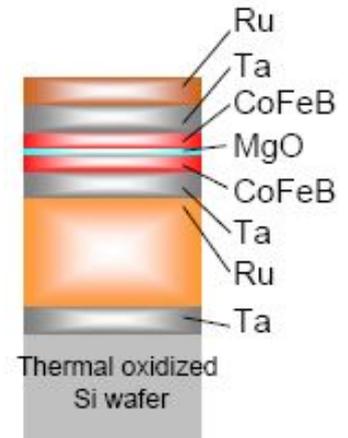
MRAM-память

- Сегодня разработку MRAM-памяти ведут несколько фирм: Motorola, IBM, Infineon, Cypress Semiconductor, TSMC, а также совместно NEC и Toshiba. Большинство из них остановились на MRAM-памяти с магнитным туннельным переходом.
- MRAM-память выглядит весьма перспективной и многообещающей по сравнению с другими типами энергонезависимой памяти. Так, например, время выборки данных у MRAM-памяти может составлять 10 нс, что в пять раз меньше, чем у flash-памяти, а время записи - 2 нс (на три порядка меньше, чем у flash-памяти). При этом энергопотребление магниторезистивной памяти вдвое меньше, чем у flash- и DRAM -памяти (Dynamic random-access memory).

Туннельное магнитосопротивление: как это делается



В этом здании в 1844 году
профессором К. К. Клаусом
был открыт
химический элемент
рутений.
Бу бинада
профессор К. К. Клаус
Тарафиннан 1844 елда
химик элемент Рутений
табылды.



ТМРАМ в сравнении с другими

Категория	Параметр	SRAM	DRAM	NOR Flash	MRAM
Затраты	Площадь ячейки	3,7 мкм ²	0,56 мкм ²	0,5 мкм ²	0,7-0,14 мкм ²
Быстродействие	Доступ на чтение	3,3 нс	13 нс	13 нс	5-20 нс
	Цикл записи	3,4 нс	20 нс	5 мкс	5-20 нс
	Энергопотребление на сохранение данных	0,6 нА на бит при 85°С	0,2 нА на бит при 85°С	0	0
Мощность	Активная при чтении	15 пКл на бит	7 пКл на бит	30 пКл на бит	7 пКл на бит
	Активная при записи	15 пКл на бит	7 пКл на бит	30 нКл на бит	45 пКл на бит
Прочее	Способность к перезаписи	неограниченная	неограниченная	105 циклов	неограниченная

Эффекты спиновой поляризации

- В настоящее время различают три различных типа спиновой поляризации:

- Поляризация тока

$$P_J = \frac{J_{\uparrow} - J_{\downarrow}}{J_{\uparrow} + J_{\downarrow}}$$

- Поляризация спиновой плотности

$$P_n = \frac{n_{\uparrow} - n_{\downarrow}}{n_{\uparrow} + n_{\downarrow}}$$

- Поляризация проводимости

$$P_{\sigma} = \frac{\sigma_{\uparrow} - \sigma_{\downarrow}}{\sigma_{\uparrow} + \sigma_{\downarrow}}$$

- Явление спиновой аккумуляции возникает когда величина токовой поляризации отличается от поляризации проводимости

$$P_J = 2 \frac{\sigma_{\uparrow} \sigma_{\downarrow}}{\sigma_{\uparrow} + \sigma_{\downarrow}} \frac{\nabla(\mu_{\uparrow} - \mu_{\downarrow})}{J_{\uparrow} + J_{\downarrow}} + P_{\sigma}$$

- **Явление спиновой аккумуляции возникает на межфазной границе ферромагнетик – немагнитный металл (F-N)**

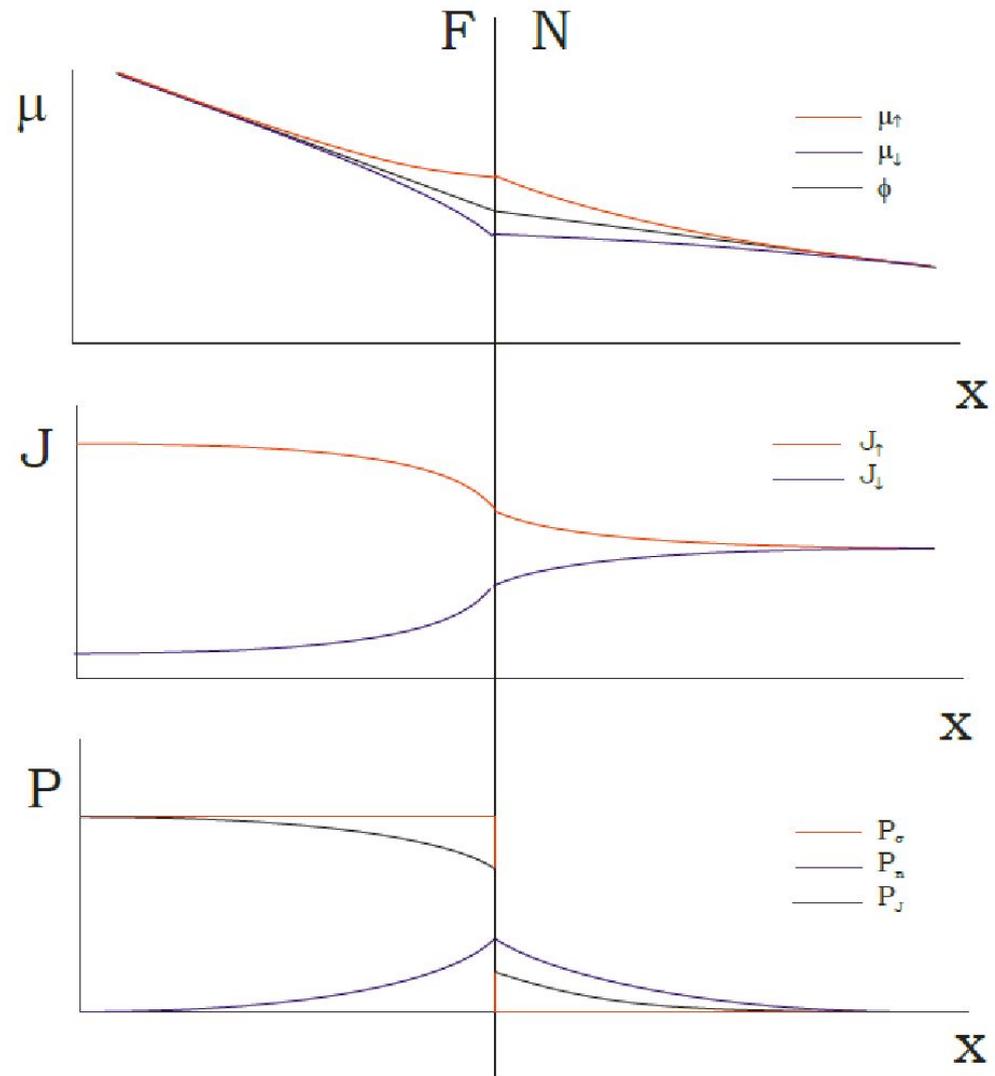
Расщепление химического потенциала μ на межфазной границе

Плотность тока J , поляризованная в ферромагнетике, стремится к нулю в глубине нормального металла

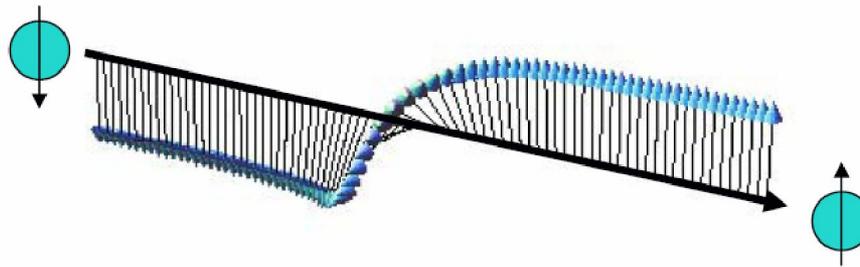
Поляризация:

- поляризация проводимости $P\sigma$ – отражает свойство материала (F или N);
- спиновая поляризация Pn характеризует аккумуляцию спинов;
- поляризация тока Pj .

Осуществляется инжекция спинов в немагнитный металл.

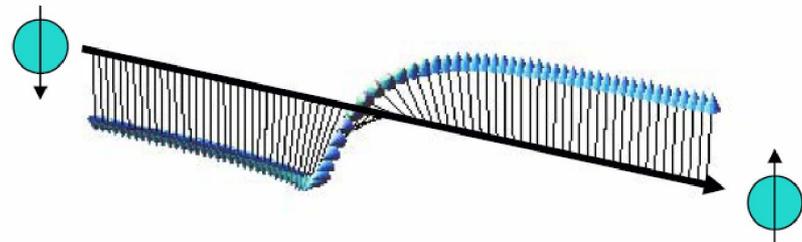


- **Эффект гигантского магнитосопротивления**
- - на межфазных границах структур типа F/N/F
- **Эффект колоссального магнитосопротивления** (в манганитах)
- - на доменных стенках в однородном ферромагнитном материале



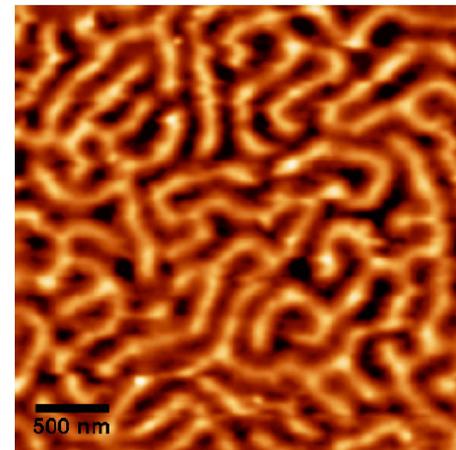
- **Доменные стенки в однородном (по структуре) ферромагнитном материале**

Доменная стенка — макроскопическая область, в которой происходит переориентация намагниченности материала



Возникновение спин-поляризованных токов из-за взаимодействия электронов с доменными стенками (меняется направление оси квантования)

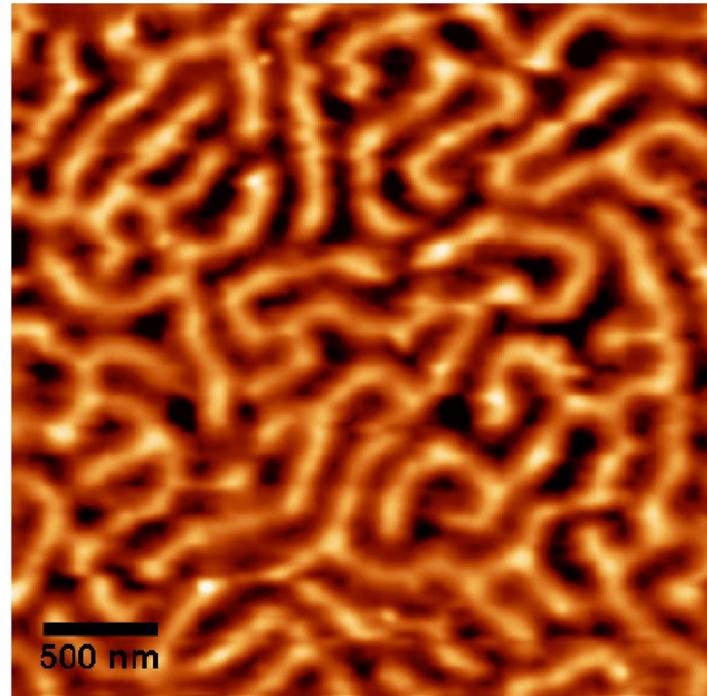
Рассеяние на доменных стенках стимулирует **рост магнитосопротивления**



~ 8 нм — толщина доменных стенок

- **Доменные стенки в однородном ферромагнитном материале**

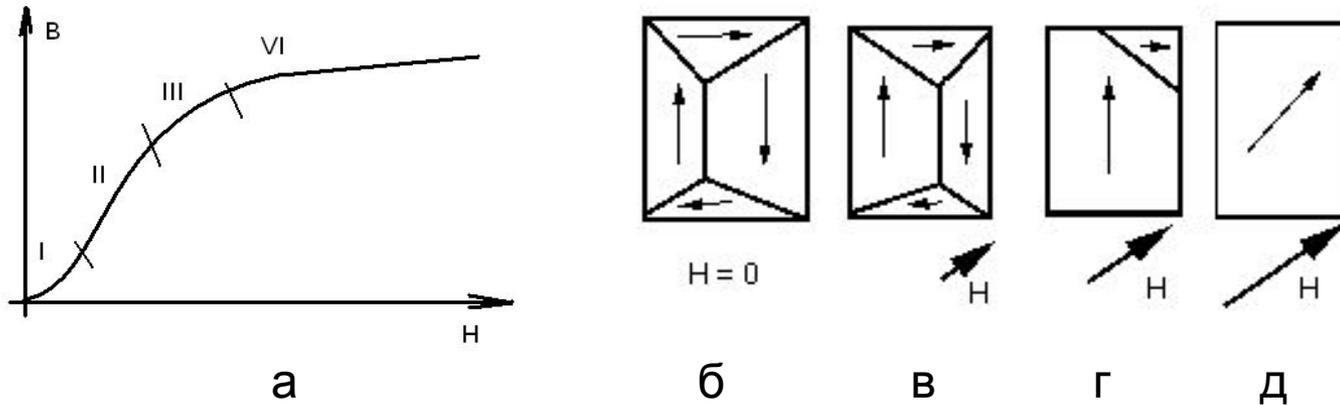
Сопротивление в доменных стенках на ~ 10% выше чем в доменах, что приводит к ~90% поляризации тока



Реальные площади доменов составляют от 0,001 до 0,1 мм² при толщине граничных стенок между ними несколько десятков – сотен атомных расстояний. Размеры доменов особо чистых материалов могут быть больше.

В зависимости от размеров образца, его физических свойств и других причин существуют различные доменные структуры: однодоменные, полосовые, лабиринтные, цилиндрические и др.

- **Доменные стенки в однородном ферромагнитном материале**

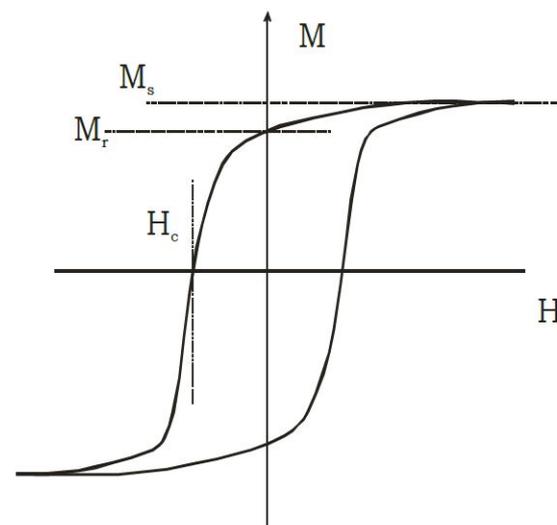


Кривая намагничивания ферромагнетика (а) и схемы ориентации спинов и доменах при отсутствии магнитного поля (б), намагничивании в слабом (в) и сильном полях (г) и при насыщении (д)

На кривой намагничивания возрастание индукции под действием поля обусловлено двумя основными процессами: смещением границ доменов и поворотом их магнитных моментов. Кривую намагничивания можно разбить на четыре области: I и II – обратимого и необратимого смещения доменных границ; III – вращения магнитных моментов доменов; IV – насыщения.

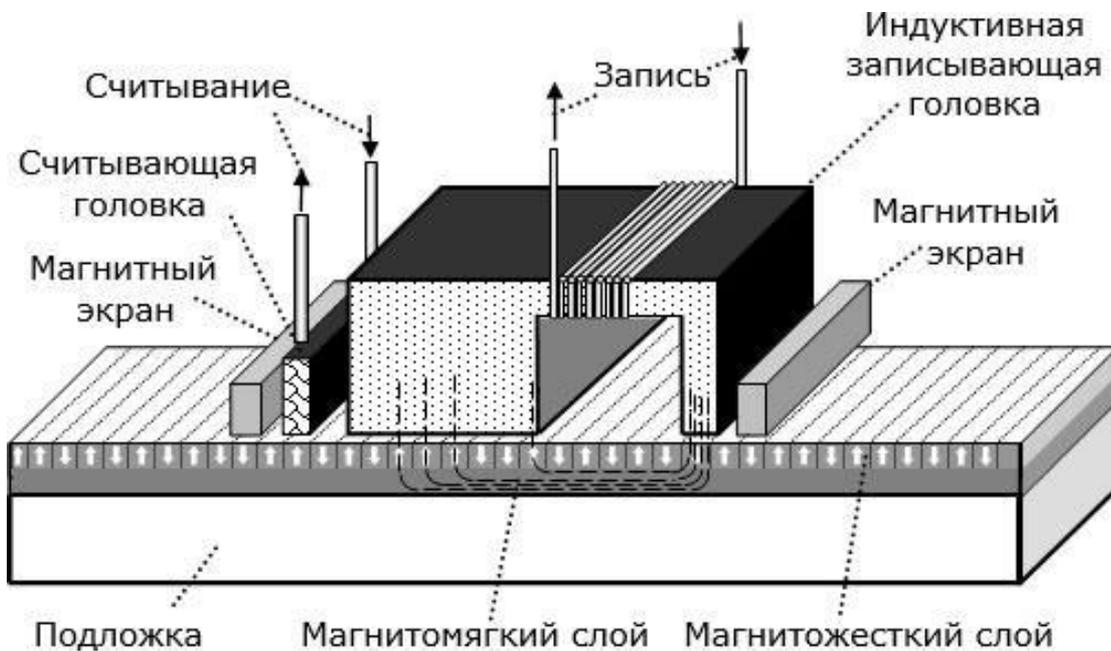
Псевдоспиновые вентили

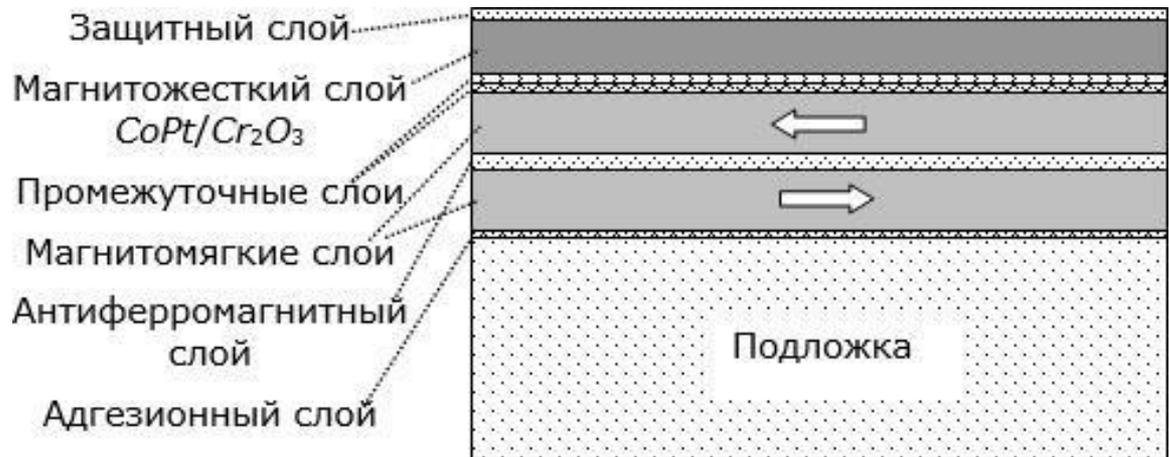
Создание данных спин-поляризующих систем основано на использовании ферромагнитных пленок из материалов с различными значениями коэрцитивной силы – поля H_c (мягкие и жесткие ФМ)



Если один из ферромагнетиков намного мягче, чем другой, то при некоторых полях H намагниченности этих ферромагнитных слоев будут ориентированы антипараллельно.

На основе таких элементов созданы считывающие головки в жестких дисках с перпендикулярной записью информации.





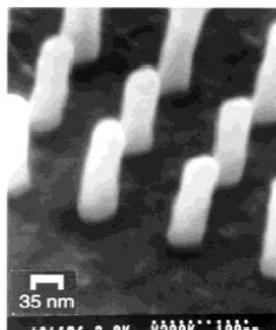
На основу диска (Подложка) наносят адгезионный слой, поверх него – два слоя магнитомягкого материала с противоположными направлениями горизонтальной намагниченности. Между ними для магнитной развязки формируют тонкий антиферромагнитный слой.

Между магнитомягкими и магнито жестким слоями наносят тонкие промежуточные слои с тщательно подобранным химическим составом, которые помогают избавиться от внутренних магнито стрикционных напряжений в системе. Магнито жесткий слой формируют таким образом, чтобы ось его легкого намагничивания была сориентирована вертикально. Поэтому магнитные домены в нем вытянуты по вертикали и в проекции на поверхность диска занимают наименьшую площадь. И именно это направление, перпендикулярное к поверхности диска, становится рабочим. Над магнито жестким запоминающим слоем наносят тонкий защитный слой, который оберегает внутренние слои от механических повреждений.

Перспективы увеличения плотности записи информации на жестких дисках компьютеров: наноструктурированная среда записи

Квантовый магнитный диск – среда записи, состоящая из ферромагнитных НАНО-столбиков

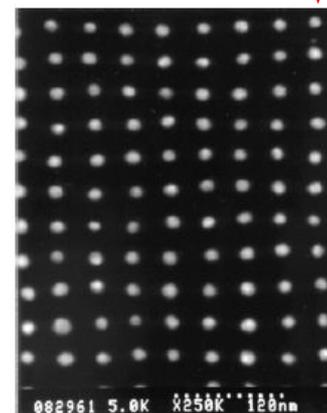
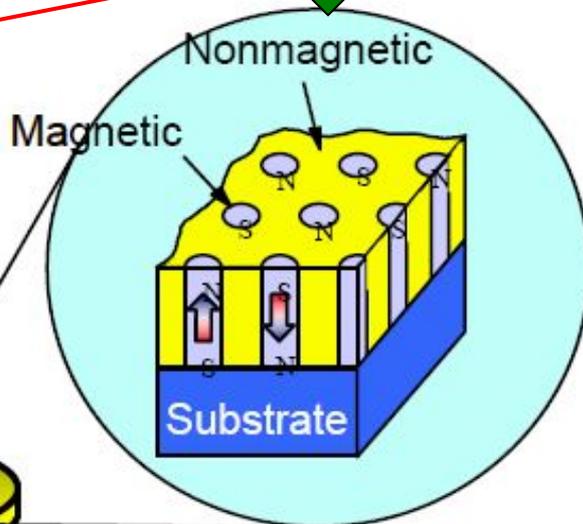
Плотность записи – от **20 Гб/см²** (слева) до **100 Гб/см²** (справа)



SEM micrograph of nanomagnetic pillars of a 65 Gbit/in² density

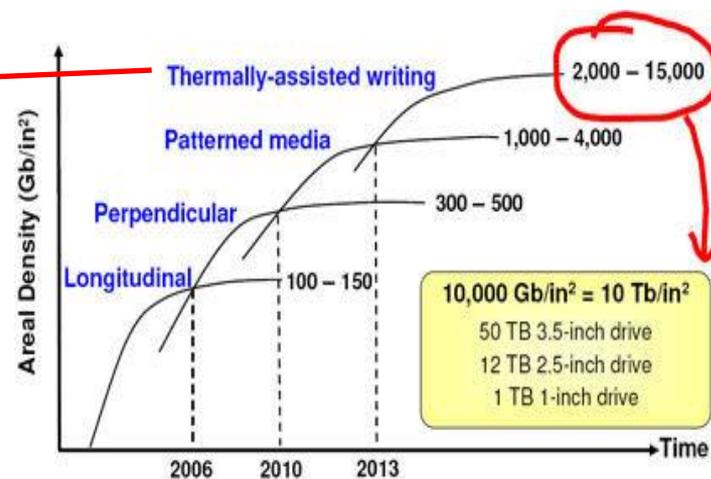
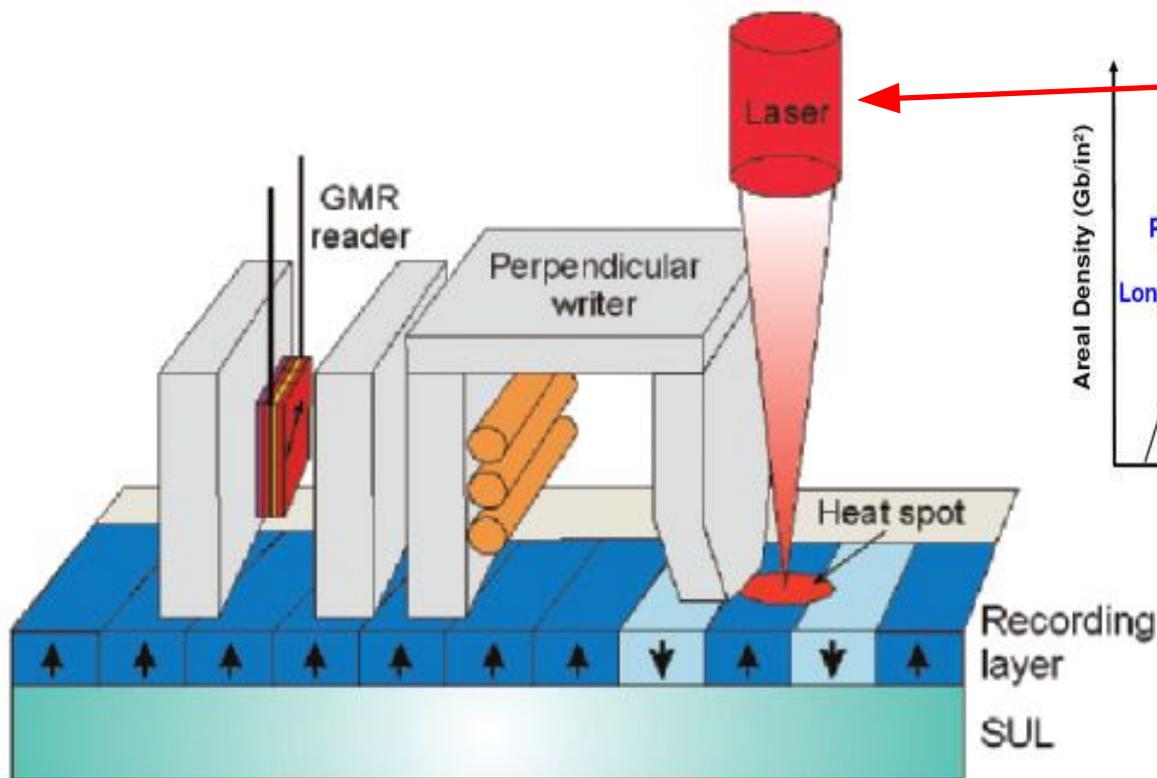


Schematic of quantized magnetic disk.



SEM micrograph of a 400 Gdot/in² density and 10 nm dots and 40 nm pitch by nanoimprint

Перспективы увеличения плотности записи информации на жестких дисках компьютеров: лазерный прогрев среды перпенд. записи

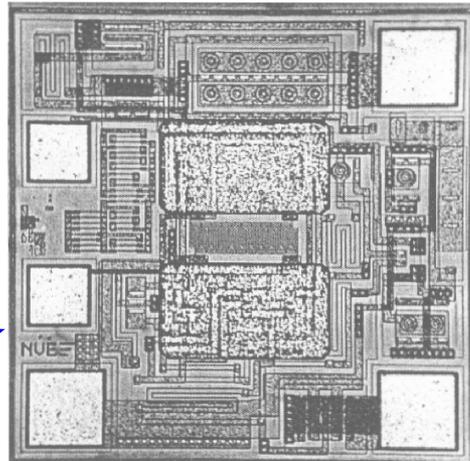


Устройства на основе ГМС материалов

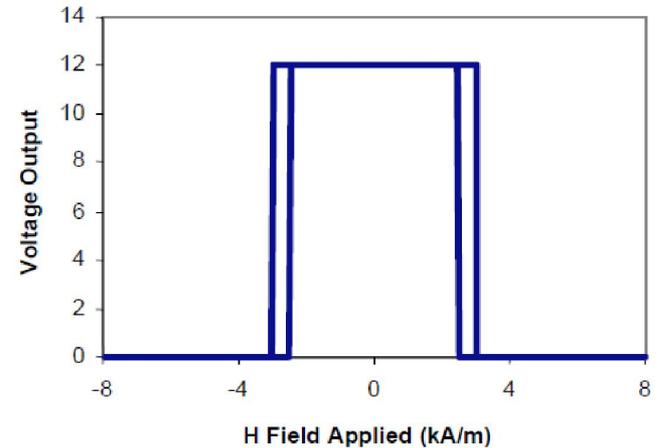
Структура	Устройство	Параметры, R/R ₀ , %	Исследоват. группы
Co/AlGaAs сверхрешетка из Co полосок шириной 200нм, высотой 120нм, периодом 500нм на поверхности гетероструктуры AlGaAs	Магнитные датчики, записывающие устройства	~1000 (4К), ~1 (300К)	Univ. Nottingham (Великобритания)
Многослойные структуры NiFeCo/Cu(Ag)	Магнитные датчики	8 (300К)	Univ. Manchester (Великобритания)
Многослойные структуры NiFe/Cu	Записывающие головки	9.5; чувстви- тельность 0.44 Э	Lawrence Livermore National Lab. (США)
Многослойные структуры CoFe/Cu	Сенсорные устройства	~20 (поле насыщения 20-100 Э)	Fijitsu Lab. Ltd. (Япония)
Многослойные структуры NiFe/Cu	Магнитные датчики	10 (295К); поле насыщения <125 Э; чувствит. 0.17 Э)	Univ. Bielefeld (Германия)

Приложения эффекта гигантского магнитосопротивления

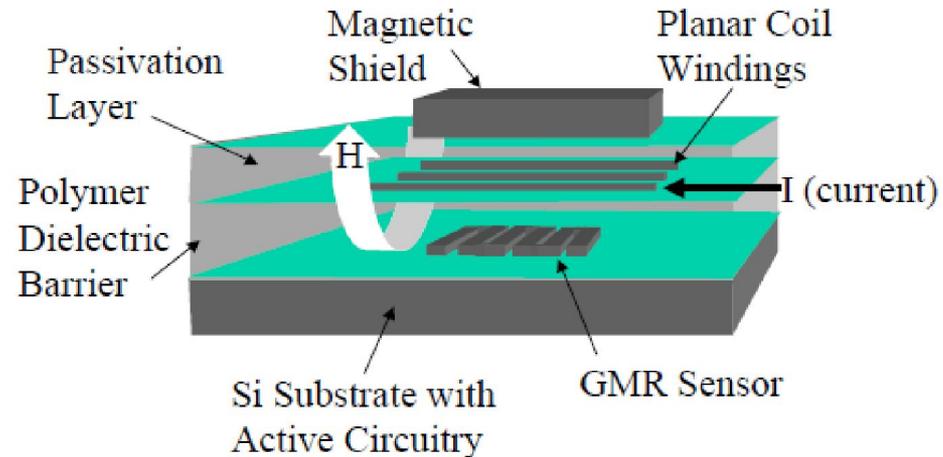
СЕНСОРЫ
И
РАЗВЯЗКИ



GMR Digital Switch Output

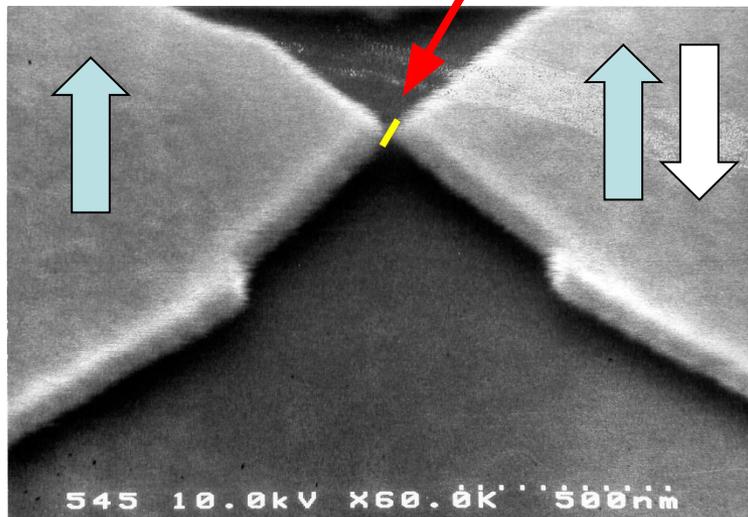


0.9 мм



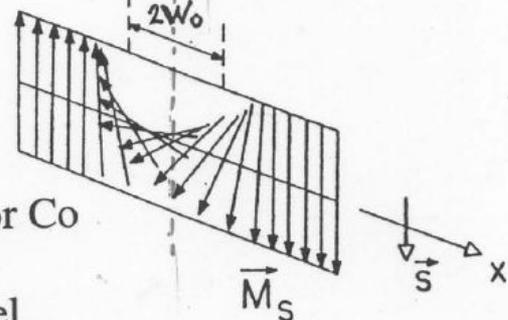
Проблема - сенсор магнитного поля размером ~ 10-20 нм

Возможное решение - магнитные наноконтакты
Геометрически ограниченная доменная стенка - очень тонкая



Domain Wall Structure

Bloch wall



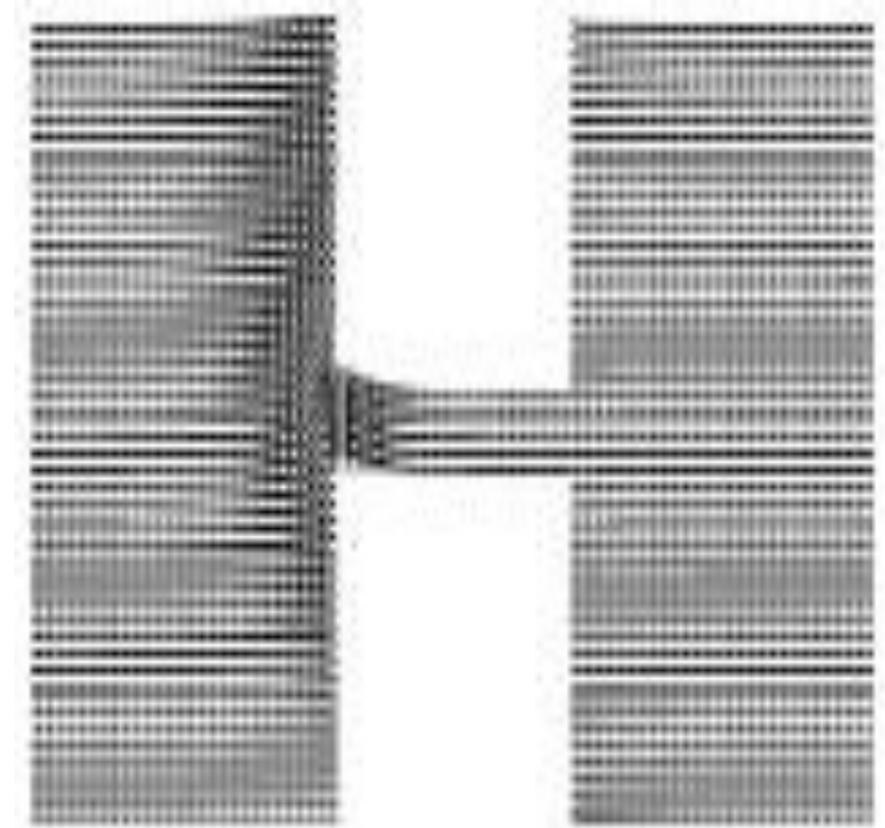
$w_0 \approx$ ~150-200Å for Co
~400Å for Iron
~1000Å for Nickel

В 1999 году испанские ученые Н. Гарсия и М. Мунос предложили осуществить контакт двух намагниченных областей, тем самым, объединив свойства наноконтакта и спинового клапана.

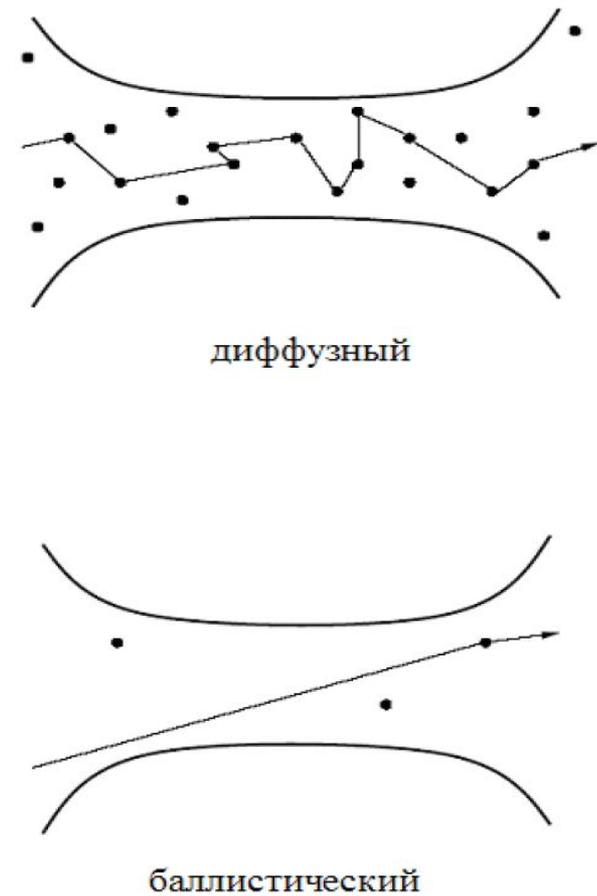
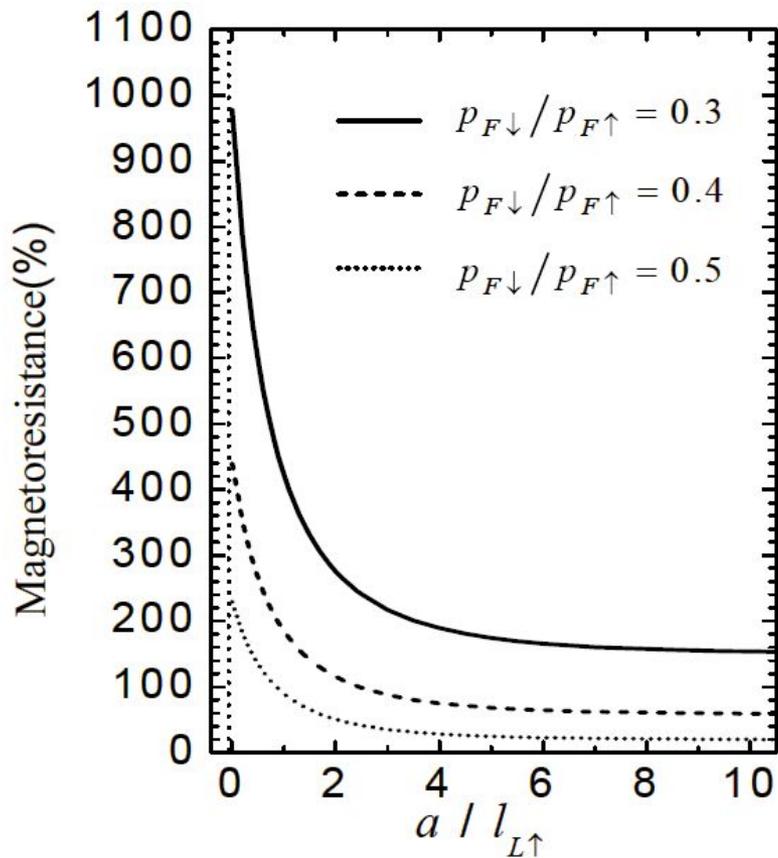
Получившиеся значения магнитосопротивления при комнатных температурах составляли 700% (против 10% используемых в жестких дисках). В своих опытах испанцы использовали заостренные ферритовые стержни, площадь соприкосновения которых менялась от эксперимента к эксперименту и плохо воспроизводилась.

На рисунке показана усовершенствованная версия магнитных наноконтактов - наномостик (разработан в Спин МТ А.К. Звездиным с коллегами).

Магнитосопротивление наномостика зависит не только от взаимного направления намагниченности в контактах, но и от положения доменной границы (посередине мостика-перемычке или вблизи одного из берегов).



Гигантское магнитосопротивление в наноконтактах



Материалы спинтроники.

Магнитные полуметаллы

Для работы спинтронных устройств важно получить высокую поляризацию по спину. В некоторых материалах, называемых "полуметаллами" (half-metals, не путать с semimetals), например, в перовските $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, электрический ток может быть полностью поляризован по спину. Это связано с тем, что в таких материалах уровень Ферми находится в зоне, образованной состояниями электронов с одной проекцией спина, и лежит выше полностью заполненной зоны состояний с другой проекцией спина.

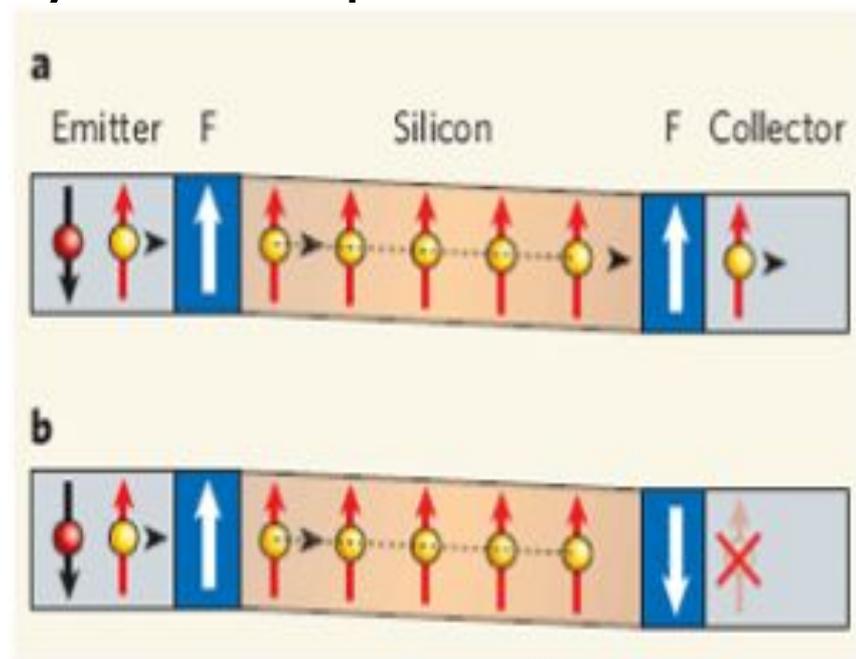
Магнитные полупроводники

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. Магнитные свойства магнитных атомов обусловлены d -орбиталями, в то же время полупроводники образуются из атомов с внешними s - или p -орбиталями. Вследствие этого помещение магнитных атомов в кристаллическую решетку полупроводника резко ухудшает их магнитные характеристики. В результате намагниченность магнитного полупроводника можно ощущать только с помощью сверхчувствительных магнетометров.

Примеры $(In,Mn)As$; $(Ga,Mn)As$, — но, к сожалению, все при низких температурах. А магнитные свойства GaN с примесью Mn , проявляющего едва заметную намагниченность при комнатной температуре, возможно, являются экспериментальным артефактом — следа на поверхности от стального пинцета.

Поэтому развитие полупроводниковой спинтроники пошло по другому пути - не создавать магнитные полупроводники, а инжектировать в них поляризованные по спину электроны. На рисунке показано как 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.

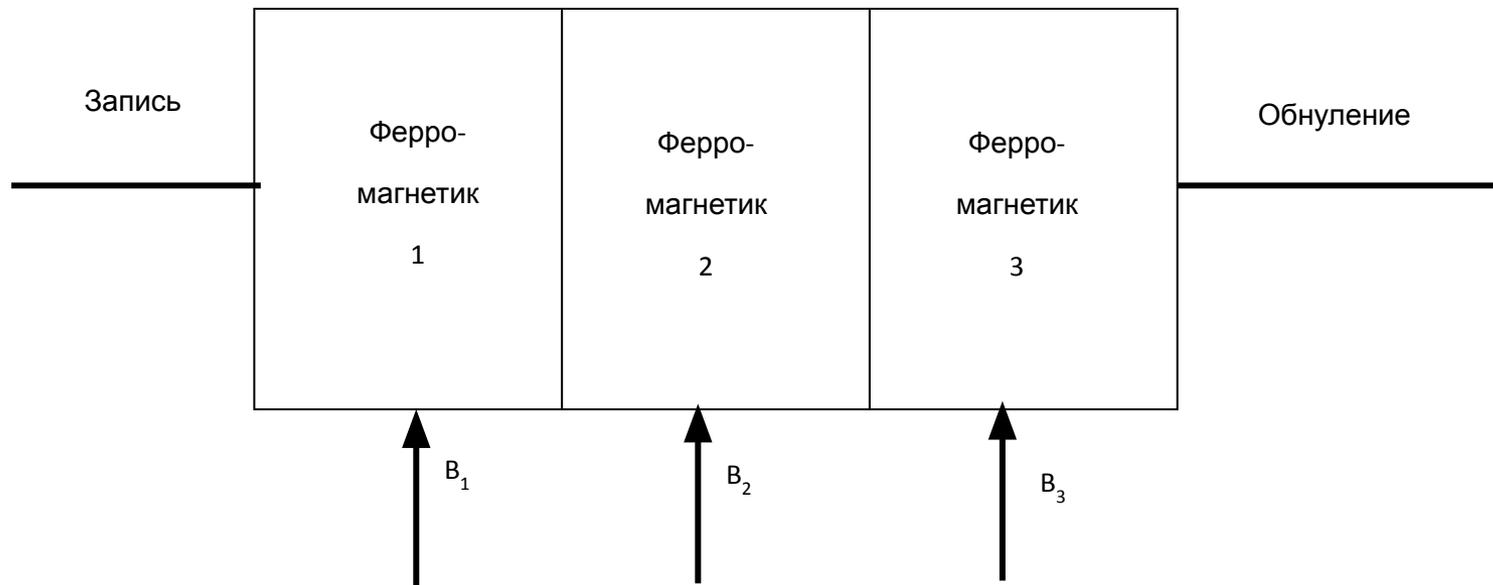


Инжекция спиновых токов в кремний. F - слой магнитного вещества, действующие как спиновые поляризатор и анализатор.

В 2010 году была предложена еще одна концепция использования полупроводников в спинтронике: создать в магнитном полупроводнике p-n переход. Прототип такого устройства, работающего при комнатных температурах создан командой ученых из университета Северной Каролины на нитриде галлия марганца [IEEE Spectrum, n.11, p.43 (2010)]. Изменяя напряжение на p-n переходе, можно управлять концентрацией носителей, от которой зависит магнитное состояние материала. Малая концентрация носителей соответствует слабому обменному взаимодействию между атомами марганца и парамагнитному состоянию, а большая концентрация носителей - ферромагнитному.

Спиновой полевой транзистор

- На рисунке приведена схема полевого транзистора на спинтронном эффекте. Ферромагнетики 1 и 3 являются истоком и стоком транзистора и они всегда намагничены одинаково и постоянно. Ферромагнетик 2 является проводящим каналом. Путем подачи на него поля V_2 с разным направлением можно варьировать проводимость канала и добиваться разного значения тока.



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.

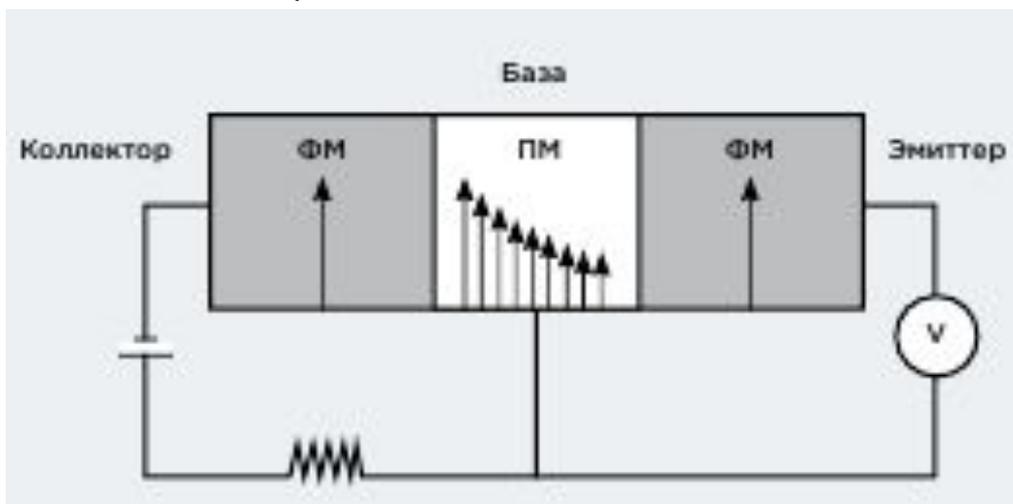


Схема спинового транзистора Джонсона

Если говорить на языке биполярных транзисторов, то транзистор Джонсона состоит из базы (парамагнетик), эмиттера и коллектора (ферромагнетики). 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.

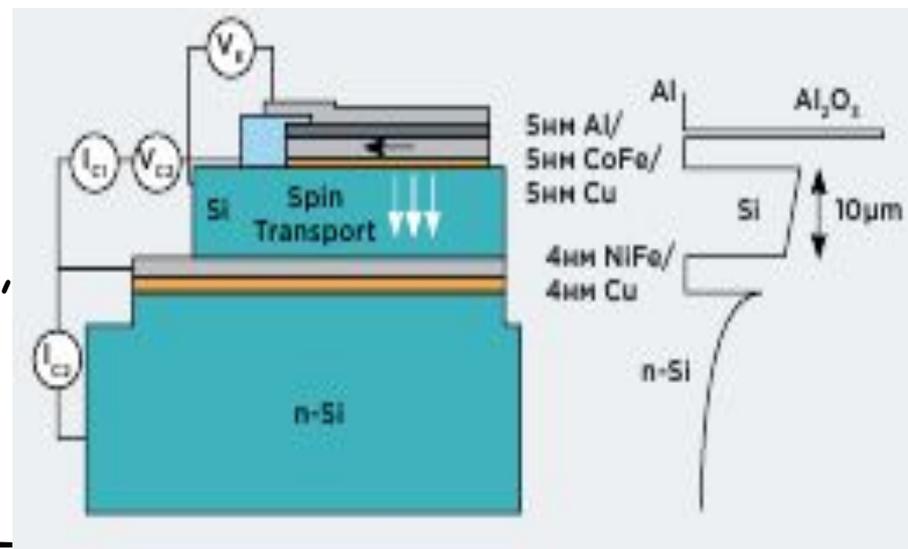
Гибридная спинтроника.

Транзистор Джонсона имеет некоторые ограничения в использовании. Измеряемые значения напряжения очень малы, и увеличить их без привлечения дополнительных устройств не представляется возможным. Основным недостатком 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 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).

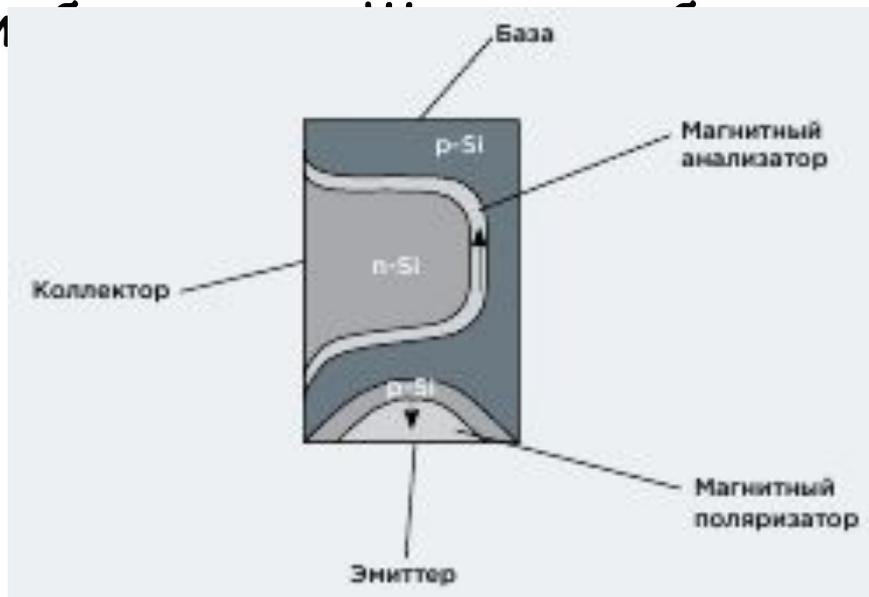
Транзистор Монсма стал важным шагом в эволюции спинтроники. Это первая комбинация спин электронных устройств с полупроводниками. Следует заметить, что полупроводники используются только для создания энергетических барьеров и экранирования спин зависимой части устройства от электрических полей. Для раскрытия 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 поляризованного тока эмиттера в электрически экранированную область устройства РИС .

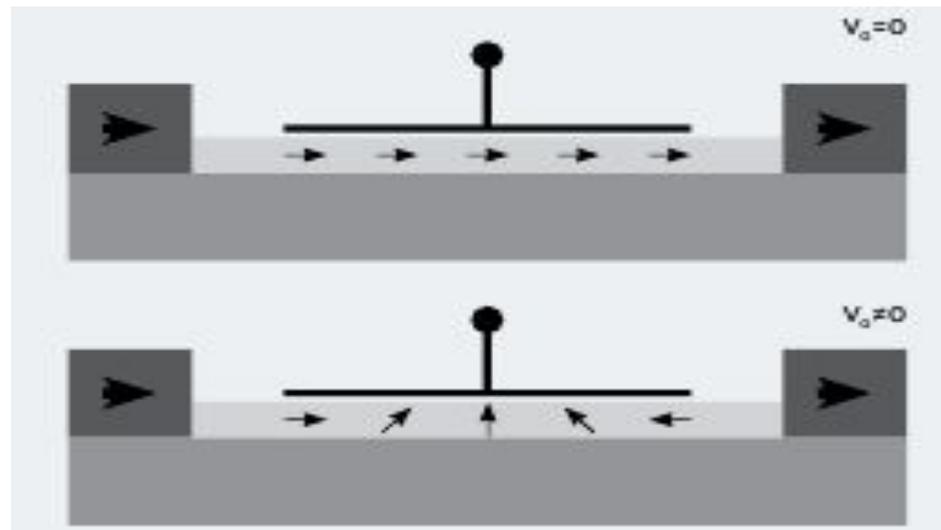
В итоге получено устройство с предварительным усилением мощности. Электрическими характеристиками SPICE-транзистора можно управлять, меняя внешнее магнитное поле. Дизайн SPICE-транзистора может быть разным. К примеру, межфазные границы эмиттера и коллектора могут быть реализованы p-n-переходами туннельными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



Спин полевой транзистор Датта-Даса

В 1990 году Суприйо Датта (Supriyo Datta) и Бисуюджит 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.

Принцип действия
спин полевому
транзистора
Датта-Даса



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.

Недостатки

•Основной недостаток приборов спинтроники — использование разных источников переменного магнитного поля и создание активных областей, соответствующих различным ферромагнетиком, с быстрым реагированием на переключение магнитного поля. В результате очень непросто создать области с малыми размерами, а в случае получения таких ферромагнитных областей — очень не просто изолировать их от влияния не своих полей. Например, подавая B_1 на ферромагнетик 1 мы частично влияем и на ферромагнетик 2, зачастую не позволяя переключиться ему в нужное состояние. Чтобы избежать таких паразитных переключений нужно создавать очень сложные изолирующие конструкции, что заметно увеличивает размеры элементов и самих приборных структур.

Рынок

Основные сегменты рынка

- 1) Рынок запоминающих устройств типа flash-памяти.
- 2) Рынок твердотельных жестких магнитных дисков.
- 3) Рынок оборудования для изготовления наноструктурированных материалов и изготовления устройств микросистемной техники.
- 4) Рынок магнитных наноматериалов.

Рынок устройств памяти Мировой объем рынка flash-памяти в 2008 г. ориентировочно составлял 15 млрд. долл. К 2011 г. Рынок достиг объема 25 млрд.долл. В 2012 г. произошло некоторое снижение объема рынка до 24 млрд.долл., однако с 2013 года рост рынка возобновился. Объем российского рынка flash-памяти составляет ~ 300 млн. долл. В целом, рынок flash-памяти является довольно устойчивым, на протяжении длительного времени на нем лидируют 4 основных производителя: фирмы Samsung, Toshiba, Micron, Hynix. Доля остальных производителей крайне незначительна - в течение длительного времени она не превышает 1%. Рынок памяти DRAM имеет объем, сопоставимый с объемом рынка flash-памяти. Наиболее объемные сегменты рынка DRAM-памяти - DDR-память и память для мобильных устройств, прежде всего, смартфонов. Один из наиболее динамичных рынков-потребителей DRAM-памяти - рынок смартфонов - является потребителем памяти с плотностью записи ~ 8 Гб/чип. В 2013 году отмечается рост доли памяти с плотностью 16 Гбит/чип примерно до 15%. На рынке DDR-памяти прогнозируемая средняя плотность памяти достигнет 8 Гб/чип к 2015 г. Таким образом, к моменту выхода на рынок (в 2016-2017 гг) планируемая плотность записи 32 Гбит/чип должна соответствовать мировому уровню или превышать его.

1. Рынок магнитных наноматериалов

Российский рынок: 1млрд.рублей;

Потребители:

Зеленоград (есть договоренность);

Екатеринбург (есть договоренность);

Красноярск (есть договоренность);

ВУЗЫ, осуществляющие подготовку по направлениям 020300 «Химия, физика и механика материалов», 200700 «Фотоника и оптоинформатика» 022200 «Наносистемы и наноматериалы», 152100 «Наноматериалы», 210100 «Электроника и наноэлектроника», 222900 «Нанотехнологии и микросистемная техника» (более 80 ВУЗов в РФ;

Мировой рынок: 1 млрд. долларов

Наша доля: до 1%

2. Рынок запоминающих устройств

Российский рынок - 300 млн.долларов (~10млрд. Рублей):

Мировой рынок - 25 млрд.долларов.

Наша доля - 0,5%

Потребители: Зеленоград, Ecol Centrale Lille, ZEMN-Lille,