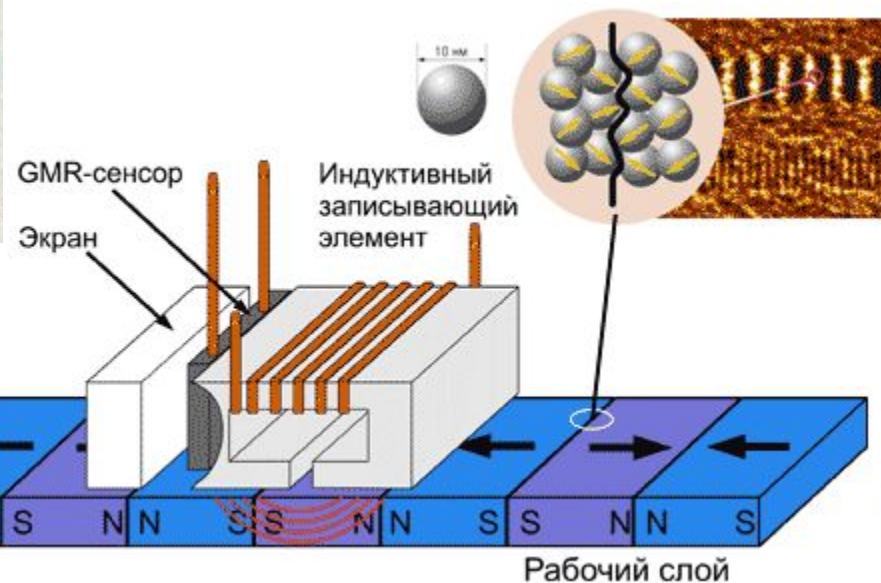
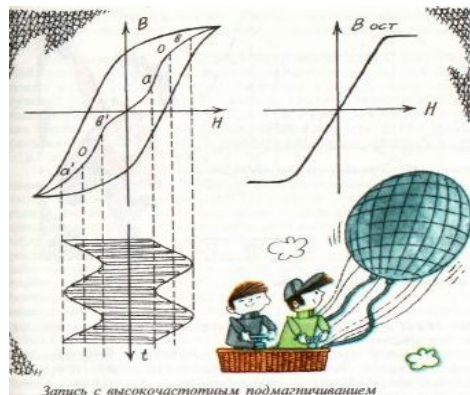
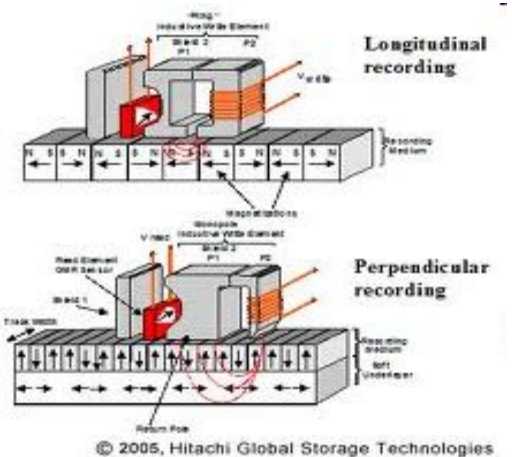
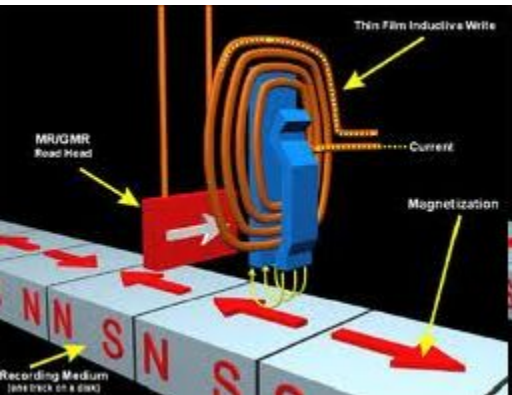


Magnetic memory & recording

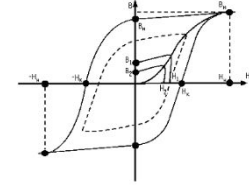
Магнитная запись



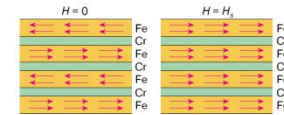
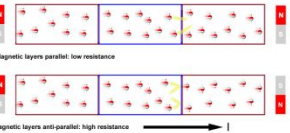


Материалы для магнитной записи:

- классификация;
- основные физические характеристики;
- состав.

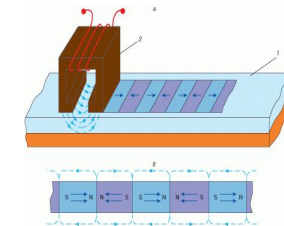


Гигантский магниторезистивный эффект: до и после.



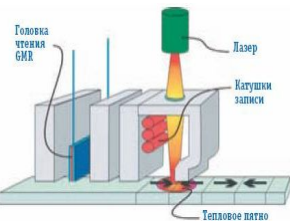
Технологии записи данных:

- продольная запись;
- поперечная (перпендикулярная) запись;
- термостимулированная запись;
- структурированная запись (Pattern Media).



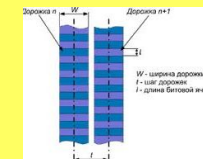
Физические пределы плотности для каждого метода магнитной записи.

Проблема суперпарамагнетизма

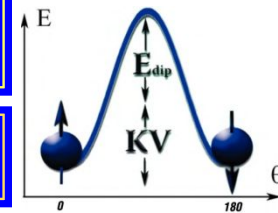


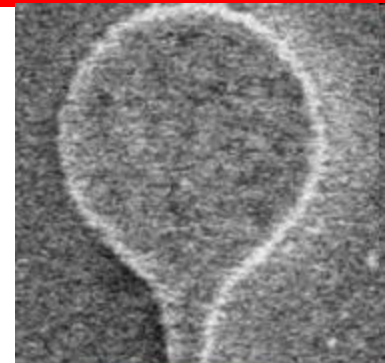
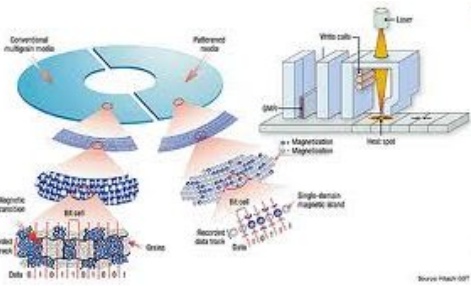
Жесткий диск:

- организация;
- протоколы;
- интерфейсы.



Перспективы магнитной записи





Eastmag 2013: Trends in magnetism



Pattern Media & Heat-Assisted memory record seem to be still the most perspective

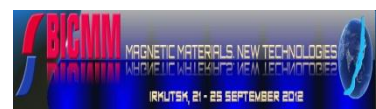
International Workshop Of Non-Crystalline Solids, Portugal, 2008



International Workshop on Structural and Mechanical Properties of Metallic Glasses, Spain, 2009



Joint European Magnetic Symposium, Poland, 2010





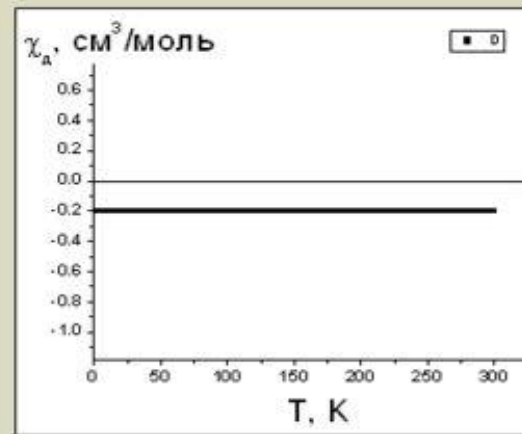
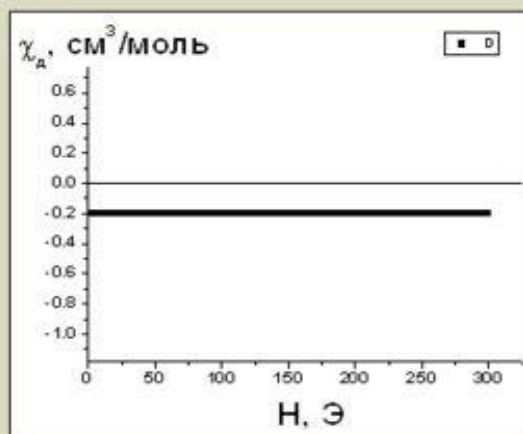
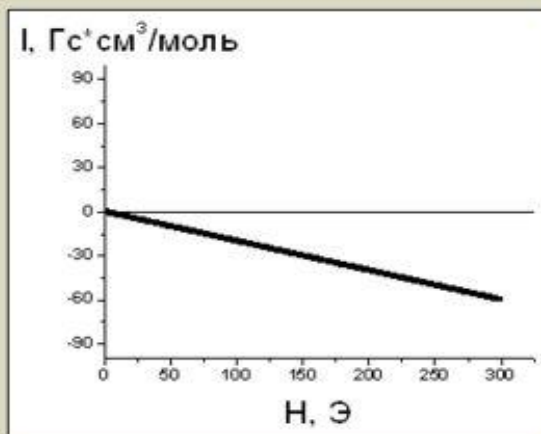
Возникает вопрос: любой ли материал подойдёт для магнитной записи?



Вещество в магнитном поле

Диамагнетизм

- χ_d *не зависит* от приложенного магнитного поля H и температуры T



$$\chi_d \sim 10^{-4} - 10^{-5} \text{ cm}^3 / \text{mol}$$



Возникает вопрос: любой ли материал подойдёт для магнитной записи?



Вещество в магнитном поле

Парамагнетизм

- *Не зависит* от приложенного магнитного поля H
- *Зависит* от температуры T

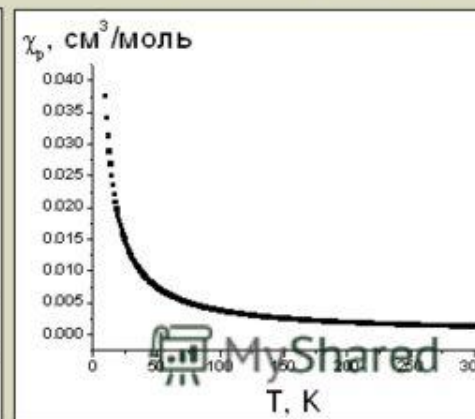
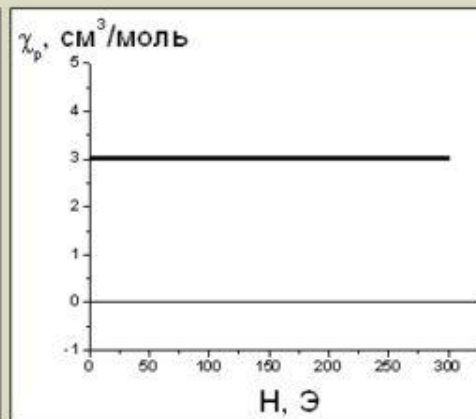
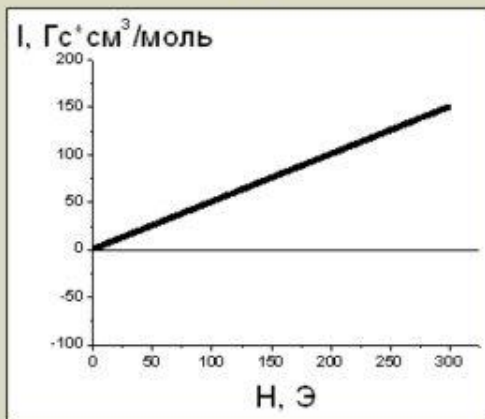
Закон Кюри:

$$\chi_p = C / T$$



Пьер Кюри
(1859-1906)
Нобелевская премия, 1903

$$I = \chi H$$



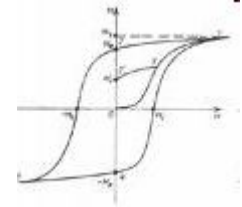


Возникает вопрос: любой ли материал подойдёт для магнитной записи?

Классификация магнетиков

Свойство	Знак χ	$ \chi $	$\chi(H)$	$\chi(25^\circ\text{C})$	Причина магнетизма
Диамагнетизм	–	$10^{-6} \div 10^{-5}$	Нет	$\text{H}_2\text{O}: -0,72 \cdot 10^{-6};$ $\text{Bi}: -14 \cdot 10^{-6}$	Прецессия спаренных электронов [$\uparrow\downarrow$]
Парамагнетизм	+	$10^{-5} \div 10^{-2}$	Нет	$\text{O}_2: 0,15 \cdot 10^{-6};$ $\text{W}: 14 \cdot 10^{-6}$	Собственный P_m неспаренного электрона [\uparrow]
Ферромагнетизм	+	$10^2 \div 10^4$	Есть	$\text{Fe}: < 650;$ $\text{Sm}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Co}_5:$ < 8000	Кооперативное [\uparrow][\uparrow] выстраивание спинов неспаренных электронов
Антиферромагнетизм	+	$10^{-4} \div 10^{-2}$	Есть	$\text{MnO}: < 10^{-2}$	Антипараллельное выстраивание спинов неспаренных электронов двух подсистем [\uparrow][\downarrow]
Ферримагнетизм	+	$10^1 \div 10^3$	Есть	$\text{BaFeO}_4: < 60$	Антипараллельное [\uparrow][\downarrow] выстраивание спинов неспаренных электронов двух разных подсистем

Magnetic memory & recording



Ферромагнетики

$A > 0$

Наличие локализованных магнитных моментов, например, в атомах с недостроенными d- или f-электронными подуровнями.

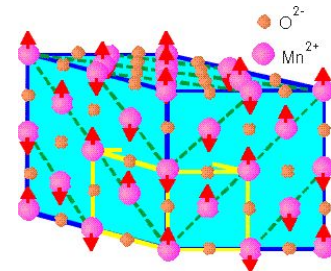
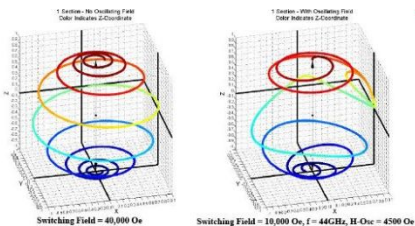
Антиферромагнетики

$A < 0$

Скомпенсированный антиферромагнетизм имеет место при полной компенсации магнитного момента, т. е. когда результирующая намагниченность кристалла равна нулю

Ферримагнетики
(нескомпенсированный антиферромагнетизм)

имеются магнитные ионы двух или более типов разной химической природы или одной природы, но разной валентности (например, Fe²⁺ и Fe³⁺ в магнетите FeO · Fe₂O₃), либо ионы одной химической природы и одной валентности, но имеющие в магнитных подрешетках разное число узлов в единице объема образца.



ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ ЗАПОМИНАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Магнитные свойства:

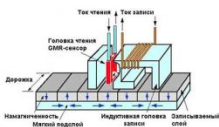
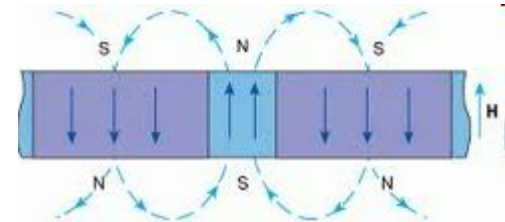
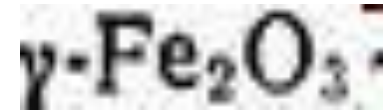
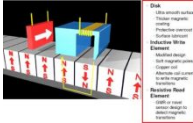
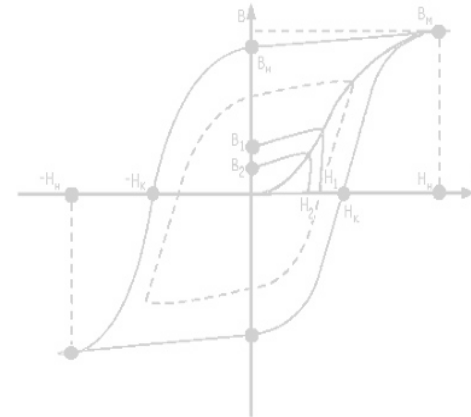
- Коэрцитивная сила;
- Остаточная индукция (намагниченность).

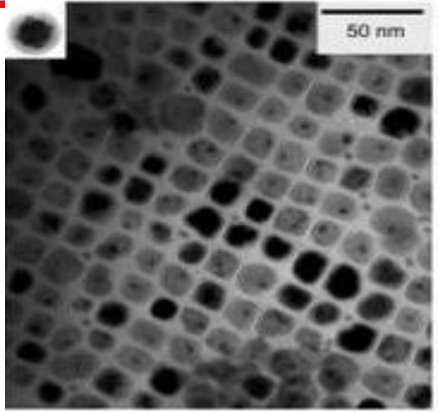
- оптимальное соотношение основных магнитных свойств, в подавляющем большинстве случаев - предельно достижимое значение:

- B_r ,
- коэффициента выпуклости петли гистерезиса;

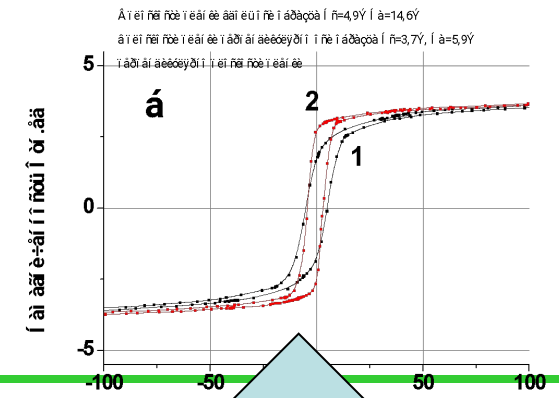
- однородность магнитных свойств в пределах промышленных партий ферропорошка;

- минимальная дисперсия полей перемагничивания микрочастиц ферропорошка.



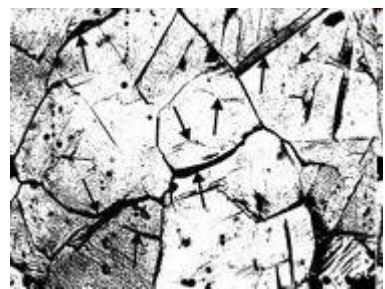


Структурные требования

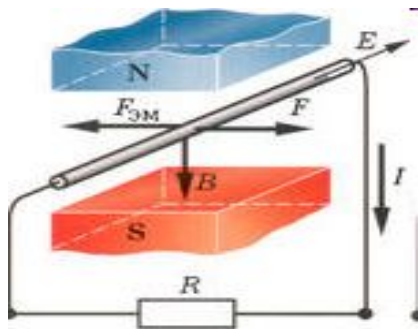


Структура микрочастиц:

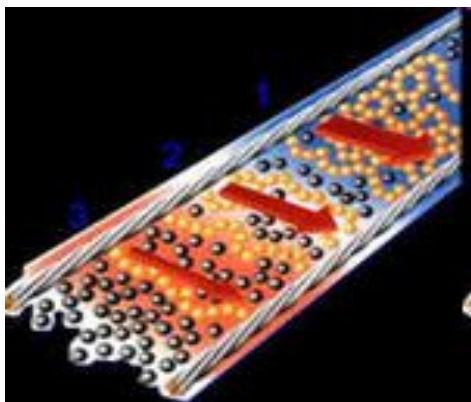
- максимальная однородность размеров, в идеальном случае - монодисперсность;
- оптимальные размеры;
- отчетливо выраженная анизотропия формы частиц;
- отсутствие пор и трещин.



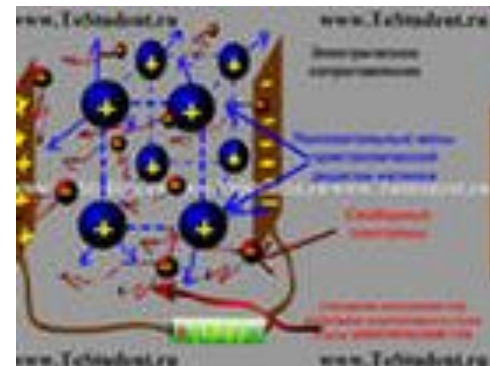
Всем знакомо *электрическое сопротивление* — способность материалов мешать протеканию электрического тока, а причина существования электрического сопротивления металлов — рассеяние электронов проводимости.



Если проводник с током поместить во внешнее магнитное поле, то оно слегка изменит электрический ток — так, словно бы под действием магнитного поля изменилось электрическое сопротивление материала.



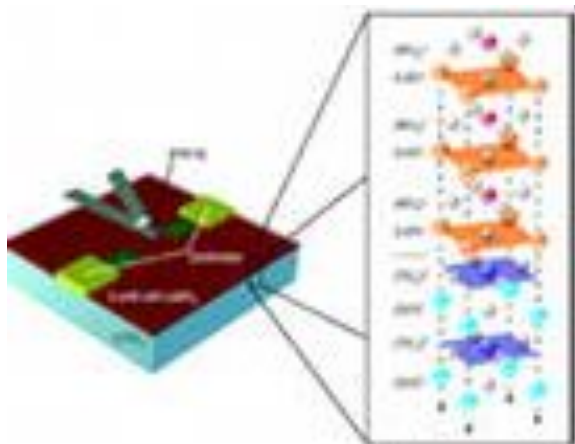
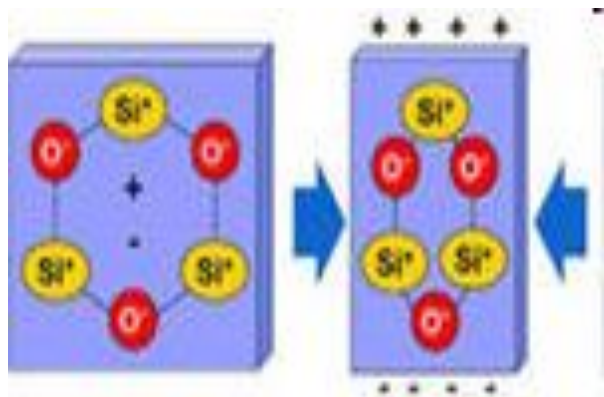
Это изменение называется *магнетосопротивлением*; открыто оно было давно, 150 лет назад, когда люди еще толком не знали, откуда вообще берется сопротивление.



Сама эта связь электрического тока и магнитного поля совершенно естественна и никого не удивляет (идея Эрстеда).



Ключевое слово в открытии, отмеченном Нобелем-2007, — слово «*гигантский*». Дело в том, что за более чем вековую историю изучения электромагнитных явлений в самых разнообразных веществах величина магнетосопротивления никогда не превышала нескольких процентов — в обычных материалах большему магнетосопротивлению неоткуда и взяться.



NiFe

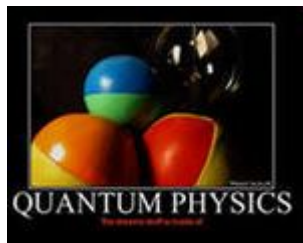
Ru

IrMn



Электрическое сопротивление

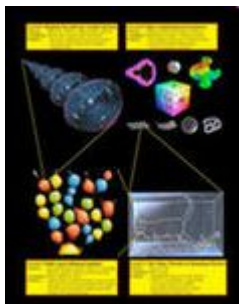
Начать рассказ стоит с того, откуда берется обычное электрическое сопротивление металлов. Самый удивительный факт про него состоит в том, что его *нельзя понять без квантовой механики.*



$$\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \psi}{dx^2} + U_0 \psi = E \psi$$
$$\psi_x = \cos kx \quad \psi_{\text{total}} = A \cos kx$$
$$\frac{\hbar^2}{2m} (-k^2) \cos kx + U_0 \cos kx = E \cos kx$$

Электрический ток в металле — это поток свободных (не связанных с конкретными атомами) электронов. Возникает он потому, что кусок металла находится под напряжением — то есть внутри него возникают электрические силы, которые и приводят электроны в движение.

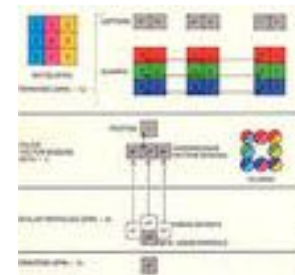
Сопротивление проводника возникает из-за того, что в своем движении электроны натываются на препятствия, постоянно сбиваясь с того курса, на который их направляют электрические силы.



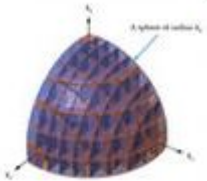
Не стоит представлять себе этот процесс так, словно электроны разгоняются, стучаются об атомы, останавливаются и снова разгоняются. На самом деле электроны внутри металла движутся *всегда*, даже без внешнего электрического поля и даже при нулевой температуре, и причем с довольно большой скоростью.



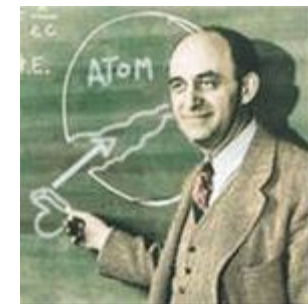
Это неустранимое движение электронного газа внутри металла возникает из-за [принципа Паули](#) — важнейшего квантового закона, запрещающего двум или более электронам занимать одинаковое квантовое состояние.



В данном случае это означает, что электроны не могут иметь слишком близкие значения энергии, а значит, они не могут все остановиться.

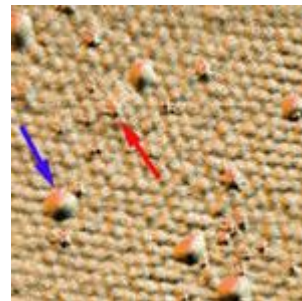
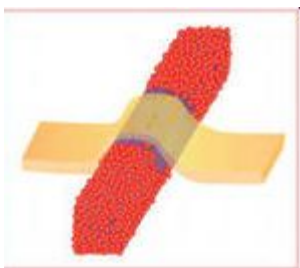
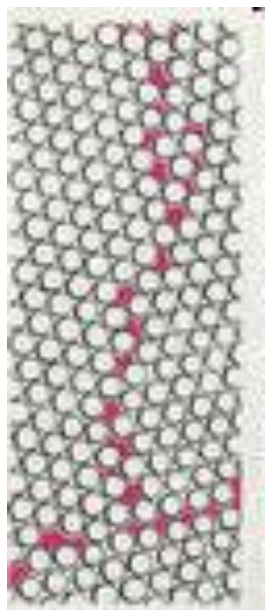
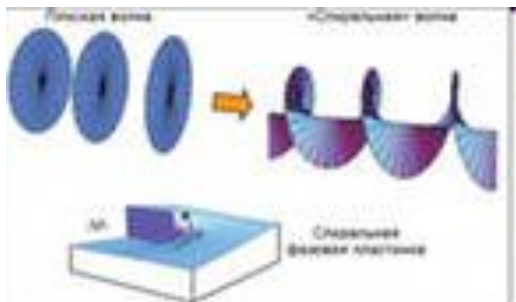


В результате электроны в металле обладают всевозможными энергиями — от нуля и до некоторой величины, которую называют *энергией Ферми*.

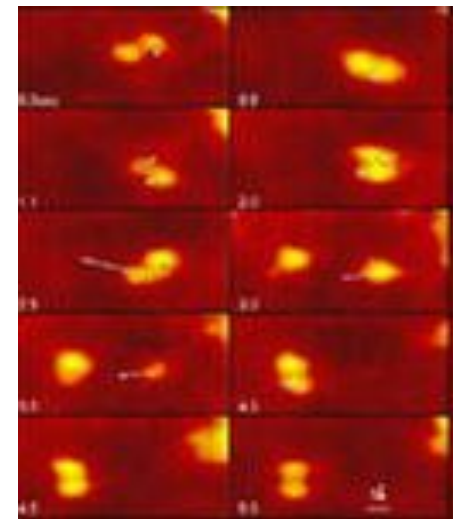


«Препятствия», на которые натываются электроны, — это вовсе не атомы.

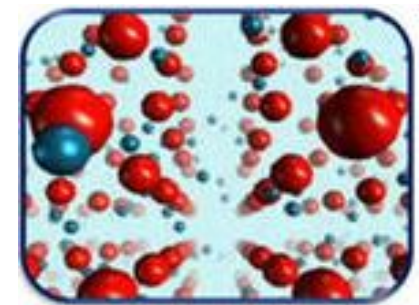
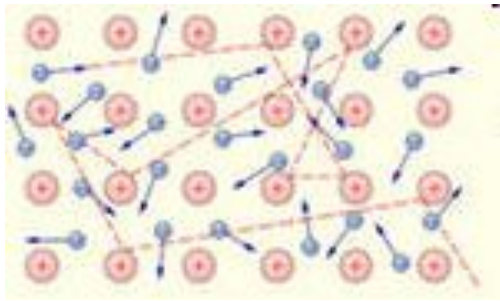
На самом деле, атомы для электронов проводимости вообще прозрачны — если, конечно, они расположены в виде строгой периодической решетки (это — проявление волновой природы электронов, т.е. еще одно чисто квантовое явление).



Натываются же электроны на неоднородности, нарушения строгой периодичности — например, на дефекты кристалла, на примесные атомы или просто на тепловые колебания.



Если приложить напряжение, то на быстрое беспорядочное движение электронов наложится медленное смещение под действием внешних электрических сил. Этот медленный дрейф и есть электрический ток.



Тут есть важный момент: участвовать в этом движении могут далеко не все электроны, а только очень небольшая их часть — лишь те, которые обладают энергией, близкой к максимальной (т.е. к энергии Ферми).

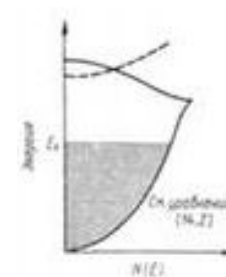
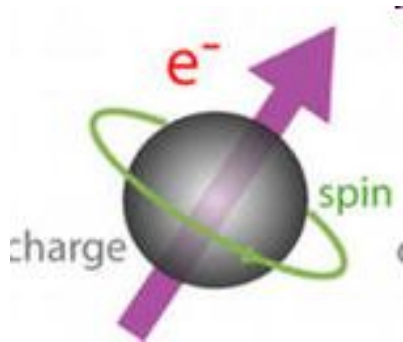


Рис. 8.1. Сопоставление распределения энергии электронов с энергией Ферми (см. текст)

Если таких электронов много, то ток течет большой, а значит, сопротивление маленькое. Если таких электронов мало, то тока получается мало, то есть материал имеет большое сопротивление.

Спин и магнетизм

У электрона есть еще одна характеристика (и тоже квантовая!), которая до сих пор не упоминалась, — **спин**.

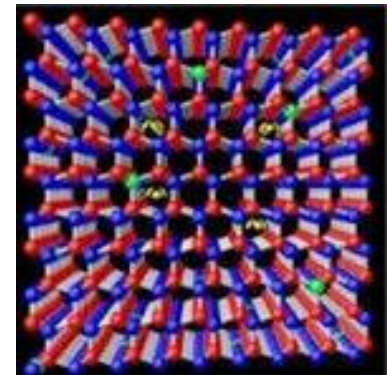
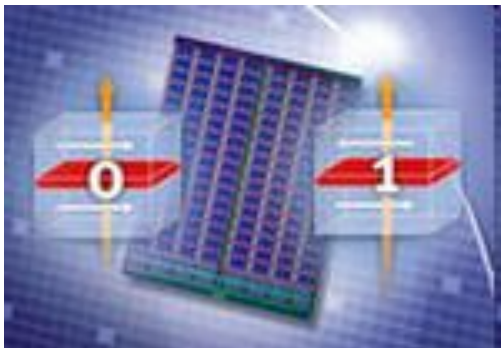


Как и многие квантовые характеристики, спин бывает не любой, а строго определенный.

Если выбрать какое-то направление, то у электрона спин может быть ориентирован по этому направлению и против него — условно говоря, вверх и вниз.

В большинстве веществ ориентация спина никак не сказывается на электрическом токе — потому-то в электротехнике про спин электрона вообще не вспоминают. Однако для явления ГМС именно спин будет играть ключевую роль.

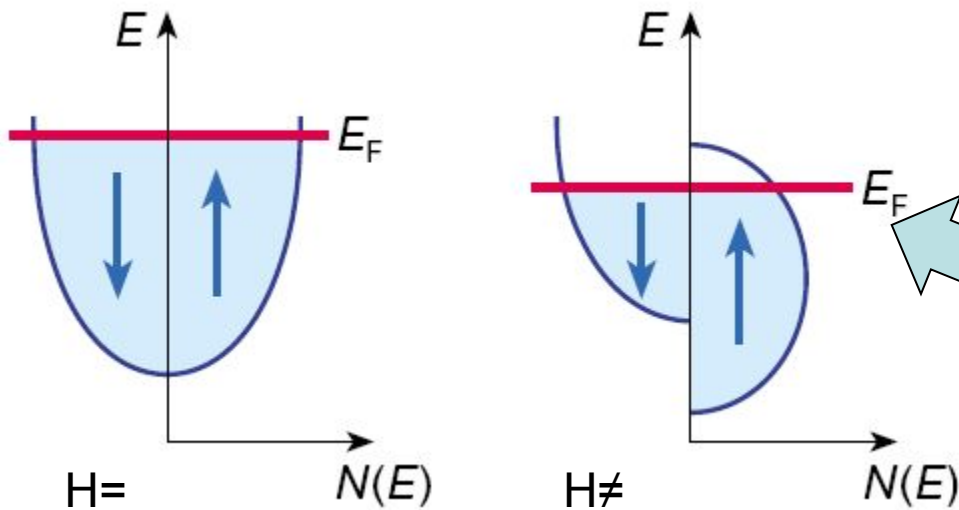
Само это открытие, собственно, стало моментом рождения новой области электроники — **спинтроники**, в которой спин электрона такая же важная характеристика, как и его заряд.



Отличительной особенностью спина является его *связь с магнитным полем*. Спин не только заставляет частицу откликаться на магнитное поле, но и сам его порождает. В частности, магнетизм в ферромагнетиках как раз получается из-за того, что спины всех ионов железа выстраиваются в одинаковом направлении.

Между прочим, само по себе наличие большого спина у ионов переходных металлов. Спин не только заставляет частицу откликаться на магнитное поле, но и сам его порождает. В частности, магнетизм в ферромагнетиках как раз получается из-за того, что спины всех ионов железа выстраиваются в одинаковом направлении. Между прочим, само по себе наличие большого спина у ионов

переходных металлов целиком обязано еще одному знаменитому закону — первому правилу Хунда, которое тоже является чисто квантовым эффектом. Без магнитного поля концентрация электронов со спином вверх и вниз одинаковая. В присутствии магнитного поля (т.е. внутри ферромагнетика) энергии электронов со спином по и против поля сдвигаются

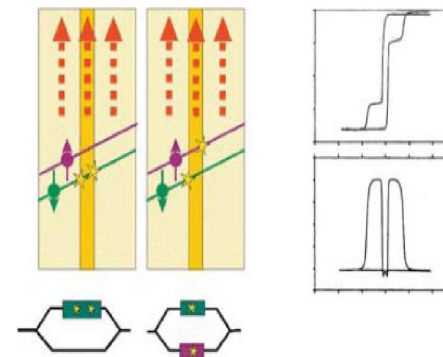
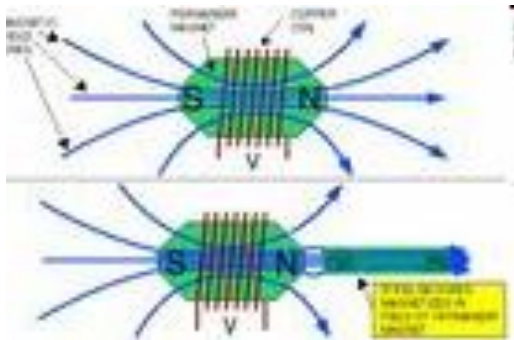
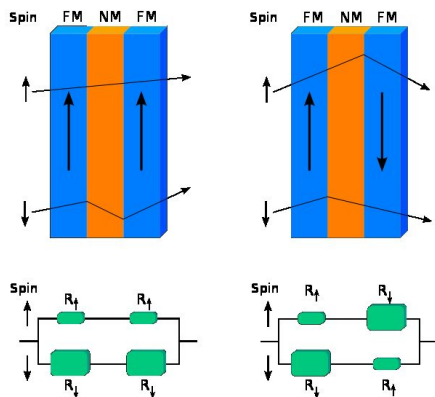


Концентрация 3d-электронов проводимости в зависимости от энергии.

В результате концентрация электронов вблизи энергии Ферми (E_F) разная.

Спин и магнетизм

Теперь попытаемся представить, что электроны проводимости чувствуют, находясь в ферромагнетике. Магнитное поле внутри металла влияет на электроны, и причем влияет по-разному для спинов по полю и против поля. Это немного сдвигает их энергии, и в результате количество электронов вблизи энергии Ферми со спином вверх и вниз получается разное. В результате возникает немножко необычная картина.

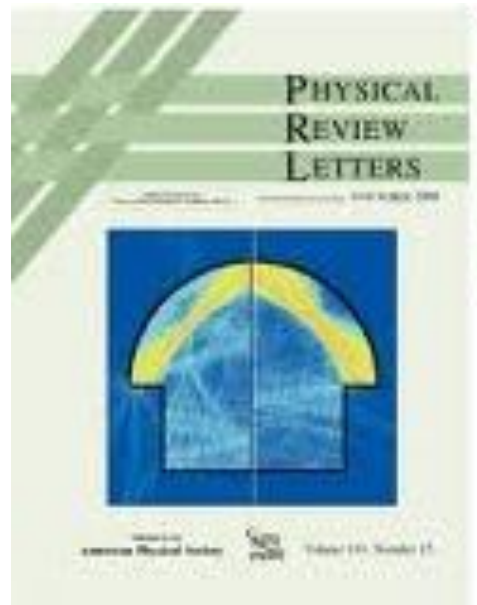


Электрический ток в ферромагнитном металле состоит из *двух разных, но тщательно перемешанных потоков* — потоков электронов со спином по направлению намагниченности и против него.

Эти два типа электронов испытывают со стороны металла разное сопротивление — те, которые ориентированы против поля, двигаются более свободно, чем те, которые ориентированы наоборот.

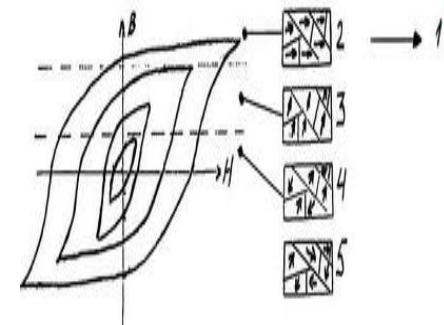
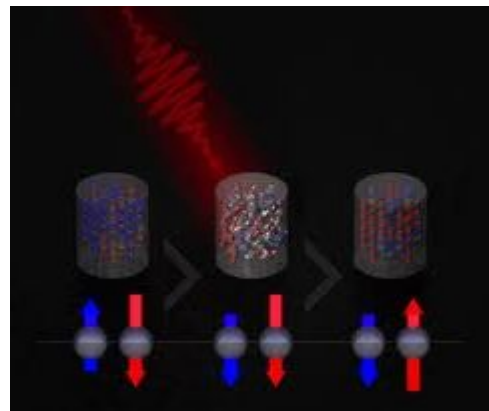
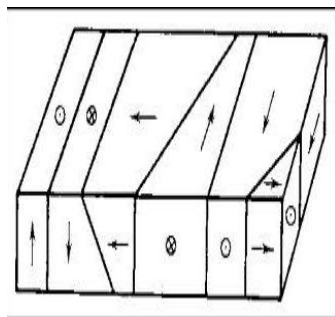
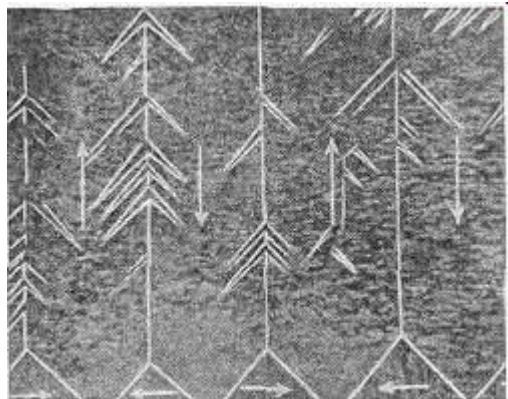
Спин и магнетизм

Важно отметить, что в обычной медной проволоке такого разделения нет — эта картина специфична именно для ферромагнетиков, например для намагниченного куска железа. Она была подтверждена экспериментально [в статье 1968 года](#). Среди авторов этой статьи был и Альбер Фер — один из нобелевских лауреатов 2007. И хотя от той статьи и до работ по гигантскому магнетосопротивлению должно было пройти еще 19 лет, но общее понимание электрических явлений в ферромагнетиках складывалось именно тогда.



Спин и магнетизм

Итак, «внутренний мир» ферромагнетика оказывается очень богатым, но пока не видно способа им воспользоваться для манипуляции сопротивлением образца.



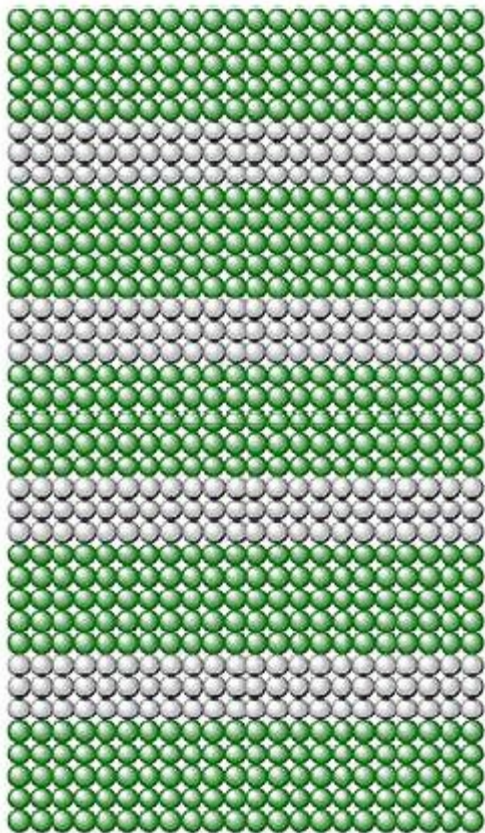
Ведь если металл ферромагнитный, то он таким остается и при воздействии внешних полей, разве только у него может измениться направление намагниченности.

Тут-то и пришли на помощь новые искусственные материалы, не существующие в природе — *сверхрешетки*.

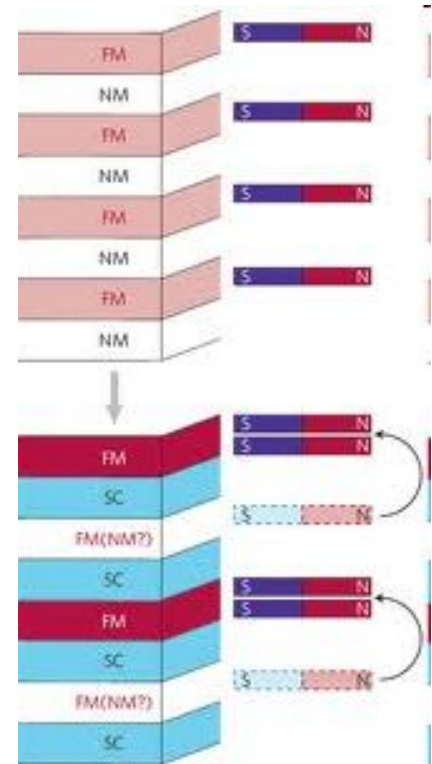
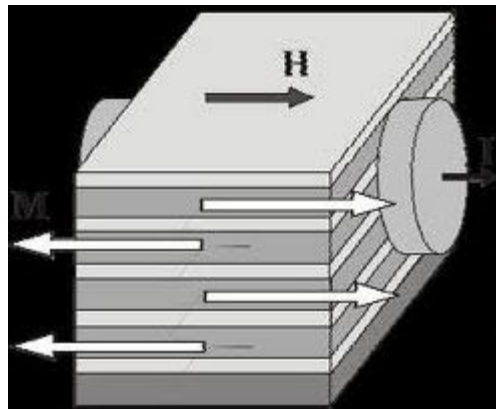
Как оказалось, именно в них можно управлять не просто величиной намагниченности, а *характером магнитной упорядоченности*, и уже через него — электрическим сопротивлением.

Материалы, которых никогда раньше не было

Сверхрешетка — это слоеный кристалл, состоящий из строго чередующихся слоев то одного, то другого материала толщиной всего в несколько атомов. Приставка «сверх» отражает здесь наличие периодической структуры еще большего размера, чем период кристаллической решетки

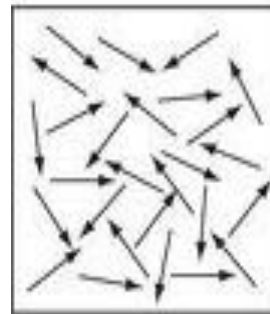
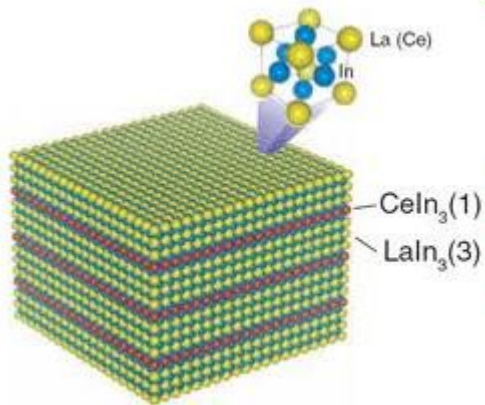
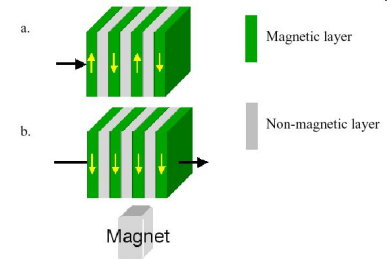


Сверхрешетка — это чередующиеся слои толщиной в несколько атомов различных материалов с похожей кристаллической структурой

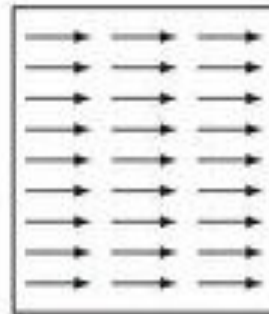


Материалы, которых никогда раньше не было

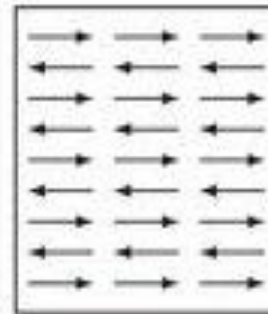
Как только научились изготавливать разные слои, принялись эксперименты с разными комбинациями материалов, в том числе и с чередующимися слоями ферромагнетика и немагнитного металла.



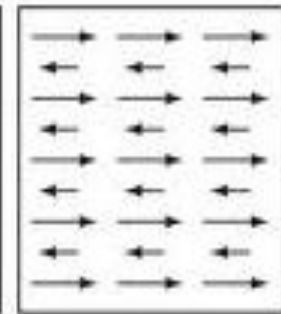
ПАРАМАГНЕТИКИ
магнитные моменты атомов
расположены хаотично



ФЕРРОМАГНЕТИКИ
магнитные моменты атомов
расположены параллельно



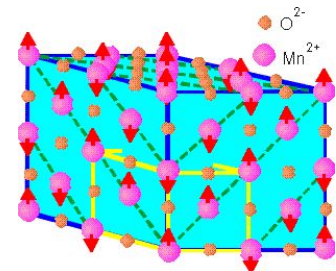
АНТИФЕРРОМАГНЕТИКИ
магнитные моменты атомов
расположены антипараллельно



ФЕРРИМАГНЕТИКИ
некомпенсированные магнитные
моменты атомов расположены
антипараллельно

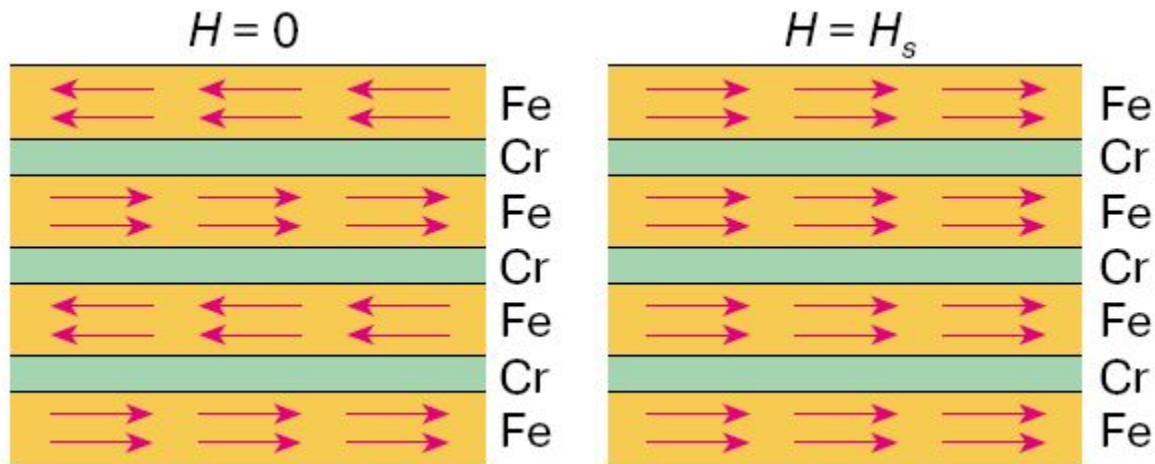
В ходе этих исследований выяснилась одна интересная вещь. Если правильно подобрать материал для немагнитных слоев и его толщину, то магнитные слои приобретут «протivoестественную» для ферромагнетика тенденцию чередовать ориентацию намагниченности

АНТИФЕРРОМАГНЕТИЗМ



Материалы, которых никогда раньше не было

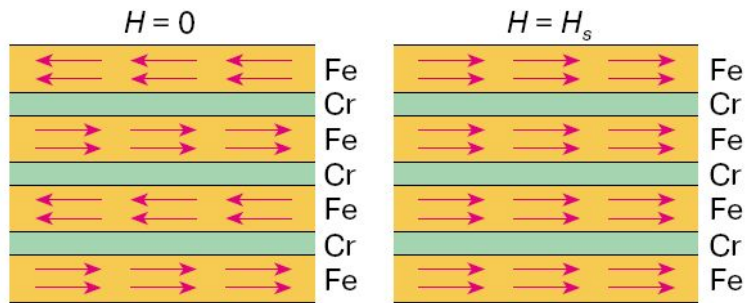
В слоистой структуре Fe-Cr обнаружил это Петер Грюнберг вместе со своими сотрудниками в 1986 году. Интересно, что их [статья](#) с этими результатами цитируется даже больше, чем работа 1988 года об обнаружении ГМС.



Если слои ферромагнетика (Fe) чередуются с тонкими слоями немагнитного металла (хрома, Cr) определенной толщины, то слои ферромагнетика будут чередовать направление намагниченности (слева). Однако если эту структуру поместить в достаточно сильное внешнее поле, то намагниченность всех слоев развернется в одну сторону (справа).

Материалы, которых никогда раньше не было

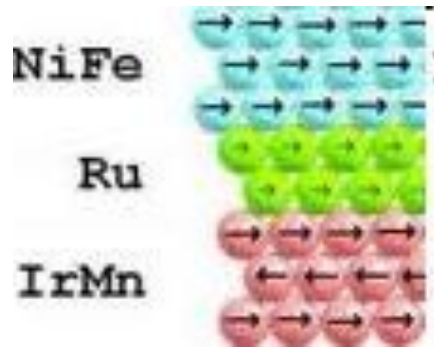
Кстати, не стоит думать, что все такие открытия делаются автоматически. У Грюнберга был шанс «проглядеть» это замечательное свойство слоев железа—хрома. Его группа изучала также и слойки железо—золото, и вот в них ничего подобного найдено не было. Если бы исследование только ими и ограничилось, открытие эффекта, возможно, задержалось бы на некоторое время.



Однако если эту структуру поместить в достаточно сильное внешнее поле, то намагниченность всех слоев развернется в одну сторону (справа).

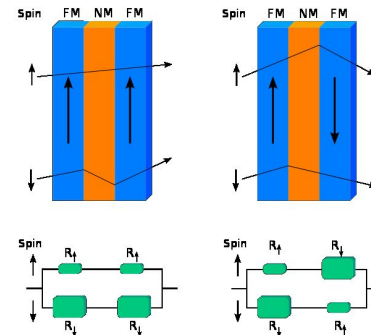
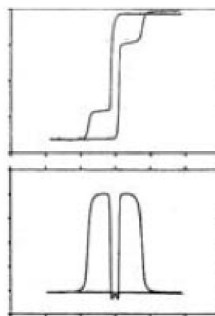
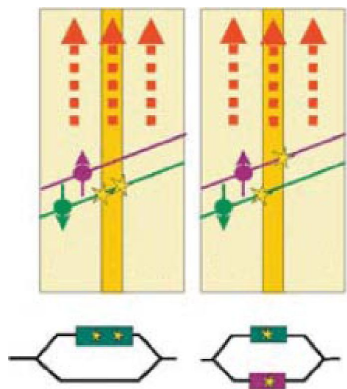
Последнее, что здесь нужно объяснить, — как такая слойка перестраивается под действием внешнего магнитного поля. Магнитное поле, как известно, способно перемагнитить «неправильно» ориентированный ферромагнетик. Поэтому если такую слойку поместить в достаточно сильное магнитное поле, то оно заставит все слои железа развернуться в одном направлении, как показано на **рисунке** справа. Если же поле убрать, то чередование слоев вновь восстановится. Так у экспериментаторов появилась возможность легко изменять тип магнитной упорядоченности.

Когда все ключевые аспекты расписаны, остается разобраться с тем, что происходит с электрическим током, который течет сквозь такую слойку поперек слоев.

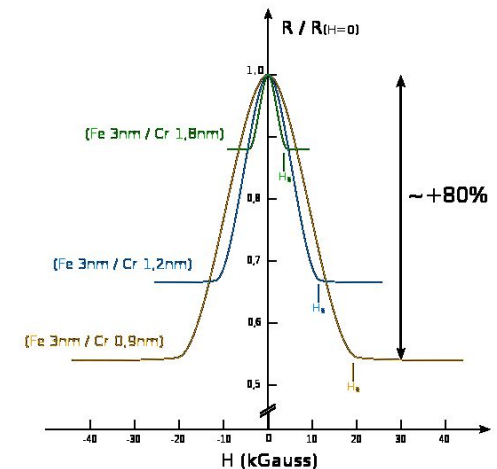
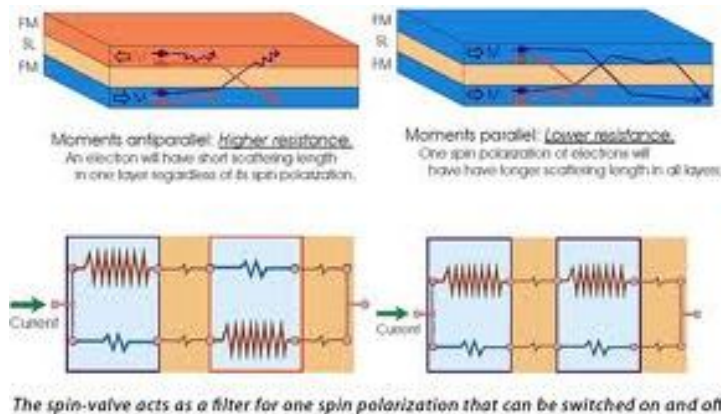
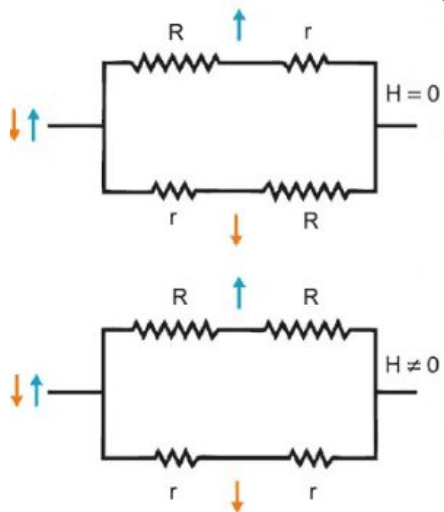


В отсутствие внешнего магнитного поля слои железа намагничены в чередующемся направлении. Двигаясь поперек слойки, электроны со спином вверх чувствуют большое сопротивление внутри слоев с магнитными полями вверх, но слабое сопротивление внутри слоев с магнитными полями вниз.

Для электронов со спином вниз всё в точности наоборот. Поскольку и тех, и других слоев — одинаковое число, то оба сорта электронов оказываются в равноправной ситуации.

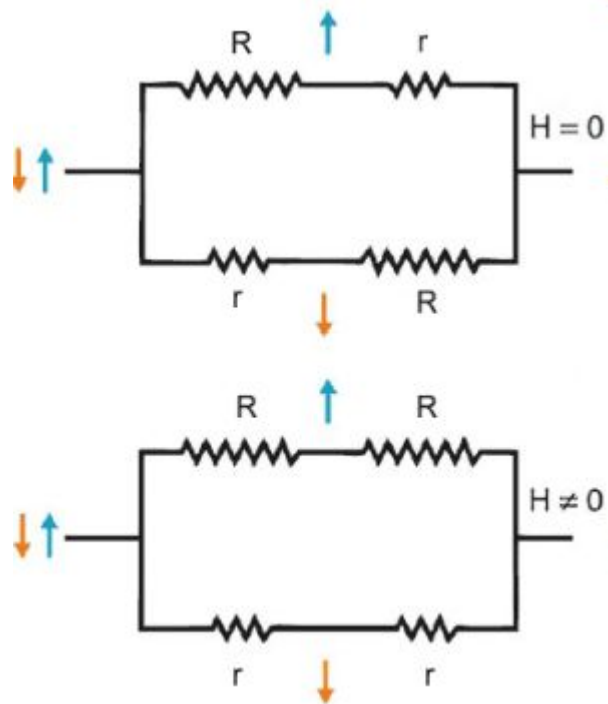


Если же приложить внешнее поле и выровнять намагниченность всех слоев, то электроны двух типов окажутся в *разных* условиях. Электроны, ориентированные по полю, *езде*, во всех слоях, испытывают большое сопротивление, то есть их вклад в ток уменьшится. В то же время электроны, ориентированные в противоположном направлении, испытывают везде маленькое сопротивление.

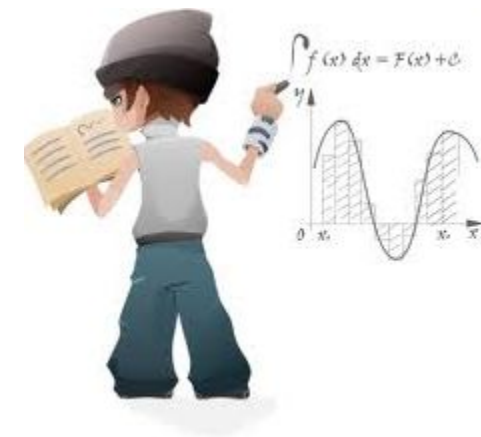
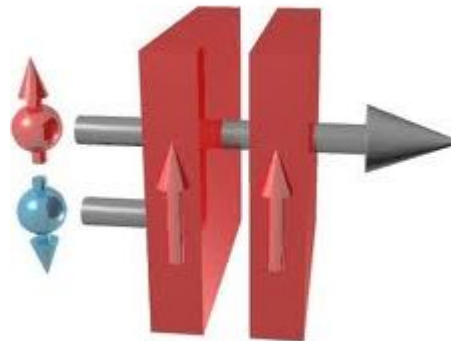


Иными словами, для таких электронов слойка *выглядит как короткое замыкание*, и переносимый ими ток заметно возрастает. Во сколько именно раз уменьшится ток со спином по полю и увеличится ток со спином против поля — зависит от свойств вещества, но в любом случае увеличение пересилит уменьшение тока, и в результате суммарное сопротивление уменьшается.

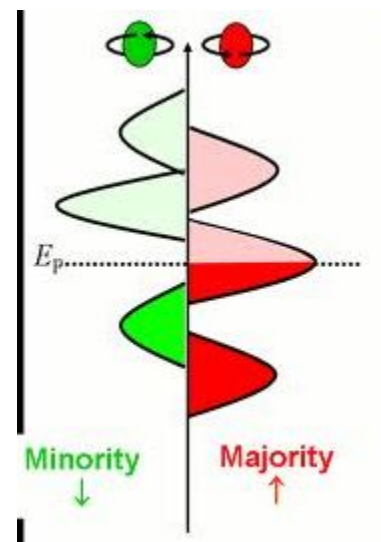
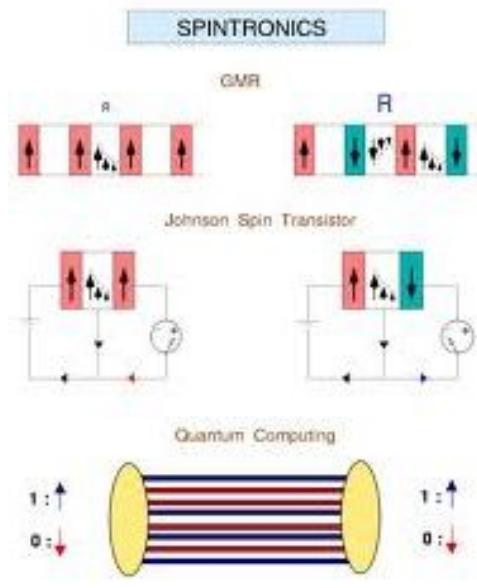
Эту задачу нетрудно сосчитать и количественно — она будет по силам даже школьнику, умеющему «складывать сопротивления». Надо только представить себе, что два сорта электронов работают как два параллельных участка электрической цепи (несмотря на то, что текут они сквозь одну и ту же слойку!). Все наводящие соображения и обозначения показаны на **рисунке**.



Простая модель для расчета сопротивления в случае чередующегося (вверху) и одинакового (внизу) направления намагниченности слоев железа. Синяя и оранжевая стрелки показывают сопротивления, испытываемые электронами со спином вверх и вниз



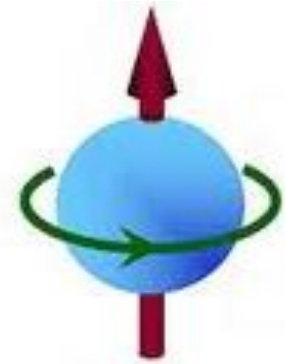
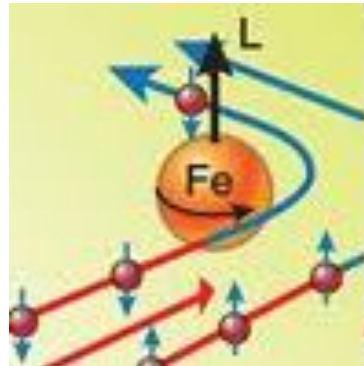
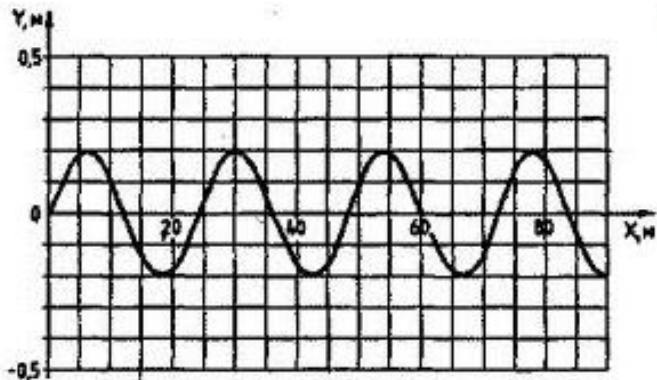
Первоначальные эксперименты Фера показали уменьшение сопротивления образца почти в два раза. Правда, такой результат был достигнут лишь с использованием сильных магнитных полей и при очень низкой температуре, всего 4,2 градуса выше абсолютного нуля.



В экспериментах Грюнберга при комнатной температуре изменение сопротивления было гораздо скромнее, всего полтора процента — и тем удивительнее, что будущий Нобелевский лауреат разглядел в этом принципиально новый эффект. Несколько лет исследований позволили добиться уменьшения сопротивления в два раза уже при комнатной температуре и гораздо меньших магнитных полях.

Так просто и так сложно

На гигантское магнетосопротивление полезно взглянуть еще и вот с какой точки зрения. Само явление формулируется чрезвычайно просто и выглядит очень естественно: электрический ток и магнитное поле — это классическая физика XIX века. Однако реальные микроскопические причины, приводящие к такому интересному эффекту, очень непросты и многократно опираются на квантовую механику. Можно даже отметить, что в этом явлении используются *все три* принципиальных новшества квантовой механики по сравнению с классической физикой — *волновая природа, тождественность и спин* частиц.



Так просто и так сложно

Напрашивается также и параллель еще с одним электромагнитным явлением со схожей судьбой — [эффektenом Холла](#). Этот эффект тоже возникает при протекании тока в магнитном поле, он тоже был открыт в XIX веке, и с приходом квантовой механики в нём тоже открыт целый пласт новых эффектов. Только, в отличие от магнетосопротивления, эффект Холла привел уже к двум Нобелевским премиям по физике — [за 1985-й](#) (целочисленный эффект Холла) и [за 1998 год](#) (дробный эффект Холла).



Клаус фон Клитцинг
Нобель-1985

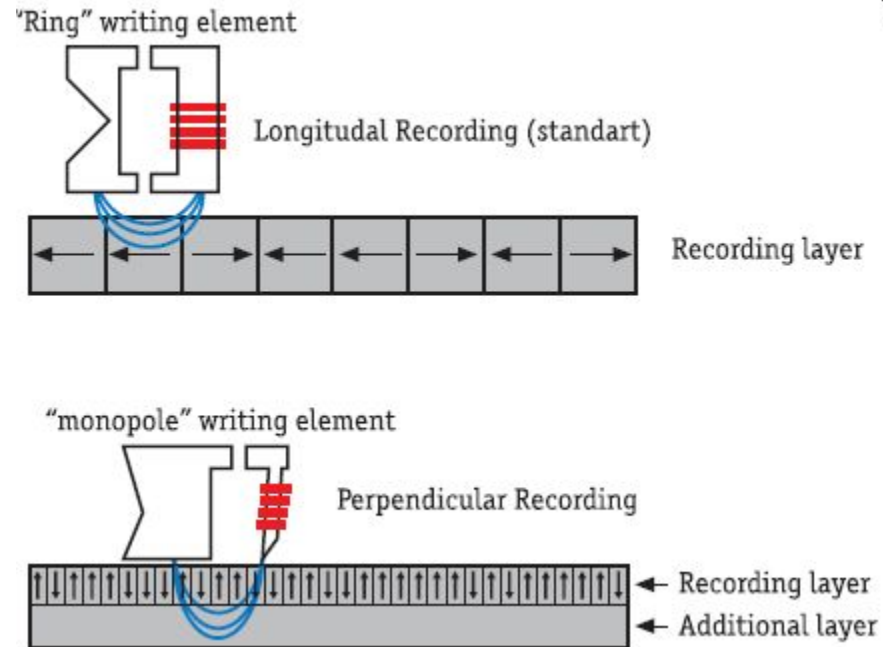


Роберт Беттс Лафлин
Нобель-1998

Впрочем, у магнетосопротивления есть реальный шанс поквитаться. На очереди стоит *колоссальное магнетосопротивление* — явление совсем иного уровня сложности, детальное понимание которого пока что ускользает от исследователей.

Так просто и так сложно

Использование эффекта гигантского магнетосопротивления привело к резкому увеличению плотности записи на жестких дисках.



Связь очень простая — слойка с гигантским магнетосопротивлением явилась чрезвычайно компактным, быстрым, чувствительным и, наконец, очень простым датчиком магнитных полей. Будучи расположенной над быстро вращающейся пластиной жесткого диска, такая слойка послушно отслеживает магнитные поля пролетающих под ней битов и сразу же переводит их в электрический ток.



Представляется перспективным

наногранулированные магнитопленочные среды

могут стать материалом для носителей информации высокой плотности

требование

сформировать определенный структурный порядок

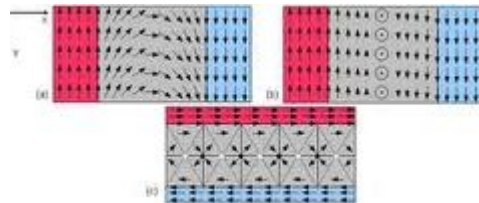
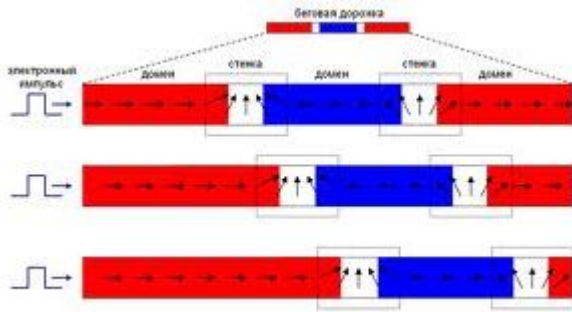
Для реализации

использовать высокую адсорбционную способность наночастиц 3d-металлов к высокомолекулярным соединениям

Для создания носителей с плотностью записи 10 Гбит/см² на базе наногранулированных магнитопленочных материалов, в которых наночастицы размером ≤ 5 нм микрокапсулированы в полимерной матрице, необходимо совмещение **физических и химических** методов получения нанокompозитов.

Как известно

в магнитоупорядоченных материалах кроме однородно намагниченных областей (доменов) существуют переходные области (доменные стенки), в которых намагниченность меняется от точки к точке



Чтобы максимально использовать объем магнитной среды для записи информации,

необходимо уменьшить размеры доменной стенки W

$$W = (A/K)^{1/2};$$

$C/\text{Ш} = 10 \log S/D^2$; S – площадь бита

D – размер зерна (**Важный фактор!**).

Для $N = 10^9$ бит/см² и

$C/\text{Ш} 30-40$ дБ $D = 10 - 15$ нм.

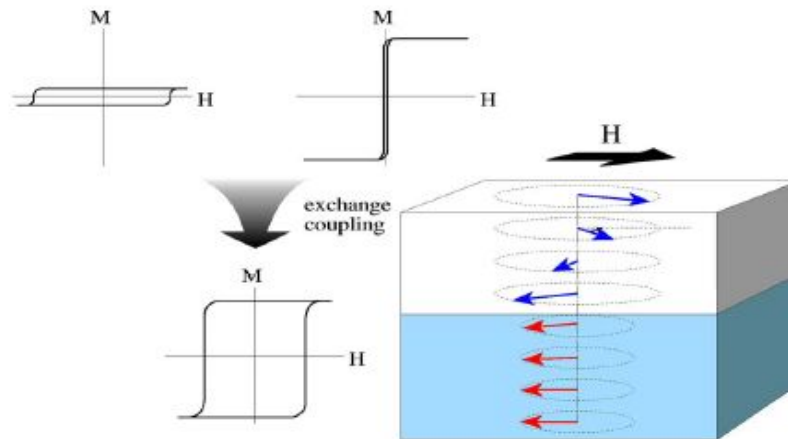
Величина M_r определяется из уравнения:

$$a = [M_r \delta (h + \delta/2) / \pi N_c]^{1/2}$$

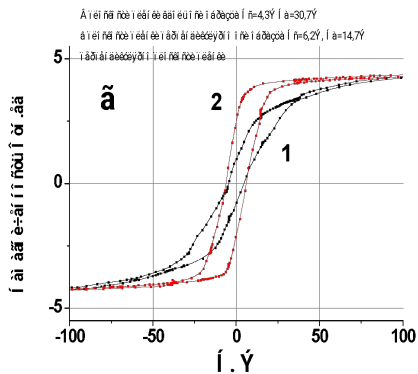
a - ширина переходной области между битами ($\approx 13\text{nm}$)

h - расстояние между головкой и носителем ($\approx 20\text{nm}$)

δ - толщина магнитного слоя носителя ($\approx 10\text{nm}$)



Магнитные параметры
для высокоплотных
магнитных носителей



Кроме того, носитель должен иметь прямоугольную петлю гистерезиса с высоким значением M_r/M_s .



Nobel Price Winner in Physics 2007



Грюнберг был одним из первых, кто занялся исследованием магнитных свойств тонких плёнок. Эта область исследований изучает спиновые свойства материалов и называется спинтроникой.

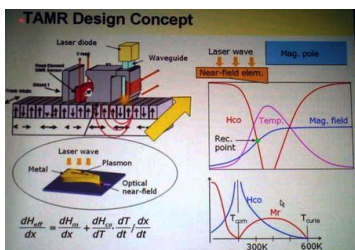
Результаты исследований позволили создать новые компактные электронные устройства.

В 1986 г. Грюнберг открыл антиферромагнитную взаимосвязь в слоях железа и хрома.

В конце 1987 г. Грюнберг открыл, почти одновременно с Альбером Фером, эффект гигантского магнетосопротивления, при которого в конце 1990-х годов удалось резко увеличить ёмкость накопителей на жёстких магнитных дисках.



Принцип действия большинства головок записи/считывания информации по состоянию на 2007 год основывался на этом эффекте.



В 1962 году Фер окончил Высшую нормальную школу в Париже, а в 1963 году он получил степень магистра в Сорбонне.

В 1970 году стал доктором философии (PhD) в университете Париж-юг, в котором он и работал научным сотрудником.

В 1988 году Фер обнаружил в слое железа и хрома эффект гигантского магнетосопротивления (ЭГМс).

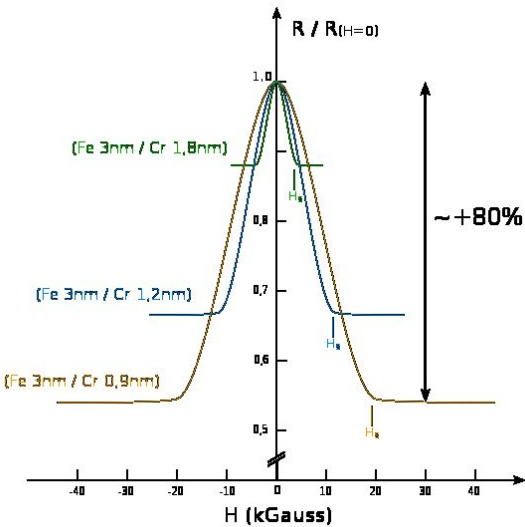
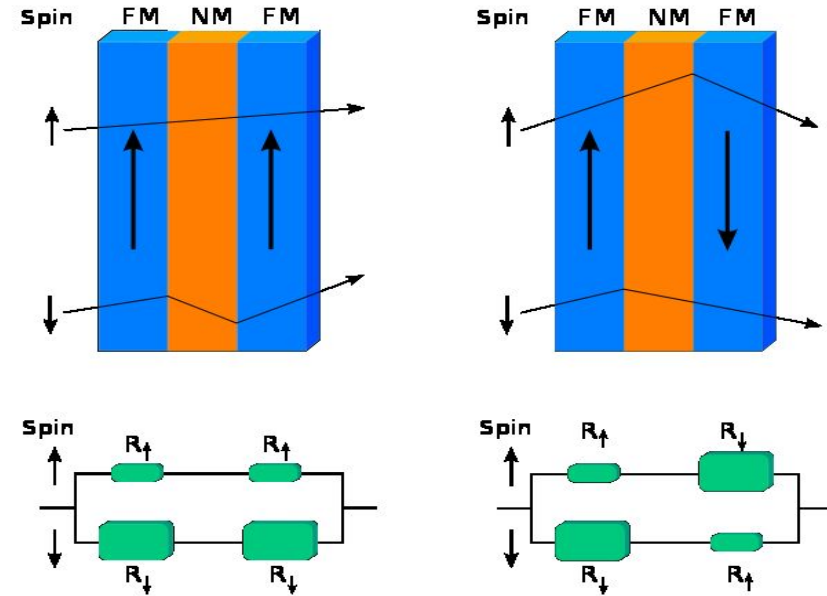
Гигантское магнитное сопротивление

Giant magnetoresistance, сокр. GMR —

квантовомеханический эффект, наблюдаемый в тонких плёнках, состоящих из чередующихся ферромагнитных и немагнитных слоёв.

В такой системе эффект проявляется в существенном уменьшении электрического сопротивления в зависимости от взаимной ориентации намагниченности соседних магнитных слоёв.

Эта взаимная ориентация может быть изменена, например, приложением внешнего магнитного поля. В основе эффекта лежит спино-зависимое рассеяние электронов.

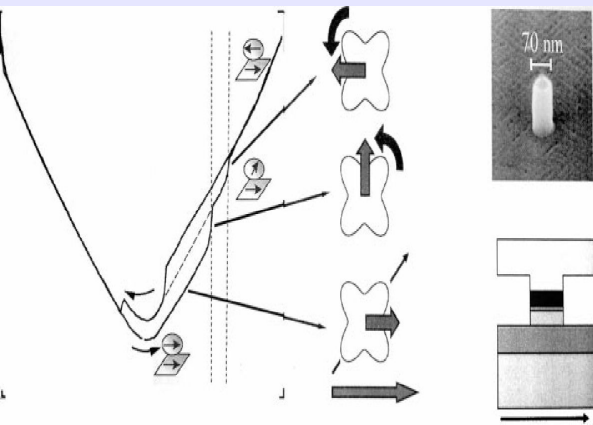
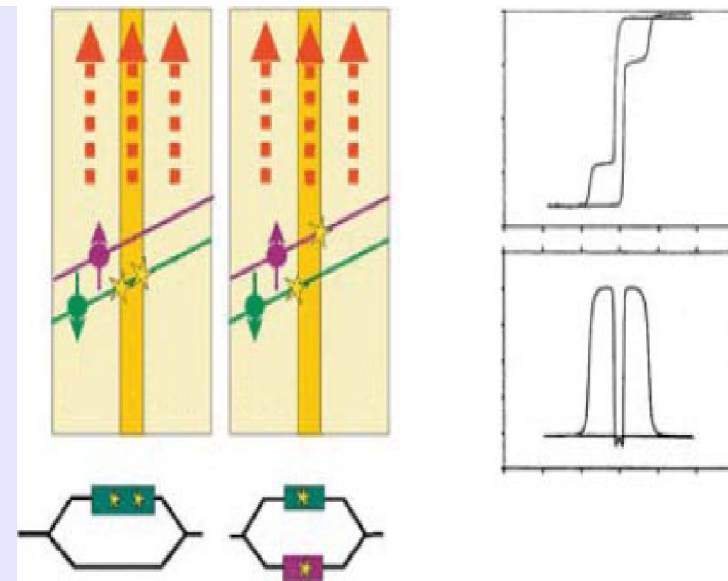


GMR-устройства используют чередующиеся сверхтонкие слои магнитного и немагнитного материалов (в IBM такую структуру называют **спиновым клапаном**). Самый простой вариант включает в себя три слоя: два ферромагнитных слоя, разделенных немагнитным проводником. Роль немагнитного проводника выполняет рутений. Этот металл является парамагнетиком, но когда толщина Ru-слоя составляет всего несколько атомных слоев, через него осуществляется обменная связь между ферромагнетиками. Эта обменная связь в зависимости от толщины Ru-слоя может быть как ферромагнитной, так и антиферромагнитной. В последнем случае, который и используют на практике, намагниченности ферромагнитных слоев ориентированы противоположно.

Главный источник GMR-эффекта — так называемое спин-зависимое рассеяние.

Известно, причина существования электрического сопротивления металлов — рассеяние электронов проводимости.

При протекании электрического тока электроны проводимости рассеиваются по-разному в зависимости от ориентации их спина по отношению к намагниченности слоя.



Об этом явлении и говорят как о **спин-зависимом рассеянии**.

Природу его можно объяснить так: в ферромагнитных 3d-металлах из-за наличия ферромагнитного обменного взаимодействия энергия электронов с разной ориентацией спинов различна - энергия электронов **со спином «вверх»** (ориентированным вдоль намагниченности ферромагнетика) **более низкая**, чем у электронов **со спином «вниз»**.

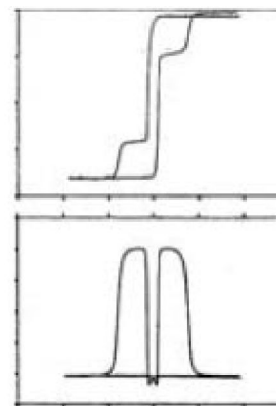
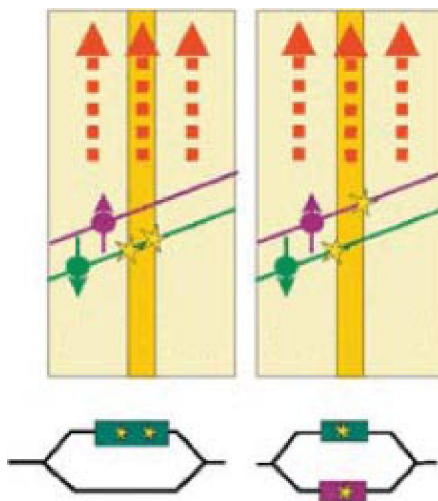
В результате плотность состояний вблизи уровня Ферми для электронов с разными направлениями спинов также различается.

• <http://ufn.ru/rubrics/nobel-lectu>

В спиновом клапане с антиферромагнитно-связанными слоями ферромагнетиков намагниченности этих слоев в отсутствие внешнего магнитного поля антипараллельны.

Толщина немагнитного слоя (Ru) очень мала, меньше длины свободного пробега электрона, поэтому в рутении электроны практически не рассеиваются => электрон проводимости при протекании тока переходит из одного слоя в другой, с противоположным направлением намагниченности, и вероятность рассеяния электрона должна измениться.

В этом случае спиновый клапан **обладает повышенным сопротивлением**. Если же к многослойному образцу приложить достаточно большое внешнее магнитное поле, то намагниченности ферромагнитных слоев установятся параллельно и сопротивление понизится.

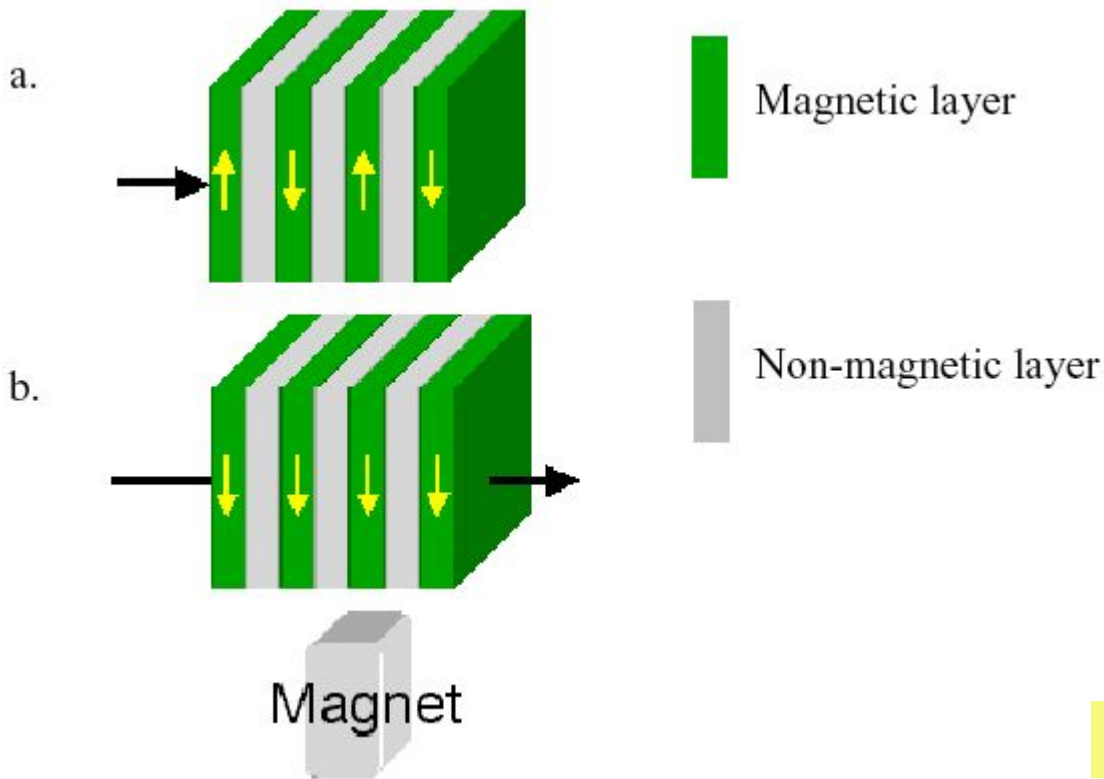


• <http://ufn.ru/ru/rubrics/nobel-lectures/>

Создание высокочувствительных **GMR-головок** чтения позволило избавиться от ограничения, налагаемого на плотность записи малым разрешением традиционных головок.

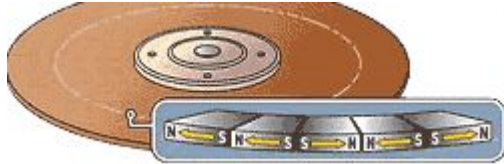
Бит информации в принципе может быть рассчитан при размерах порядка нескольких нанометров. Поэтому материалы для этого должны быть **нанокристаллическими**.

Но при размерах уже несколько десятков нанометров наблюдается **суперпарамагнитный эффект**.



<http://ufn.ru/ru/rubrics/nobel-lectures/>

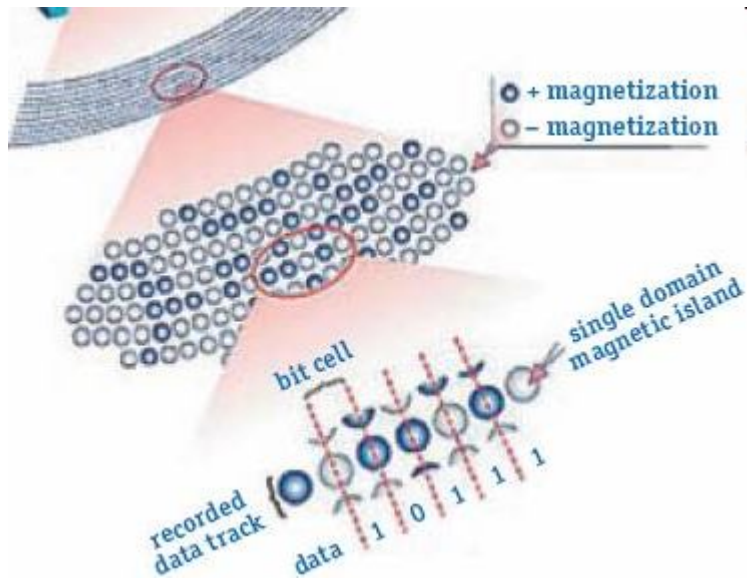
Продольная запись



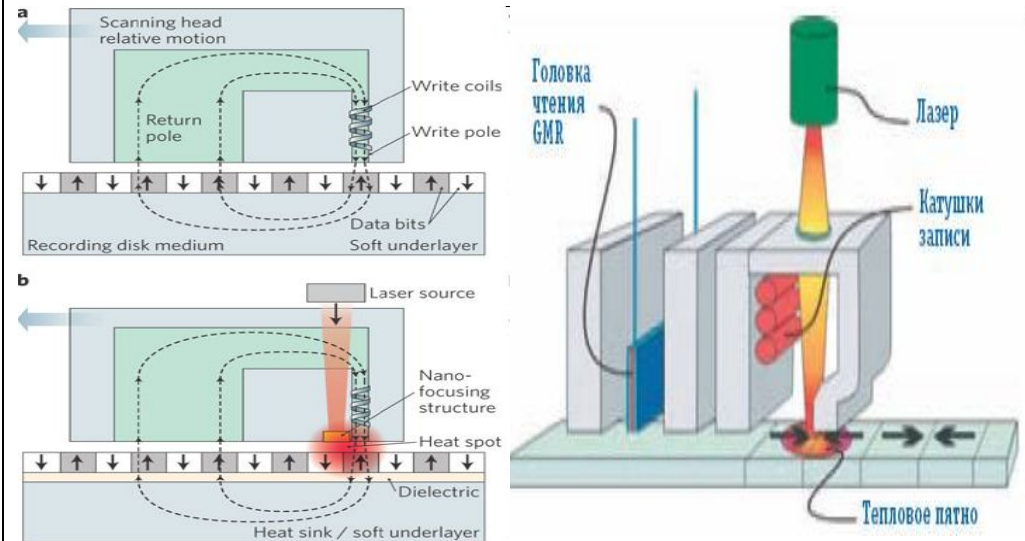
Перпендикулярная запись



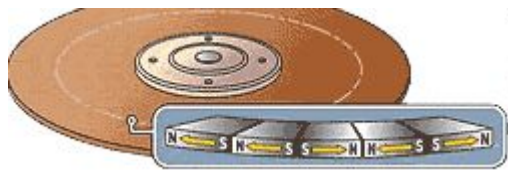
Структурированные носители Pattern Media



Термоассистируемая магнитная запись (Heat-Assisted Magnetic Recording, HAMR)

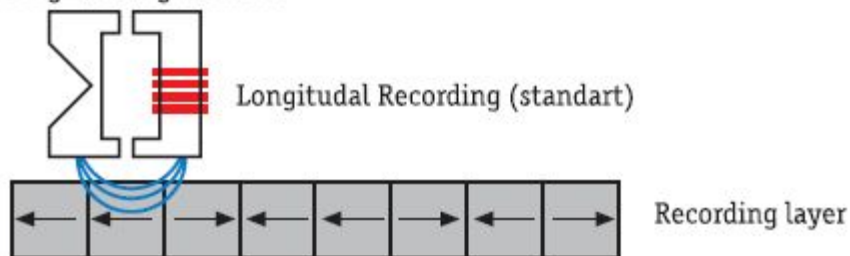


Главное отличие между данными технологиями заключается в **направлении намагниченности доменов** — в случае параллельной записи оно параллельно плоскости диска, а в случае перпендикулярной, соответственно, перпендикулярно.

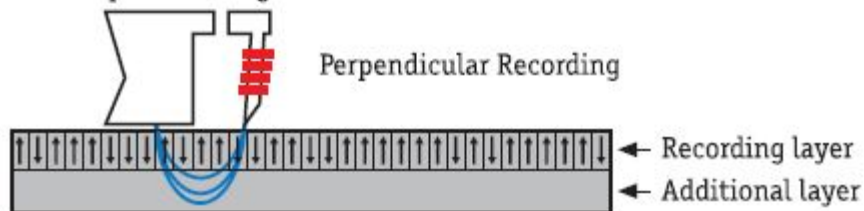


Однако если мы посмотрим на конкретный домен в отдельности, то никакой разницы не увидим, поскольку **суперпарамагнитный предел** не зависит от направления намагниченности.

"Ring" writing element



"monopole" writing element



Причина более высокой плотности перпендикулярной записи объясняется не какими-то внутренними характеристиками одного домена, а **силами взаимодействия между соседними ячейками**.

- **ИЗВЕСТНО!** Что постоянные магниты, расположенные одинаковыми полюсами друг к другу, отталкиваются, а разными, наоборот, притягиваются.

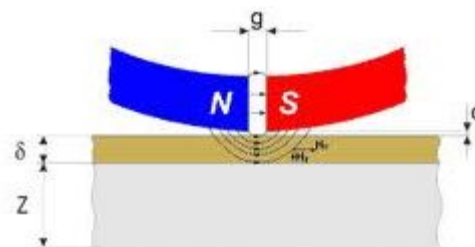
=> при использовании технологии последовательной записи возникают силы магнитного взаимодействия соседних доменов, влияющие на магнитные поля каждой из этих частиц.

□ Т.е., магнитная энергия каждого домена может уменьшиться, и тогда вероятность влияния термофлуктуаций на магнитный порядок данного домена увеличится.

Величина H_c должна с одной стороны превышать значение этого размагничивающего поля, а с другой – учитывать возможности считывающей головки.

Поэтому для продольной записи
 $H_c \approx 3 \text{ кЭ}$

□ При использовании перпендикулярного расположения доменов их влияние друг на друга существенно уменьшается.



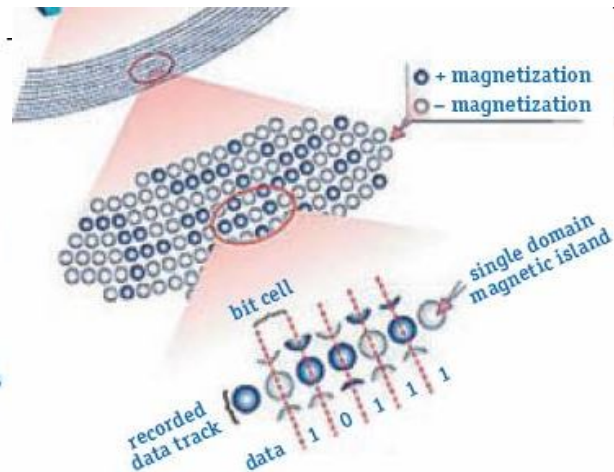
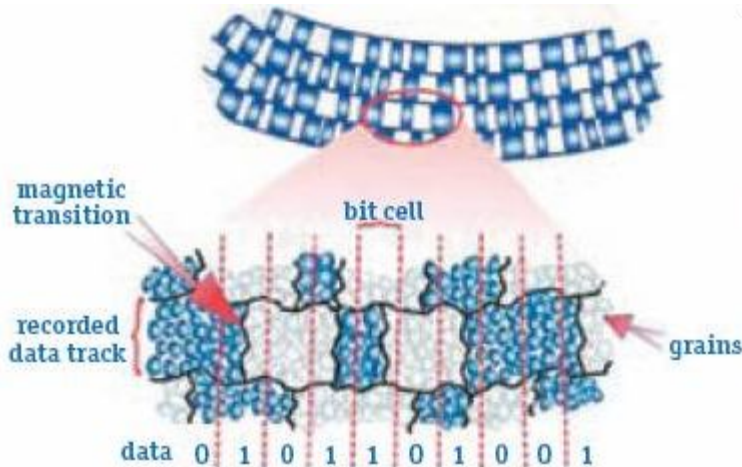
g - ширина зазора головки;
 d - расстояние между поверхностью пластины и головкой записи/чтения;
 Z - толщина алюминиевой подложки;
 δ - толщина магнитного слоя.

В современных накопителях каждый магнитный домен состоит из нескольких десятков (70–100) мелких структурных элементов («зерен»), каждое из которых теоретически способно выполнять функции домена и содержать в себе 1 бит информации.



В результате появляется возможность уменьшить суперпарамагнитный предел:

увеличить размеры отдельного «зерна» и хранить единицу информации в меньшем количестве «зерен».



В настоящее время разработки, связанные со структурированными носителями, ведут как минимум две лидирующие компании-производителя:

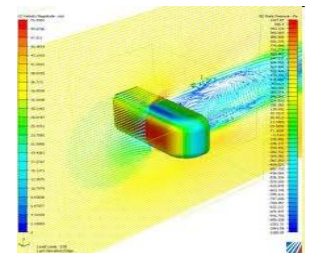
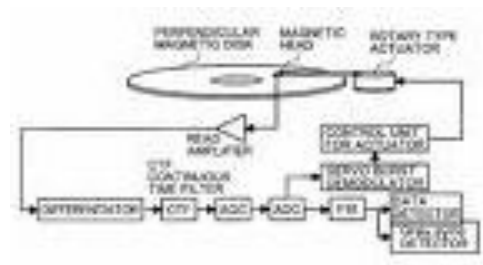
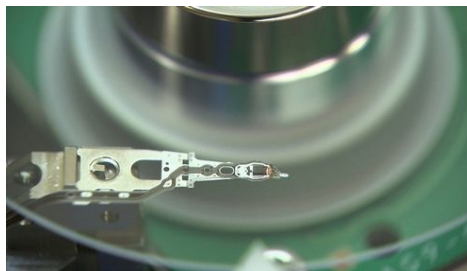
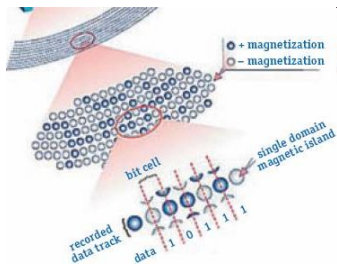
- Hitachi Global Storage Technologies (HGST)
- Seagate.

Причем первая из них возлагает на данный метод большие надежды.

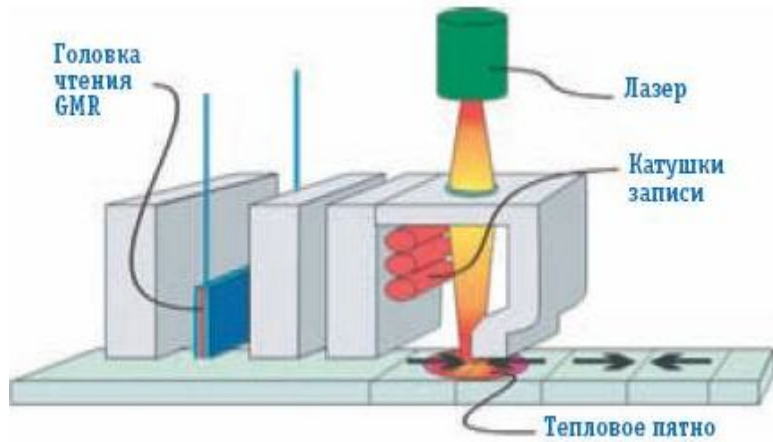


- Предел их теоретической плотности может достигнуть отметки несколько терабит на квадратный дюйм.

Если же разработчикам удастся придумать материалы с однозернистыми «островами», то возможны и вовсе фантастические результаты — с плотностью до нескольких десятков и даже сотен терабит.



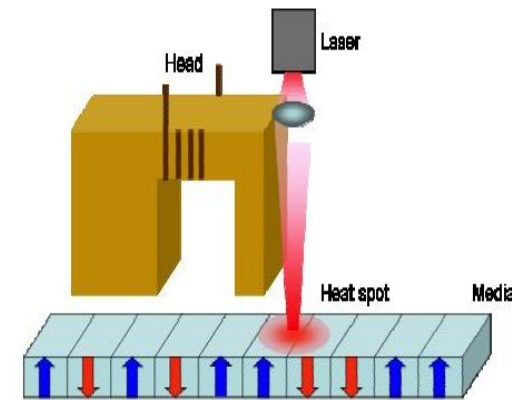
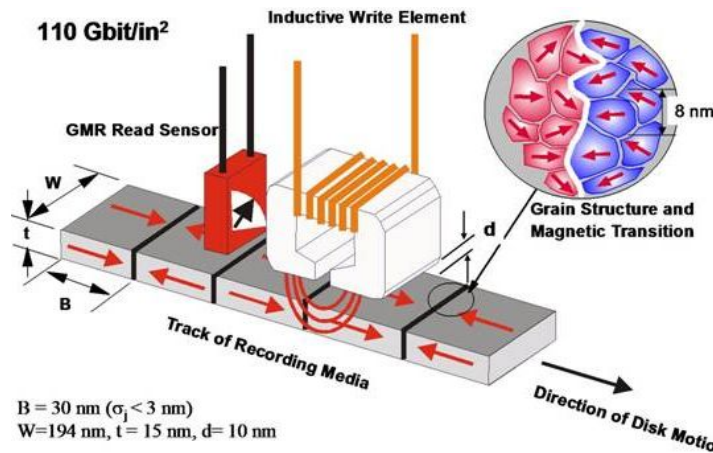
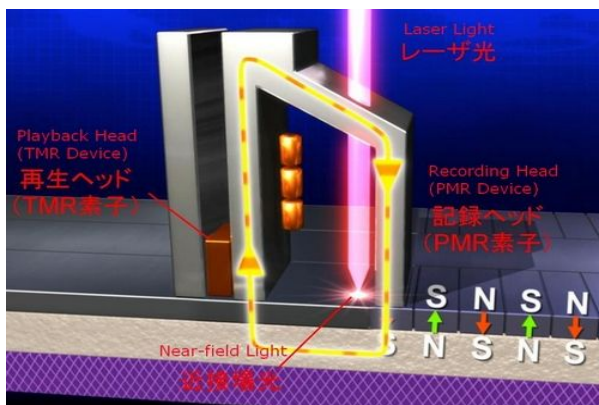
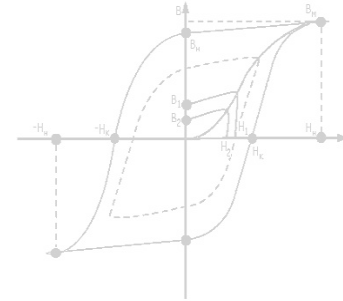
Термоассистируемая магнитная запись (Heat-Assisted Magnetic Recording, HAMR)







Для такого метода записи требуется значительная **коэрцитивная сила**, которая не может создаваться современными головками.

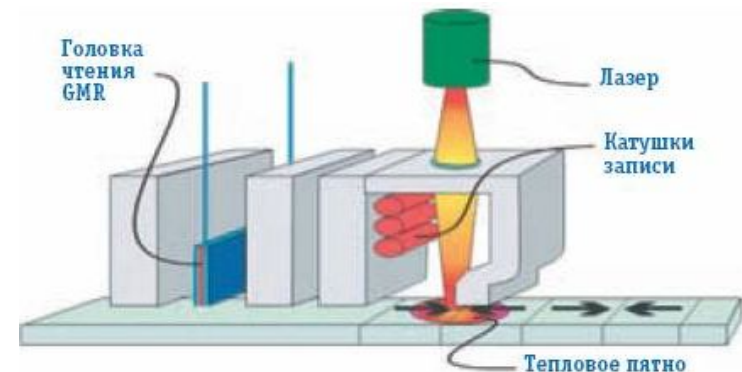
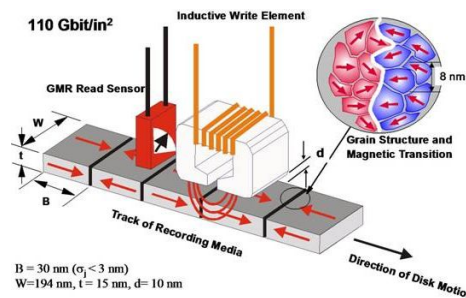
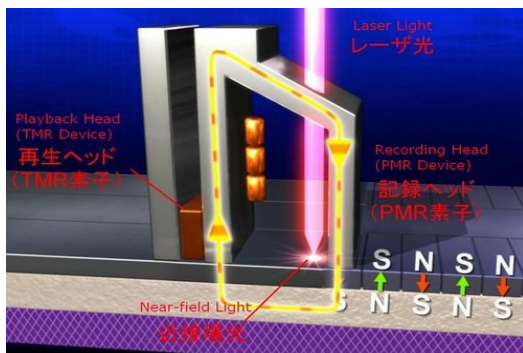
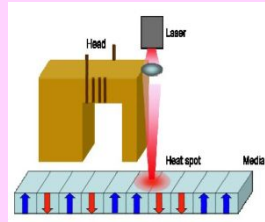
В технологии **HAMR** она и не создается — во время записи носитель нагревается, его коэрцитивность **падает** и требуемая сила становится гораздо меньше.

Нагрев малой части носителя происходит с помощью теплового лазера, интегрированного в записывающую головку

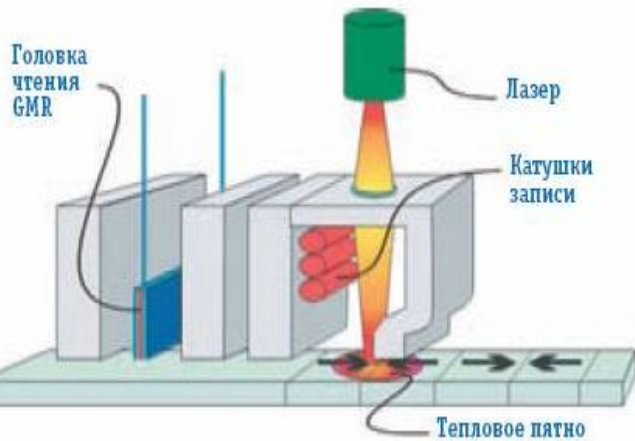


Проблемы:

- ❑  поместить лазер в головку;
- ❑  позиционирование: обеспечить нагрев именно той области, которая необходима;
- ❑  охлаждение;
- ❑  материал носителя с заданными свойствами, а именно:
 - ❑ с высокой коэрцитивностью при комнатной температуре
 - ❑ и низкой при температуре записи.



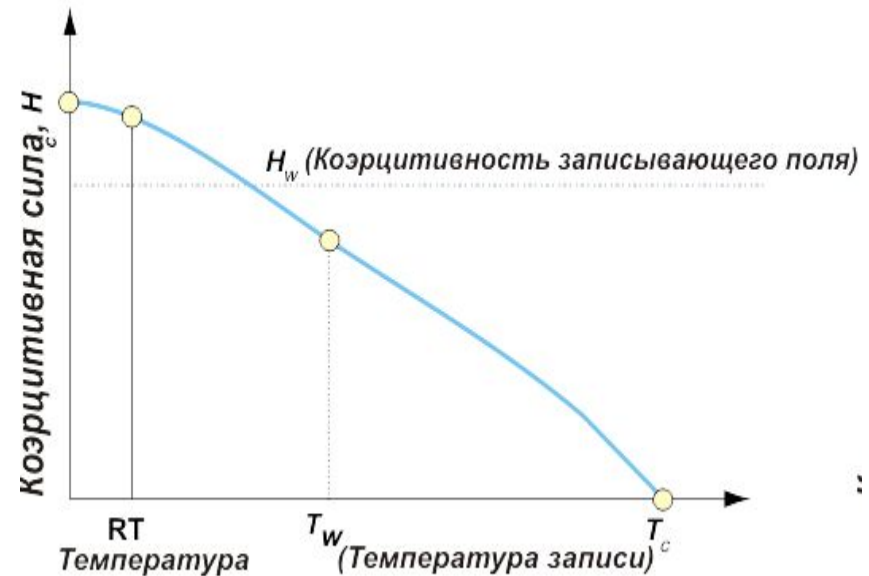
Термоассистируемая магнитная запись (Heat-Assisted Magnetic Recording, HAMR)



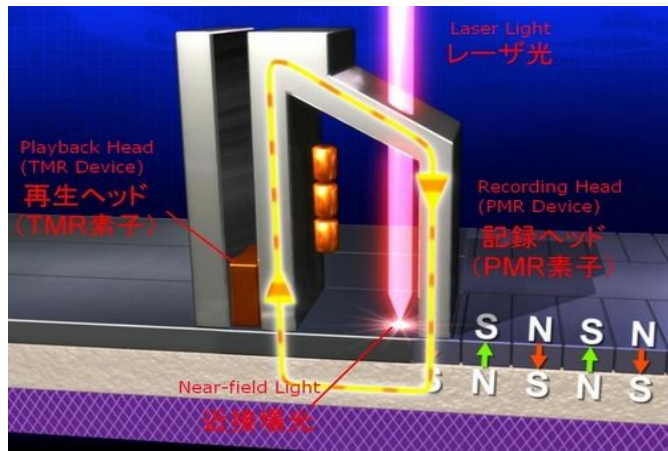
Внедрение этой технологии потребует использования в качестве записывающего слоя принципиально новых материалов с высоким уровнем анизотропности. Речь может идти о таких сплавах, как $\text{Fe}_{14}\text{Nd}_2\text{B}$, CoPt , FePt или даже Co_5Sm . Кроме того, специалисты из Seagate всерьез полагают, что в HAMR винчестерах придется ставить 2 отдельные головки. Наиболее необычным является считывающий элемент – это оптическая головка! Точнее, не совсем оптическая, в ней будет использоваться специальное твердотельное зеркало (Planar Solid Immersion Mirror).

В технологии *HAMR* положен эффект снижения коэрцитивной силы магнита при его нагреве. Если же нагреть магнитный материал до температуры Кюри, то его коэрцитивная сила становится равной нулю. Зависимость коэрцитивности материала от его температуры, демонстрируется на *рисунке*.

$$\text{Стабильность} = (K_u \times V) / (k_B \times T)$$



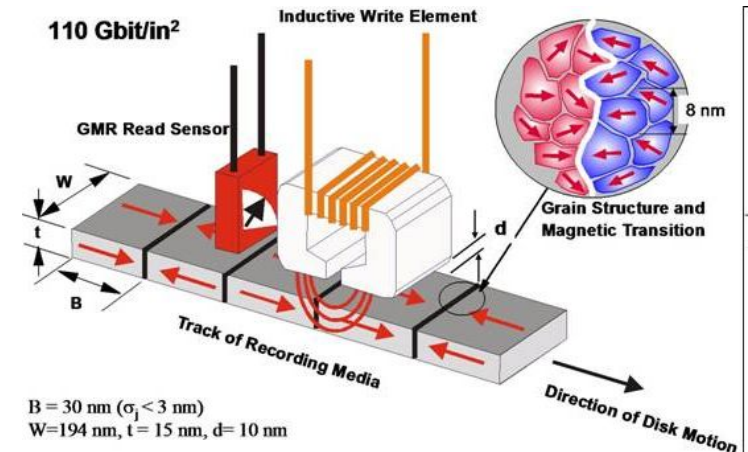
Термоассистированная магнитная запись (Heat-Assisted Magnetic Recording, HAMR)



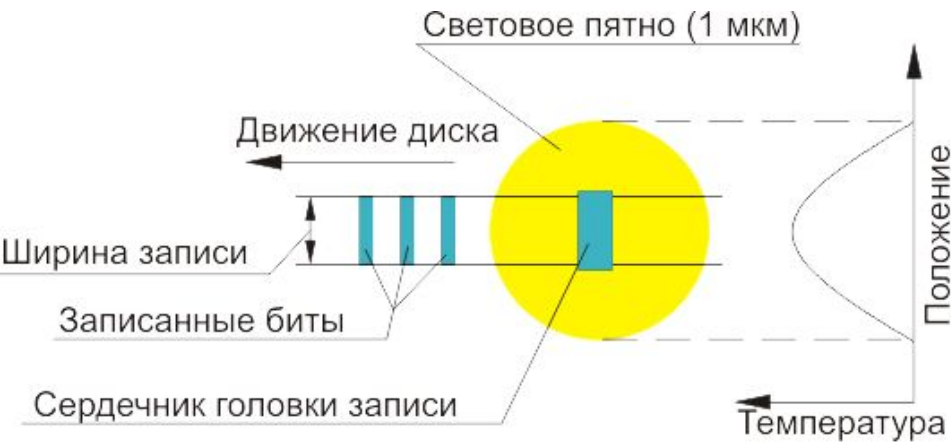
Для разогрева поверхности магнитного материала предлагается использовать нагревательный элемент, в основе которого лежит полупроводниковый лазер. Световое излучение лазера должно быть сконцентрировано на той дорожке, на которую и осуществляется запись.

В технологии *HAMR* выделяют два метода записи:

- магнитное доминирование (*Magnetic dominant*);
- оптическое доминирование (*Optical dominant*).



Термоассистируемая магнитная запись (Heat-Assisted Magnetic Recording, HAMR)



www.mirpu.ru

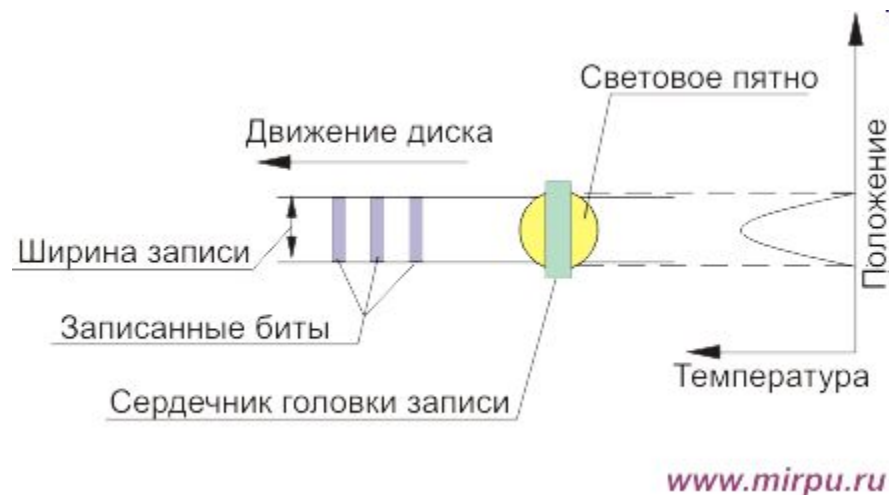
При использовании метода магнитного доминирования световое пятно, осуществляющее разогрев магнитного материала, имеет большие размеры, чем ширина дорожки

Ширина дорожки определяется шириной сердечника записывающей головки. Характерной особенностью данного метода является то, что магнитный материал разогревается до температуры, которую называют температурой записи T_w . Температура T_w характеризуется тем, что при ее достижении H_c домена становится меньше величины магнитного поля записывающей головки, но при этом до точки Кюри домен не разогревается. Т.е., разогревом домена обеспечивается просто снижение его H_c , а не полное его "размагничивание", как это происходит в точке Кюри.

Светового пятна лазера при таком методе записи имеет размер порядка 1 мкм.

Ширина дорожек, а значит и плотность записи в таком методе ограничивается конструктивными особенностями записывающей головки.

Термоассистируемая магнитная запись (Heat-Assisted Magnetic Recording, HAMR)

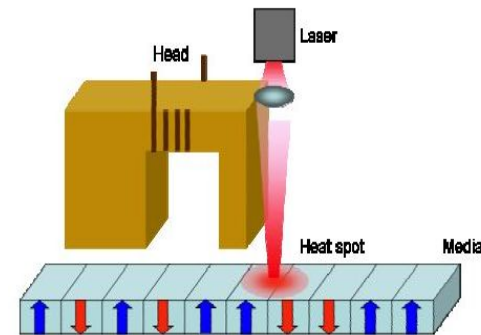
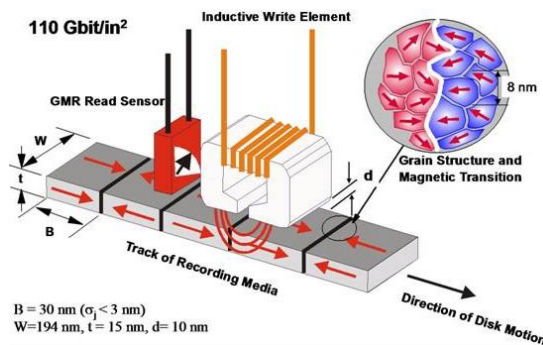


Метод оптического доминирования отличается значительно меньшим размером светового пятна – менее 50 нм. Ширина дорожки в этом случае определяется именно диаметром светового пятна, а ширина записывающей головки оказывается несколько больше ширины дорожки

Именно этот метод позволяет добиться меньшего размера магнитного домена и обеспечивает большую плотность записи, ведь ширина дорожки составляет всего 40-50 нм. Однако при таком способе записи необходимо использовать материалы с большей коэрцитивной силой. В результате, магнитный домен необходимо разогреть до большей температуры, т.е. до температуры Кюри, при которой магнитный материал имеет нулевое значение коэрцитивной силы и его очень легко перемагнитить, не смотря даже на малые габариты записывающей головки, а, значит, не смотря и на малое значение ее записывающего магнитного поля.

Термоассистируемая магнитная запись (Heat-Assisted Magnetic Recording, HAMR)

Сравнивая эти два метода можно сказать, что на сегодняшний день реально обсуждается использование лишь первого метода, т.е. метода магнитного доминирования. Это связано с тем, что пока еще не созданы лазеры с таким малым размером светового пятна, как 50 нм, и их разработка ограничивается дифракционным пределом.



Fujitsu официально заявлено о получении лазера, формирующего световое пятно размером 88 x 60 нм с оптической мощностью 17%. Имеются разработки, позволяющие получить и меньшие значения светового пятна, но мощность подобных лазеров пока еще незначительна (около 1.5%), чтобы говорить об их применении в качестве нагревателя поверхности. Отдельные фирмы-производители разрабатывают системы, в которых лазер фокусируется с помощью прецизионной зеркальной системы до размеров, приемлемых для записи с оптическим доминированием.

Для разогрева магнитного материала, как уже говорилось, предлагается использовать нагревательный элемент на основе лазера. При этом световое излучение лазера должно быть в максимальной степени сфокусировано.

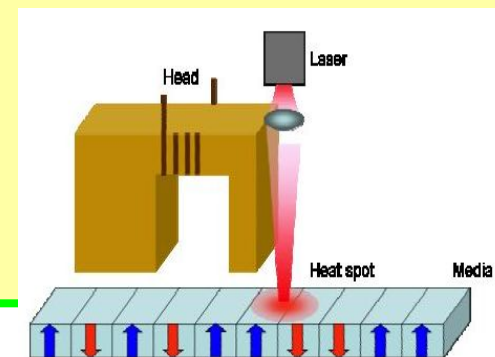
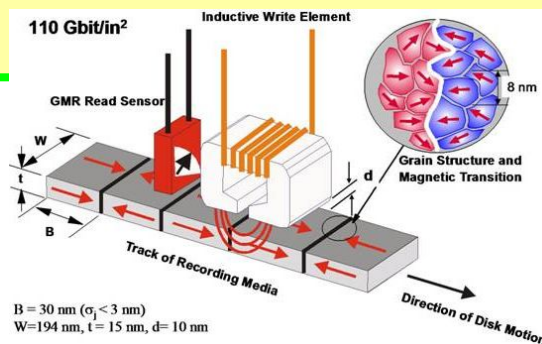
Требования, выдвигаемые к нагревательному элементу:

- размер формируемого светового пятна должен быть менее 50 нм;*
- оптическая эффективность должна быть на уровне 2%, чтобы обеспечить разогрев материала до необходимой температуры;*
- длина затухания светового потока должна быть более 10 нм, т.к. между нагревательным элементом и поверхностью магнитного носителя имеется определенный зазор;*
- нагревательный элемент должен хорошо интегрироваться в состав магнитной головки;*
- процесс производства нагревательного элемента должен быть совместим с процессом производства магнитной головки;*
- конструкция головки должна позволять осуществлять прецизионную регулировку расстояния между световым пятном и записывающим магнитным полем.*

Термоассистируемая магнитная запись (Heat-Assisted Magnetic Recording, HAMR)

В качестве нагревательного элемента, в принципе, могут использоваться следующие устройства:

- гребенчатый волновод;
- дуговая подвесная излучающая антенна;
- плоский дифракционный элемент;
- SMASH-головка.

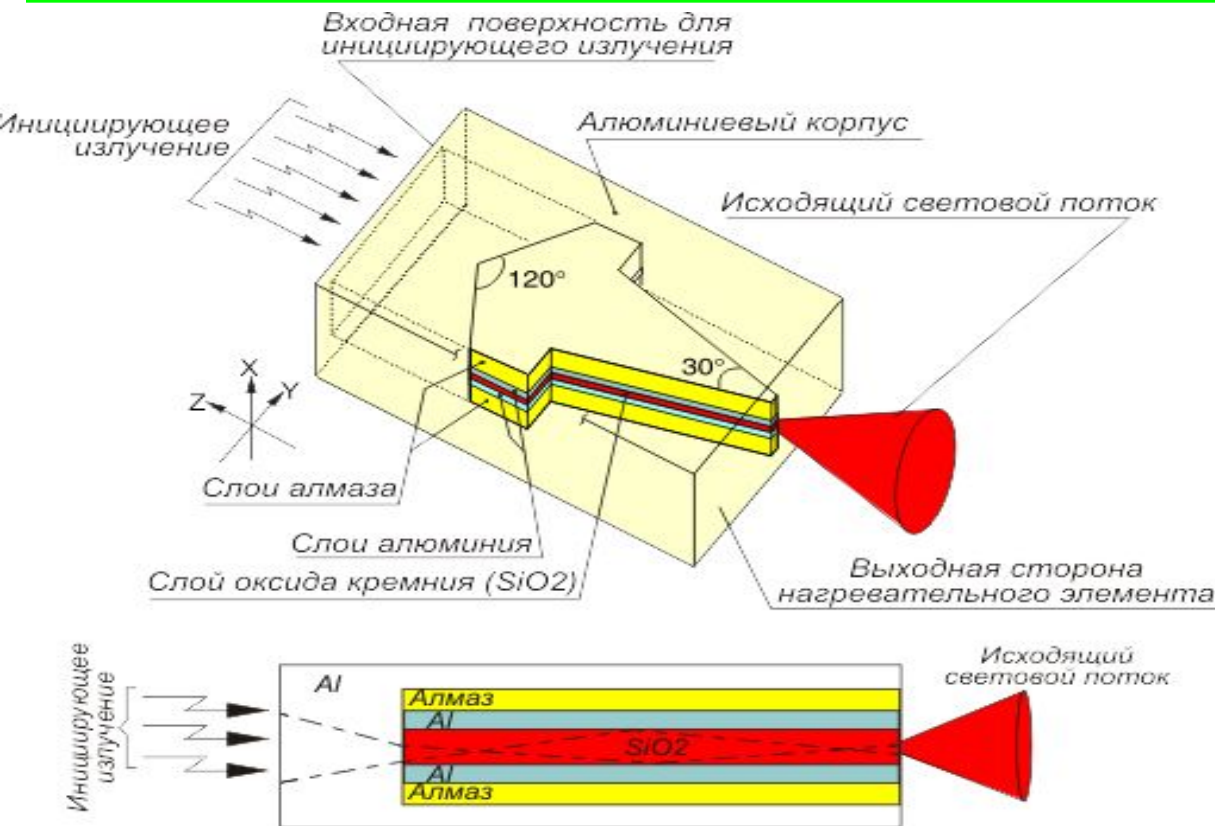


Однако при использовании всех этих элементов записывающие магнитные поля ограничивается величиной 100 Oe, т.к. они комбинируются с катушкой без магнитного сердечника.

Другими словами, эти элементы достаточно плохо интегрируются с магнитной головкой.

Термоассистируемая магнитная запись (Heat-Assisted Magnetic Recording, HAMR)

Fujitsu предлагает использовать в качестве нагревательного элемента слоенную дифракционную структуру. Такая структура очень хорошо сочетается с магнитной головкой, и процесс ее производства совместим с технологией изготовления современных магнитных головок. Все это означает, что головка чтения, головка записи и нагревательный элемент могут изготавливаться на подложке из AlTiC (алюминий-титан-углерод) планарным методом.



Нагревательный элемент для HAMR-записи, разработанный Fujitsu

Термоассистируемая магнитная запись (Heat-Assisted Magnetic Recording, HAMR)

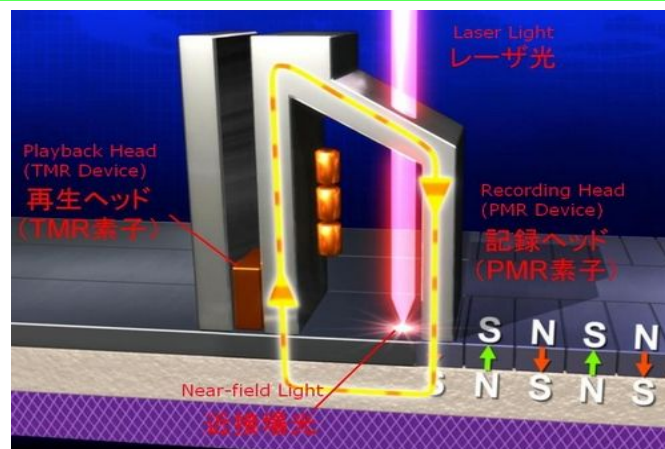
Элемент имеет стреловидную форму и состоит из 7 слоев.

Данная структура, в какой-то мере, может называться зеркальной фокусирующей оптической системой, которая преобразует входной световой поток в световое пятно малого размера.

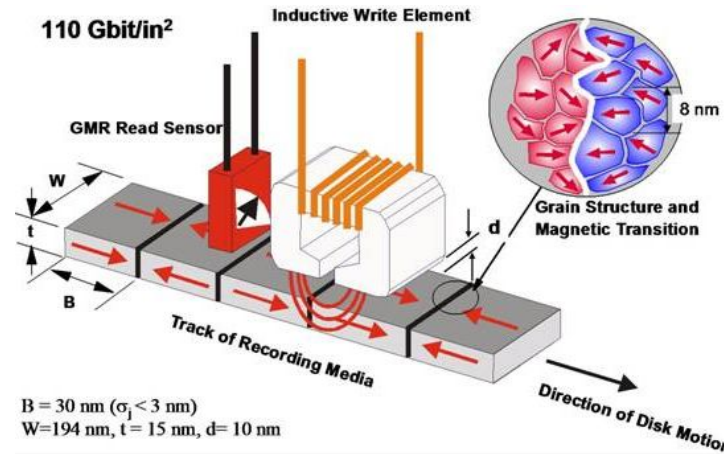
Основная идея работы такого многослойного элемента заключается в следующем. В центральной части структуры средний (оксид-кремниевый) слой образует совместно с соседними алюминиевыми слоями однопериодный переход с высоким коэффициентом отражения.

Одновременно с этим, граница слоев алюминия и алмаза образует с обеих сторон многослойной структуры переходы с низким коэффициентом отражения и с некоторым (небольшим) количеством периодов.

Все это способствует увеличению коэффициента оптической передачи нагревательного элемента. В результате, входной световой поток с длиной волны 400 нм преобразуется в световой поток, имеющий размер 30 нм (в плоскости X), за счет высокого коэффициента оптической передачи нано-лучей, проходящих через слой оксида кремния.



Термоассистируемая магнитная запись (Heat-Assisted Magnetic Recording, HAMR)



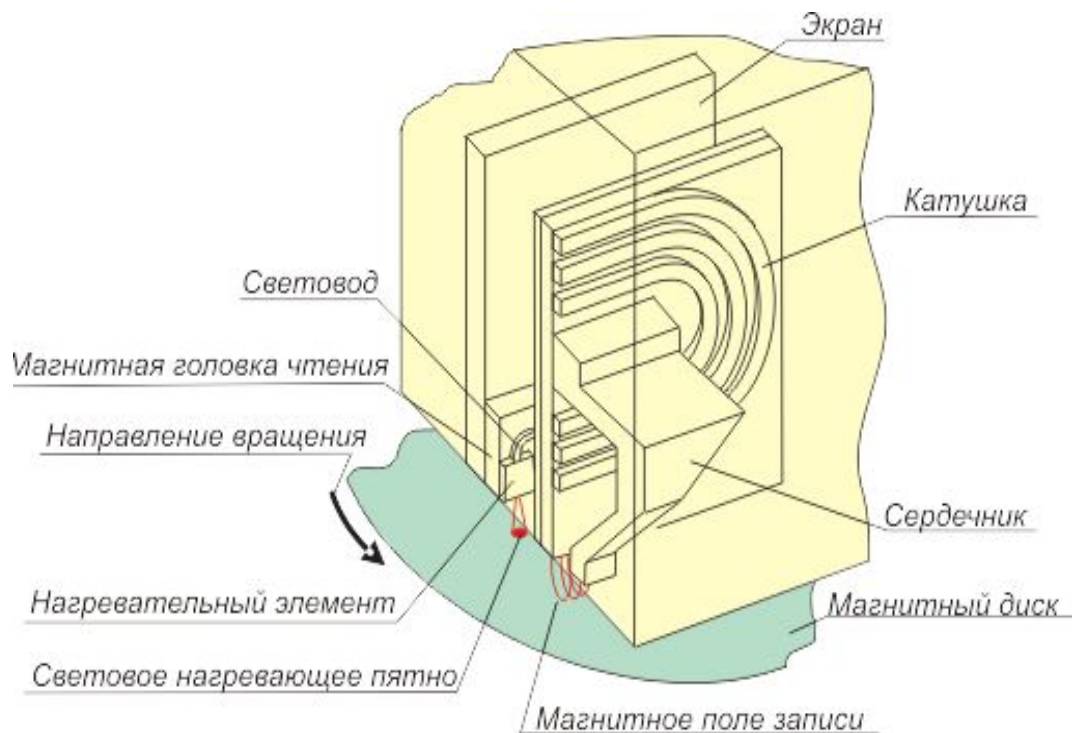
Но, кроме того, свет, поляризованный в плоскости X , начинает распространяться и в плоскости Y из-за интерференции лучей, отраженных от боковых стенок структуры.

В результате, на выходе нагревательного элемента формируется световое пятно размером 45 нм (в плоскости X) на 60 нм (в плоскости Y). Длина затухания в плоскости Z составляет 15 нм, что сопоставимо с величиной магнитного зазора.

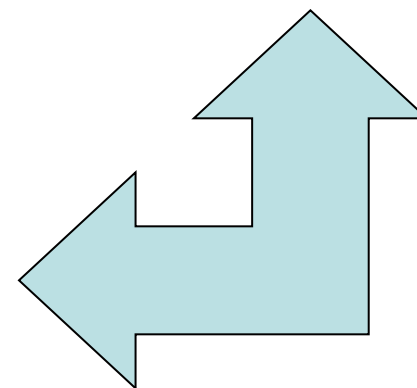
На данный момент времени недостатком рассмотренного нагревательного элемента является, все-таки, высокий коэффициент оптической передачи, который находится на уровне 1.6%, что явно недостаточно, в соответствии с указанными выше требованиями.

Однако, на взгляд разработчиков, данная структура является оптимальной и перспективной, и продолжают работы по повышению ее оптической эффективности. Многослойный нагревательный элемент очень хорошо сочетается с обычной магнитной головкой и может быть изготовлен методом травления или напыления.

Термоассистируемая магнитная запись (Heat-Assisted Magnetic Recording, HAMR)



Примерный вариант конструкции головки HAMR, в которой используется традиционная магнитная головка записи и многослойный нагревательный элемент



www.mirpu.ru

Термоассистируемая магнитная запись (Heat-Assisted Magnetic Recording, HAMR)

Материалы

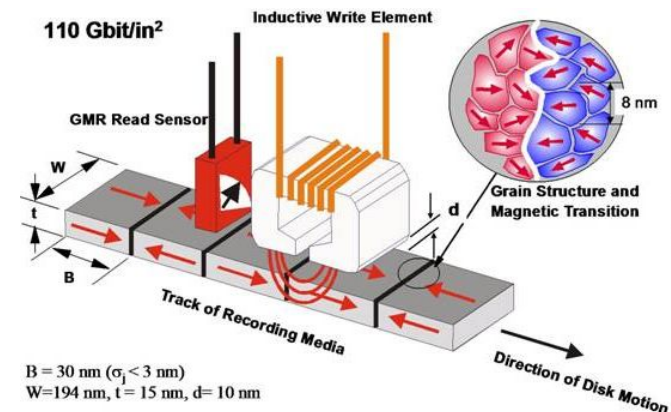
На сегодняшний день, для технологии HAMR предлагается использовать синтетические ферромагнитные материалы (SFM). Одним из примеров SFM может служить композитный носитель, состоящий из следующих слоев:

- тонкая основа (нижний слой) из кобальт-хромового сплава (CoCr);
- толстый верхний слой из сплава кобальта-хрома-платины-бора (CoCrPtB);
- слой рутения (Ru), расположенный между двумя ферромагнитными слоями.

Подобная структура с широким слоем магнитного материала обладает высоким значением константы K_u и высоким значением фактора стабильности при малом размере магнитного домена.



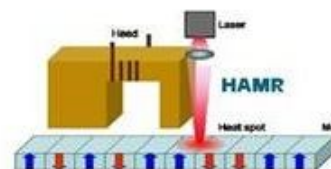
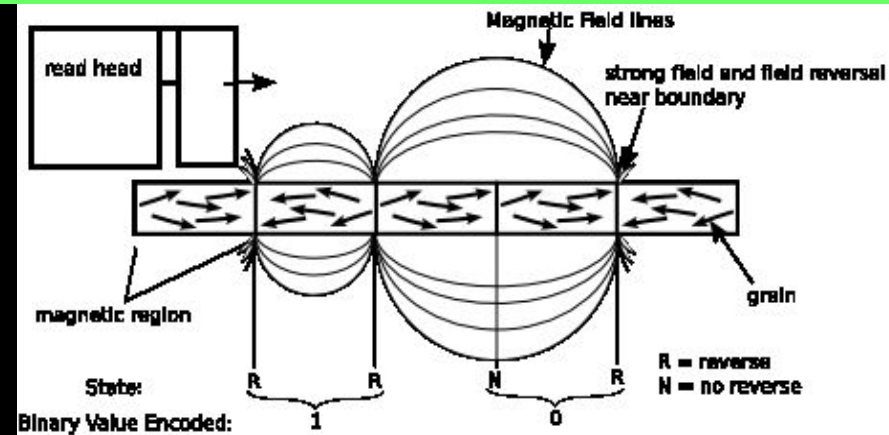
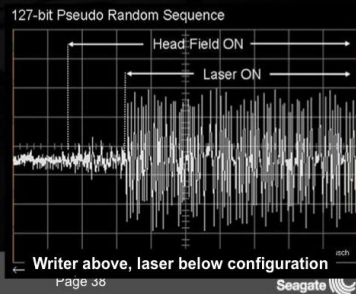
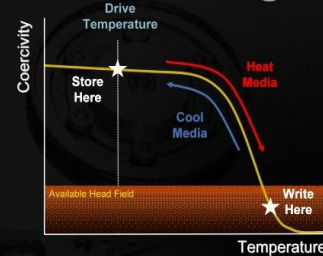
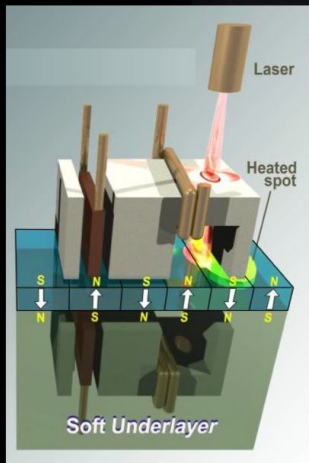
www.mirpu.ru





Как видно из роад-мапа развития технологий, в ближайшие несколько лет в индустрии жестких дисков ожидаются более существенные технологические изменения, чем за весь пятидесятилетний период ее существования.

Heat Assisted Magnetic Recording



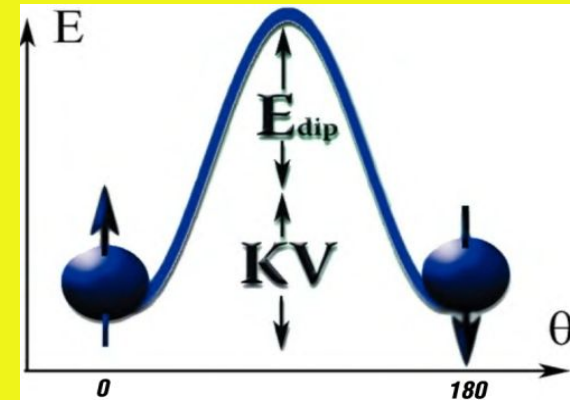
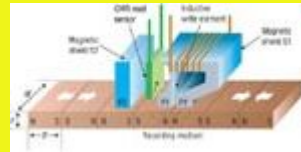
“Versus”



Физические пределы плотности для каждого метода магнитной записи

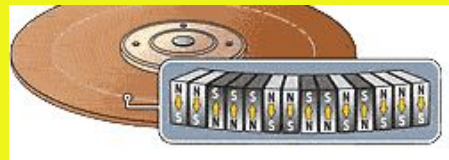
Продольная запись

имеет физический предел плотности
в 23 Гбит/дюйм²



Перпендикулярная запись

имеет физический предел плотности
в 500 Гбит/дюйм²



Структурированная запись

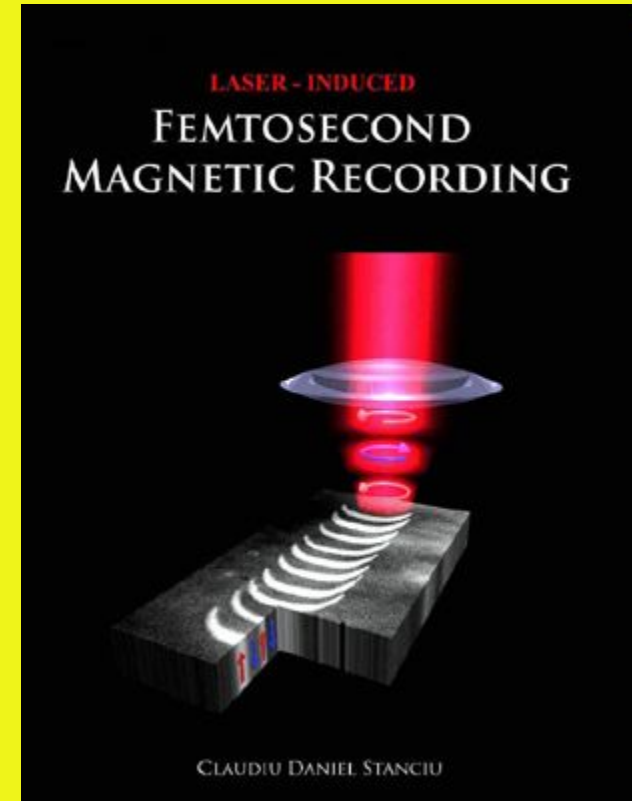
имеет физический предел плотности
в 4 Тбит/дюйм²

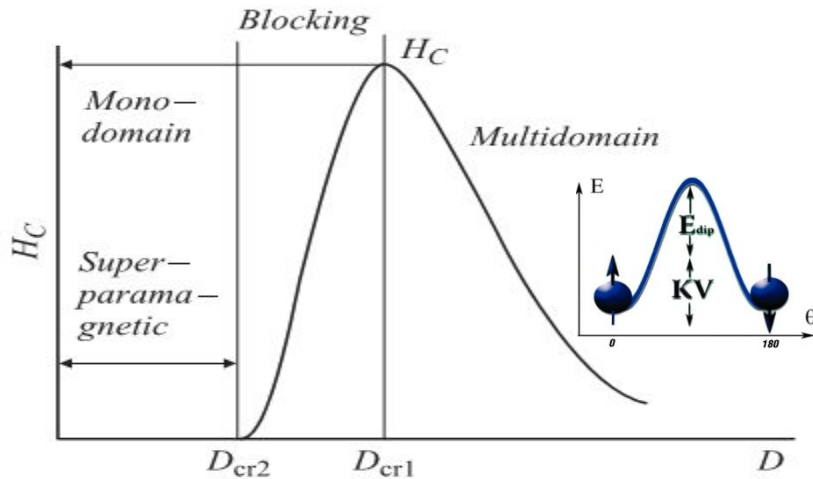


Термоассистируемая запись

имеет физический предел плотности
в 50 Тбит/дюйм²

$$K_u V / k_B T > 70$$



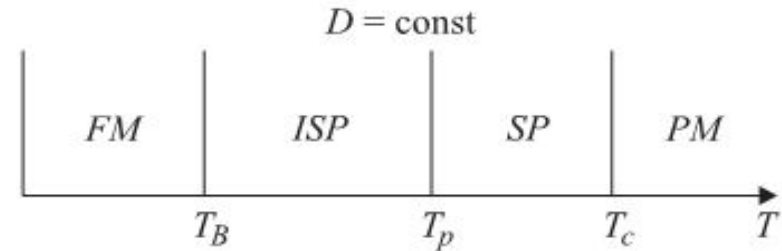


Для $H = 0$ порог перехода системы в суперпарамагнитное состояние равен $E = KV$. При $H \neq 0$ порог понижается и определяется выражением

$$\Delta E(H) = KV \left[1 - \frac{HM_s}{2K} \right]^2. \quad (5)$$

Переход в суперпарамагнитное состояние

При дальнейшем уменьшении размера частиц ($D < D_{cr1}$), которые находятся в однодоменном состоянии, казалось бы, коэрцитивная сила не должна изменяться. Однако наблюдается обратная картина — значение H_c уменьшается и при определенном размере (D_{cr2}) обращается в нуль (рис. 1). Для объяснения этого явления обратимся к результатам работы [6], в которой исследовались эффекты тепловой релаксации намагниченности в ансамбле невзаимодействующих однодоменных частиц, обладающих одноосной анизотропией.



Суперпарамагнетизм — форма магнетизма, проявляющаяся у ферромагнитных и ферримагнитных частиц. Если такие частицы достаточно малы, то они переходят в однодоменное состояние, т.е. становятся равномерно намагниченными по всему объёму.

Магнитный момент таких частиц может случайным образом менять направление под влиянием температуры, и при отсутствии внешнего магнитного поля **средняя намагниченность суперпарамагнитных частиц равна нулю**.

Но во внешнем магнитном поле такие частицы ведут себя как парамагнетики даже при температуре ниже **точки Кюри** или **точки Нееля**. Тем не менее, магнитная восприимчивость суперпарамагнетиков намного больше, чем парамагнетиков.



Hard (magnetic) disk drive, HDD, HMDD), жёсткий диск, в компьютерном сленге «винчестер», «винт», «хард», «харддиск» — устройство хранения информации, основанное на принципе магнитной записи.

Информация в **винтах** записывается на жёсткие (алюминиевые или стеклянные) пластины, покрытые слоем ферромагнитного материала, чаще всего **двуокиси хрома**.

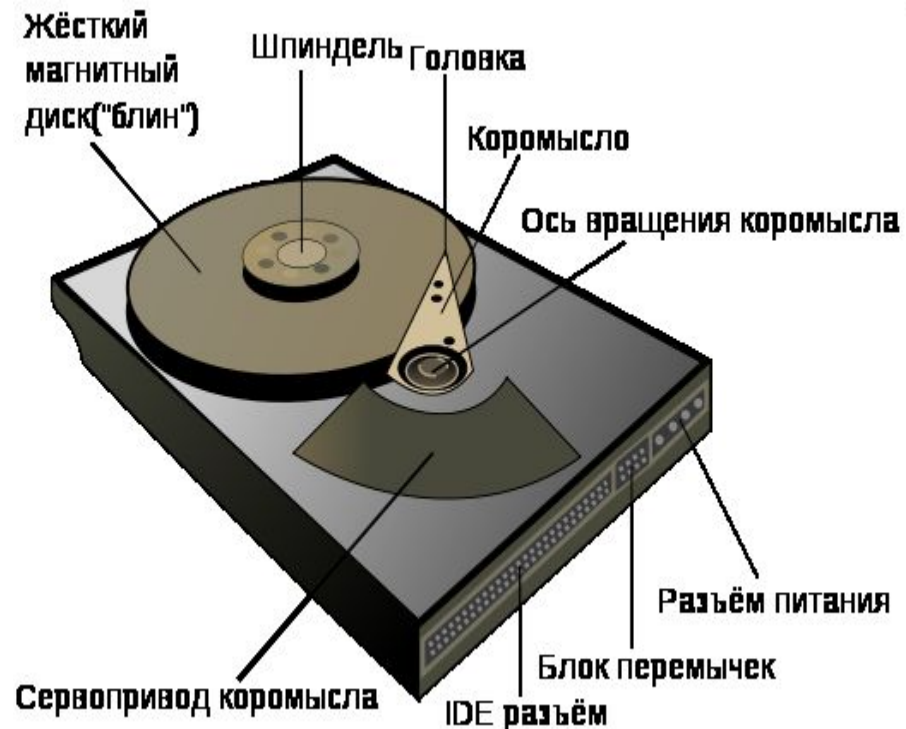
Жёсткий диск состоит из:

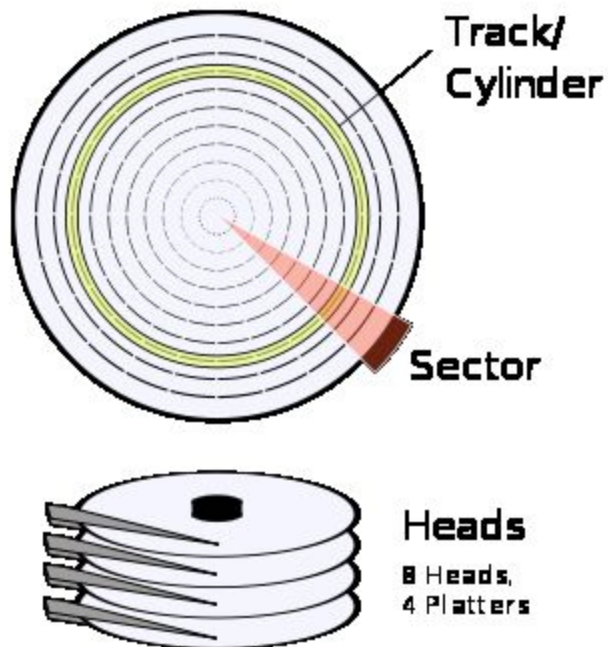
■ гермозоны:

- диски (пластины) с магнитным покрытием;
- блок головок с устройством позиционирования;
- электропривод шпинделя.

■ блока электроники:

- управляющий блок, постоянное запоминающее устройство (ПЗУ);
- буферную память;
- интерфейсный блок;
- блок цифровой обработки сигнала.





Низкоуровневое форматирование и геометрия магнитного диска

Устройства поверхности пластин форматируются — на дорожки — концентрические кольцевые области.

Каждая дорожка делится на равные отрезки — секторы (минимальные адресуемые области данных: размер сектора традиционно равен 4096 байт/был 512 байт).

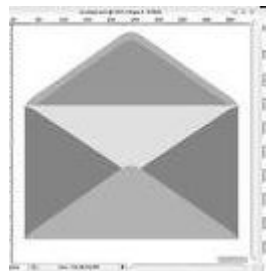
Адресация CHS предполагает, что все дорожки в заданной зоне диска имеют одинаковое число секторов. и секторы.

Конкретный способ определяется производителем и/или стандартом, но, как минимум, на каждую дорожку наносится магнитная метка, обозначающая её начало.

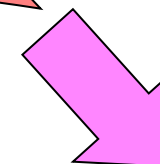
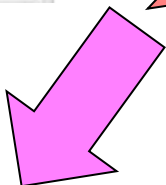
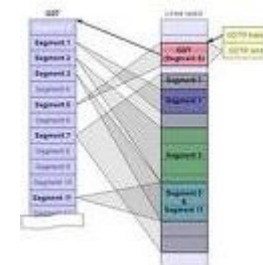
Цилиндр — совокупность дорожек, равноотстоящих от центра, на всех рабочих поверхностях пластин жёсткого диска.

Номер головки задает используемую рабочую поверхность (то есть конкретную дорожку из цилиндра), а номер сектора — конкретный сектор на дорожке.





Адресация данных



Цилиндр-головка-сектор
(англ. cylinder-head-sector,
CHS)

Линейная адресация блоков (англ. linear block addressing, LBA)

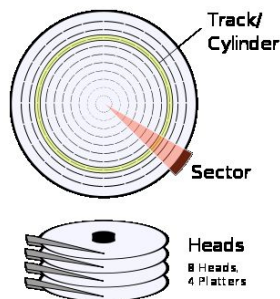
При этом способе сектор адресуется по его физическому положению на диске

При этом способе адрес блоков данных на носителе задаётся с помощью логического линейного адреса.

3 координатами:

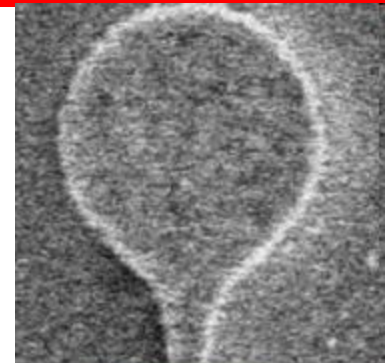
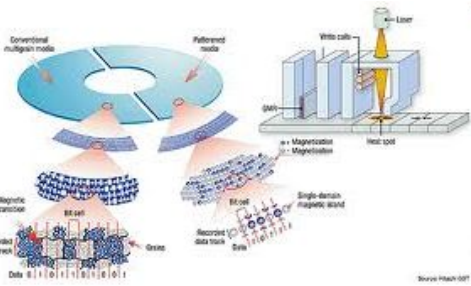
- номером цилиндра,
- номером головки
- номером сектора.

$$LBA = [(Cylinder * no\ of\ heads + heads) * sectors/track] + (Sector-1)$$





	Пропускная способность, Мбит/с	Максимальная длина кабеля, м	Требуется ли кабель питания	Кол-во накопителей на канал	Число проводков в кабеле	Другие особенности
UltraATA/133	1064	0,46	Да (3,5") / Нет (2,5")	2	40/80	Controller + 2Slave, горячая замена невозможна
SATA-300	3000	1	Да	1	7	Host/Slave, возможна горячая замена на некот-ых контроллерах
SATA-600	6144	нет данных	//-//-//	//-//-//	7	
FireWire/400	400	4,5 (при послед-ом соединении до 72 м)	Да/Нет (зависит от типа интерфейса и накопителя)	63	4/6	устройства равноправны, горячая замена возможна
FireWire/800	800	//-//-//	Нет	//-//-//	4/6	//-//-//
USB 2.0	480	5 (при послед-ом соединении, через хабы, до 72 м)	Да/Нет (зависит от типа накопителя)	127	4	Host/Slave, горячая замена возможна
USB 3.0	4800	нет данных	//-//-//	нет данных	9	Двунаправленный, совместим с USB 2.0
Ultra-320 SCSI	2560	12	Да	16	50/68	устройства равноправны, горячая замена возможна
SAS	3000	8	//-//-//	Свыше 16384		горячая замена; возможно подключение SATA-устройств в SAS-контроллеры
eSATA	3000	2	//-//-//	1 (с умножителем портов до 15)	7	Host/Slave, горячая замена возможна



Eastmag 2013: Trends in magnetism



Pattern Media & Heat-Assisted memory record seem to be still the most perspective

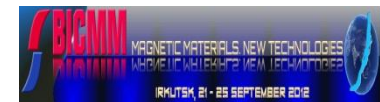
International Workshop Of Non-Crystalline Solids, Portugal, 2008



International Workshop on Structural and Mechanical Properties of Metallic Glasses, Spain, 2009



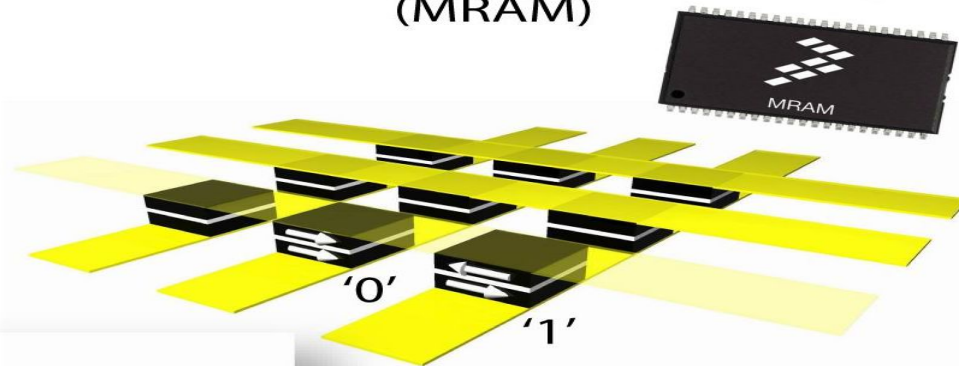
Joint European Magnetic Symposium, Poland, 2010



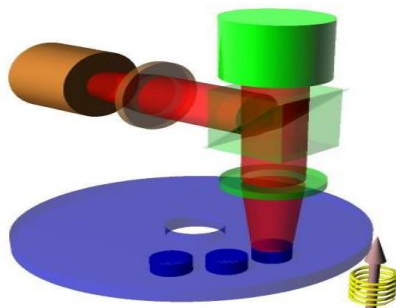
Hard Disk Drive (HDD)



Magnetic Random Access Memory (MRAM)

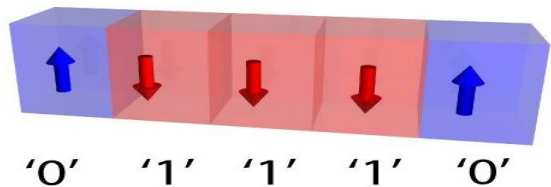


Magneto - Optical Disk



The binary information in:

HDD & Magneto - Optical Disk

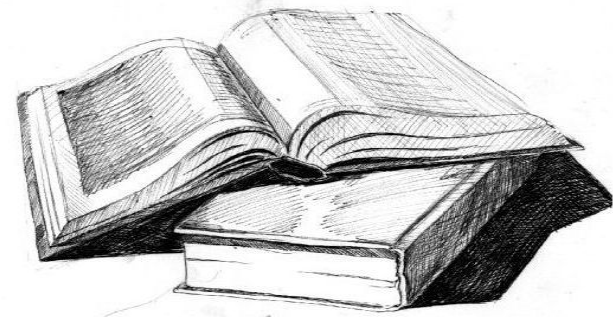


MRAM



Используемые Интернет-ресурсы:

- http://ru.wikipedia.org/wiki/Жёсткий_диск
- <http://www.smarthdd.com/rus/help.htm>
- http://citforum.ru/hardware/data/hdd_industry/
- http://rlab.ru/doc/hdd_from_inside.html
- <http://ru.wikipedia.org/wiki/Суперпарамагнетизм>
- <http://oval.ru/enc/69559.html>
- <http://ufn.ru/ru/rubrics/nobel-lectures/>
- <http://remont-hdd.by.ru/ustroistvo.html>
- http://hddfix.ru/Stati/ZHestkie_diski_Printsipy_iya/
- http://www.datalabs.ru/pages/hdd_structure



- Скотт Мюллер. Модернизация и ремонт ПК = *Upgrading and Repairing PCs*. — 21-е изд. — М.: Вильямс, 2012. — С. 653—700. — ISBN 0-7897-3404-4
- Книга «Архитектура ЭВМ», автор Мюллер
- Книга «Архитектура ЭВМ», автор Танненбаум
- Книга «Архитектура ЭВМ», автор Гук
- Журнал Технической Физики, том 74, в. 7 «Магнитные свойства нанокристаллических пленок», автор Фролов
- *Book of Abstracts: Proceedings of Joint European Magnetic Symposia 13-17 September, 2008. - Dublin, Ireland. - 2008.*
- *Book of Abstracts: International Workshop on Structural and Mechanical Properties of Metallic Glasses IWMG09, 2009: Books of Abstracts 17-19 June 2009. - Barcelona, Spain, 2009.*
- *Book of Abstracts: Joint European Magnetic Symposia 2010 (JEMS 2010): 23-28 August 2010 - Krakow, Poland, 2010*
- *Book of Abstracts: EastMag Symposium 2013: 13-20 September 2013 - Vladivostok, Island Russkiy, Ajax, 2013*

