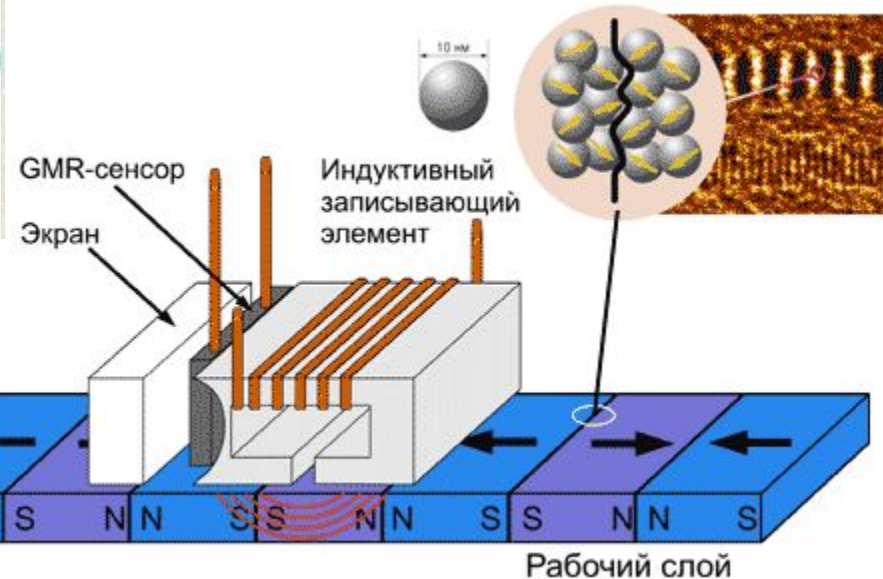
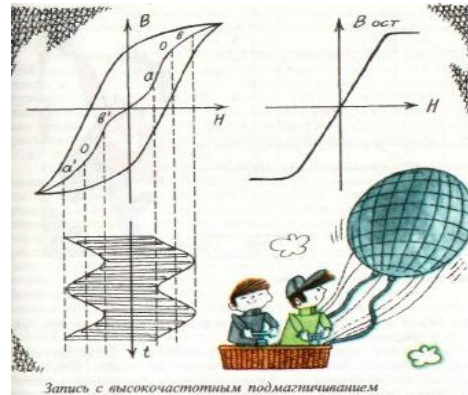
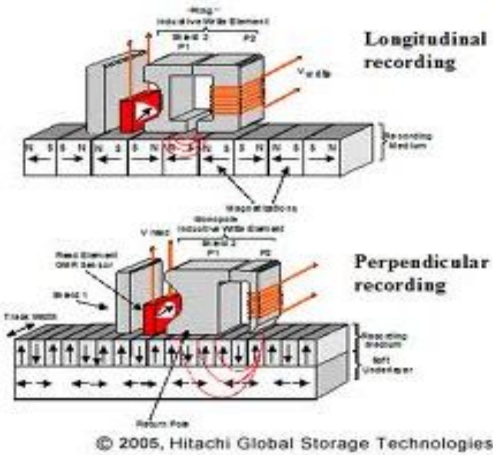
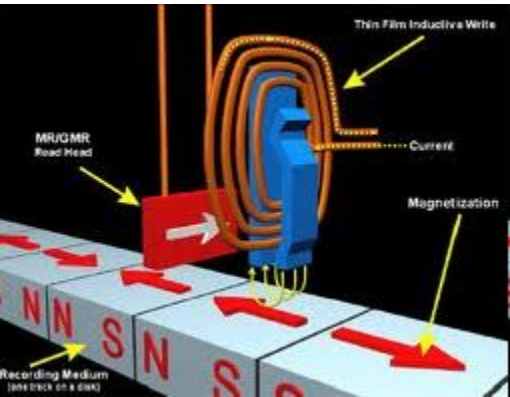


Magnetic memory & recording (продолжение)

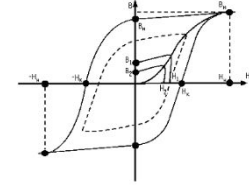
Магнитная запись



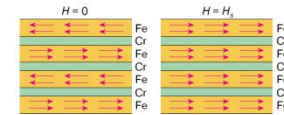
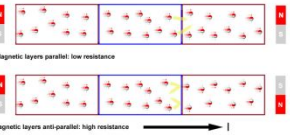


Материалы для магнитной записи:

- классификация;
- основные физические характеристики;
- состав.

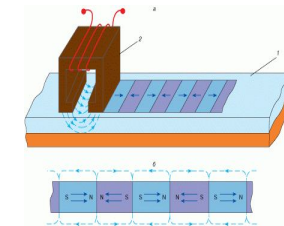


Гигантский магниторезистивный эффект: до и после.



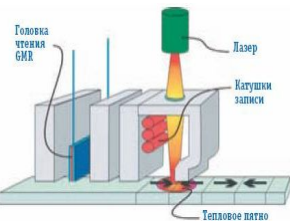
Технологии записи данных:

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



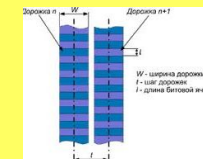
Физические пределы плотности для каждого метода магнитной записи.

Проблема суперпарамагнетизма

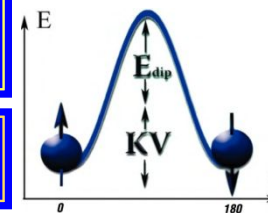


Жесткий диск:

- организация;
- протоколы;
- интерфейсы.



Перспективы магнитной записи





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

Магнитные свойства:

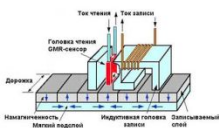
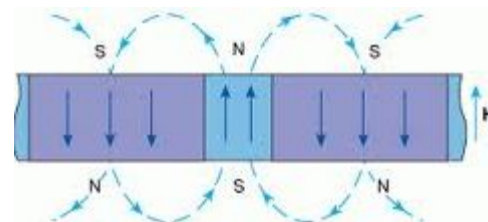
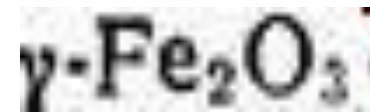
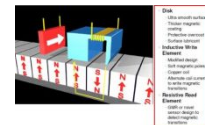
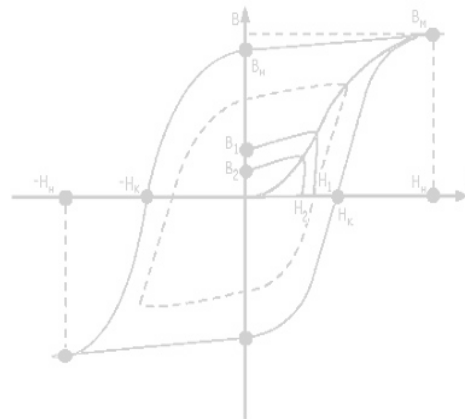
- Коэрцитивная сила;
- Остаточная индукция (намагниченность).

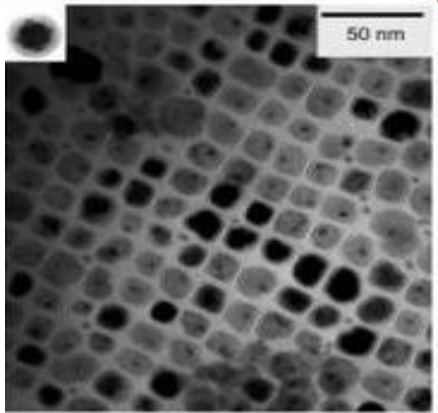
- оптимальное соотношение **основных магнитных свойств**, в подавляющем большинстве случаев - **предельно достижимое значение**:

- B_r ;
- коэффициента выпуклости петли гистерезиса;

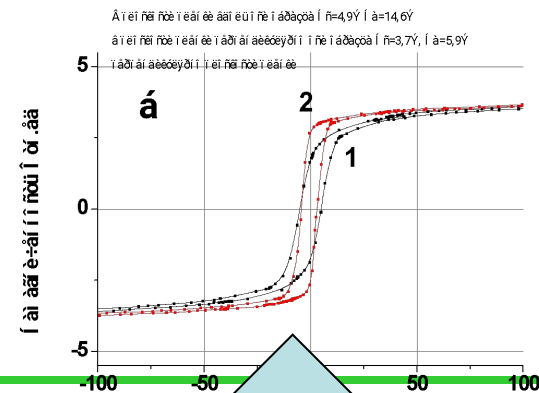
- однородность магнитных свойств в пределах промышленных партий ферропорошка;

- минимальная дисперсия полей перемагничивания микрочастиц ферропорошка.



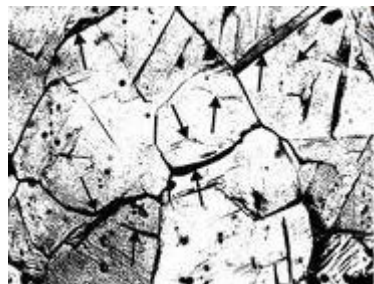


Структурные требования



Структура микрочастиц:

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

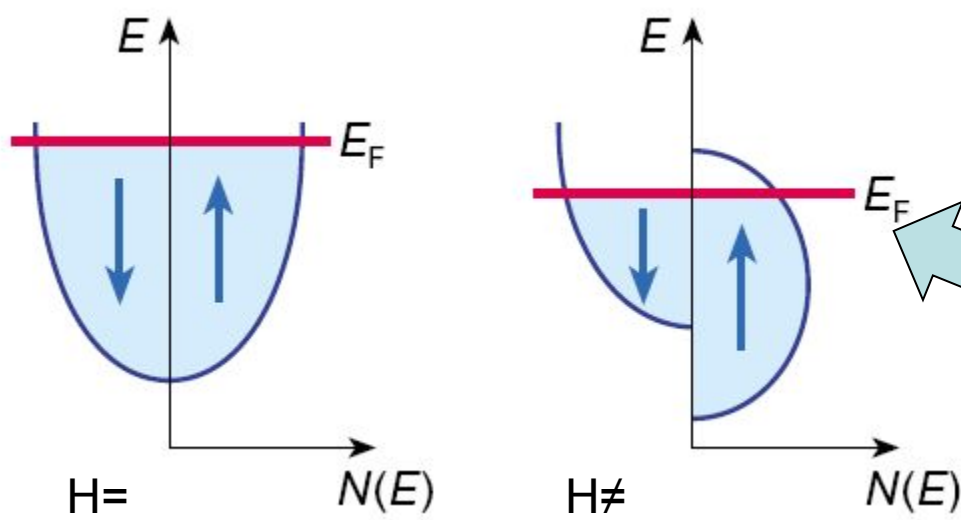


Спин и магнетизм

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

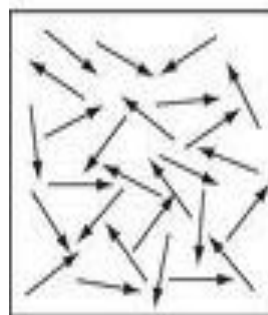
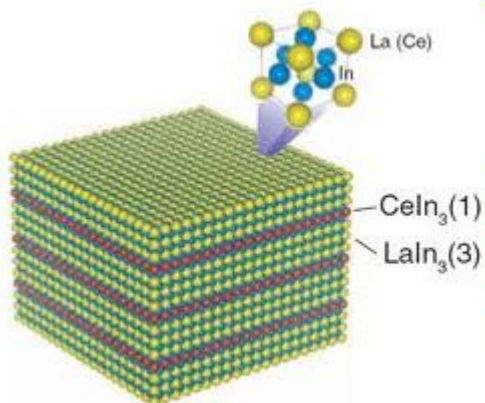
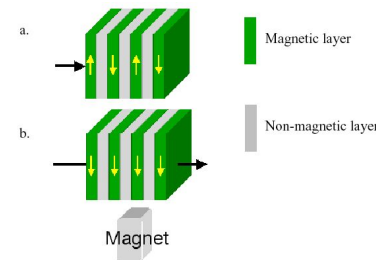


Концентрация 3d-электронов проводимости в зависимости от энергии.

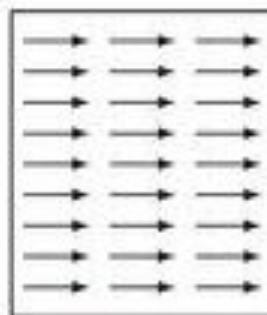
В результате концентрация электронов вблизи энергии Ферми (E_F) разная.

Материалы, которых никогда раньше не было

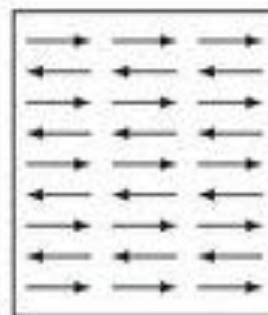
Как только научились изготавливать разные слои, принялись эксперименты с разными комбинациями материалов, в том числе и с чередующимися слоями ферромагнетика и немагнитного металла.



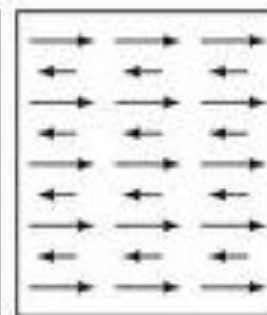
ПАРАМАГНЕТИКИ
магнитные моменты атомов
расположены хаотично



ФЕРРОМАГНЕТИКИ
магнитные моменты атомов
расположены параллельно



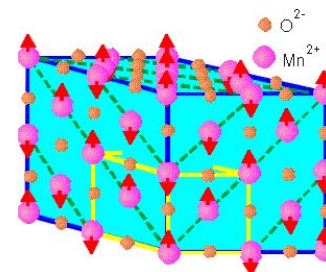
АНТИФЕРРОМАГНЕТИКИ
магнитные моменты атомов
расположены антипараллельно



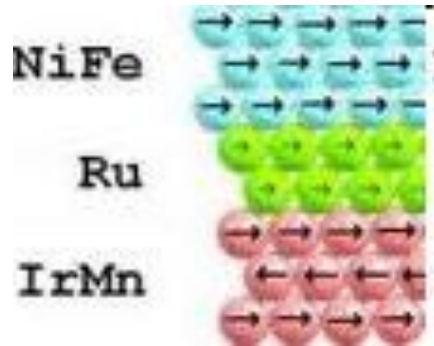
ФЕРРИМАГНЕТИКИ
нескомпенсированные магнитные
моменты атомов расположены
антипараллельно

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

АНТИФЕРРОМАГНЕТИЗМ

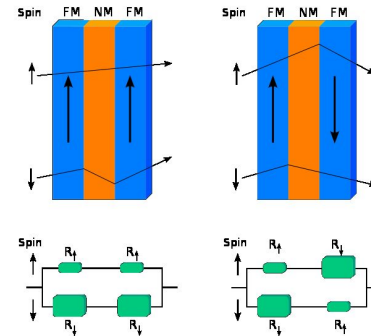
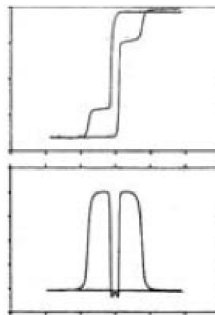
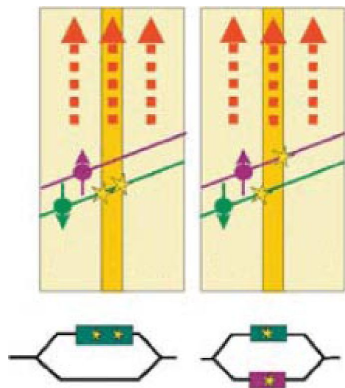


Когда все ключевые аспекты расписаны, остается разобраться с тем, что происходит с электрическим током, который течет сквозь такую слойку поперек слоев.

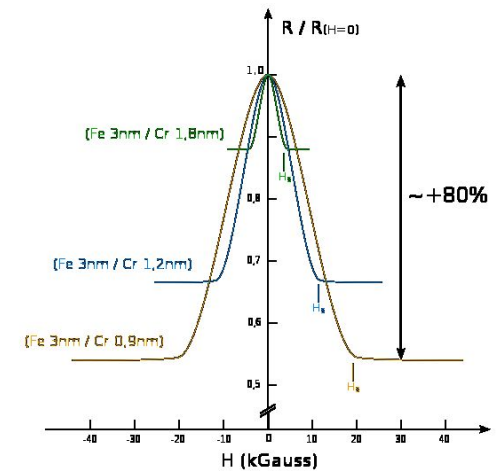
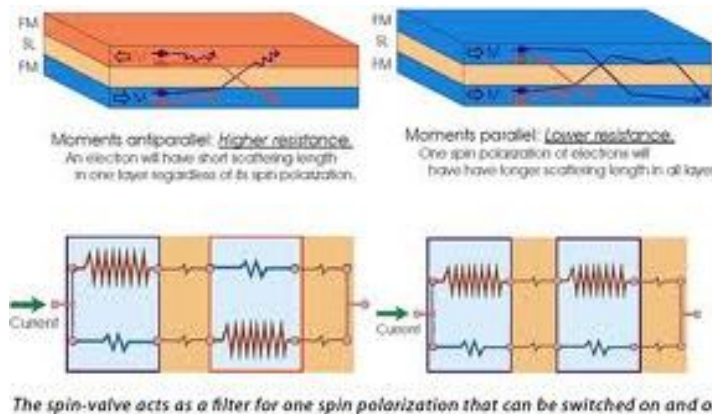
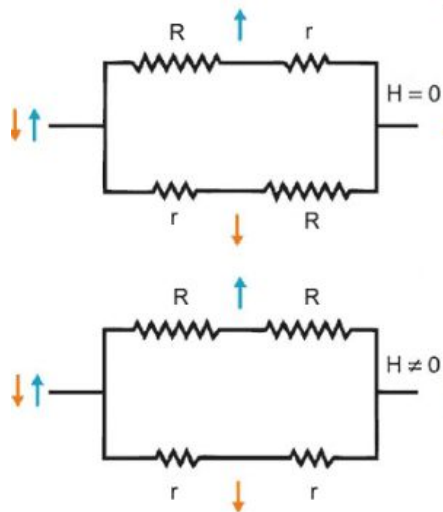


В отсутствие внешнего магнитного поля слои железа намагничены в чередующемся направлении. Двигаясь поперек слойки, электроны со спином вверх чувствуют большое сопротивление внутри слоев с магнитными полями вверх, но слабое сопротивление внутри слоев с магнитными полями вниз.

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.



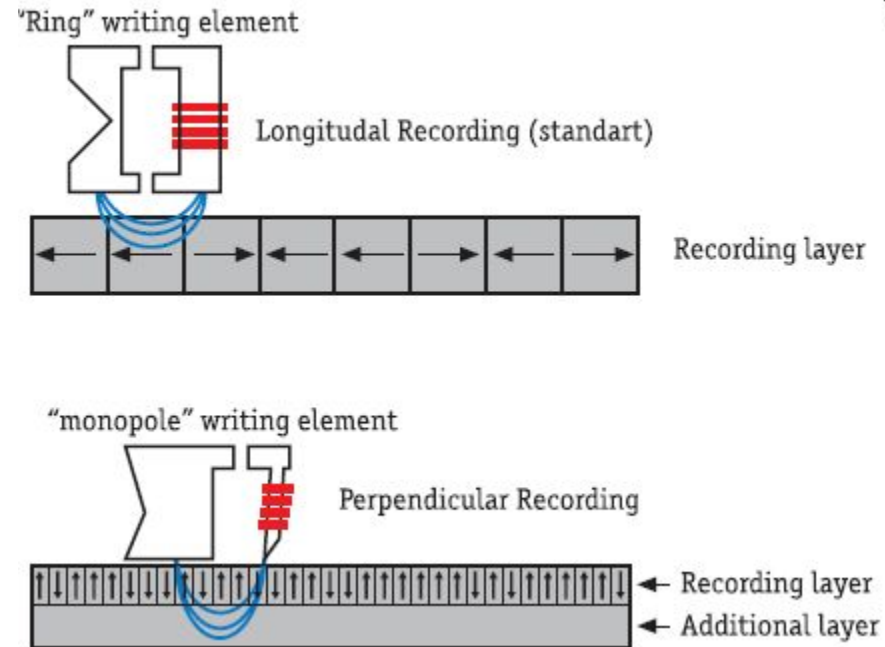
Если же приложить внешнее поле и выровнять намагниченность всех слоев, то электроны двух типов окажутся в *разных* условиях. Электроны, ориентированные по полю, *езде*, во всех слоях, испытывают большое сопротивление, то есть их вклад в ток уменьшится. В то же время электроны, ориентированные в противоположном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

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.

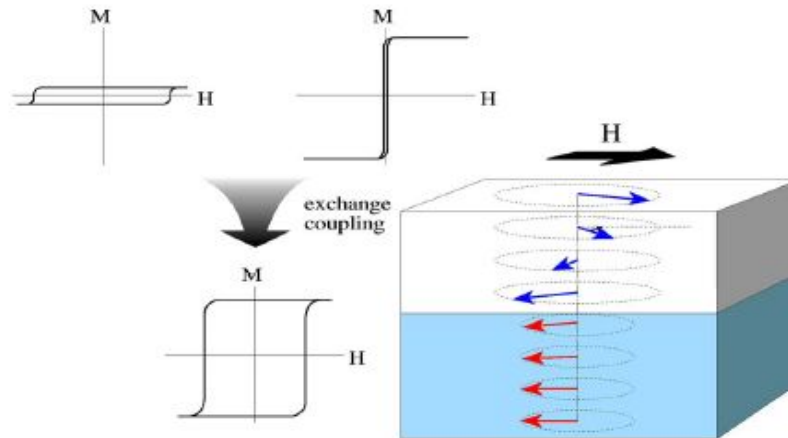
Величина M_r определяется из уравнения:

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

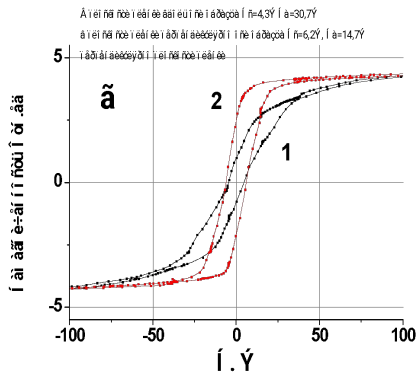
a- ширина переходной области между битами ($\approx 13\text{nm}$)

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 Winners 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.

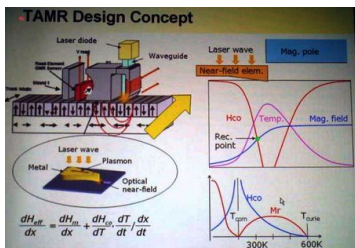
Результаты исследований позволили создать новые компактные электронные устройства.

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).

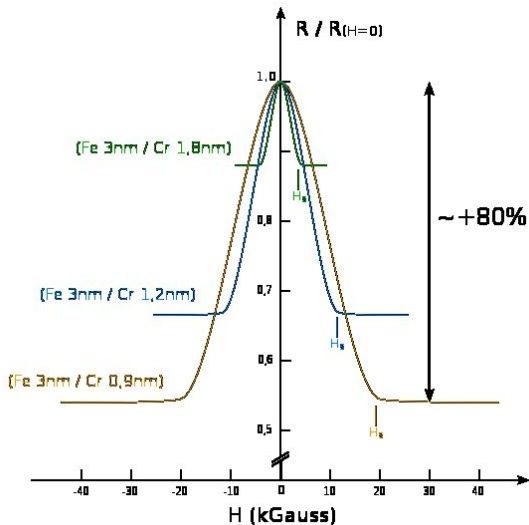
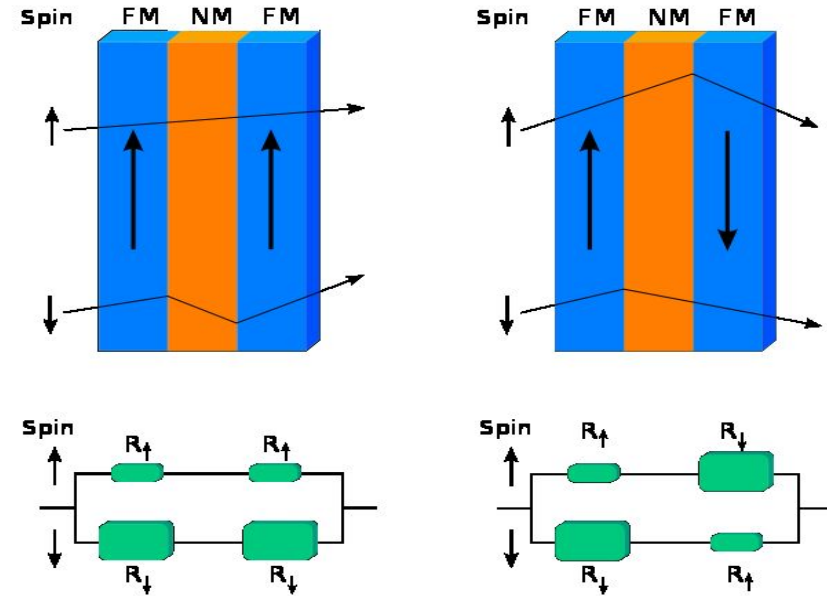
Гигантское магнитное сопротивление

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.

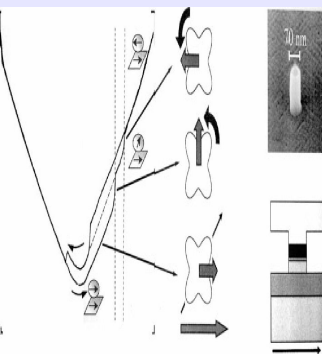
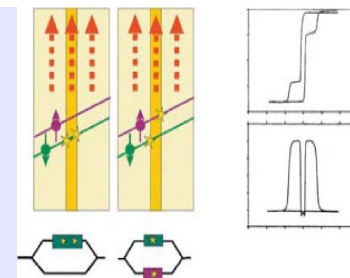


GMR-устройства используют чередующиеся сверхтонкие слои магнитного и немагнитного материалов (в IBM такую структуру называют **спиновым клапаном**). Самый простой вариант включает в себя три слоя: два ферромагнитных слоя, разделенных немагнитным проводником. Роль немагнитного проводника выполняет рутений. 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»**.

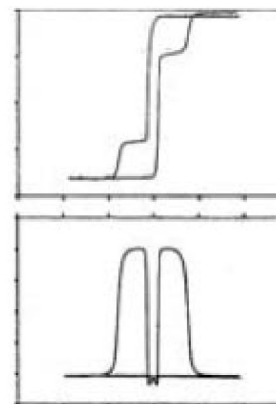
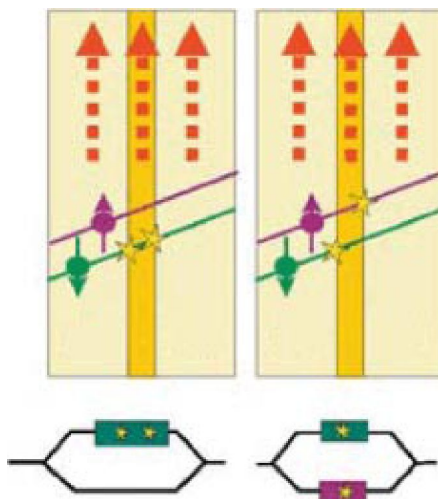
В результате плотность состояний вблизи уровня Ферми для электронов с разными направлениями спинов также различается.

• <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.

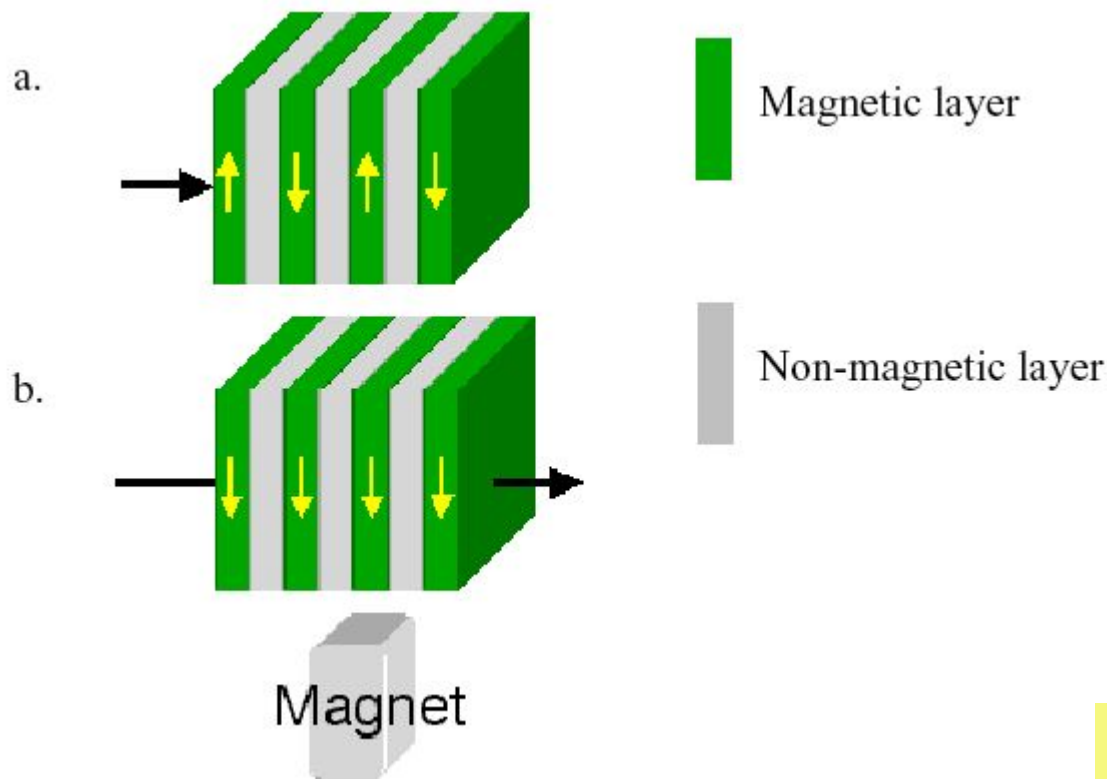


• <http://ufn.ru/ru/rubrics/nobel-lectures/>

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

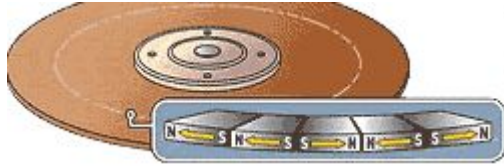
Бит информации в принципе может быть рассчитан при размерах порядка нескольких нанометров. Поэтому материалы для этого должны быть **нанокристаллическими**.

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



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

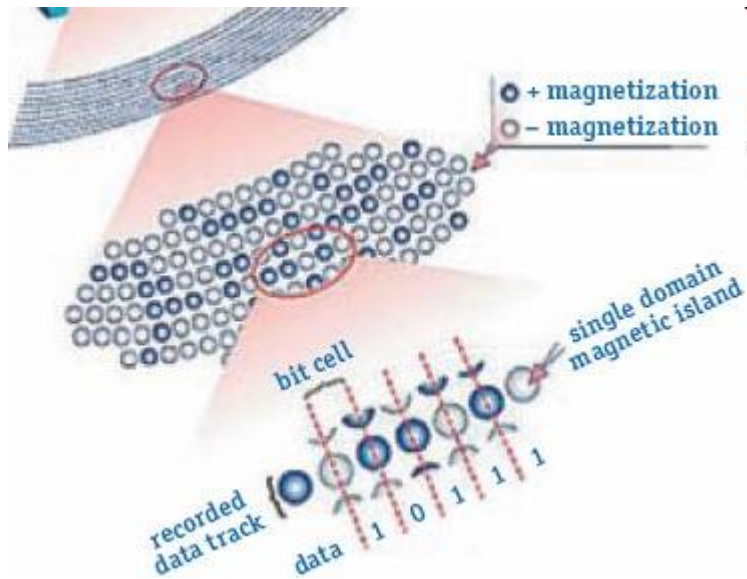
Продольная запись



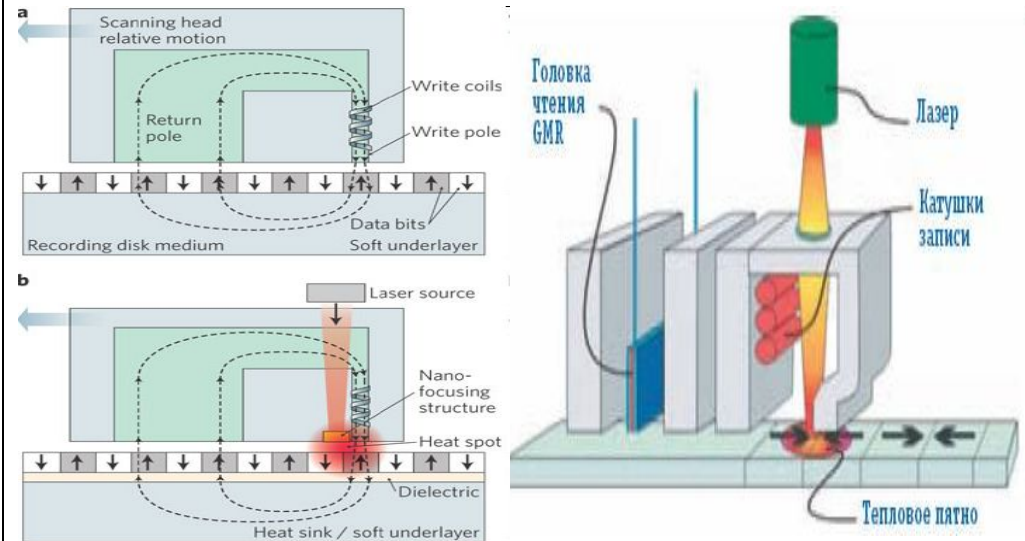
Перпендикулярная запись



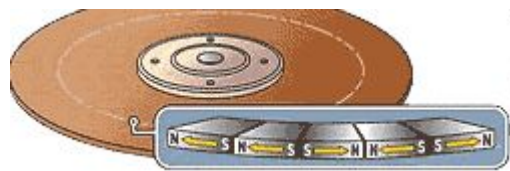
Структурированные носители Pattern Media



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

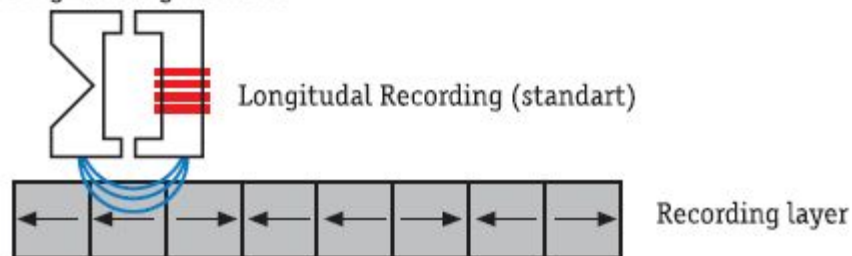


Главное отличие между данными технологиями заключается в направлении намагниченности доменов — в случае параллельной записи оно параллельно плоскости диска, а в случае перпендикулярной, соответственно, перпендикулярно.

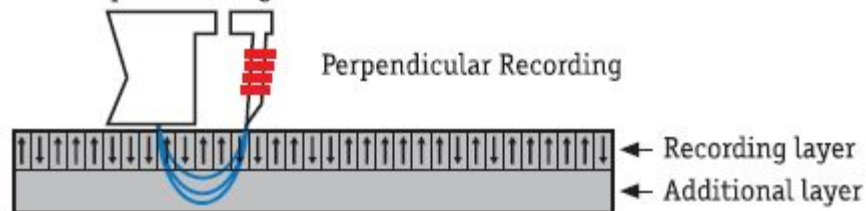


Однако если мы посмотрим на конкретный домен в отдельности, то никакой разницы не увидим, поскольку суперпарамагнитный предел не зависит от направления намагниченности.

"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.

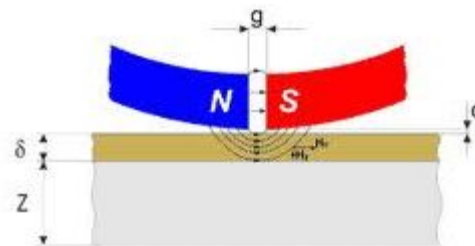
=> при использовании технологии последовательной записи возникают силы магнитного взаимодействия соседних доменов, влияющие на магнитные поля каждой из этих частиц.

□ 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.



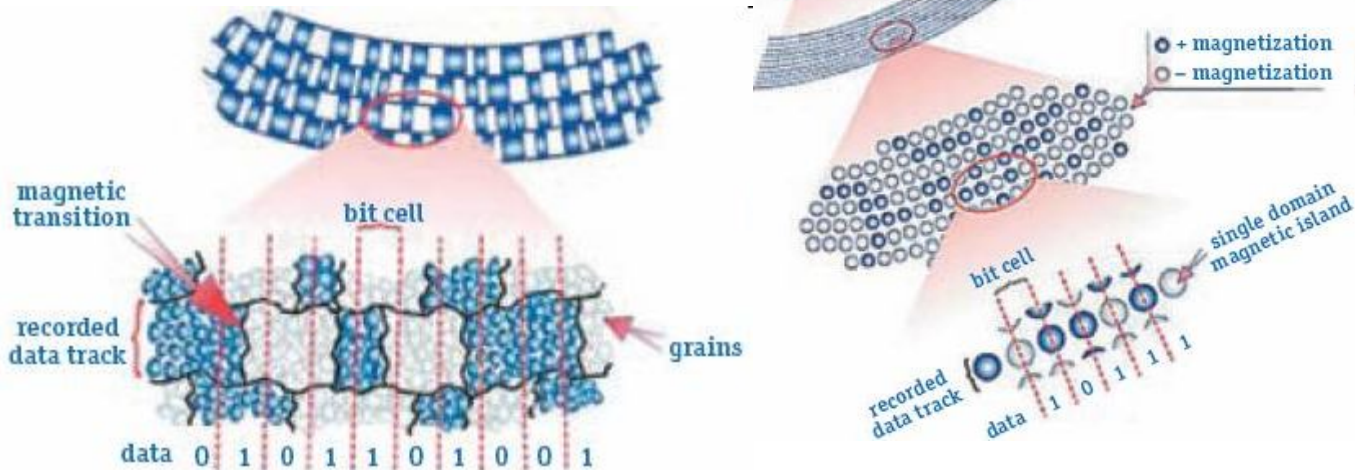
g - ширина зазора головки;
d - расстояние между поверхностью пластины и головкой записи/чтения;
Z - толщина алюминиевой подложки;
δ - толщина магнитного слоя.

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:

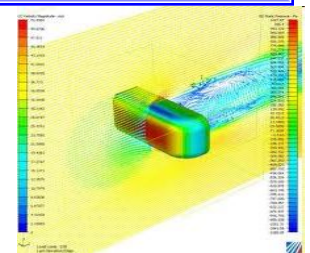
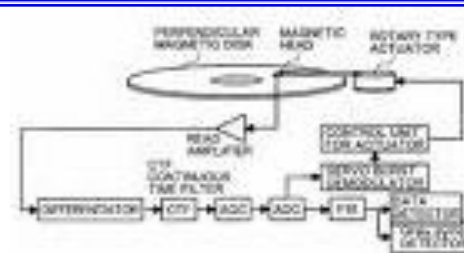
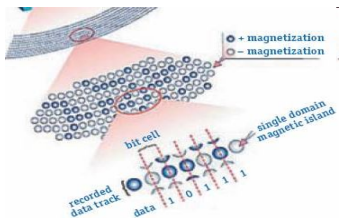
увеличить размеры отдельного «зерна» и хранить единицу информации в меньшем количестве «зерен».



Т.о., для того чтобы изготовить pattern media-диски, требуется технология, способная наносить на поверхность носителя отпечатки столь малой длины. **Значение 27 нм** находится на пределе возможности оптической литографии — метода, применяющегося сегодня для изготовления микросхем и продуктов на их основе (например, процессоров).

□ Поэтому производители жестких дисков планируют применять другие литографические методы или использовать самоорганизующиеся материалы (примером подобного материала может послужить FePt сплав).

● Материал носителя — **не единственная проблема** структурированной технологии, инженерам также придется разработать механизмы синхронизации магнитных импульсов головки и «островов», а также создать специальные навигационные метки для головки.



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

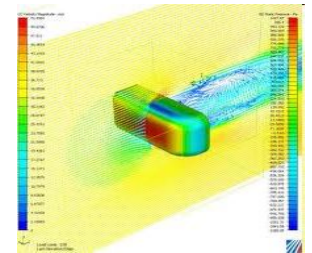
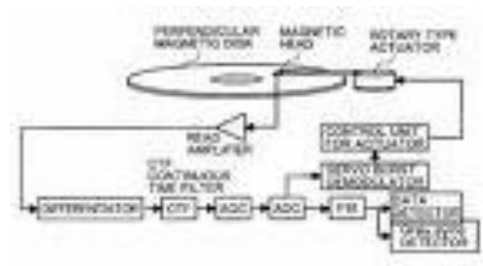
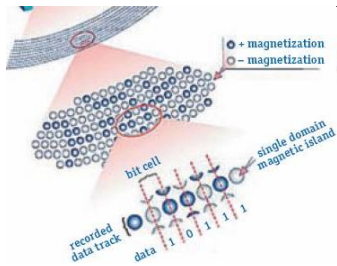
- Hitachi Global Storage Technologies (HGST)
- Seagate.

Причем первая из них возлагает на данный метод большие надежды.

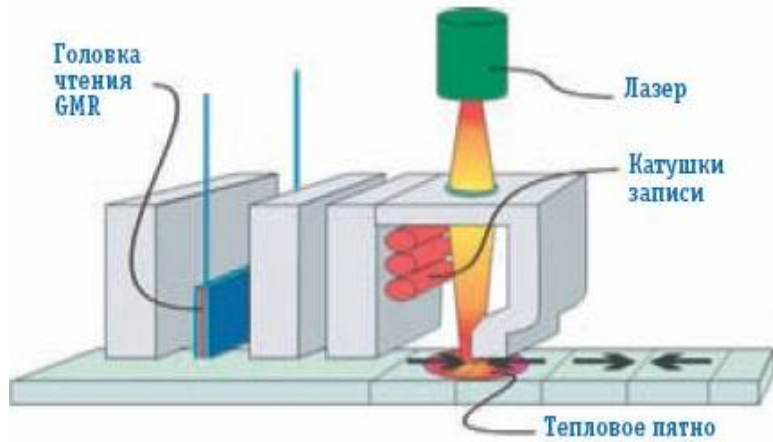


- Предел их теоретической плотности может достигнуть отметки несколько терабит на квадратный дюйм.

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



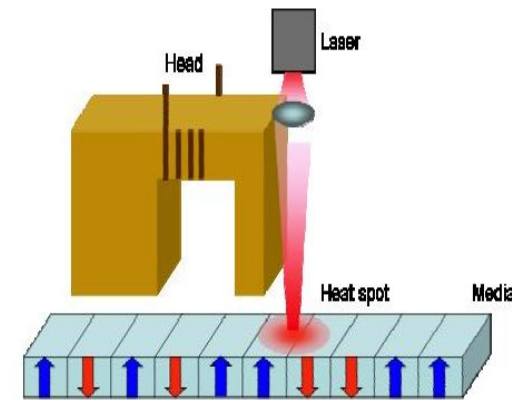
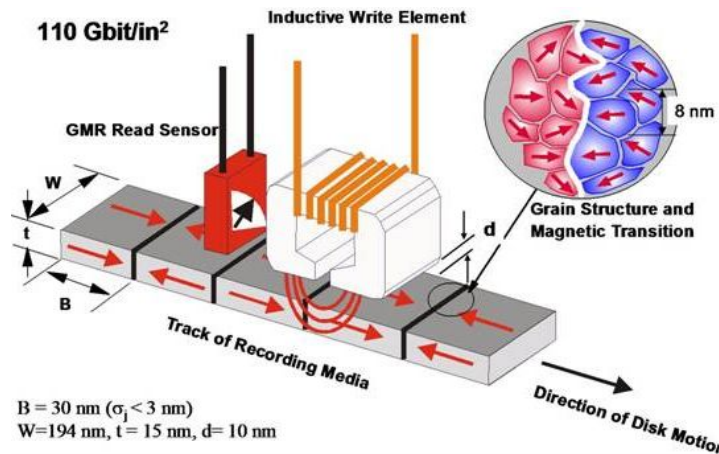
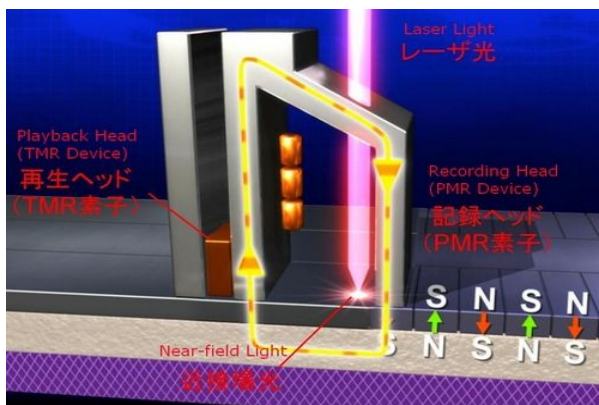
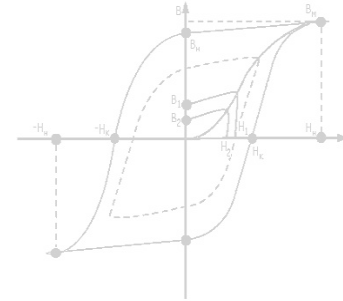
Термоассистируемая магнитная запись (Heat-Assisted Magnetic Recording, HAMR)







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

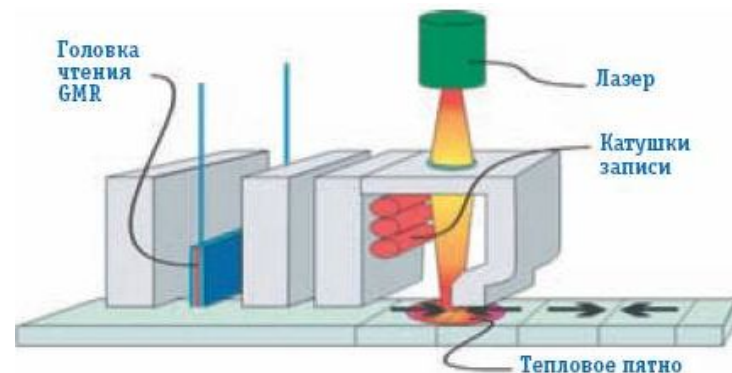
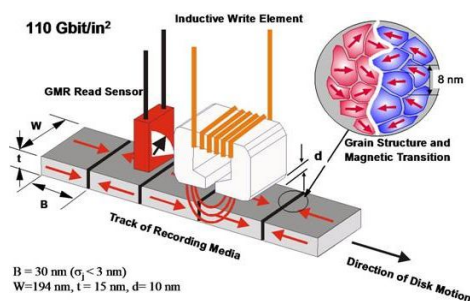
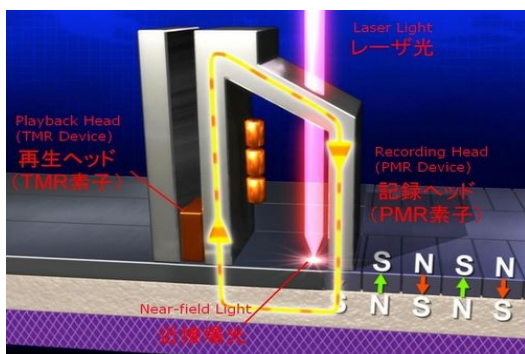
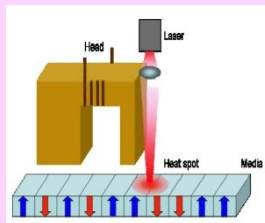
В технологии **HAMR** она и не создается — во время записи носитель нагревается, его коэрцитивность **падает** и требуемая сила становится гораздо меньше.

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

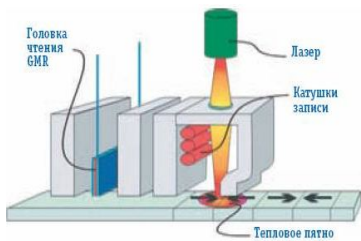


Проблемы:

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

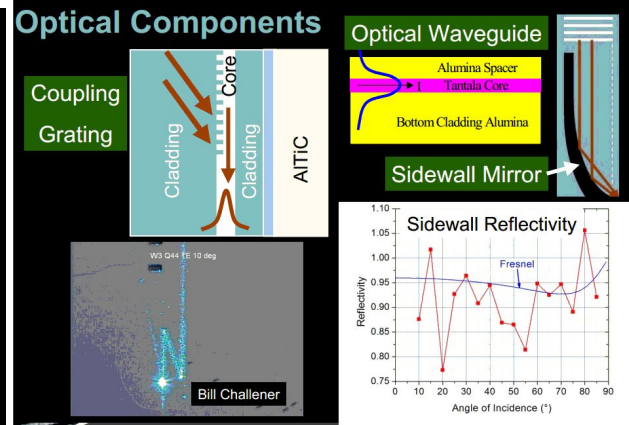
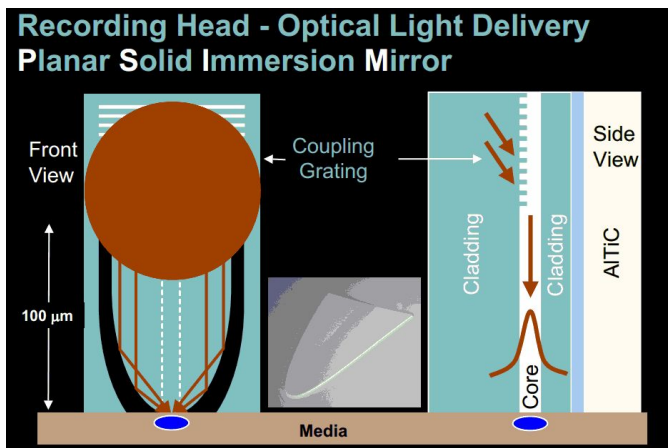


Термоассистируемая магнитная запись (Heat-Assisted Magnetic Recording, HAMR)

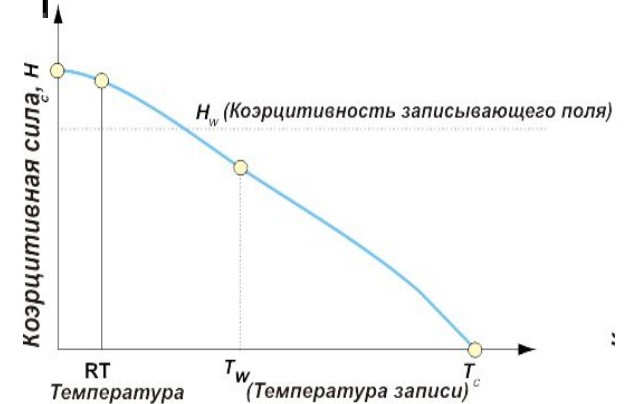


Внедрение этой технологии потребует использования в качестве записывающего слоя принципиально новых материалов с высоким уровнем анизотропности. Речь может идти о таких сплавах, как $Fe_{14}Nd_2B$, $CoPt$, $FePt$ или даже Co_5Sm .

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).

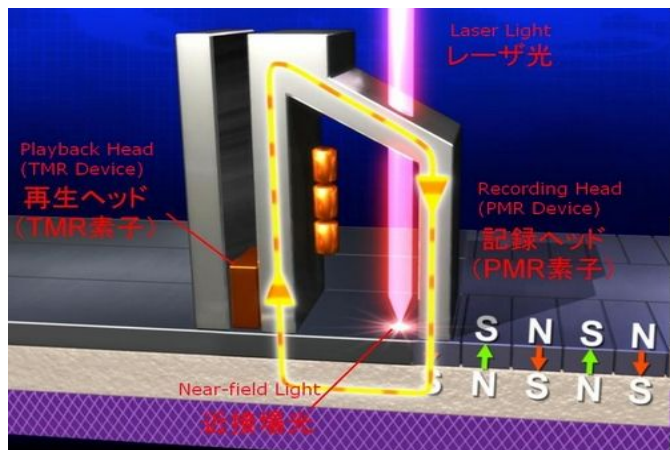


$$\text{Стабильность} = (K_u \times V) / (k_B \times T)$$



В технологии HAMR положен эффект снижения H_c магнита при его нагреве. Если же нагреть магнитный материал до T_c , то его $H_c = 0$. Зависимость коэрцитивности материала от его температуры, демонстрируется на *рисунке*.

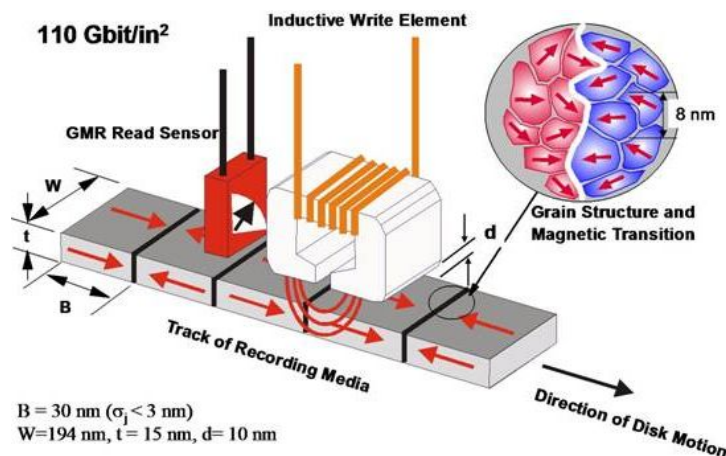
Термоассистируемая магнитная запись (Heat-Assisted Magnetic Recording, HAMR)



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.

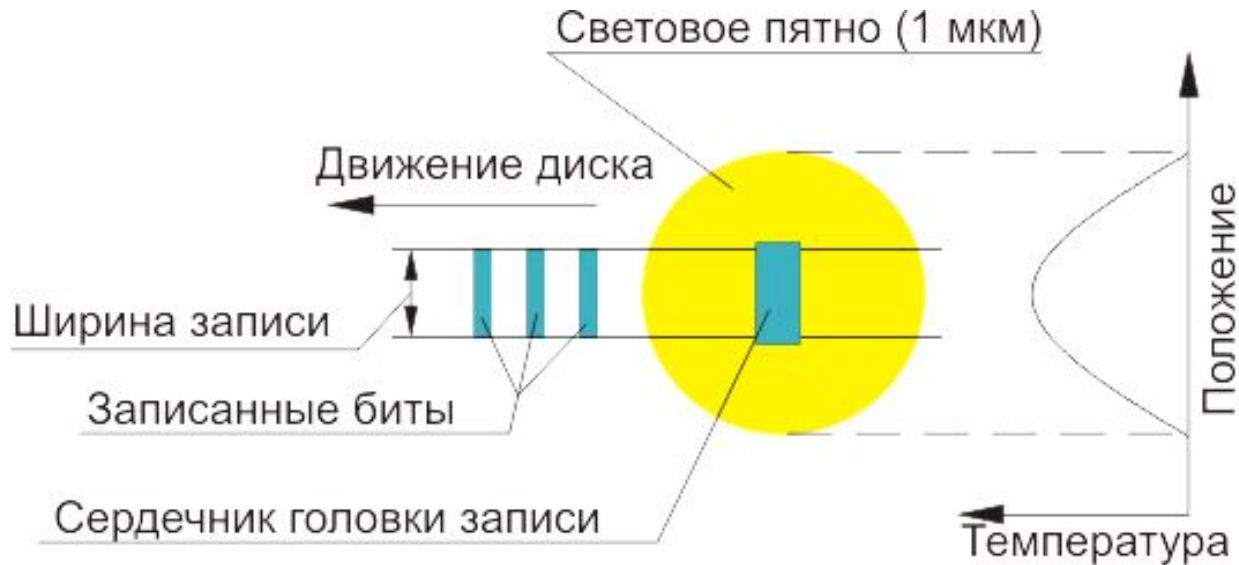
В технологии *HAMR* выделяют два метода записи:

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



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

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

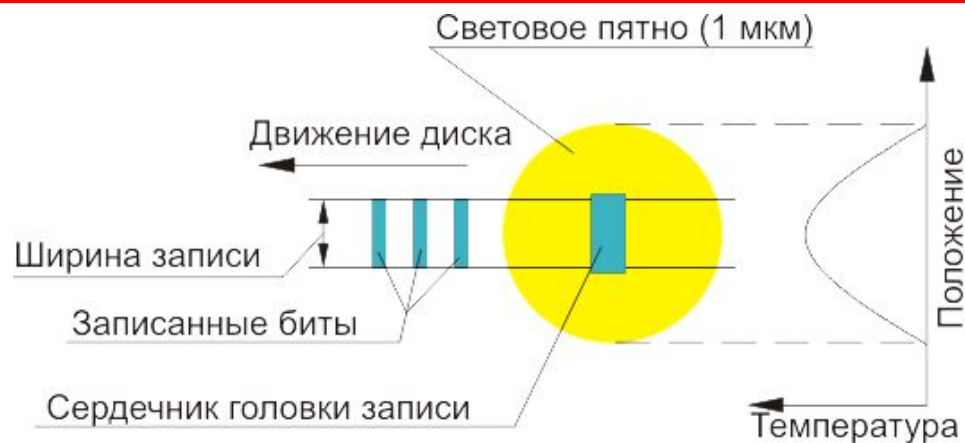


www.mirpu.ru

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 .

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



www.mirpu.ru

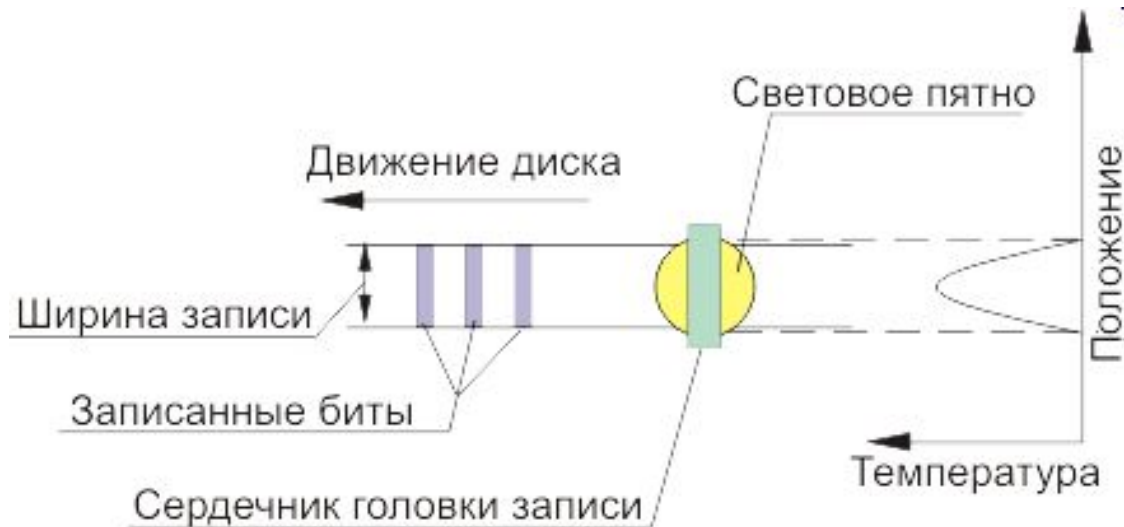
Температура T_w характеризуется тем, что при ее достижении H_c домена становится меньше величины магнитного поля записывающей головки, но при этом до точки Кюри домен не разогревается.

Т.е., разогревом домена обеспечивается просто снижение его H_c , а не полное его "размагничивание", как это происходит в точке Кюри.

Светового пятно 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.

Метод оптического доминирования отличается значительно меньшим размером светового пятна – менее 50 нм.

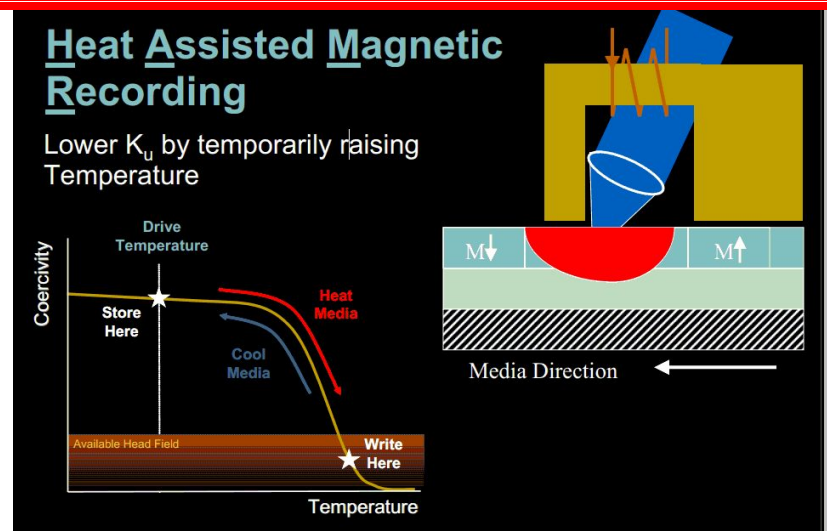
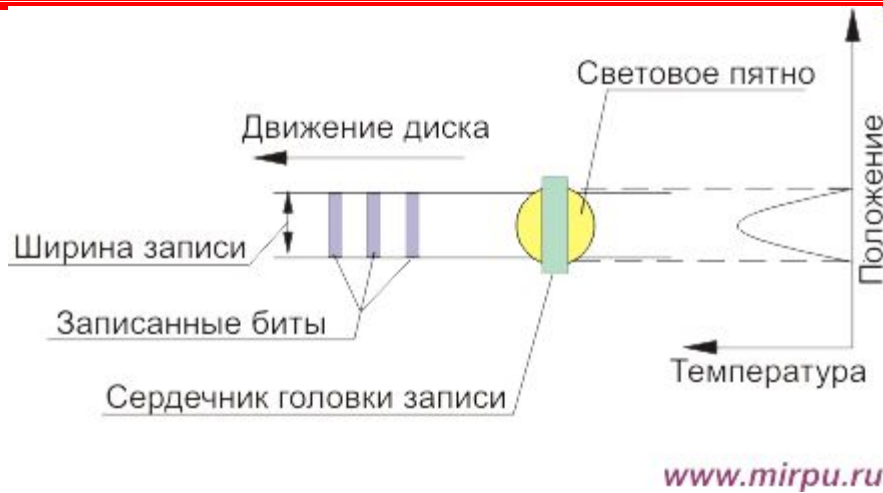


www.mirpu.ru

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.

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



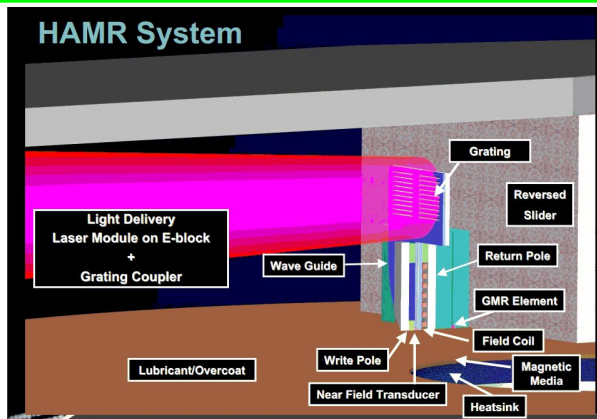
Однако при таком способе записи необходимо использовать материалы с большей H_c . В результате, магнитный домен необходимо разогреть до большей температуры, т. е. до T_c , при которой магнитный материал имеет $H_c=0$ и его очень легко перемагнитить, не смотря даже на малые габариты записывающей головки, а, значит, не смотря и на малое значение ее записывающего магнитного поля.

HDD Recording Subsystem Components

Major Elements of HAMR HDD

- Recording Head
 - Optical Delivery
 - Magnetic Field Source
 - Magneto-Resistive Reader
- Media
 - Lubricant
 - Overcoat
 - Recording Layer
 - Heatsink/Soft Underlayer
 - Disk Substrate
- Mechanical Integration
- Servo
- Preamp
- Data Channel

Seagate Barracuda ATA II

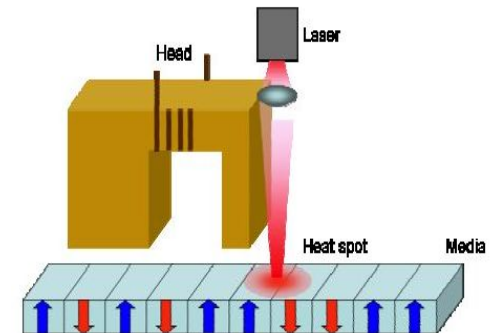
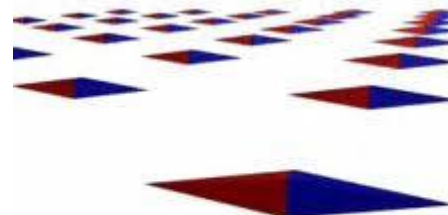
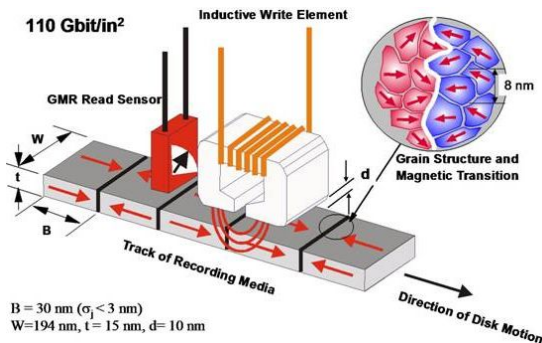
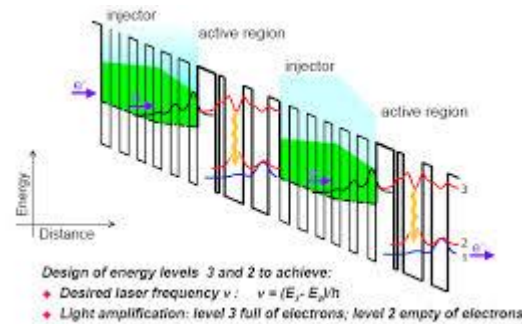


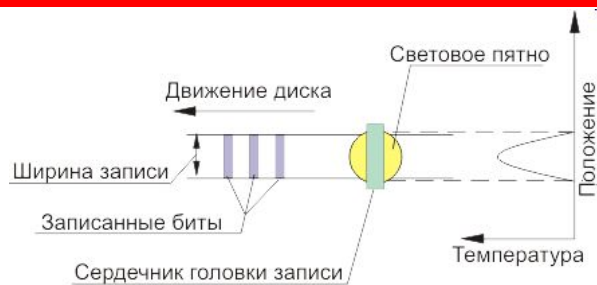
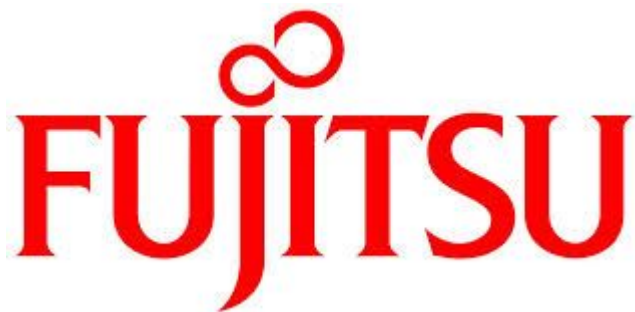
Термоассистируемая магнитная запись (Heat-Assisted Magnetic Recording, HAMR)

Сравнивая эти два метода можно сказать, что на сегодняшний день реально обсуждается использование лишь первого метода,

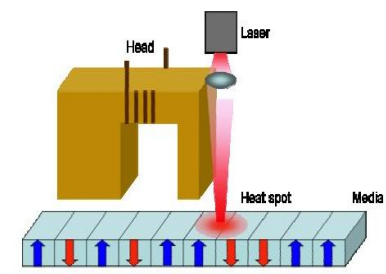
т.е. метода магнитного доминирования.

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.





www.mirpu.ru



Fujitsu официально заявлено о получении лазера, формирующего световое пятно размером 88 x 60 нм с оптической мощностью 17%.

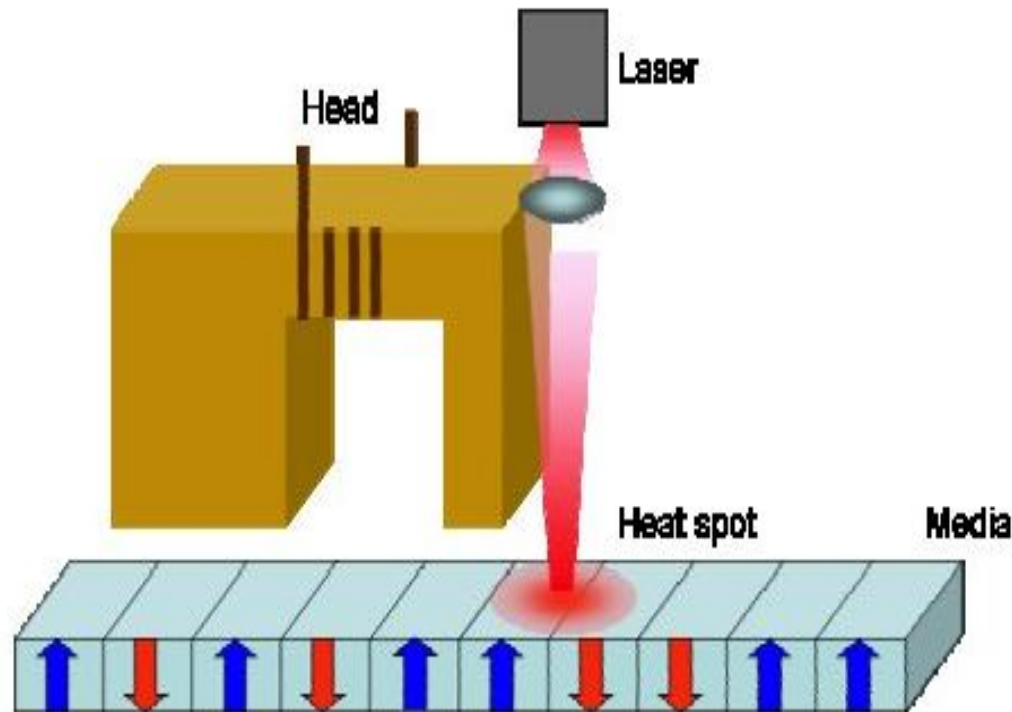
Имеются разработки, позволяющие получить и меньшие значения светового пятна, но мощность подобных лазеров пока еще незначительна (около 1.5%), чтобы говорить об их применении в качестве нагревателя поверхности.

Отдельные фирмы-производители разрабатывают системы, в которых лазер фокусируется с помощью прецизионной зеркальной системы до размеров, приемлемых для записи с оптическим доминированием.

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

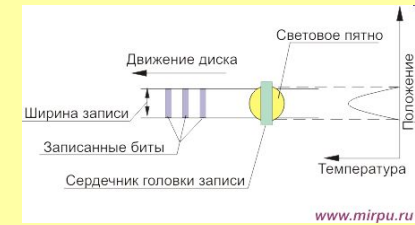
Для разогрева магнитного материала, как уже говорилось, предлагается использовать нагревательный элемент на основе лазера.

При этом световое излучение лазера должно быть в максимальной степени сфокусировано.



Требования, выдвигаемые к нагревательному элементу:

- диаметр формируемого светового пятна должен быть менее 50 нм;
- оптическая эффективность должна быть на уровне 2%, чтобы обеспечить разогрев материала до необходимой температуры;



Оптическая эффективность элемента обычно определяется путем сопоставления выходного и входного светового потока, проходящего через заданные оптические поверхности.

$$D_{\text{н}} = 10 \lg \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \tau_i(\lambda) \Phi_0(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \tau_i(\lambda) \Phi_0(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda}$$

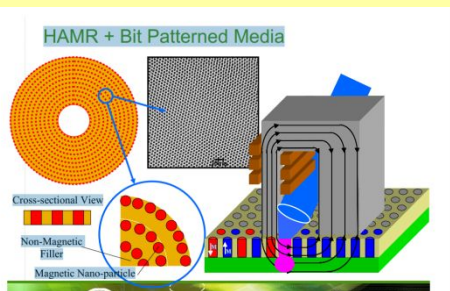
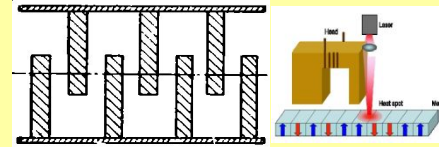
где $S(\lambda)$ - спектральная чувствительность фотоприемника; $\tau(\lambda)$ - спектральная характеристика измерительного светофильтра (r, g или b); $\Phi(\lambda)$ - спектр источника света; $\rho(\lambda)$ - спектральный коэффициент отражения измеряемого образца; - пределы интегрирования, граница зон спектра - записи.

- 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.

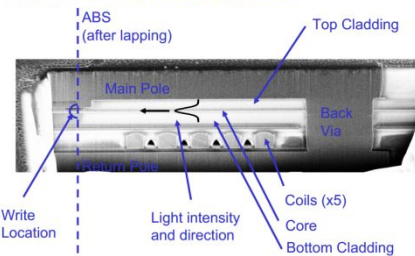
Термоассистируемая магнитная запись (Heat-Assisted Magnetic Recording, HAMR)

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

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

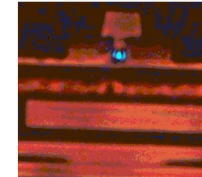
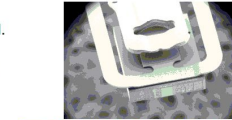
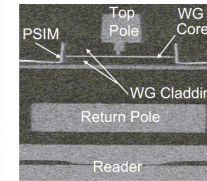


HAMR Head Cross-section



Wafer Level HAMR Head Fabrication

- Standard Thin-film processes used.
- 1000's of heads per 6" wafer.
- 1000's of heads built into sliders & HGAs.

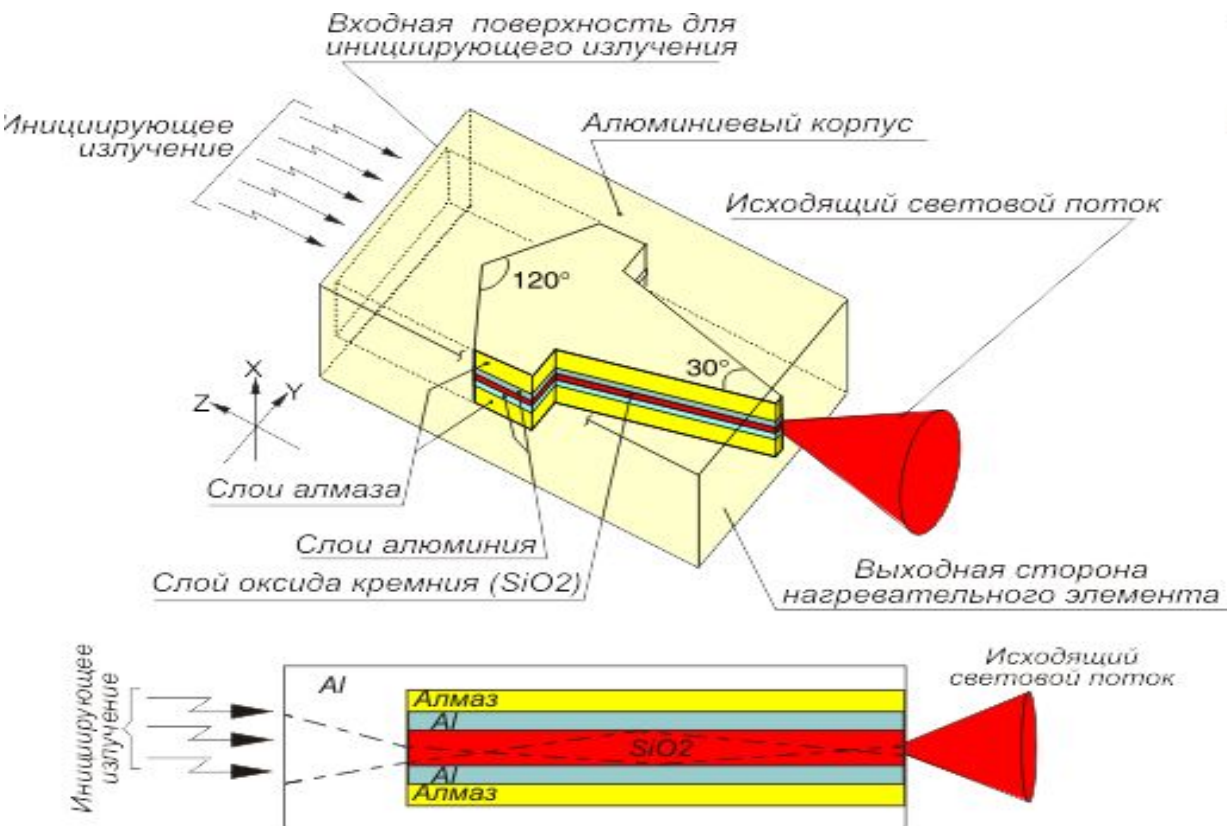


Однако при использовании всех этих элементов записывающие магнитные поля ограничивается величиной $H_w=100$ Oe, т.к. они комбинируются с катушкой без магнитного сердечника.

Т.е., 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.



Нагревательный элемент для HAMR-записи, разработанный Fujitsu

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.

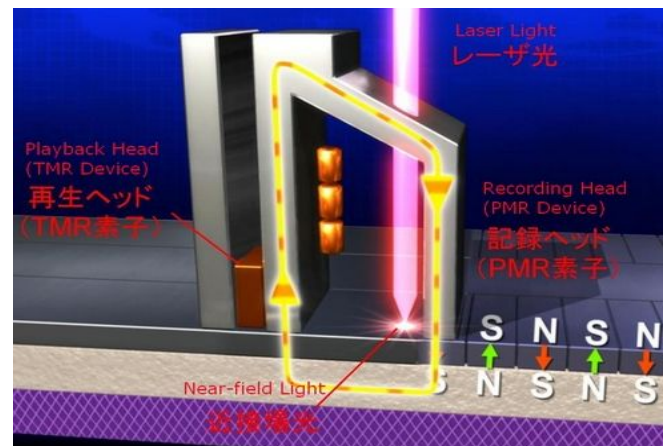
Термоассистируемая магнитная запись (Heat-Assisted Magnetic Recording, HAMR)

Элемент имеет стреловидную форму и состоит из 7 слоев.

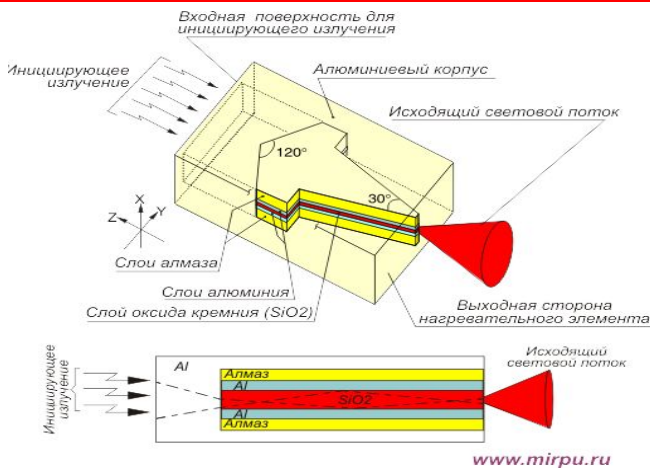
Данная структура, в какой-то мере, может называться зеркальной фокусирующей оптической системой, которая преобразует входной световой поток в световое пятно малого размера.

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)



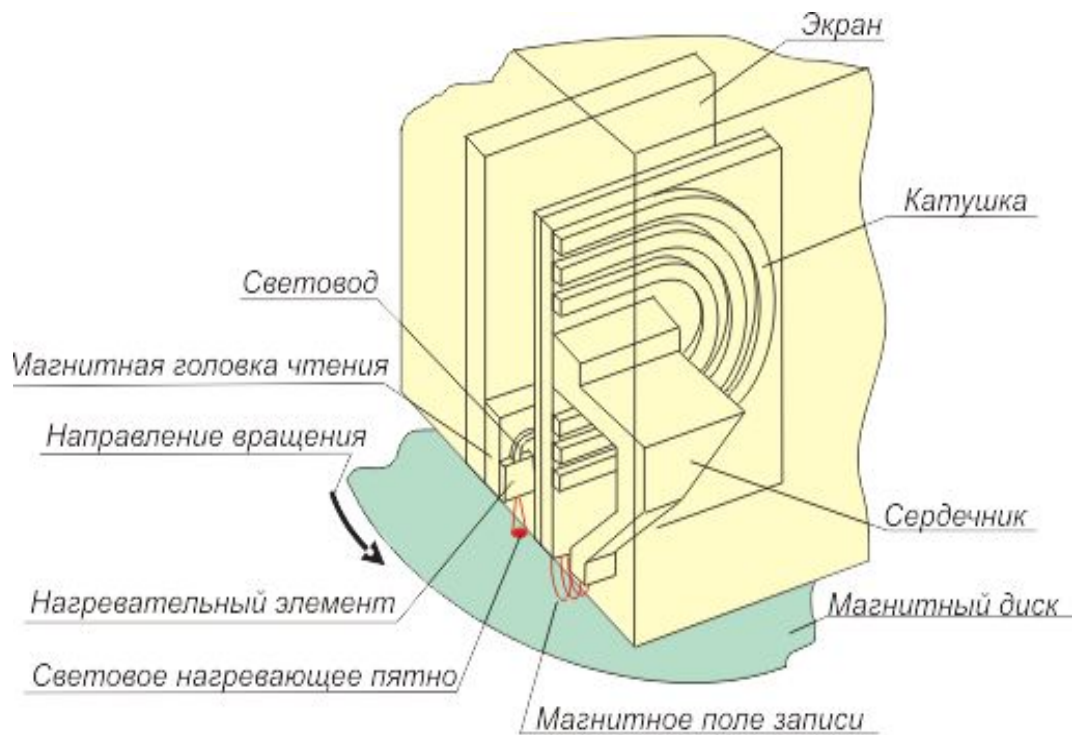
Но, кроме того, свет, поляризованный в плоскости X , начинает распространяться и в плоскости Y из-за интерференции лучей, отраженных от боковых стенок структуры.

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.

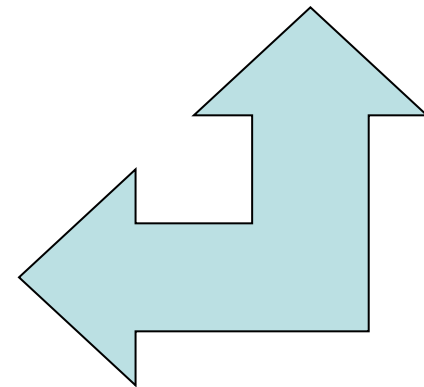
На данный момент времени недостатком рассмотренного нагревательного элемента является, все-таки, высокий коэффициент оптической передачи, который находится на уровне 1.6%, что явно недостаточно, в соответствии с указанными выше требованиями.

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

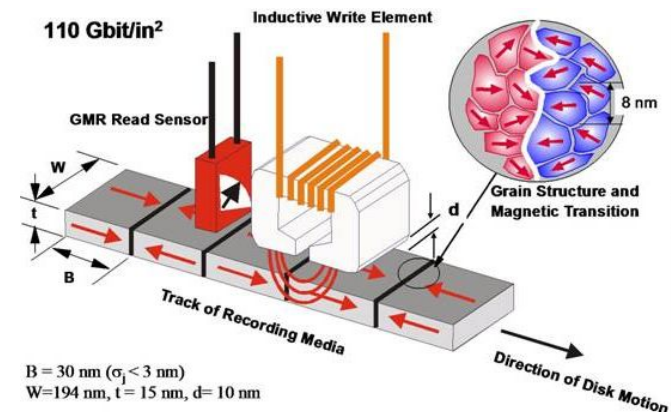
На сегодняшний день, для технологии HAMR предлагается использовать синтетические ферромагнитные материалы (SFM). Одним из примеров SFM может служить композитный носитель, состоящий из следующих слоев:

- 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.



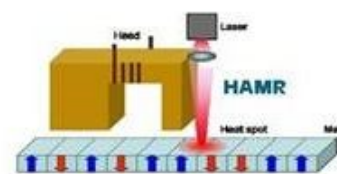
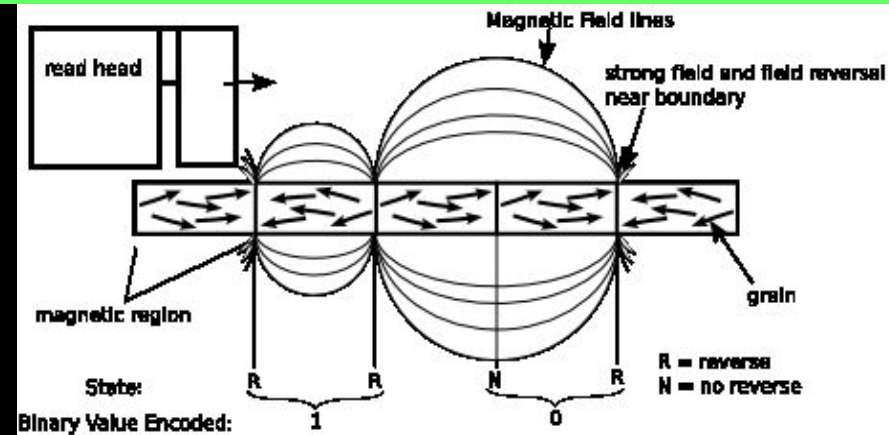
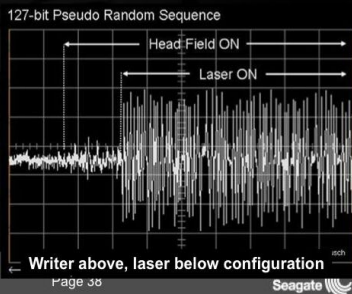
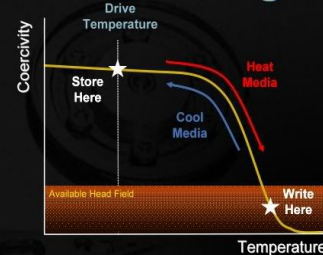
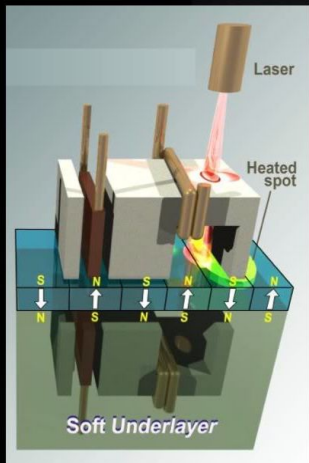
www.mirpu.ru





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.

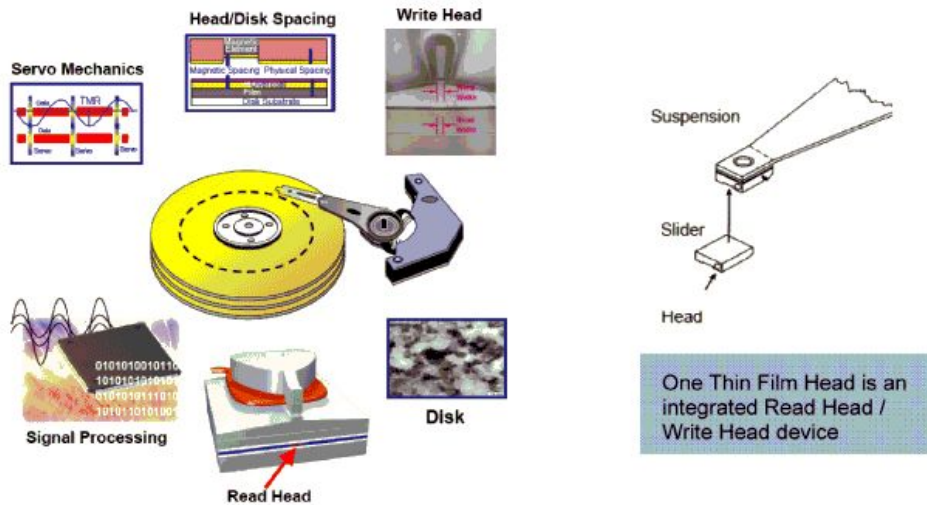
Heat Assisted Magnetic Recording



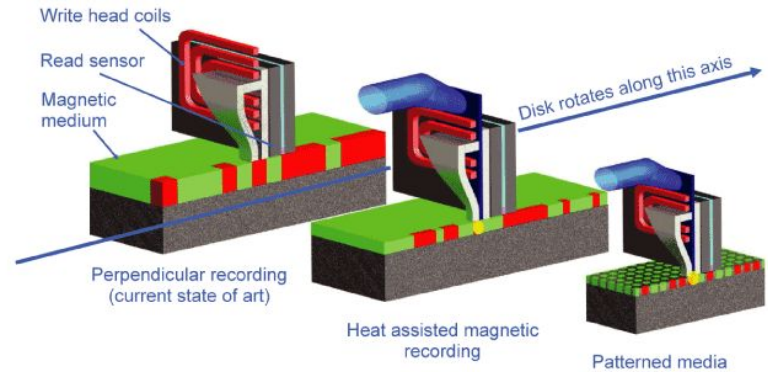
“Versus”



Storage requirements drive huge HDD demand, to >2,000,000,000 TFHs per year

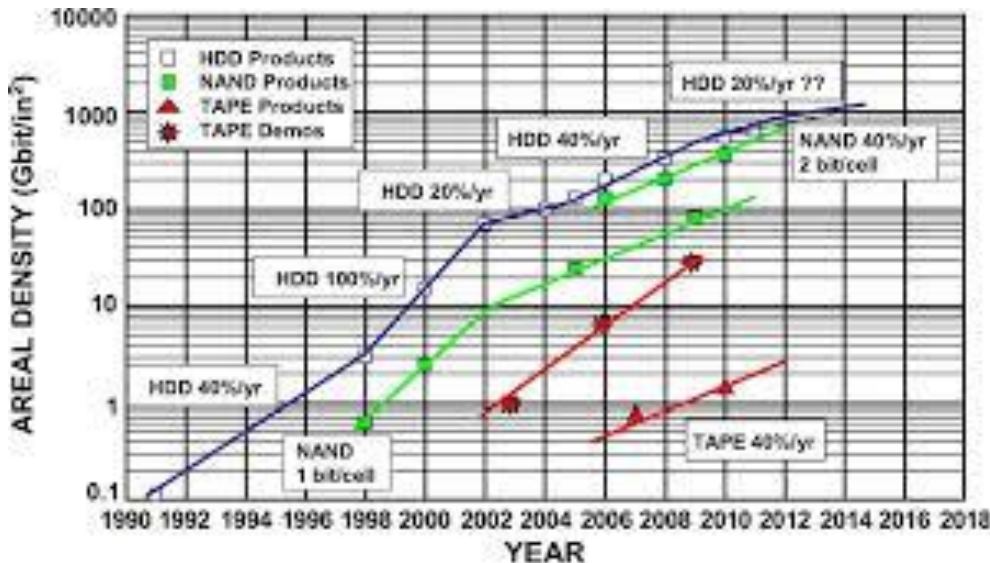


New technologies are introduced to support the areal density roadmap



Source: Seagate, IDEMA Dec 2007

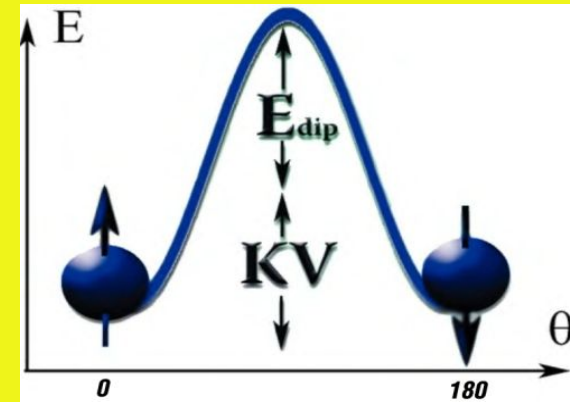
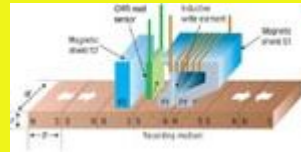
Slide 21 |



Физические пределы плотности для каждого метода магнитной записи

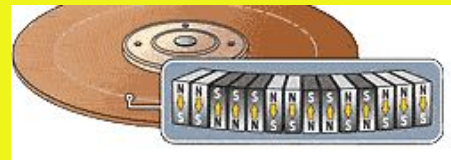
Продольная запись

имеет физический предел плотности
в 23 Гбит/дюйм²



Перпендикулярная запись

имеет физический предел плотности
в 500 Гбит/дюйм²



Структурированная запись

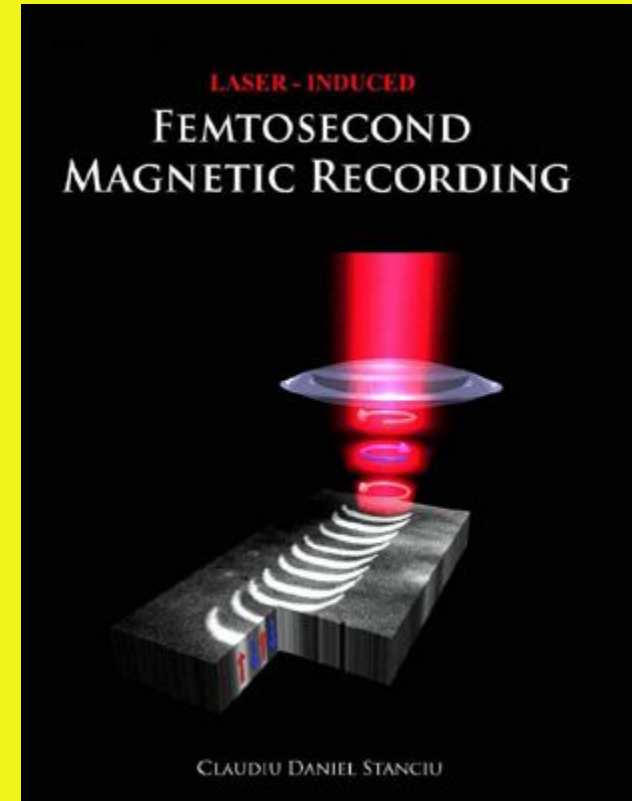
имеет физический предел плотности
в 4 Тбит/дюйм²

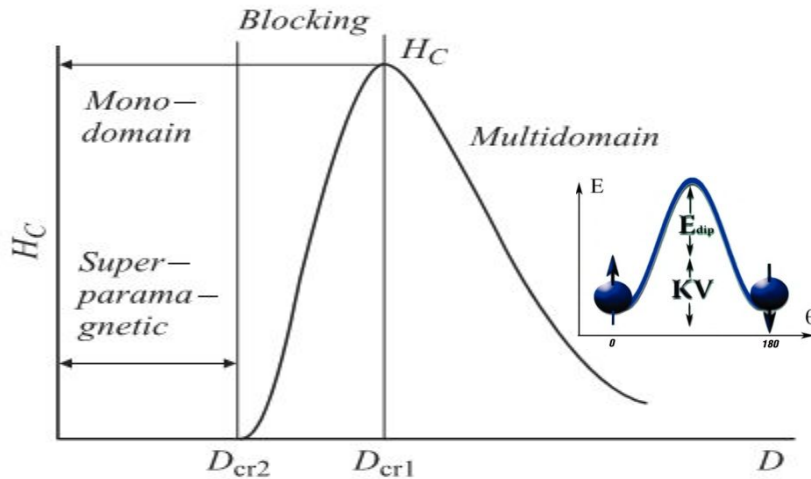


Термоассистируемая запись

имеет физический предел плотности
в 50 Тбит/дюйм²

$$K_u V / k_B T > 70$$



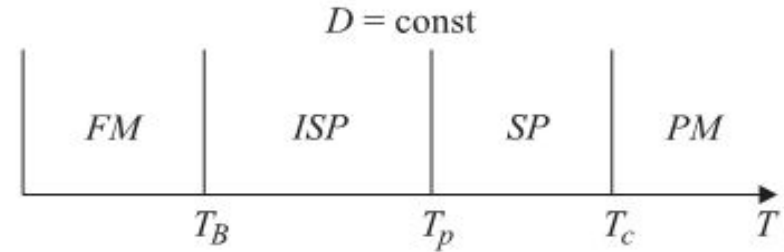


Переход в суперпарамагнитное состояние

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.

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

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



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**.

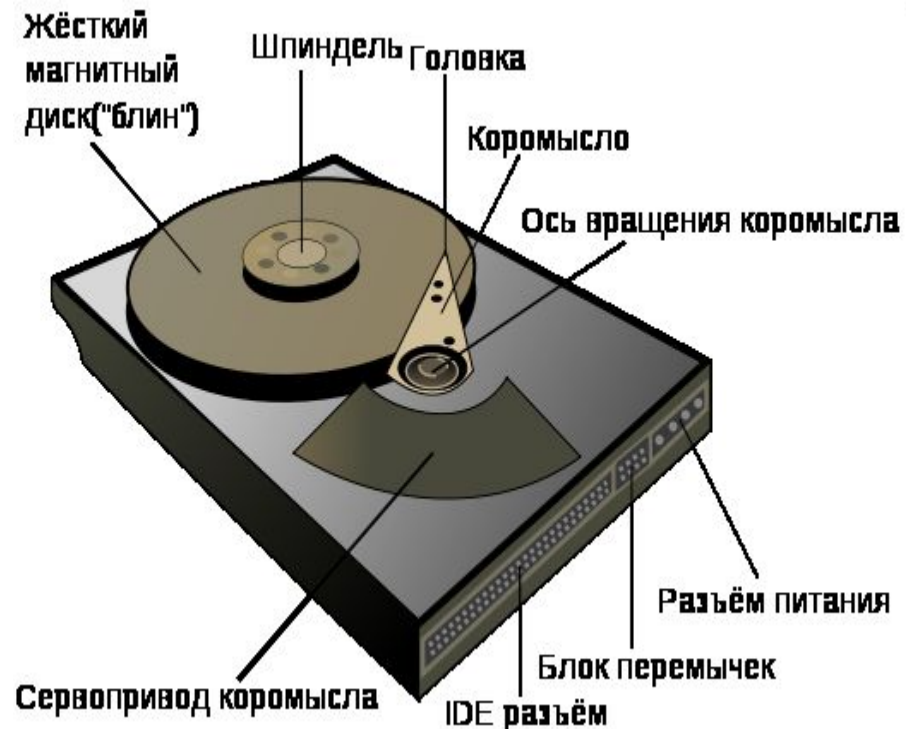
Жёсткий диск состоит из:

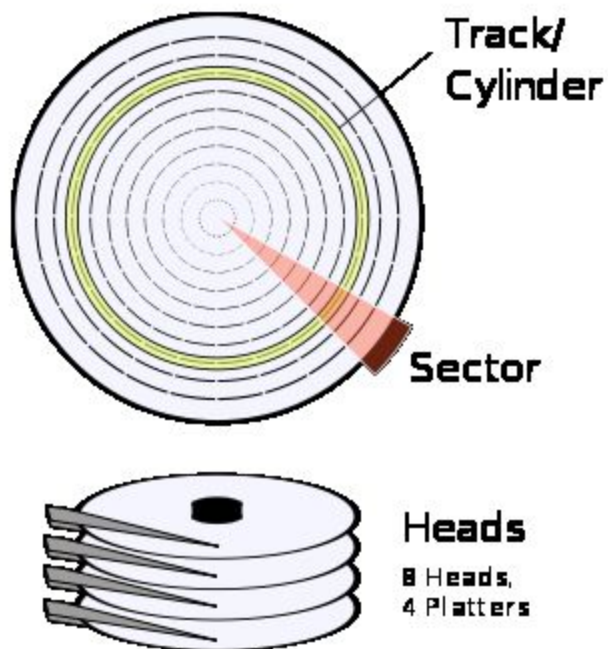
■ **гермозоны:**

- 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).

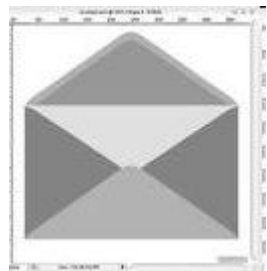
Адресация CHS предполагает, что все дорожки в заданной зоне диска имеют одинаковое число секторов. и секторы.

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

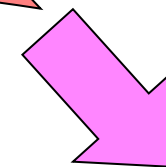
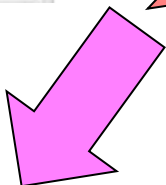
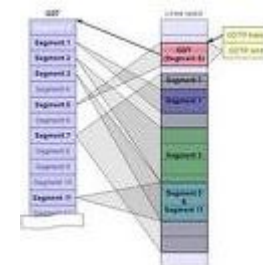
Цилиндр — совокупность дорожек, равноотстоящих от центра, на всех рабочих поверхностях пластин жёсткого диска.

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)

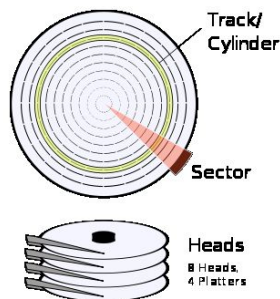
При этом способе сектор адресуется по его физическому положению на диске

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

3 координатами:

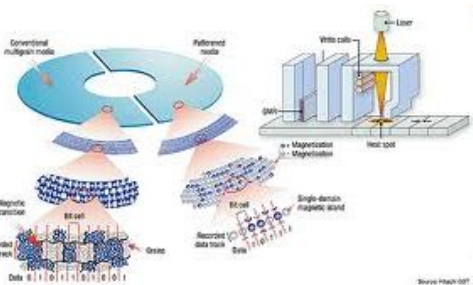
- номером цилиндра,
- номером головки
- номером сектора.

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





	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

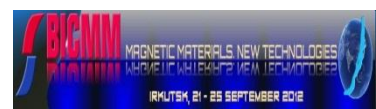
International Workshop Of Non-Crystalline Solids, Portugal, 2008




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

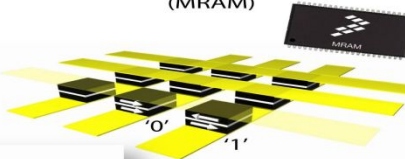


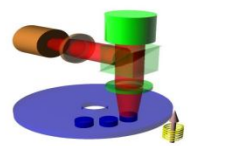
Joint European Magnetic Symposium, Poland, 2010



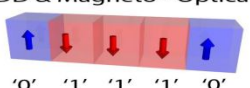



Hard Disk Drive (HDD)


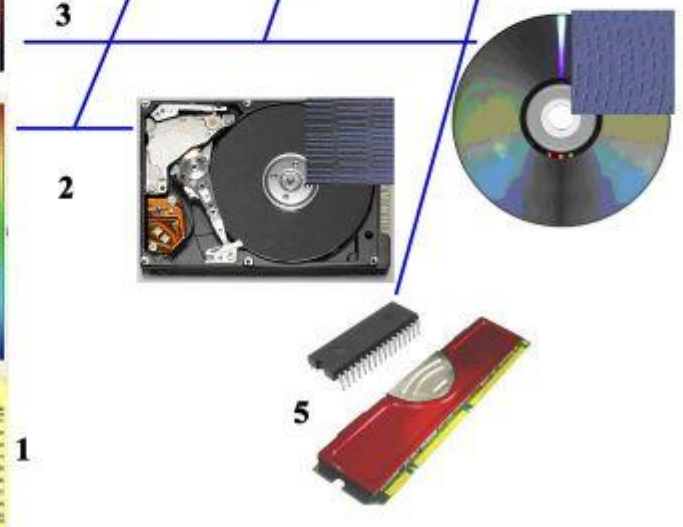
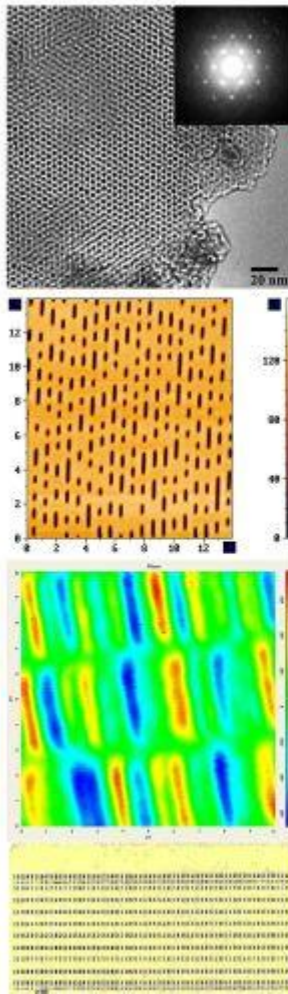
Magnetic Random Access Memory (MRAM)


Magneto - Optical Disk


The binary information in:

HDD & Magneto - Optical Disk


MRAM




- 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://hddfux.ru/Stati/ZHestkie_diski_Printsipy_raboty_i_vosstanovleniya/
- http://www.datalabs.ru/pages/hdd_structure
- <http://compulenta.computerra.ru/tehnika/devices/10002118/>
- <http://xplqa30.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5257351&url=http%3A%2F%2Fexplqa30.ieee.org%2Fexpl%2Ficp.jsp%3Farnumber%3D5257351>
- <http://www.utexas.edu/news/2012/11/13/computer-memory-could-increase-fivefold-from-ut-research/>
- <http://www.smarthdd.com/rus/help.htm>
- <http://www.idema.org/wp-content/downloads/1818.pdf>
- <http://www.idema.org/wp-content/downloads/1855.pdf>
- <http://mirpu.ru/hdd/72-standards/hdd/149-hamr-hdd-.html>



- 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*

