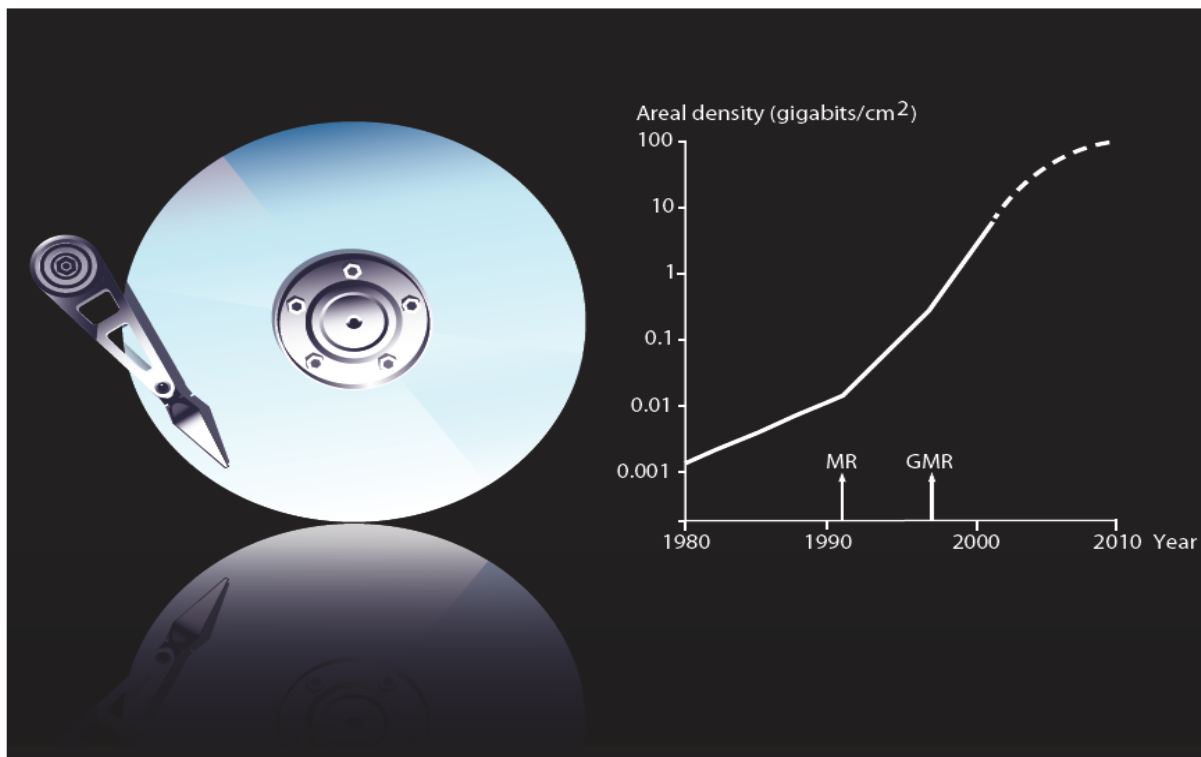


# Нобелевская премия по физике 2007 года

*В этом году Нобелевская премия по физике присуждена **Альберту Ферту (Albert Fert)** и **Петеру Грюнбергу (Peter Gruenberg)** за открытие гигантского магниторезистивного эффекта. Применение этого явления революционизировало способы считывания данных с жесткого диска. Это открытие играет также главенствующую роль в создании различных магнитных сенсоров и в разработке нового поколения электронных устройств. Использование гигантского магнитосопротивления можно рассматривать как одно из первых значительных применений нанотехнологии.*

## Улучшенные считывающие головки для карманных приборов

Постоянная минимизация электронных устройств стала чем-то самым собой разумеющимся в современном мире информационных технологий. Мы уже стали привыкать к ежегодному поступлению на рынок всё более мощных и легких компьютеров. В частности, «съжились» жесткие диски – громоздкий ящик под вашим столом станет скоро историей, коль скоро тот же самый объем данных можно так же легко сохранять в изящном лэптопе. И хотя у множества людей имеется в кармане музыкальный плеер, мало кто задумывается над тем, сколько музыки в пересчете на cd-диски можно уместить в его крошечном жестком диске. В последнее время максимальная емкость памяти жестких дисков для бытового пользования взлетела до терабайта (одной тысячи миллиардов байтов).



Диаграммы, показывающие ускоряющийся рост миниатюризации, могут создать ложное впечатление простоты – как если бы её развитие следовало закону природы. На самом деле, поступательный ход ИТ-революции зависит от сложной взаимосвязи между прогрессом фундаментальной науки и тонкими техническими усовершенствованиями. Именно об этом говорит Нобелевская премия 2007 г.

Переносные компьютеры, музыкальные проигрыватели и мощные поисковые машины – все нуждаются в жестких дисках, где информация «упакована» очень плотно. Информация хранится на жестком диске в виде различно намагниченных участков. Определенное направление намагничивания соответствует бинарному нулю, а другое направление соответствует бинарному значению единицы. Для извлечения информации считывающая головка сканирует жесткий диск и регистрирует различные магнитные поля. Когда жесткие диски становятся меньше, каждый намагниченный участок также должен уменьшиться. Это значит, что магнитное поле каждого байта становится слабее и труднее для считывания. Таким образом, более плотно упакованный диск требует более чувствительного считывающего устройства.

К концу 1990х стала стандартной совершенно новая технология считывающих головок жестких дисков. Это имеет решающее значение для нарастающей тенденции миниатюризации жестких дисков, которую мы наблюдаем последние несколько лет. Современная технология считывания основана на физическом эффекте, который два нобелевских лауреата этого года впервые наблюдали почти двадцать лет тому назад. Француз Альберт Ферт и немец Петер Грюнберг одновременно и независимо друг от друга открыли то, что называется гигантским магнитосопротивлением, ГМС (GMR). Именно за это открытие эти двое разделили Нобелевскую премию по физике 2007.

## **От лорда Кельвина до нанотехнологии**

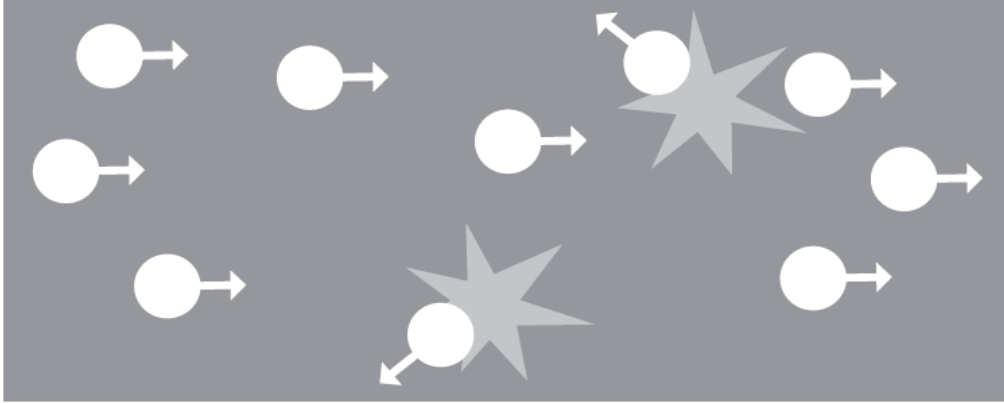
Первоначально в считывающих головках применялись индукционные катушки, используя тот факт, что изменяющееся магнитное поле индуцирует ток через катушку. Хотя эта технология была не в состоянии идти в ногу с требованиями, предъявляемыми все большей миниатюризацией жестких дисков, индукционные катушки всё еще находят применение для записывания информации на диск. Для функции считывания, однако, эффект магнитосопротивления оказался более подходящим.

Давно уже было известно, что с помощью магнитного поля можно воздействовать на электрическое сопротивление материалов, таких, например, как железо. В 1857 г. английский физик лорд Кельвин уже опубликовал статью, в которой показывалось, что при приложении магнитного поля к магнитному проводнику сопротивление уменьшается вдоль линий намагничивания. Если магнитное поле налагается поперек проводника, то сопротивление, наоборот, возрастает. Это (анизотропное) магнитосопротивление (МС) было прямым предшественником гигантского магнитосопротивления как стандартной технологии для считывающих головок. ГМС выступило на сцену в тот момент, когда стала необходимой еще более чувствительная техника.

Предпосылками для открытия ГМС-эффекта послужили новые возможности получения тонких слоев металла в нанометрическом диапазоне, - технология, которая начала развиваться в 70х гг. Нанометр – это одна миллиардная метра, и нанотехнология имеет дело с пленками, состоящими всего лишь из нескольких монослоев. Глубоко на атомном уровне материя начинает вести себя иначе, и поэтому нано-размерные структуры зачастую обнаруживают совершенно новые свойства материалов. Это относится не только к магнетизму и электропроводности, но и к таким свойствам, как прочность или химические и оптические характеристики материала. В этом смысле ГМС-технология может рассматриваться как одно из первых крупных внедрений нанотехнологии, которая так популярна сейчас в самых различных сферах применения.

## Сопротивление и намагничивание

В металлическом проводнике электричество переносится в виде электронов, которые могут свободно перемещаться в материале. Ток возникает из-за того, что электроны движутся в определенном направлении, и чем прямолинейнее путь электронов, тем выше проводимость материала. Электрическое сопротивление является результатом отклонения (дивергенции) электронов от прямолинейного пути, когда они рассеиваются на неупорядоченностях и примесях в материале. Чем больше электроны рассеиваются, тем выше сопротивление.



Электрическое сопротивление возникает в проводнике, когда электроны рассеиваются на неупорядоченностях в материале так, что их поступательное движение затрудняется.

В магнитном материале на рассеивание электронов влияет направление намагниченности. Очень сильная связь между намагниченностью и сопротивлением, которую мы наблюдаем при гигантском сопротивлении, возникает благодаря собственному вращению электрона; оно создает магнитный момент – квантовомеханическое свойство, называемое спином, - который направлен в любое из двух противоположных направлений. В магнитном материале большинство спинов направлено в одну сторону (параллельно). Однако небольшое число спинов всегда направлено в противоположную сторону, анти-параллельно общей намагниченности. Этот дисбаланс ведет не только к намагниченности как таковой, но также и к тому, что электроны с разным спином рассеиваются в меньшей или большей степени на неупорядоченностях и примесях и, особенно, в поверхностях раздела (интерфейсах) между материалами. От свойств материала зависит, какой тип электронов рассеивается больше всего.



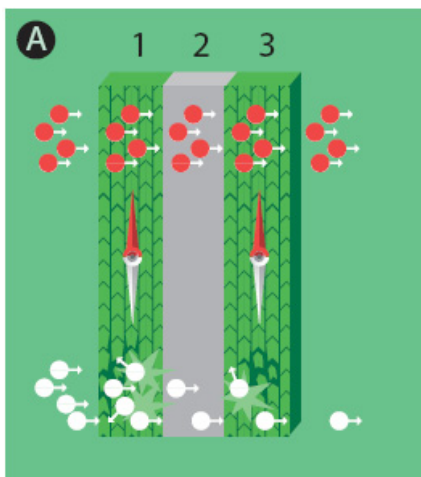
В магнитном проводнике направление спина у большинства электронов параллельно магнетизации (красные кружки). Меньшинство электронов имеют спин противоположного направления (белые кружки). В этом примере электроны с антипараллельным спином рассеяны больше.

## Гигантское магнитосопротивление – ГМС

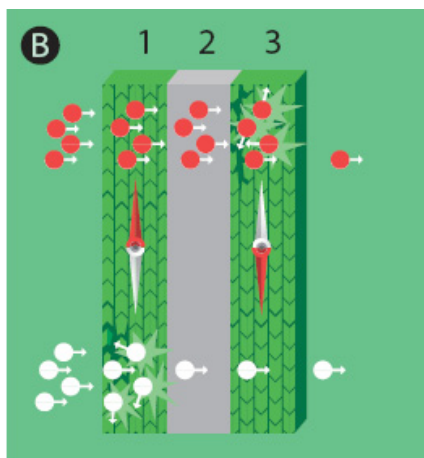
Ниже описывается пример простейшего вида системы, где может возникнуть гигантское магнитосопротивление. Она представляет собой «сэндвич» из слоя немагнитного металла между двумя слоями магнитного металла (см. рисунок). Внутри магнитного материала и, особенно, на интерфейсе между магнитным и немагнитным материалами электроны с разными спинами рассеиваются по-разному (1). Здесь мы рассмотрим случай, где электроны рассеиваются больше, если их спин анти-параллелен общему направлению намагниченности. Это означает, что сопротивление будет больше для этих электронов, чем для тех, у которых спин параллелен направлению намагниченности. Затем, когда электроны входят в немагнитный материал, они все рассеиваются в одинаковой степени, независимо от направленности их спина (2). На втором интерфейсе и внутри последнего слоя магнитного материала электроны с анти-параллельным спином снова рассеиваются в большей степени, чем электроны с параллельным спином (3).

В случае, когда оба магнитных слоя намагничены в одном и том же направлении, большинство электронов будут иметь параллельный спин и легко двигаться сквозь структуру. Поэтому суммарное сопротивление будет низким (случай А на рисунке). Но если намагниченности этих слоев противоположны друг другу, все электроны будут в состоянии анти-параллельного спина в одном из двух слоев. Это означает, что ни один электрон не может легко пройти через систему, и, следовательно, суммарное сопротивление будет высоким (случай В). Теперь вообразите использование этой структуры в считывающей головке, сканирующей жесткий диск: намагни-

ченность слоя (1) зафиксирована по направлению, между тем, как намагниченность слоя (2) подвижна и может меняться под влиянием различных магнитных полей на жестком диске. Таким образом, намагниченности обоих магнитных слоев будут попеременно параллельны и анти-параллельны друг к другу. Это приведет к варьированию сопротивления и тока через считывающую головку. Если ток является сигналом на выходе из считывающей головки, то сильный ток может означать бинарную единицу, а слабый ток – ноль.



Если направление магнетизации одно и то же в обоих магнитных слоях, электроны с параллельным спином (красные) могут пройти через всю систему без сколько-нибудь значимого разброса. Общее сопротивление системы будет поэтому мало.



Если направление магнетизации в двух магнитных слоях будет противоположным, все электроны будут иметь антипараллельный спин в одном из слоев и поэтому их разброс будет велик. В результате, полное сопротивление будет высоким

## ГМС быстро становится стандартом

Уже в середине 1980х гг. ученые, занимающиеся магнетизмом, осознали, какие перспективы открывает использование наноразмерных пленок. Альберт Ферт с коллегами создал около тридцати чередующихся слоев железа и хрома, каждый из которых состоял всего из нескольких моноатомных слоев. Чтобы этого добиться, им пришлось вести работу почти при вакууме, используя чрезвычайно разреженные газы железа и хрома, соответственно. В такой установке атомы будут постепенно присоединяться к поверхности, позволяя наращивать слой, монослой за монослой. Таким же образом, группа Петера Грюнберга создала несколько более простую систему, состоящую из двух или трех слоев железа с помещенным между ними слоем хрома.

Частично из-за того, что Ферт использовал большее число слоев, он зарегистрировал большее магнитосопротивление, чем Грюнберг. Французская группа наблюдала зависимое от намагниченности изменение сопротивления до 50%, в то время как немецкая группа отмечала разницу, самое большое, в 10%. Основной эффект и стоящая за ним физика были, однако, идентичны в обоих случаях. Обе группы понимали, что они наблюдают совершенно новое явление. При традиционном магнитосопротивлении никто не зарегистрировал изменения сопротивления более одного процента, или около того. Именно Альберт Ферт придумал актуальную концепцию гигантского магнитосопротивления для описания нового эффекта, и в своей первой публикации на эту тему он указал, что это открытие может иметь важное практическое значение. Петер Грюнберг также осознавал практический потенциал явления и оформил патент одновременно с написанием первой научной статьи.

Однако для коммерциализации новой технологии необходимо было найти производственный процесс изготовления таких пленок. Метод, использованный и Фертом, и Грюнбергом (известный как метод эпитаксии) был трудоёмким и дорогим, более пригодным для научно-исследовательской лаборатории, чем для широкомасштабного технологического процесса. Поэтому так важна была следующая ступень исследования, когда Стюарт Паркин (Stuart Parkin), англичанин, работающий в Соединенных Штатах, продемонстрировал возможность добиться того же эффекта, используя гораздо более простую технологию – набрызгивание. В самом деле, ГМС эффект, как оказалось, не зависит от того, насколько совершенны слои. Это значило, что ГМС-системы можно было производить на индустриальном уровне. Индустриальный способ производства в сочетании с высокой чувствительностью ГМС-головок привели к тому, что очень скоро, сразу после появления в 1997 г. первой коммерческой ГМС-головки, новая технология стала стандартной для жестких дисков.

## **Новая электроника – спинтроника**

ГМС означало не только прорыв в проблеме прочтения плотно упакованной информации на жестких дисках (и для магнитных сенсорах в других областях применения). Не менее интересно и то, что эта технология может рассматриваться как первая ступень в развитии совершенно нового вида электроники, названного спинтроникой. Для спинтроники характерно использование спина электрона, а не только его электрического заряда, как в традиционной электронике. Важнейшей предпосылкой для электроники являются малые размеры, созданные нанотехнологией. Направление электронного спина может сохраняться неизменным только на очень коротких дистанциях; в более толстых слоях направление спина изменится, прежде чем можно будет успеть использовать различные свойства электронов с разными спинами (такие, как более высокое или более низкое сопротивление).

По стопам ГМС, подобная же система была сконструирована с применением электроизолирующего материала вместо немагнитного металла для изготовления «сэндвича» между двумя слоями магнитного металла. Никакой электрический ток не способен пройти через изолирующий слой, но, если этот слой достаточно тонок, электроны могут проскользнуть, используя квантовомеханический эффект, называемый «туннельным». Поэтому эта новая система называется ТМС, туннельное магнитосопротивление. С помощью ТМР можно создать еще больший перепад сопротивления при очень слабых магнитных полях, и новейшее поколение считывающих головок основано на этой технологии.

## **Цель – универсальная память**

Еще одно применение спинтроники, которое уже начало вырисовываться, это – магнитная оперативная память, или MRAM. В дополнение к жесткому диску, предназначенному для накопления и долговременного хранения информации, компьютеры нуждаются в более быстродействующей оперативной памяти. Это устройство обычно называется RAM – запоминающее устройство с произвольной выборкой. В RAM'е компьютер накапливает всю информацию, в которой он нуждается, чтобы иметь возможность обрабатывать информацию во время его работы. Используемые в настоящее время стандартные оперативные запоминающие устройства имеют тот недостаток, что они не способны хранить любую информацию перманентно. Только пока данный текст пишется, он сохраняется в RAM'е компьютера. Если происходит потеря мощности, или кто-то отключает компьютер без команды «сохранить», текст теряется. Только при нажатии кнопки «сохранить» текст будет надежно сохранен на жестком диске.

Преимущество MRAM состоит в возможности использовать TMR и для чтения, и для записи информации и, тем самым, создать магнитную компьютерную память, которая будет быстродействующей и легко доступной. Поэтому MRAM могла бы быть использована в качестве оперативной памяти в отличие от более медленного жесткого диска, но также и в качестве долговременной памяти, которая не будет зависеть от электроэнергии. Это означает, что на основе MRAM можно разработать универсальное запоминающее устройство, которое смогло бы заменить как традиционную RAM, так и жесткий диск. Компактность такой системы может оказаться особенно полезной в маленьких встроенных компьютерных системах – во всём, от кухонных плит до автомобилей.

Открытие ГМС-эффекта распахнуло дверь в совершенно новый технологический мир спинтроники, где равно используется и заряд электрона, и его спин. Нарождающаяся нанотехнология создала в свое время предпосылки для открытия ГМС; теперь, в свою очередь, спинтроника становится движущей силой для быстрого развития нанотехнологии. Эта область исследований является чрезвычайно ярким примером того, как фундаментальная наука и новая технология переплетаются и усиливают друг друга.