



HDD будущего: перпендикулярная запись и не ТОЛЬКО

02.11.2005

Александр Радаев, info@ferra.ru

Соавтор(ы): Евгений Пугач

Долгое время компании-производители накопителей на жестких дисках ежегодно удваивали емкость своих продуктов, но вот уже два года мы не наблюдаем подобного роста: индустрия подошла к пределу возможностей используемых технологий. Как же инженеры выходят из сложившейся ситуации? Есть ли будущее у HDD? Что делать? Информационный бум продолжается, терабайт данных уже ни у кого не вызывает трепета. А привычная технология создания жестких дисков достигла физических пределов увеличения плотности записи. Неужели 500 Гбайт – это максимум, что можно поместить на стандартный 3,5-дюймовый жесткий диск ближайшего будущего?

К счастью, нет. Наука не стоит на месте, разрабатываются и находят коммерческое применение совершенно фантастические проекты. С некоторыми из них мы вас сегодня познакомим. Но основной упор будет сделан на фактически готовую к выходу на рынок технологию – перпендикулярную запись. Пора узнать, какими станут жесткие диски в ближайшие 5-10 лет.

Экскурс в прошлое

История накопителей на базе жестких дисков началась в 1952 году, когда корпорация IBM предложила одному из своих ведущих инженеров, Рейнольду Джонсону, возглавить новую исследовательскую лабораторию. В те годы приоритетной задачей был поиск альтернативы чрезвычайно медленным перфокартам и магнитным лентам, требовались высокочастотные накопители информации с произвольным доступом.

Результатом пятилетнего труда команды Рейнольда стало создание в 1955 году накопителя на жестких дисках IBM 350 Disk File, в 1956 году вошедшего в состав IBM RAMAC. Накопитель состоял из 50 дисков диаметром 24 дюйма, вращавшихся со скоростью 1200 об/мин. Среднее время доступа к произвольной ячейке составляло 1 с, плотность – 2 кбит на квадратный дюйм, емкость – 5 Мбайт. Размер накопителя был сравним с двумя современными двухкамерными холодильниками.



Первый HDD емкостью 5 Мбайт

С тех пор плотность записи на пластины возросла более чем в 60 миллионов раз (!), достигнув отметки в 120 Гбит/дюйм².

На протяжении 50 лет технология записи не менялась, а только уменьшались размеры жестких дисков, повышалась скорость вращения шпинделя и емкость пластин. Царствовала параллельная запись.

Технология параллельной записи на магнитные диски

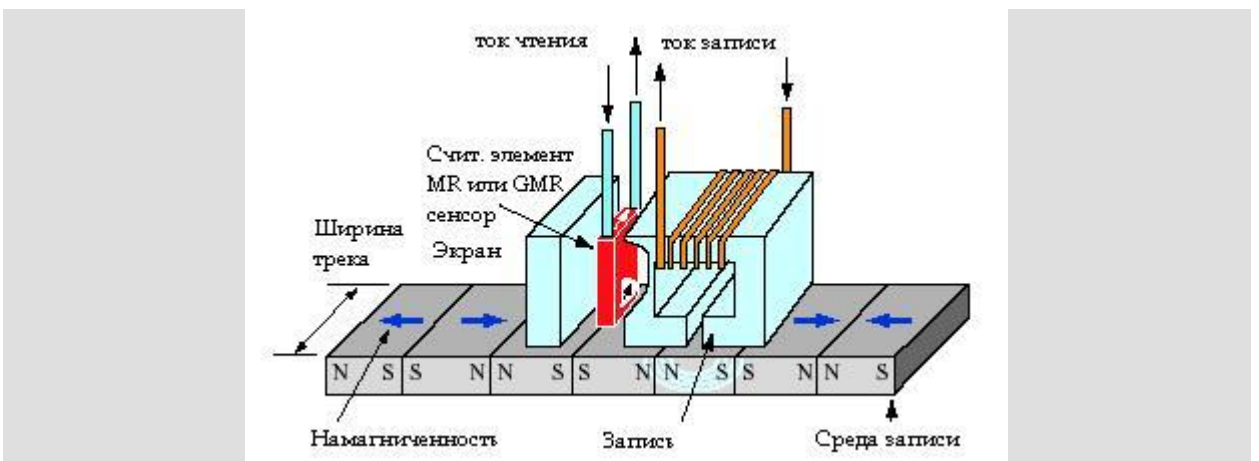
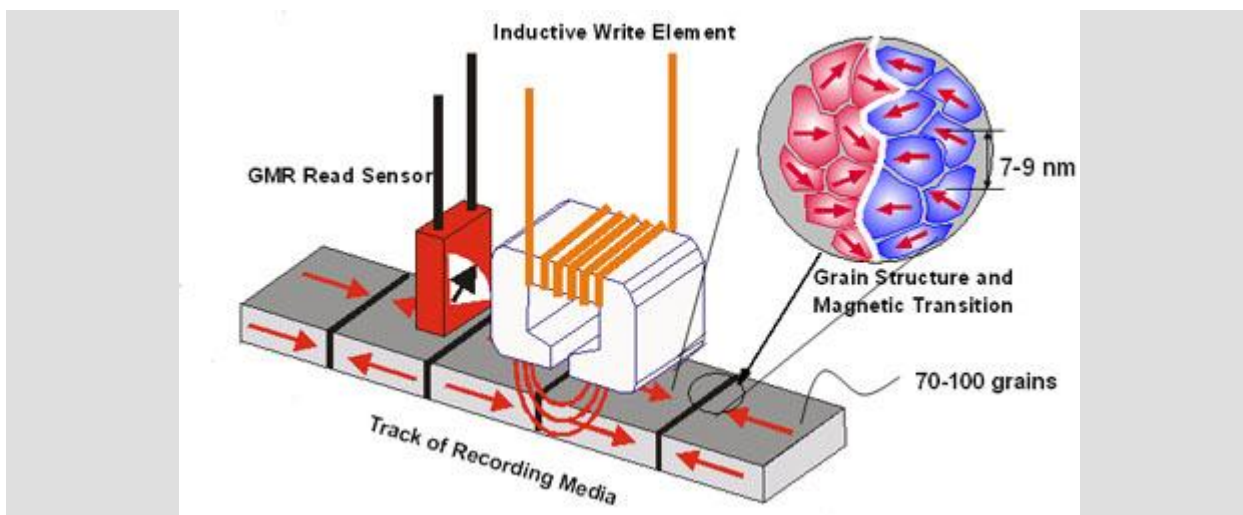


Схема технологии параллельной записи

Данные записываются на диск, покрытый магнитным записывающим слоем. Любой магнитный материал (например, оксид железа) состоит из доменов - областей, внутри которых магнитные моменты всех атомов направлены в одну сторону. Каждый домен имеет большой суммарный момент, который в исходном состоянии может быть направлен

произвольно. Под действием внешнего магнитного поля домены могут менять направление магнитного момента.

Именно этот эффект используется при записи. Информация хранится не на одном домене, а на областях (частицах), состоящих минимум из 70-100 «зерен». Если магнитный момент такой частицы совпадает с направлением движения считывающей головки – получаем «0», если противоположен – «1». Так как две соседние области имеют противоположное направление моментов, на границе между ними часть доменов может потерять стабильность и произвольно менять направление магнитного момента. Но об этом позже.



Конструкция считывающей головки

Главной характеристикой магнитной пластины является плотность записи. Она состоит из нескольких показателей: линейная плотность - плотность на один дюйм дорожки (Bits per Inch, BPI), количество дорожек на дюйм диаметра (Tracks per Inch, TPI), и плотность на квадратный дюйм поверхности (areal density, произведение первых двух).

Чтобы увеличить емкость накопителя, можно пойти двумя путями: увеличить количество пластин или увеличить плотность записи на пластину. Первый путь означает значительное усложнение механического устройства накопителя, что зачастую просто невозможно, да и экономически не выгодно. Поэтому основным показателем, определявшим рост емкости жестких дисков за последние 50 лет, являлась плотность записи на пластину.

Уроки масштабирования

Основы масштабирования в магнитной записи точно такие же, как и в теории трехмерного магнитного поля. Если магнитные свойства материалов постоянны, то конфигурация поля остается неизменной при изменении всех токов и размеров во всех плоскостях в s раз. При этом плотность записи также увеличивается в s раз. Однако следует учитывать еще два важных для практического использования фактора: скорость вращения дисков и скорость передачи данных. На практике скорость вращения остается неизменной, скорость передачи данных растет, а токи постепенно уменьшаются, поэтому приходится изобретать новые методы чтения.

В теории, если необходимо увеличить TPI в 2 раза, BPI в 2 раза и areal density в 4 раза, достаточно уменьшить все размеры в 2 раза, сохранить скорость вращения той же и удвоить скорость передачи данных. Если материалы и пропорции сохраняются, то устоявшийся принцип соблюдается.

На практике такой способ масштабирования сталкивается с 3 сложностями:

- Сохранение или увеличение скорости считывания при увеличении плотности записи может быть невозможно для существующей электроники;
- Для увеличения производительности приводов приходится увеличивать скорость вращения дисков, что также сказывается на скорости считывания;
- Уменьшение масштабов уменьшает уровень сигналов чтения, что резко увеличивает шумы в магнитных полях. Уменьшение соотношения сигнал/шум требует создания более чувствительных считывающих головок. Поэтому индустрия перешла от индуктивных головок к магниторезистивным (MR), затем к GMR-головкам, использующим эффект «гигантской магниторезистивности», и даже к TMR-головкам, построенным на туннельном эффекте.

Тем не менее, до последнего времени производители накопителей шли именно таким путем, пока не подошли вплотную к так называемому **суперпарамагнитному пределу**, который сделал невозможным дальнейшее наращивание плотности традиционными методами.

Суперпарамагнетизм

Как известно из курса физики, свойством любого магнетика является анизотропия. Домен с большим трудом намагничивается в одном направлении, и легко – в противоположном (по «легкой оси»). Его энергия пропорциональна $\sin^2\theta$, где θ - угол между углом намагниченности домена и осью предпочтительного намагничивания. В условиях абсолютного нуля в изолированной системе намагниченный домен занимает положение в одном из состояний с наименьшей энергией (т.е. под углом 0 или 180 градусов). Для представления информации эти положения принимаются за логический ноль или единицу. При изменении направления намагниченности и повышении температуры домен может поменять направленность магнитного момента. Уменьшение размеров частицы в 2 раза означает уменьшение энергетического барьера, который необходимо преодолеть для смены направления, поэтому она становится значительно менее стабильной. Период стабильности может измениться со 100 лет (стабильная частица) до 100 нс (при таком периоде частицу вообще сложно назвать постоянным магнитом). В последнем случае мы получим на пластине огромное количество хаотически расположенных намагниченных частиц, произвольно меняющих свою направленность. Это явление называется *суперпарамагнетизмом*, потому что макроскопические свойства такой среды похожи на свойства парамагнетиков.

В реальной среде ситуация оказывается еще более сложной. При традиционном методе параллельной записи на диск магнитные частицы располагаются магнитными моментами параллельно плоскости диска. А, как известно, два постоянных магнита, расположенных одинаковыми полюсами друг к другу, отталкиваются, а разными – притягиваются. Значит, между ними тоже происходит энергетическое взаимодействие. У границ намагниченных частиц возникает поле рассеяния, которое забирает энергию у магнитных полей обеих частиц. В результате крайние домены частицы теряют часть заряда и становятся менее стабильными.

Чтобы это преодолеть, ученые предлагают несколько методов, но все они лишь слегка отодвигают парамагнитный предел. Необходимо принципиально новое решение.

Перпендикулярная запись: забытое старое

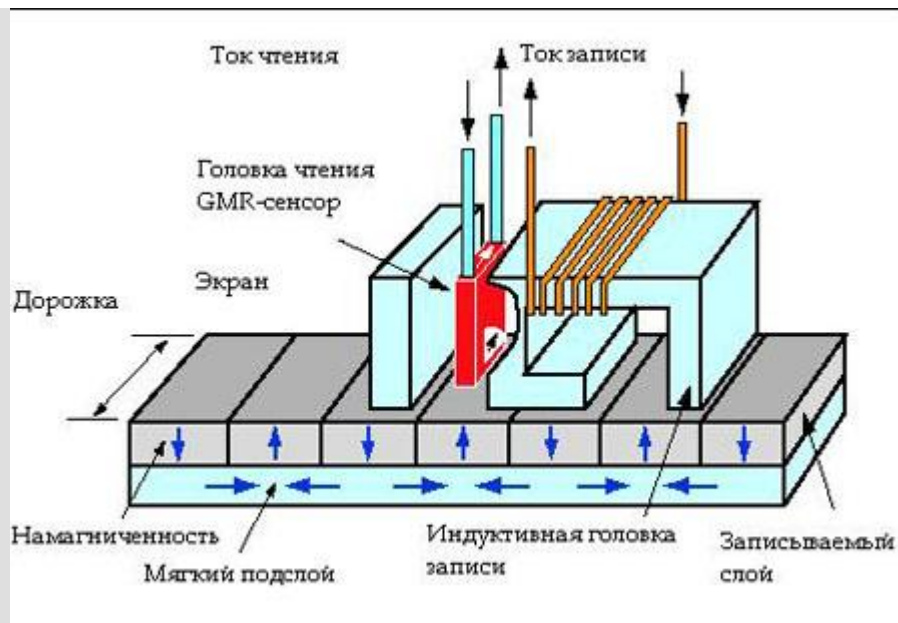


Схема технологии перпендикулярной записи

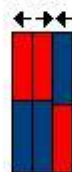
Впервые метод перпендикулярной записи на магнитный носитель был применен еще в конце 19 века датским ученым Вольдемаром Поульсенем для магнитной записи звука. Однако в дальнейшем исследования на эту тему носили больше теоретический характер из-за недостаточного развития технологий, не позволявших использовать разработки. Отцом технологии перпендикулярной записи считается доктор Shun-ichi Iwasaki – президент и директор престижного японского Tohoku Institute of Technology. Именно этот ученый в 1976 году теоретически обосновал преимущества нового типа записи, подтолкнув тем самым исследователей всего мира к углубленным разработкам.

При перпендикулярной записи на диск магнитные частицы располагаются под углом 90° к плоскости магнитного диска. Благодаря этому домены, хранящие разные значения, не отталкиваются друг от друга, потому что намагниченные частицы повернуты друг к другу разными полюсами. Увеличение плотности, означающее уменьшение размера частиц, при этом не будет требовать уменьшения толщины слоя, что обеспечит стабильность магнитного материала.

Взаимодействие частиц при параллельной записи

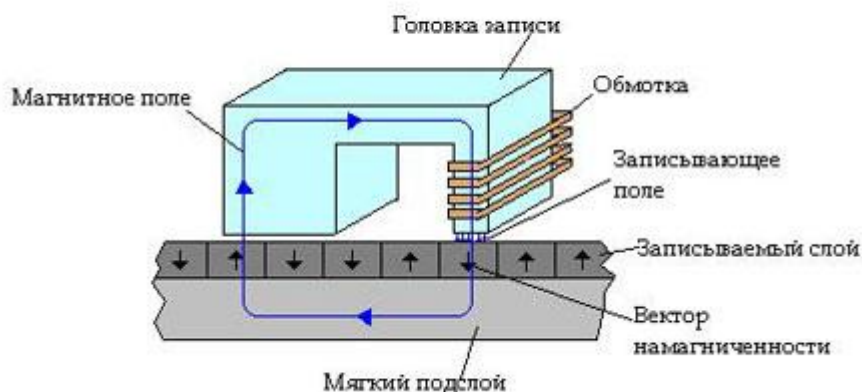


Взаимодействие частиц при перпендикулярной записи



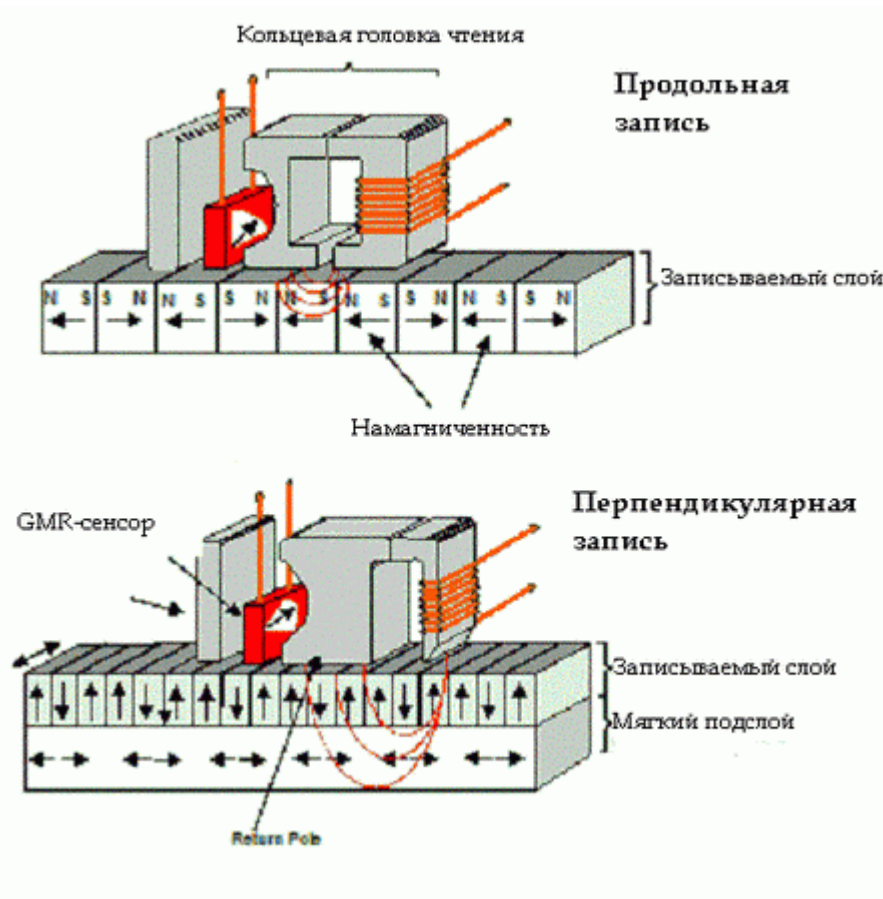
Взаимодействие намагниченных частиц

Для перпендикулярной записи на магнитный слой используется головка новой конструкции. Если при продольной записи магнитное поле генерируется в металлическом кольце с помощью индукции, то при перпендикулярной используется поле, генерируемое между срезом полюса головки записи и магнитомягким подслоем на диске. Поэтому частицы записываемого слоя намагничиваются вертикально, а частицы магнитного подслоя – горизонтально. Это обеспечивает дополнительную стабильность частиц относительно друг друга.



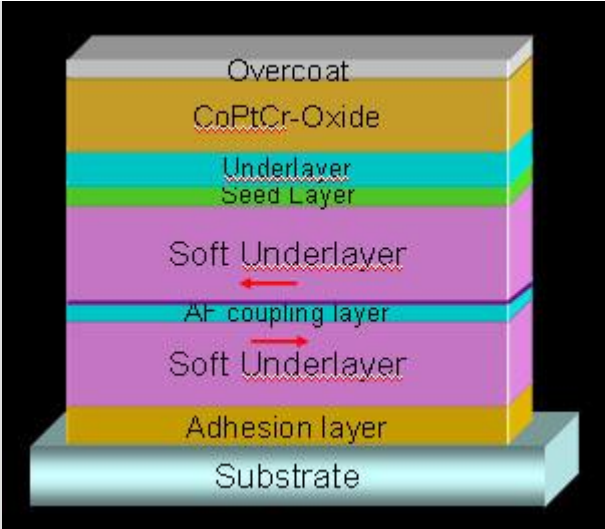
Процесс перпендикулярной записи на диск

Важное отличие перпендикулярной записи от продольной заключается в характере и расположении сигнала чтения. Продольный магнитный слой без подслоя испускает магнитный сигнал только с границы перехода бит (с границы между одной магнитной частицы и другой) под прямым углом к плоскости диска. Перпендикулярный магнитный слой испускает сигнал по всей площади частицы, а благодаря подслою вектор этого сигнала направлен параллельно плоскости диска. Для считывания требуются принципиально новые головки чтения, которые позволяют значительно увеличить соотношение сигнал/шум и мощность самого сигнала. Поэтому некоторые компании уже начинают применять новое поколение головок, использующее туннельный магниторезистивный эффект (TMR Heads).



Отличие в магнитных головках

При перпендикулярной записи используется намного более сложный состав магнитного слоя. Под тонким защитным слоем расположен записывающий слой состоящий из окисленного сплава кобальта, платины и хрома. Подложка состоит из двух слоев сложного химического состава, называемых антиферромагнитносвязанными слоями. Именно они позволяют снять внутренние напряжения магнитного поля.



Состав магнитного слоя при перпендикулярной записи

Технология перпендикулярной записи на магнитные диски начала проникать на рынок уже в прошлом году. 4 ноября 2004 года Hitachi анонсировала накопители формфактора

2,5” емкостью 100 Гбайт, основанные на 2 пластинах плотностью 230 Гбит/дюйм². Toshiba поставляет свои накопители формфактора 1,8” емкостью 40 Гбайт (133 Гбит/дюйм²). Кроме того, компания обещает применить перпендикулярную запись в своей линейке 0,85” дисков, доведя их емкость до показателя 6-8 Гбайт на пластину. Seagate, похоже, превзошла в своих разработках всех, достигнув в лабораториях плотности записи в 245 Гбит/дюйм² и скорости передачи данных в 480 Мбит/сек.

Первый коммерческий продукт от Seagate, построенный по технологии перпендикулярной записи, появится в начале 2006 года. Это будет 2,5” жесткий диск Momentus 5400.3 емкостью 160 Гбайт. Плотность записи составит 130 Гбит на дюйм².

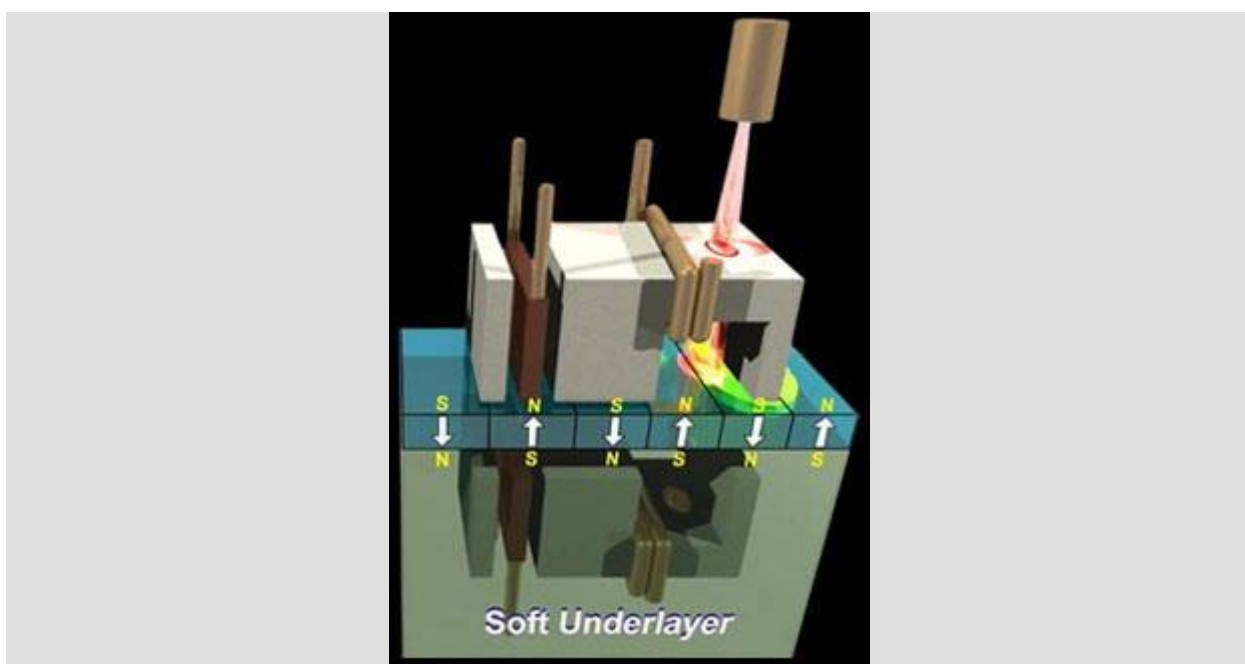
К 2010 году Seagate предсказывает появление дисков с плотностью записи до 500 Гбит на дюйм². При этом емкость 3,5” накопителя составит 2 Тбайт, 2,5” – до 640 Гбайт, 1” – 50 Гбайт.

Именно 500 Гбит на кв. дюйм – теоретический предел для существующей на сегодня технологии перпендикулярной записи. Но вспомним, еще 15 лет назад исследователи IBM называли пределом плотности записи при параллельной записи 30 Гбит/дюйм², однако сегодня мы наблюдаем показатели до 120 Гбит/дюйм². Вполне возможно, что реальное пороговое значение – это 1 Тбит/дюйм² или даже больше. Кто знает, каковы будут реальные показатели лет через 5-7?

Альтернативные технологии записи

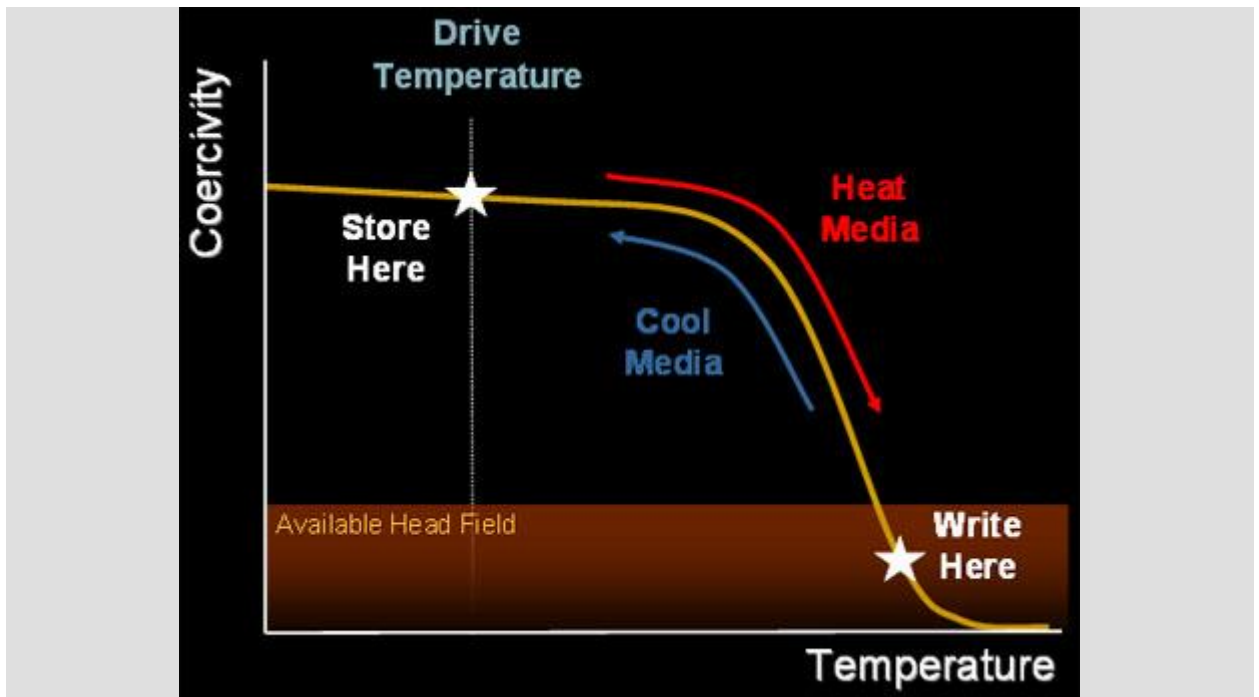
Применение технологии перпендикулярной записи на диски лишь на время отодвигает суперпарамагнитный предел. Рано или поздно индустрия снова столкнется с этим явлением, и снова нужно будет искать выход из ситуации, поэтому инженеры ведущих компаний уже сейчас занимаются разработками новых технологий. Кратко расскажем о некоторых из них.

Улучшением технологии перпендикулярной записи является **HAMR (Heat Assisted Magnetic Recording)** – запись с предварительным нагревом с помощью лазера. Этот метод предусматривает кратковременный (1 пикосекунда) нагрев участка, на который производится запись, до 100 градусов Цельсия.



Heat Assisted Magnetic Recording

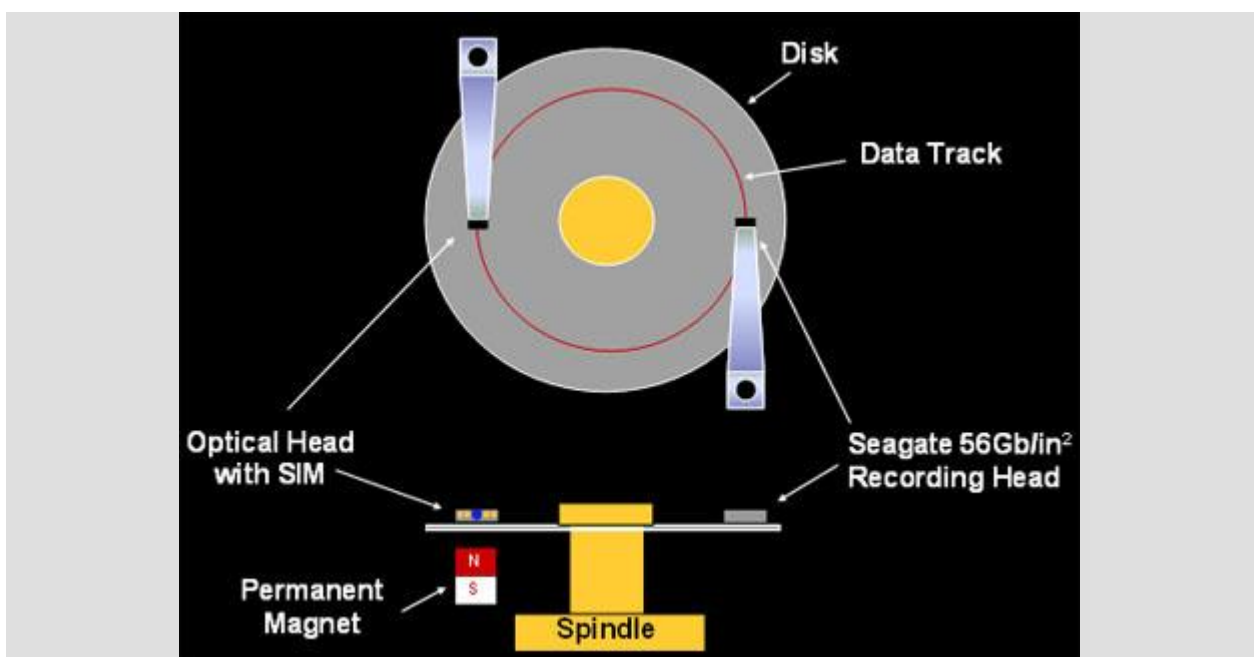
При этом магнитные частицы получают больше энергии, и головке записи уже не нужно генерировать поле большой напряженности. После записи в записываемом слое оказываются частицы с большей энергетикой, а это означает повышенную стабильность.



Изменение магнитных свойств при нагреве

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 . Стоят они очень дорого.

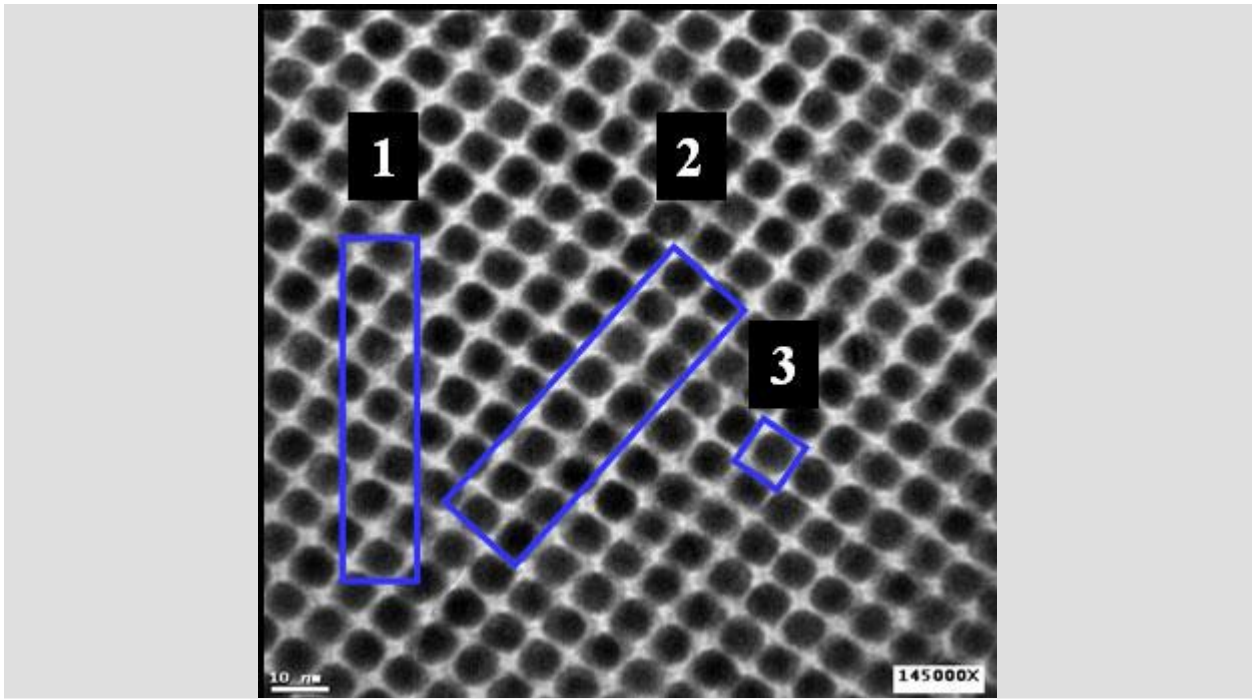
Кроме того, специалисты из Seagate всерьез полагают, что в HAMR винчестерах придется ставить 2 отдельные головки. Наиболее необычным является считывающий элемент – это оптическая головка! Точнее, не совсем оптическая, в ней будет использоваться специальное твердотельное зеркало (Planar Solid Immersion Mirror).



HDD с двумя отдельными головками?

HAMR позволит добиться плотности записи как минимум 1 Тбит/дюйм². Теоретически же такой материал как FePt позволяет повысить плотность в 10 раз! Первые реальные образцы жестких дисков с HAMR следует ждать к 2010 году.

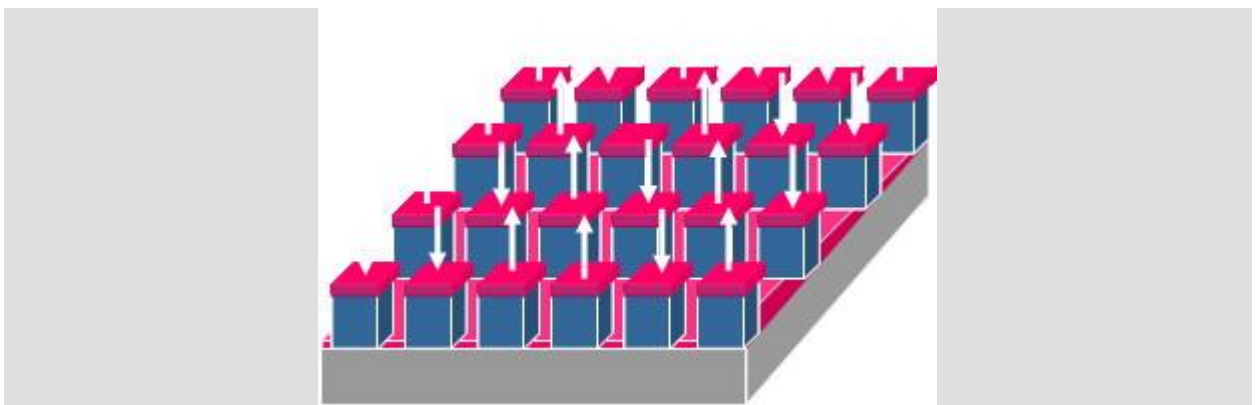
Еще одно перспективное направление – использование материалов, частицы в которых выстроены в битовый массив (Bit Patterned Media). В результате бит информации хранится в одной ячейке-домене, а не в массиве из 70-100 доменов.



1 – область, хранящая бит при стандартном подходе; 2 – массив, границы которого совпадают с границами частиц; 3 – одна частица в идеале может хранить 1 бит

Такой материал можно либо создать искусственно с помощью литографии, либо найти сплав с подходящей самоорганизующейся структурой.

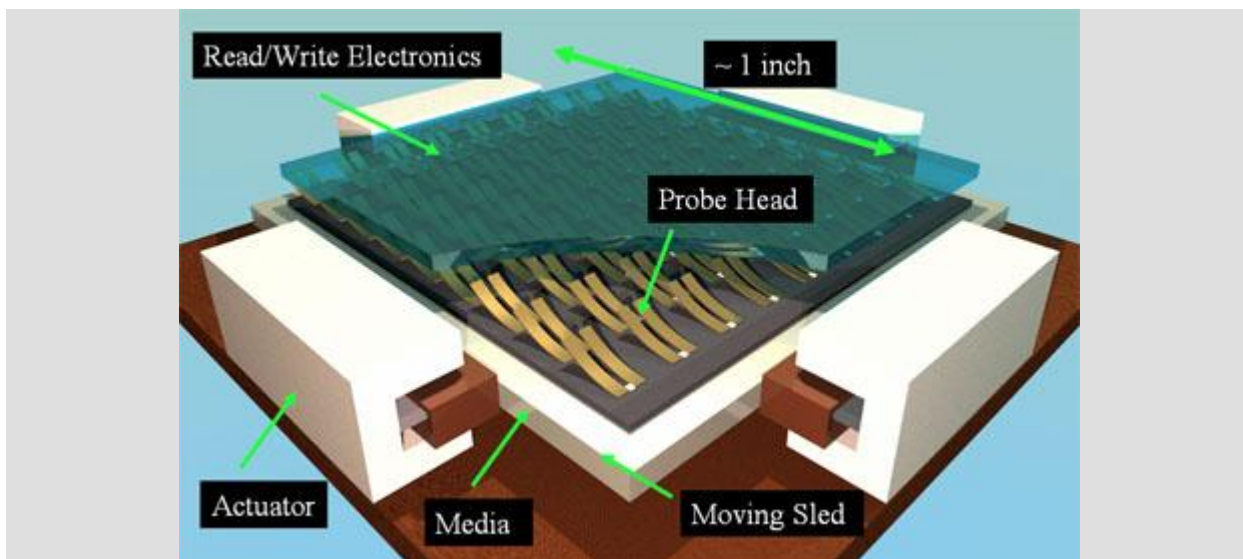
Первый метод навряд ли получит развитие. Для получения материала, допускающего плотность записи 1 Тбит/дюйм², размер одной частицы должен составить максимум 12,5 нм. Ни существующая, ни планируемая в ближайшие 10 лет технология литографии этого не обеспечивает. Хотя есть довольно хитроумные решения, позволяющие не сбрасывать со счетов данный подход.



Слой, полученный с помощью литографии

Поиск самоорганизующихся магнитных материалов (SOMA, Self-Ordered Magnetic Array) – весьма перспективное направление. Уже несколько лет специалисты Seagate указывают на особенности сплава FePt, выпариваемого в гексановом растворителе. Полученный материал имеет идеально ровную ячеистую структуру. Размер одной ячейки – 2,4 нм. Если учесть, что каждый домен обладает высокой стабильностью, можно говорить о допустимой плотности записи на уровне 40-50 Тбит/дюйм²! Похоже, это и есть окончательный предел записи на магнитные носители.

Еще одно оригинальное направление связано с отказом от стандартной технологии доступа к данным. Долой вращающиеся диски! Значительно повысить скорость доступа и надежность накопителя сможет диск (или квадрат?!), построенный на технологии PST (Probe Storage Technology).



Probe Storage Technology – никакого вращения

Представьте, что у вас есть целый массив сканирующих микроскопов, которые способны считывать или записывать данные. Каждый микроскоп имеет доступ к собственному хранилищу данных, так что возможна параллельная работа всех сканеров. Подробности этой технологии не разглашаются, но разработчики обещают, что в сантиметровую «марку» вместится около 10 Гбайт информации!

А что же с другими технологиями хранения данных? Может быть, можно вообще отказаться от накопителей на основе магнитных материалов? Существует три основных конкурента.

Голографические и оптические 3D технологии сталкиваются с проблемами в поисках подходящего материала, обеспечения возможности перезаписи и просто запредельной итоговой цены решения.

Flash-технологии показывают огромный рост в последние годы, но до сих пор не могут тягаться с жесткими дисками по стоимости в пересчете на гигабайт. Емкость таких накопителей пока довольно небольшая, а скорость записи довольно низкая.

Что остается? Молекулярная запись? Но эта технология так и не продвинулась дальше теоретического обоснования. Считать ее конкурентом не приходится.

Сделаем вывод. Ближайшие 5-10 лет обещают быть весьма интересными. Появятся новые типы жестких дисков, начнется гонка объемов, в продажу поступят HDD емкостью 5, а

может и 50 Терабайт... Потребность же в таких умопомрачительных объемах информации мы с вами, дорогие читатели, обязательно обеспечим