

#### XIV. Современные магнитные носители информации. Устройства магнитной записи и воспроизведения. Магнитооптические носители информации.

Современные тенденции в развитии накопителей на жестких дисках. Магнитооптические носители информации. Магнитная память произвольной адресации (MRAM).

Современные тенденции в развитии накопителей на жестких дисках. Жесткие магнитные диски (ЖМД) являются в настоящее время наиболее распространенным типом носителей информации. ЖМД уступают полупроводниковым устройствам памяти (например динамической памяти произвольного доступа, DRAM) в скорости обмена информации, в энергопотреблении, бесшумности, в механической надежности. Однако эти недостатки покрываются такими важнейшими свойствами ЖМД как неразрушаемость памяти, их емкость, достаточно низкая стоимость, приведенная к одному биту.

Рис. 14.1, на примере дисков IBM, иллюстрирует тенденцию к увеличению емкости жестких дисков. Прогнозируемая емкость к 2006 году для 3.5 дюймовых дисков должна составить около 200 Гбайт, что вполне реально, поскольку в 2004 году де-факто емкость превысила 100 Гбайт.

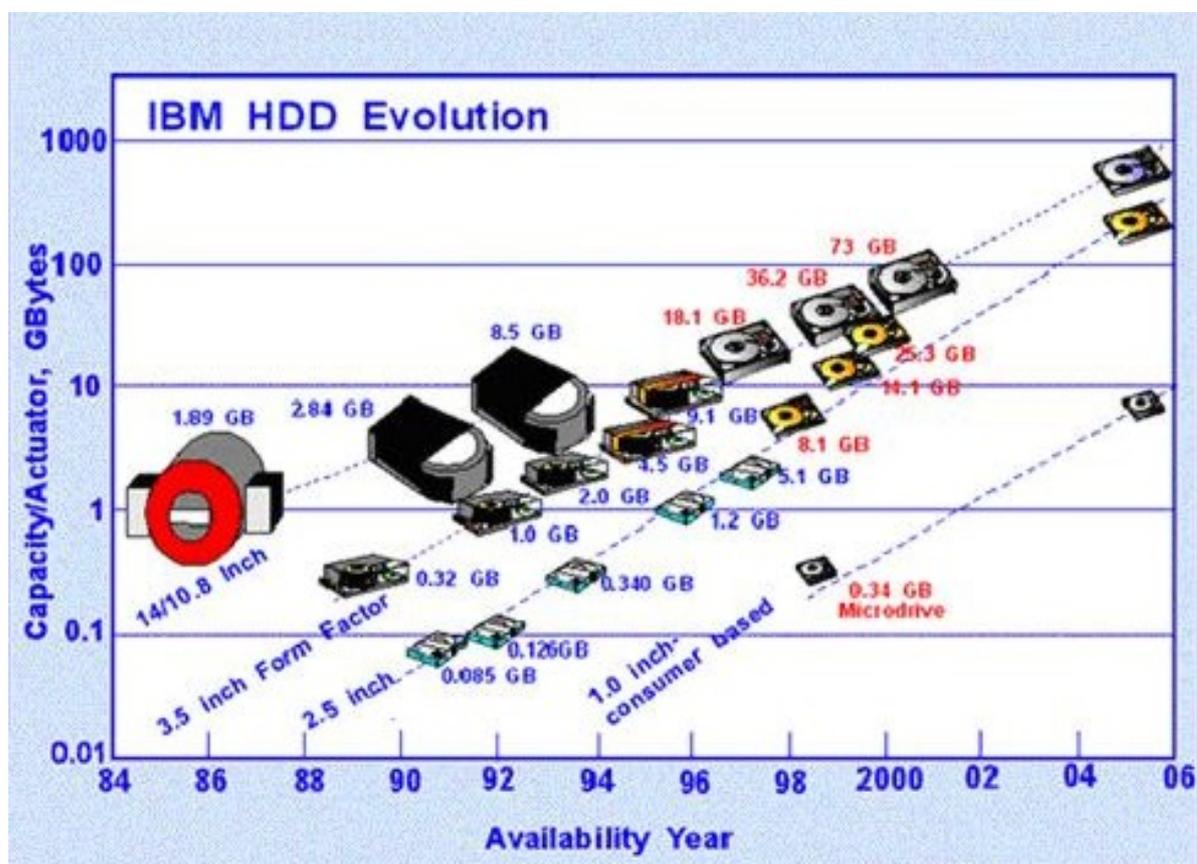


Рис. 14.1. Рост емкости накопителей на жестких дисках [1].

Емкость накопителя, в свою очередь, определяется плотностью битов. На рис. 14.2, также на примере продукции IBM, проиллюстрирована эволюция плотности информации на жестком носителе [1], которая в ближайшем будущем должна приблизиться вплотную к суперпарамагнитному пределу, обсуждавшемуся в главе XI, когда магнитная энергия бита становится сопоставимой с тепловыми флуктуациями.

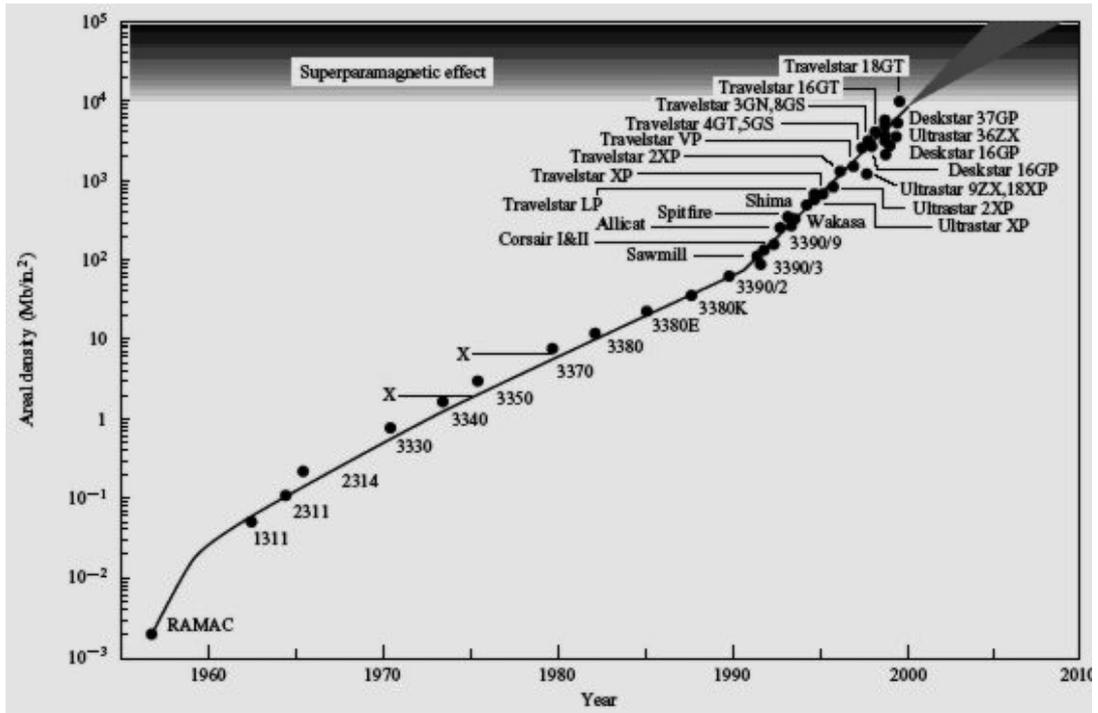


Рис. 14.2. Эволюция плотности информации на жестком носителе [1]



Рис.14.3. Устройство накопителя на жестких дисках

На рис. 14.3 показан интерьер накопителя на жестких дисках. С точки зрения микромагнетизма важными элементами дизайна являются свойства материала диска записывающей и считывающей головок накопителя, определяющие многие из перечисленных выше параметров устройства.

На рис. 14.4а схематично изображена работа записывающей и считывающей головок в системе продольной записи. Запись производится индуктивным путем подачей токового импульса в обмотку записи за счет рассеянного поля в зазоре якоря головки. Считывание происходит

за счет рассеянного поля на границе битов. При этом используется либо магниторезистивный эффект (MR), либо эффект гигантского магнитного сопротивления (GMR), обсуждавшийся в предыдущих главах. Влияние рассеянного поля соседних битов и внешних помех ослабляется магнитным экраном.

Проблема суперпарамагнитного предела может быть реальной уже при плотности в ~100-200 Гбит/кв.дюйм [1Th], рис. 14.2. Однако, имеются основания считать, что этот предел будет более высоким для технологии с перпендикулярной намагниченностью, рис.14.4б, чем с

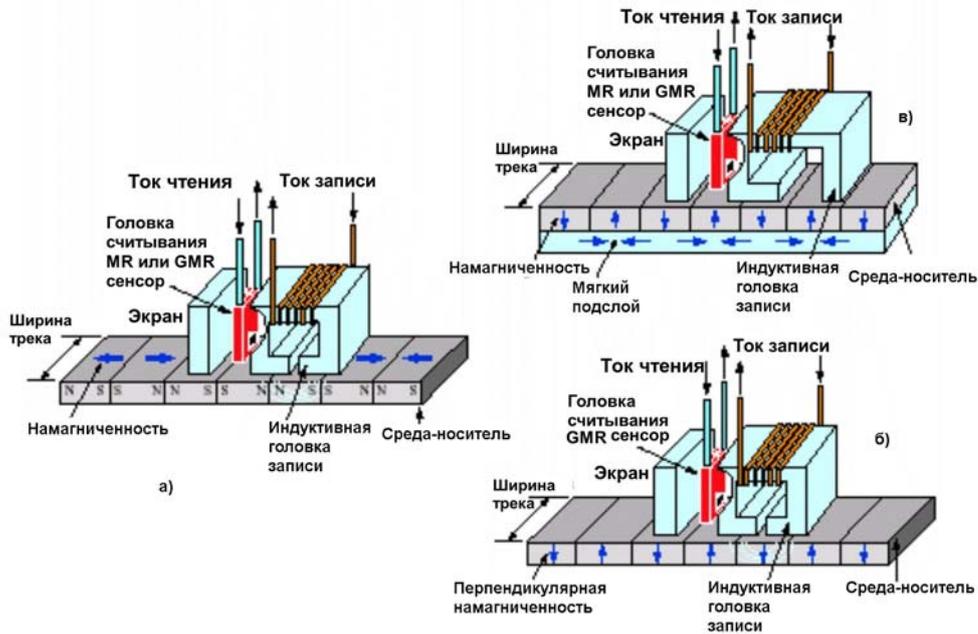


Рис. 14.4. Схемы записи а) в продольной, б) в поперечной и в) в поперечной с магнитомягким подслоем геометриях.

продольной намагниченностью. Этот подход базируется на внедрении в качестве носителей стабильных магнито жестких материалов, требующих более мощного магнитного поля для записи.

К сожалению, максимально достижимая напряженность поля, создаваемая пишущей головкой, также ограничена. Оптимальная толщина магнитного слоя для

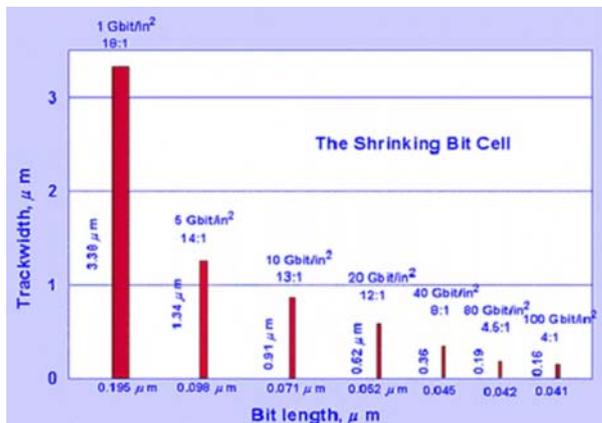


Рис.14.5. Эволюция поперечного (bit length) и продольного (bit width) размеров бита.

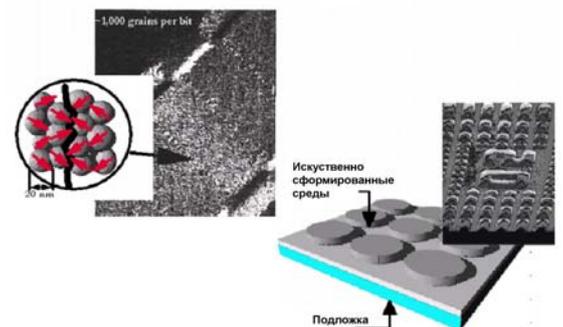


Рис.14.6. Стандартная схема записи и схема записи на искусственно созданных доменах.

перпендикулярной геометрии должна быть несколько выше, чем для продольной, поскольку, как мы видели в главе XII, рис. 12.12, именно такое соотношение между высотой и радиусом домена благоприятствует перпендикулярной намагниченности. Таким образом, объем бита в этом случае должен быть выше. Размагничивающее поле в бите в этой геометрии должно быть меньше. С учетом этого оценки показывают, что суперпарамагнитный предел в перпендикулярной геометрии может быть в несколько раз выше, чем в продольной геометрии записи. Поскольку материал носителя с перпендикулярной схемой должен быть достаточно жестким, то обеспечить соответствующие поля записи можно либо прибегая к дальнейшему уменьшению зазора (до 2 нм,

что соответствует размеру молекулы лубриканта), либо применением магнитомягкого подслоя, рис. 12.12в. Современная тенденция к более быстрому уменьшению продольного размера бита (bit length) по сравнению с поперечным размером (bit width) иллюстрируется на рис. 14.5.

Еще один порядок в плотности либо продольной, либо поперечной намагниченности может быть выигран, если реализовать схему «один бит-одно зерно», рис. 14.6. Например, структура с периодом 50 нм дает нам значение 260 Gb/in<sup>2</sup>. К сожалению, предлагаемые сейчас методы формирования искусственных сред с элементами размером <40 нм пока слишком дороги. Электронно-лучевая литография позволяет формировать элементы размером 10 нм, но она абсолютно не пригодна для массового производства из-за дороговизны и длительности процесса.

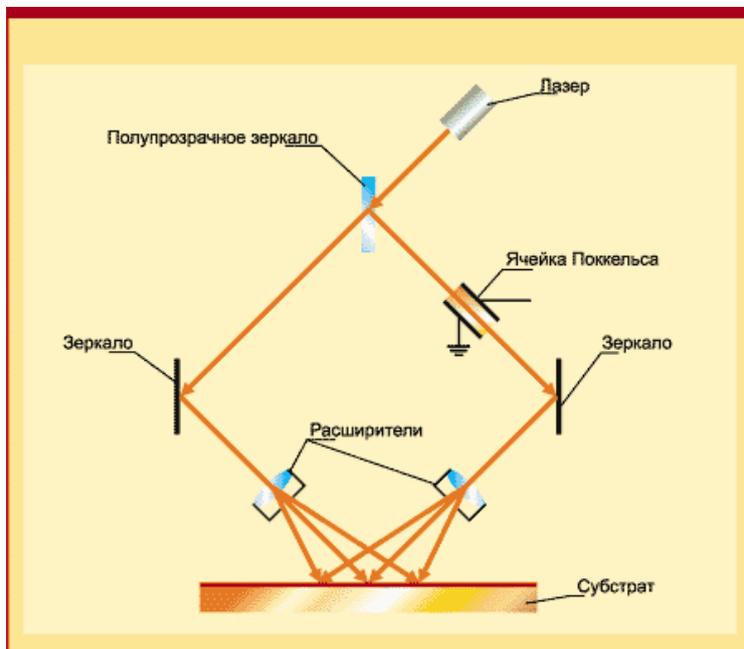


Рис.14.7.

сетчатую структуру. Специалисты Массачусетского технологического института используют данную методику для обработки поверхностей площадями до 80 см<sup>2</sup>, и она без особого труда может быть масштабирована.

К тому же обработка пластин диаметром более 100 мм этим методом сегодня невозможна. В качестве альтернативы рассматривается метод, использующий голографическую литографию: лазерный луч разделяется на два пучка, которые, отражаясь от зеркал, интерферируют на поверхности субстрата (рис. 14.7).

Образованная интерференционная картина представляет собой стоячую волну с периодом, зависящим от длины волны излучаемого лазером света и угла, образованного сходящимися лучами. Фактически - это ряд экспонированных и неэкспонированных полос. Повернув субстрат на 90° и выполнив второе экспонирование, получим необходимую нам

### Магнитооптические носители информации.

Радикальное решение проблемы суперпарамагнитного предела пришло вместе с уже давно

известной технологией магнитооптической записи (МО). Принцип ее прост: МО-диски созданы из магнитных материалов, требующих для перемагничивания нагревания выше точки Кюри.

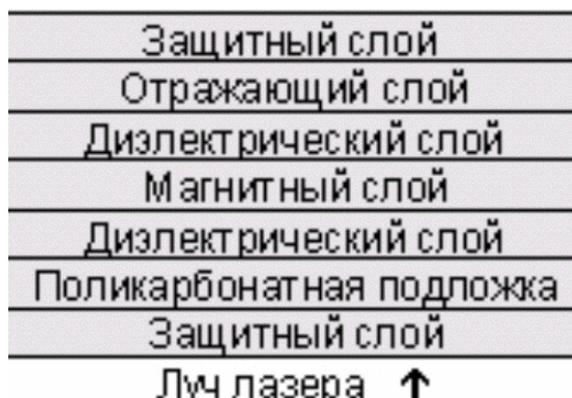


Рис. 14.8. Структура МО-диска

МО-диск (рис. 14.8) представляет собой поликарбонатную подложку толщиной 1.2 мм, на которую нанесено несколько тонкопленочных слоев. Магнитный слой состоит из сплава TbFeCo (тербий-железо-кобальт) и обладает жесткими ферромагнитными свойствами, причем ориентация доменов перпендикулярна поверхности диска. При нагревании до температуры Кюри или точки Кюри (для TbFeCo  $T_C \sim 200^\circ\text{C}$ ) происходит магнитное разупорядочение - ферромагнетик теряет свою доменную структуру и магнитные свойства. Если во время нагрева наложить на него внешнее магнитное поле, то домены в остывающем ферромагнетике ориентируются по его направлению. Запись производится блоками. Для изменения части информации в блоке необходимо перезаписать весь блок. Чтобы перезаписать информацию, требуется не только магнитное поле, но еще и лазер, который нагреет ферромагнитный слой. При записи используется внешнее магнитное поле, направление которого не может быть быстро изменено. Поэтому во время первого прохода все биты устанавливаются в состояние "ноль" (выполняется операция стирания - все домены ориентируются в одну сторону, рис. 14.9а), а во время второго - направление магнитного поля меняется и нужные биты устанавливаются в состояние "единица" (рис. 14.9б). Последний проход - проверка - как правило, в целях сокращения времени записи и перезаписи не используется. Так что на запись требуется два прохода головки, и занимает она, соответственно, в два раза больше времени, чем чтение.

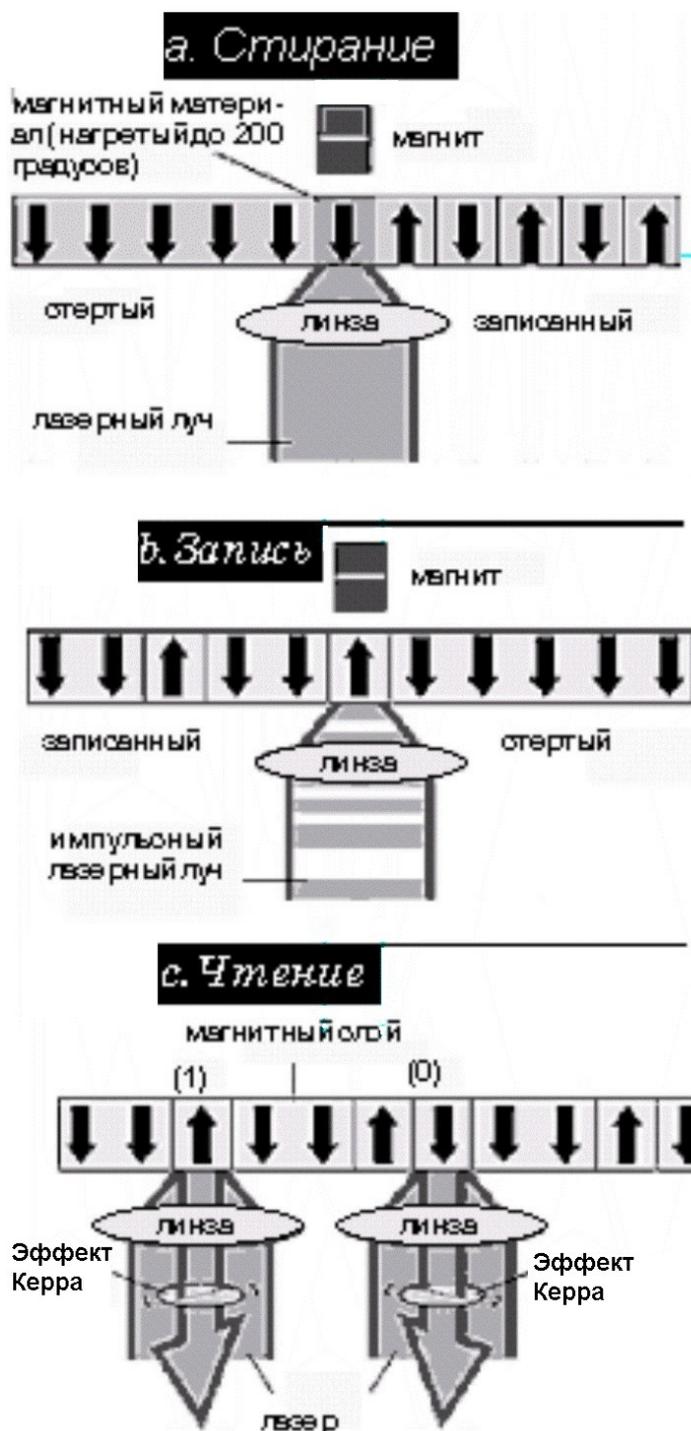


Рис.14.9. Принцип МО записи и считывания.

поляризации поворачивается всего на несколько градусов, этого уже достаточно для обнаружения и использования для чтения данных. Долговечность хранения данных у МО-диска - до 30 лет. Это традиционная технология.

Недостатки МО-записи. Основной недостаток магнито-оптики - относительно *медленная* *двухпроходная* запись. С этой проблемой успешно справились в модификации МО-дисков под названием LIMDOW (Light Intensity Modulated Direct OverWrite - прямая перезапись

происходит магнитное разупорядочение - ферромагнетик теряет свою доменную структуру и магнитные свойства. Если во время нагрева наложить на него внешнее магнитное поле, то домены в остывающем ферромагнетике ориентируются по его направлению. Запись производится блоками. Для изменения части информации в блоке необходимо перезаписать весь блок. Чтобы перезаписать информацию, требуется не только магнитное поле, но еще и лазер, который нагреет ферромагнитный слой. При записи используется внешнее магнитное поле, направление которого не может быть быстро изменено. Поэтому во время первого прохода все биты устанавливаются в состояние "ноль" (выполняется операция стирания - все домены ориентируются в одну сторону, рис. 14.9а), а во время второго - направление магнитного поля меняется и нужные биты устанавливаются в состояние "единица" (рис. 14.9б). Последний проход - проверка - как правило, в целях сокращения времени записи и перезаписи не используется. Так что на запись требуется два прохода головки, и занимает она, соответственно, в два раза больше времени, чем чтение.

Считывание данных с диска происходит с помощью поляризованного лазерного луча пониженной мощности (25% от номинальной), недостаточной для разогрева рабочего слоя. При попадании луча на упорядоченные магнитные частицы диска, ориентированные при записи данных, их магнитное поле меняет поляризацию луча (эффект Керра), рис. 14.9с. Хотя плоскость

модулированным по интенсивности светом). LIMDOW-диски содержат несколько больше слоев, в том числе еще два вспомогательных магнитных слоя. Применение этой технологии позволяет записать данные за один проход. В этом случае используется как внешнее магнитное поле, так и встроенное в диск, от дополнительных магнитных слоев, имеющих специально подобранные значения точек Кюри и коэрцитивной силы. Для записи "единиц" используется высокая интенсивность луча, а для "нулей" - низкая. Направление магнитного поля не переключается - намагничивание происходит либо от внешнего поля, либо от дополнительных магнитных слоев. Требуя только прохода перезаписи, LIMDOW дает 100% увеличения производительности. Кроме того, диски LIMDOW имеют более долгий срок хранения информации.

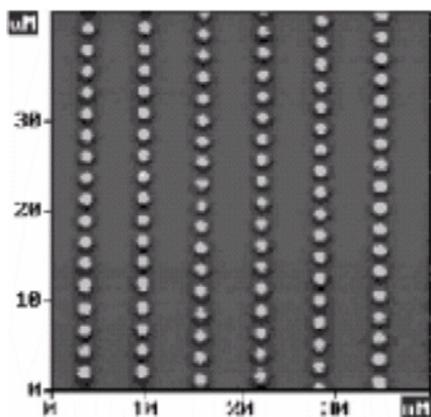


Рис. 14.10. MCM данные участка MO-диска.

В то время как вектор намагничивания доменов, образующихся на поверхности носителя при традиционном способе записи, ориентирован в плоскости его поверхности, с помощью оптических технологий удастся придать ему вертикальную ориентацию. Это существенно ослабляет взаимодействие между доменами. Кроме этого, сам факт, что для перемагничивания материала требуются высокие температуры, говорит о его *устойчивости в нормальных условиях*. В том числе и к внешнему магнитному полю, кто бы его ни генерировал, - будь то записывающая головка или соседний домен. Но при попытке придать магнитооптическим накопителям динамические и емкостные характеристики винчестеров инженеры столкнулись с серьезными трудностями. Главной и принципиальной является проблема *низкой плотности записи* - луч света очень трудно сфокусировать в достаточно малую точку. Необходимо

использовать свет с короткой длиной волны, например голубой.

Еще одним препятствием к интеграции магнитооптики с винчестерами стала *сложная и тяжеловесная конструкция оптической головки*. Ситуация усложняется необходимостью строго выдерживать фиксированное расстояние между поверхностью носителя и головкой, чтобы не потерять фокусировку лазерного луча. Вместе с повышением плотности приходят невероятные скорости поступления данных - частота импульсов будет измеряться гигагерцами, что не делает задачи управления сервосистемой и коррекции ошибок проще. Тем не менее MO-технология сулит колоссальный скачок в плотности записи - до 250 Gb/in<sup>2</sup>.

Проблема традиционной магнитооптической записи состоит в *физической невозможности сфокусировать луч лазера* в достаточно малую точку. Минимальный размер светового пятна определяется т.н. числовой апертурой, т.е. отношением длины волны излучаемого лазером света к удвоенной числовой апертуре фокусирующей линзы. Однако числовая апертура для линзы в воздухе не может превышать единицы вследствие дифракции. Преодолеть ограничение, уменьшив влияние дифракции, можно, поместив между поверхностью и линзой вещество с более высоким показателем преломления, нежели воздух. В Стэнфордском университете исследователи использовали для этих целей масло, и метод, соответственно, получил название жидкостная иммерсионная микроскопия (liquid immersion microscopy).

Жидкость не вполне подходит для конструирования винчестеров, поэтому TeraStor взяла на вооружение следующую итерацию иммерсионной микроскопии -- твердотельную. Согласно этой технологии, вместо масла используется полушарие из твердого материала, обладающего высоким коэффициентом рефракции. Эта так называемая иммерсионная линза, вообще говоря, должна контактировать с поверхностью диска, поскольку пятно света необходимого диаметра существует только внутри нее. Проблему разрешили, прибегнув к "эфемерной связи" (evanescent coupling) - эффекту, позволяющему свету беспрепятственно преодолевать небольшой зазор, остающийся между линзой головки и поверхностью диска. Расположив головку на высоте менее одной длины волны излучения используемого лазера, осуществляют "нуль-транспортировку" света между линзой и магнитной поверхностью. В наиболее благоприятных условиях так можно передать до 50% энергии луча.

#### **Магнитная память произвольной адресации (MRAM - magnetic/magnetoresistive random access memory)**

В настоящее время создается универсальная память, которая сочетает высокую скорость доступа, высокую плотность, неразрушаемость после выключения питания, которая базируется на

субмикронных магнитных элементах. Это, т.н. MRAM, сочетающая свойства магнитной памяти на жестком диске и электронной памяти произвольной адресации RAM(Random Access Memory). Неразрушающаяся память становится все более востребованной с развитием мобильных средств хранения информации все увеличивающегося объема: ноутбуки, мобильные телефоны, различного рода персональные записные книжки и т.д). В такого рода устройствах требуется хранить память в течение ~10 лет. В отличие от флэш-памяти, MRAM обещает быть гораздо более быстродействующей (с циклом чтения и записи порядка нескольких наносекунд) и очень малую склонность к деградации после большого числа записи/чтения. MRAM обещает также быть достаточно устойчивой к радиационным воздействиям, т.е. будет востребована в космических исследованиях и пригодной к военным приложениям. В наиболее оптимистичном сценарии, MRAM будет сочетать скорость статической RAM (SRAM) с плотностью динамической RAM (DRAM) и неразрушаемостью флэш- RAM, все это в одной технологии. Поэтому MRAM называют еще универсальной памятью. Наиболее простое удобство MRAM – не будет необходимости при включении компьютера ждать когда он загрузится с жесткого диска.

**Принцип действия.** В MRAM, каждая ячейка может являться битом памяти и представляет собой субмикронный элемент ферромагнитного материала, обычно пермаллоя (Ni-Fe). Если этот элемент намагничен, скажем направо, рис. 14.11, то это будет соответствовать «1», если налево, то «0». Эти элементы

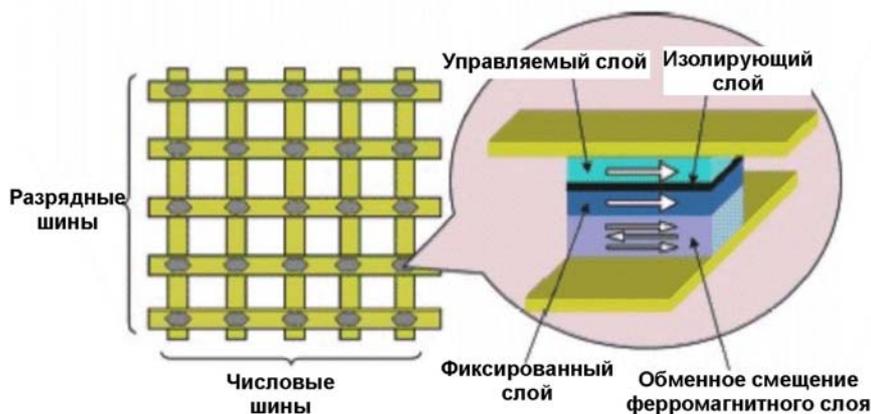


Рис. 14. 11. Принцип действия MRAM.

расположены в виде квадратной сетки.

Данные записываются путем пропускания тока через проводящие линии, расположенные выше и ниже этих элементов, называемых, соответственно, разрядными (bit lines) и числовыми (word lines) линиями (или шинами). Ток, протекающий по плоскому проводнику,

генерирует магнитное поле, направленное в плоскости проводника перпендикулярно направлению тока. Т.е., ток, протекающий в направлении x, генерирует магнитное поле в направлении y, и наоборот. Чтобы произвести запись по определенному адресу используют магнитную анизотропию и гистерезис материала. Перемагничивание однодоменной частицы, как следует из рассмотрения

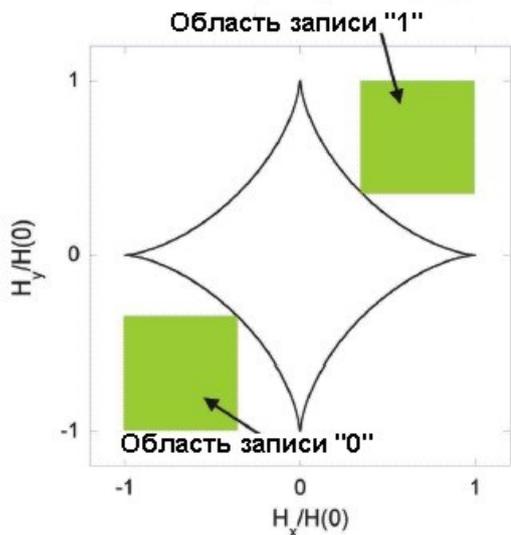


Рис. 14.12. Астроида Стонера-Волфарта.

в главе IX, происходит путем вращения вектора намагничения. Однодоменная модель Стонера-Волфарта предполагает неизменную длину вектора намагничения, пренебрегает тепловыми эффектами. Согласно этой модели угловая зависимость магнитного поля описывается зависимостью  $H(\varphi) = H(0)[\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi]^{-2/3}$ , (14.1) где  $H(\varphi)$  – переключающее поле (т.е. напряженность магнитного поля, требуемая для записи), приложенное под углом  $\varphi$  к оси легкого намагничения и  $H(0)$  – переключающее поле при  $\varphi=0$ . Если полное внешнее поле складывается из x-компоненты,  $H_x$ , и y-компоненты,  $H_y$ , как в случае MRAM, где  $H_x$  обусловлено током числовой шины, а  $H_y$  – разрядной шины,

$$H_x^{2/3} + H_y^{2/3} \geq H(0)^{2/3}. \quad (14.2)$$

Астроида, соответствующая (14.2), изображена на рис. 14.12. Отмечены области  $(H_x, H_y)$ , где одного  $H_x$  или  $H_y$  недостаточно для перемагничивания, и лишь одновременное

воздействие приводит к записи либо «1», либо «0».

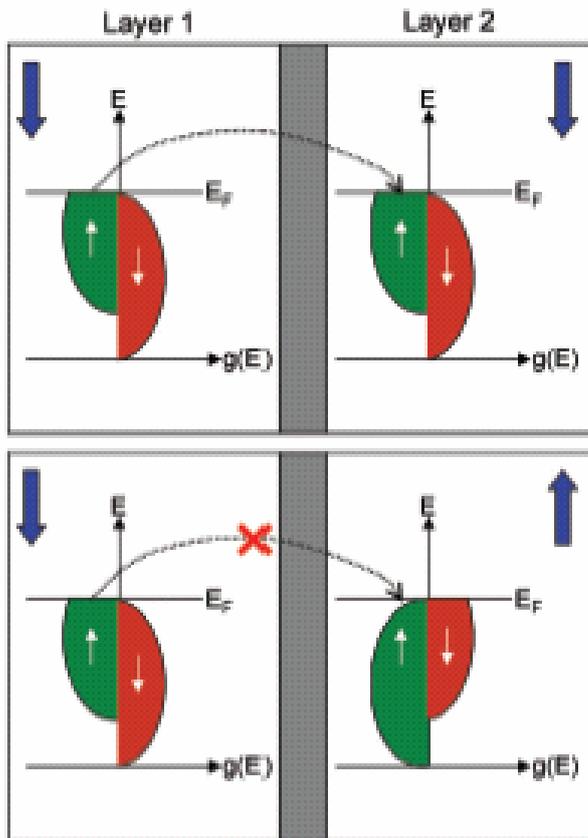


Рис. 14.13. Схематическое изображение плотности d-состояний

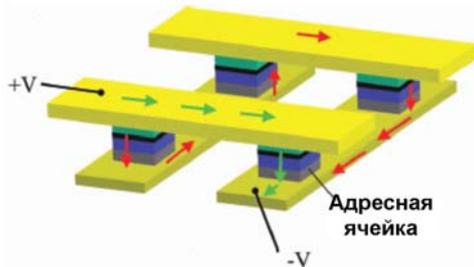


Рис. 14.14. Токовый контур при считывании в MRAM.

Чтение производится с помощью эффекта туннельного или гигантского магнетосопротивления (TMR или GMR), как обсуждалось в главе X и, дополнительно поясняется на рис. 14.13. Изолирующий слой между двумя ферромагнетиками делает невозможным классический ток, однако, при толщине в 1-2 нм, электроны могут туннелировать из одного слоя в другой. Это оказывается возможным лишь при условии, что состояния на уровне Ферми для спинов с данной ориентацией оказываются не заполненными. Присутствие магнитного поля приводит к перераспределению d-состояний. Электроны со спином, ориентированным вдоль поля имеют более низкую энергию, и зона оказывается заполненной. Т.е., при параллельной ориентации намагниченности в ферромагнитных слоях, спины могут туннелировать через разделяющий диэлектрический слой, а при антипараллельной ориентации — не могут. В реальности это означает увеличение сопротивления при антипараллельной ориентации намагниченности.

Технически, это реализуется путем фиксации намагниченности в одном из ферромагнитных слоев за счет обменного взаимодействия на границе с антиферромагнитным слоем, рис. 14.11. Процесс считывания, принципиально прост. Достаточно приложить определенную разность потенциалов к нужным шинам, как изображено на рис. 14.14. При этом, возможны утечки тока по соседним элементам, что усложняет анализ. Это одна из проблем, которые сейчас стоят на повестке для разработчиков MRAM.

Разработки MRAM интенсивно ведутся в IBM, и в ряде других фирм, таких как Siemens, Motorola, Philips, Hewlett Packard, и Hitachi. Еще в 2002 г. Motorola объявила о создании 1 Mb MRAM, который использует один транзистор и туннельный переход на ячейку [2]. Чип имеет конфигурацию 64 Kb x16. Используется 0.6  $\mu\text{m}$  CMOS-технология на пластинах  $\Phi 200$  мм с Cu соединениями. Циклы чтения и записи занимают менее чем 50 нс.

#### Литература.

1. D. A. Thompson, J. S. Best, *Ibm J. Res. Develop.* Vol. 44 no. 3 (2000) p. 311
2. [http://www.motorola.com/mediacenter/news/detail/0,1958,1499\\_1158\\_23,00.html](http://www.motorola.com/mediacenter/news/detail/0,1958,1499_1158_23,00.html)

#### Вопросы.

1. Основные параметры современных жестких магнитных дисков. Достоинства и недостатки ЖМД. Что такое суперпарамагнитный предел?
2. Принципы магнитооптической записи и считывания. Достоинства и недостатки МО-записи.
3. Что такое MRAM? Схема записи и считывания в MRAM.