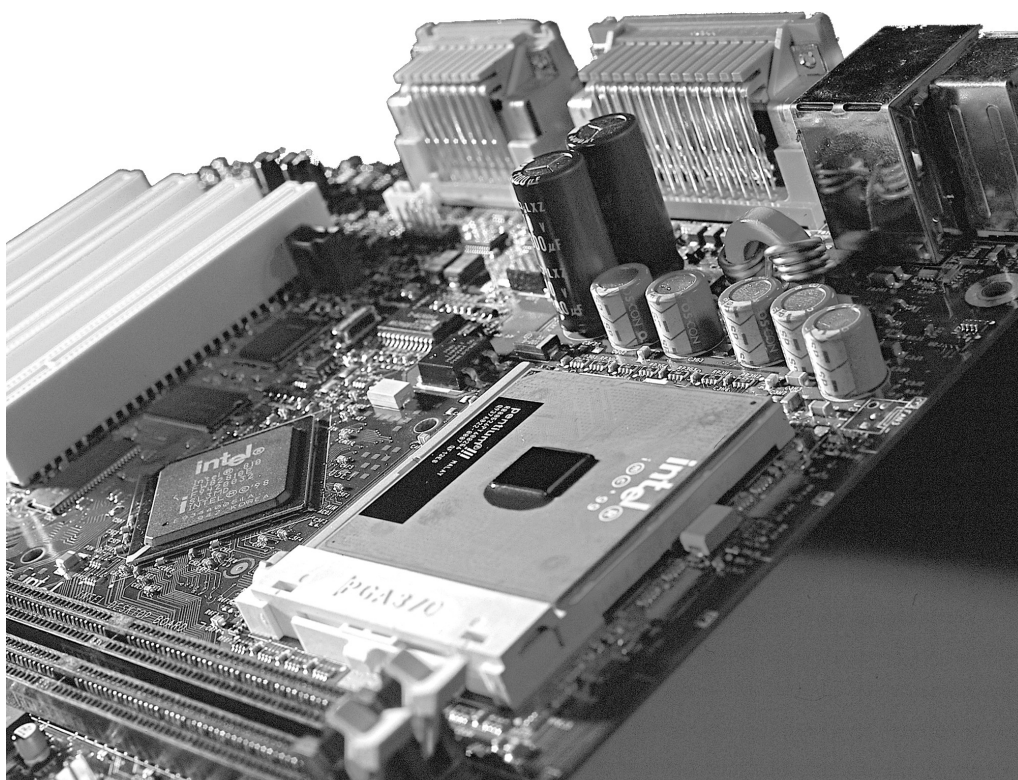


# Глава 8

## Устройства магнитного хранения данных

*(на компакт-диске)*



## Хранение данных на магнитных носителях

Практически во всех персональных компьютерах информация хранится на носителях, использующих магнитные или оптические принципы. При использовании магнитных устройств хранения двоичные данные “превращаются” в небольшие металлические намагниченные частички, расположенные на плоском диске или ленте в виде узора. Этот магнитный “узор” впоследствии может быть расшифрован в поток двоичных данных.

Понять принцип действия магнитных запоминающих устройств довольно сложно, так как магнитные поля невидимы для человеческого глаза. В этой главе рассматриваются принципы, концепции и технологии, используемые в современных компьютерных запоминающих устройствах на магнитных носителях, что поможет понять события, происходящие “за кадром”. Этот материал предназначен для любознательных читателей, которые интересуются теоретическими аспектами работы магнитных устройств; тем не менее для работы с компьютерами, их ремонта, поддержки или модернизации знать все это совершенно необязательно. Данные, которые хранятся на жестких дисках, дискетах, накопителях на магнитной ленте или других запоминающих устройствах на магнитных носителях, имеют большую ценность, чем сами устройства, поэтому понимание принципов обработки данных имеет определенные преимущества. Ясное представление об используемых технологиях позволит справиться с любыми возникающими проблемами.

Приведенная в этой главе информация очень важна для понимания функционирования накопителей на гибких и жестких дисках, ленточных накопителей и других подобных устройств. Изложенный материал можно назвать прелюдией к следующим главам:

- 10, “Накопители со сменными носителями”;
- 11, “Устройства оптического хранения данных”;
- 12, “Установка и конфигурирование накопителей”;
- 13, “Видеоадаптеры и мониторы”;
- 14, “Аудиоаппаратура”.

## История развития устройств хранения данных на магнитных носителях

Долгое время основным устройством хранения данных в компьютерном мире были перфокарты. И только в 1949 году группа инженеров и исследователей компании IBM приступила к разработке нового устройства хранения данных. Именно это и стало точкой отсчета в истории развития магнитных устройств хранения данных, которые буквально взорвали компьютерный мир. 21 мая 1952 года IBM анонсировала модуль ленточного накопителя IBM 726 для вычислительной машины IBM 701.

Четыре года спустя, 13 сентября 1956 года, небольшая команда разработчиков все той же IBM объявила о создании первой дисковой системы хранения данных — 305 RAMAC (Random Access Method of Accounting and Control).

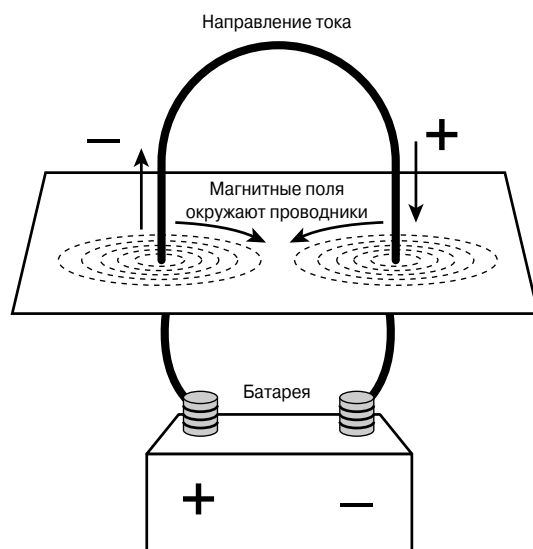
Эта система могла хранить 5 млн. символов (5 Мбайт!) на 50 дисках диаметром 24 дюйма (около 61 см). В отличие от ленточных устройств хранения данных, в системе RAMAC запись осуществлялась с помощью головки в произвольное место поверхности диска. Такой способ заметно повысил производительность компьютера, поскольку данные записывались и извлекались намного быстрее, чем при использовании ленточных устройств.

Магнитные устройства хранения данных прошли путь от RAMAC до современных жестких дисков емкостью 75 Гбайт и размером 3,5 дюйма. Практически все устройства были созданы в исследовательских центрах IBM; например, команда разработчиков под руководством Алана Шугарта (Alan Shugart) в 1971 году представила накопитель на гибких дисках диаметром 8 дюймов. Кроме того, IBM впервые разработала схемы кодирования данных MFM (Modified Frequency Modulation) и RLL (Run Length Limited), головки накопителей — тонкопленочные и

семейство магниторезистивных, технологии накопителей — PRML (Partial Response Maximum Likelihood) и S.M.A.R.T. (Self-Monitoring Analysis and Reporting Technology).

## Как магнитное поле используется для хранения данных

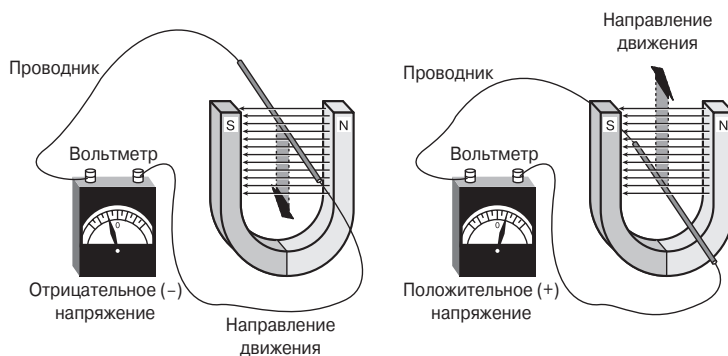
В основе работы магнитных носителей — накопителей на жестких и гибких дисках — лежит такое явление, как *электромагнетизм*. Оно было открыто датским физиком Хансом Эрстедом в 1819 году. Суть его состоит в том, что при пропускании через проводник электрического тока вокруг него образуется магнитное поле (рис. 8.1).



**Рис. 8.1.** При пропускании тока через проводник вокруг него образуется магнитное поле

Это поле воздействует на оказавшееся в нем ферромагнитное вещество. При изменении направления тока полярность магнитного поля также изменяется. Явление электромагнетизма используется в электродвигателях для генерации сил, воздействующих на магниты, которые установлены на вращающемся валу.

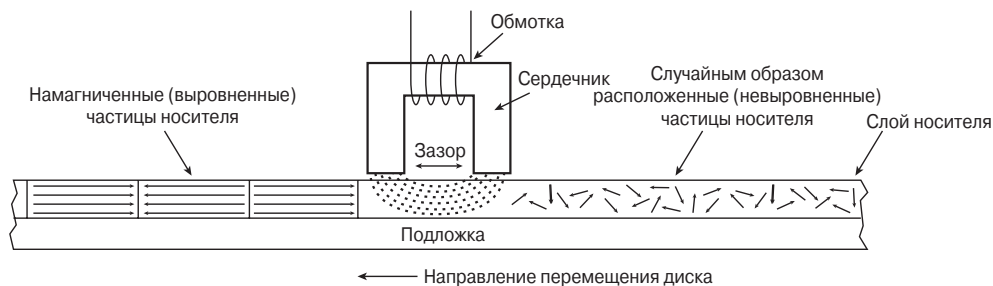
Однако существует и противоположный эффект: в проводнике, на который воздействует переменное магнитное поле, возникает электрический ток. При изменении полярности магнитного поля изменяется и направление электрического тока (рис. 8.2).



**Рис. 8.2.** При перемещении проводника в магнитном поле в нем генерируется электрический ток

Например, внутри обмоток генератора электрического тока, который используется в автомобилях, есть ротор с катушкой возбуждения, при вращении которой в обмотках генератора возникает электрический ток. Благодаря такой взаимной “симметрии” электрического тока и магнитного поля существует возможность записывать, а затем считывать данные на магнитном носителе.

Головка чтения/записи в любом дисковом накопителе состоит из U-образного ферромагнитного сердечника и намотанной на него катушки (обмотки), по которой может протекать электрический ток. При пропускании тока через обмотку в сердечнике (магнитопроводе) головки создается магнитное поле (рис. 8.3). При переключении направления протекающего тока полярность магнитного поля также изменяется. В сущности, головки представляют собой электромагниты, полярность которых можно очень быстро изменить, переключив направление пропускаемого электрического тока.



**Рис. 8.3.** Головка чтения/записи

Магнитное поле в сердечнике частично распространяется в окружающее пространство благодаря наличию зазора, “пропиленного” в основании буквы U. Если вблизи зазора располагается другой ферромагнетик (рабочий слой носителя), то магнитное поле в нем локализуется, поскольку подобные вещества обладают меньшим магнитным сопротивлением, чем воздух. Магнитный поток, пересекающий зазор, замыкается через носитель, что приводит к поляризации его магнитных частиц (доменов) в направлении действия поля. Направление поля и, следовательно, остаточная намагниченность носителя зависят от полярности электрического поля в обмотке головки.

Гибкие магнитные диски обычно делают на лавсановой, а жесткие — на алюминиевой или стеклянной подложке, на которую наносится слой ферромагнитного материала. Рабочий слой в основном состоит из окиси железа с различными добавками. Магнитные поля, создаваемые отдельными доменами на чистом диске, ориентированы случайным образом и взаимно компенсируются на любом сколько-нибудь протяженном (макроскопическом) участке поверхности диска, поэтому его остаточная намагниченность равна нулю.

Магнитное поле, генерируемое головкой чтения/записи, “перескакивает” зазор между концами U-образного сердечника. Пройти по проводнику значительно легче, чем преодолевать воздушную прослойку, поэтому магнитное поле отклоняется от конца сердечника, используя поверхность близлежащего ферромагнитного носителя в качестве кратчайшего пути к другому концу магнита. При прохождении поля через рабочий слой, находящийся непосредственно под сердечником, происходит поляризация магнитных частиц, что приводит к их ориентации по направлению действия магнитного поля. Полярность или направление поля, в частности поля, которое индуцируется в среде магнитного носителя, определяется направлением электрического тока, проходящего через обмотку. Смена направления электрического тока приводит к изменению полярности магнитного поля. Расстояние между головкой чтения/записи и поверхностью носителя с развитием магнитных запоминающих устройств постоянно сокращалось. Это дало возможность значительно уменьшить величину зазора между концами сердечника и размер записываемого магнитного домена, а уменьшение размера домена позволило, в свою очередь, повысить плотность записи данных, хранящихся на диске.

При прохождении магнитного поля через носитель, частицы, оказавшиеся под зазором сердечника, ориентируются по направлению действия поля, которое индуцируется головкой чтения/записи. Когда отдельные магнитные домены частиц выстраиваются в определенном направлении, их магнитные поля прекращают компенсировать друг друга, что приводит к появлению на этом участке отчетливого магнитного поля. Это локальное поле генерируется множеством магнитных частиц, которые в данном случае функционируют как одно целое, создавая общее поле, имеющее единое направление.

Итак, в результате протекания переменного тока импульсной формы в обмотке головки чтения/записи на вращающемся диске образуется последовательность участков с различной по знаку (направлению) остаточной намагниченностью. Причем наиболее важными в аспекте последующего воспроизведения записанной информации оказываются те зоны, в которых происходит *смена направления остаточного магнитного поля* или просто *зоны смены знака*.

Магнитная головка записывает данные на диск, размещая на нем зоны смены знака. При записи каждого бита (или битов) данных в специальных областях на диске располагаются последовательности *зон смены знака*. Эти области называются *битовыми ячейками*. Таким образом, битовая ячейка — это специальная область на диске, в которой головка размещает зоны смены знака. Геометрические размеры такой ячейки зависят от тактовой частоты сигнала записи и скорости, с которой перемещаются относительно друг друга головка и поверхность диска. *Ячейка перехода* — это область на диске, в которую можно записать только одну зону смены знака. При записи отдельных битов данных или их групп в ячейках формируется характерный “узор” из зон смены знака, зависящий от способа *кодирования информации*. Это связано с тем, что в процессе переноса данных на магнитный носитель каждый бит (или группа битов) с помощью специального кодирующего устройства преобразуется в серию электрических сигналов, не являющихся точной копией исходной последовательности импульсов.

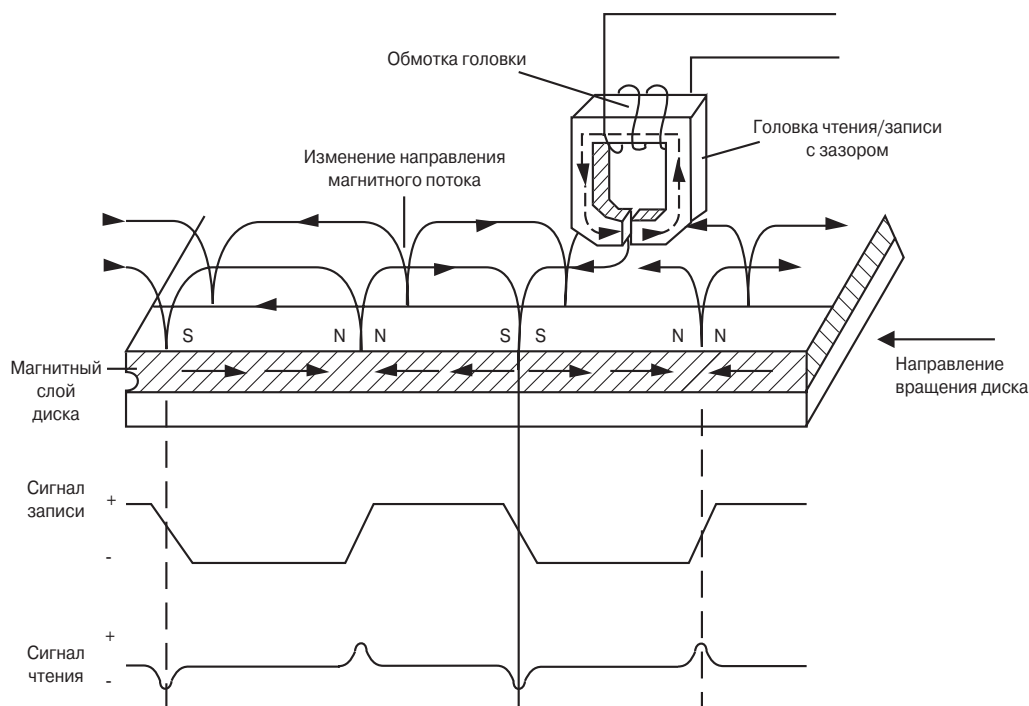
#### **Замечание**

Сегодня самыми распространенными способами кодирования являются модифицированная частотная модуляция (Modified Frequency Modulation — MFM) и кодирование с ограничением длины поля записи (Run Length Limited — RLL). Для записи на гибкие диски используется метод MFM, а на жесткие — MFM и несколько вариантов метода RLL. Подробнее о способах кодирования речь идет несколько ниже.

При записи напряжение прилагается к головке, и по мере изменения его полярности регистрируемая полярность магнитного поля также изменяется. Зоны смены знака записываются (регистрируются) в тех точках, в которых происходит изменение полярности. Это может показаться странным, но во время считывания головка выдает не совсем тот сигнал, который был записан; вместо этого она генерирует импульс напряжения, или выброс, только в тех точках, в которых пересекает зону смены знака.

В сущности, во время считывания информации с диска головка ведет себя как детектор зон смены знака, выдавая импульсы напряжения при каждом пересечении такой зоны. На тех участках, где не происходит смены знака, импульсы не генерируются (выбросы отсутствуют). На рис. 8.4 в графическом виде представлена взаимосвязь между формами импульсов (сигналов) во время считывания и записи и зонами смены знака, записанными на диске.

Записываемые данные представляют собой волновые импульсы прямоугольной формы, соответствующие положительным или отрицательным значениям напряжения, которые приводят к поляризации магнитного носителя в том или ином направлении. Когда меняется полярность напряжения, остаточная намагниченность диска также изменяет полярность. Во время считывания головка регистрирует зоны смены знака и выдает соответствующие импульсы. Другими словами, сигнал соответствует нулевому напряжению, если не обнаружены переходы от положительного знака к отрицательному или наоборот. Импульсы появляются только в тех случаях, когда головка пересекает зоны смены знака на магнитном носителе. Зная тактовую частоту, схема устройства или контроллера определяет, попадает ли импульс (и, следовательно, зона смены знака) в данную ячейку перехода.



**Рис. 8.4.** Запись и считывание информации с магнитного диска

Амплитуда сигнала, поступающего с головки при считывании, очень мала, поэтому проблема шумов и помех является достаточно острой. Для усиления сигнала используются высокочувствительные устройства. После усиления сигнал поступает на декодирующие схемы, которые предназначены для восстановления потока данных, идентичного (теоретически!) потоку, поступавшему на накопитель при выполнении записи.

Итак, запись и считывание информации с диска основаны на принципах электромагнетизма. При записи данных на диск электрический ток пропускается через электромагнит (головку устройства), в результате чего создаются зоны намагниченности, которые и сохраняются на диске. Данные считываются с диска при перемещении головки над его поверхностью; при этом головка регистрирует изменения в зонах намагниченности и в результате генерирует слабые электрические сигналы, указывающие на наличие или отсутствие зон смены знака в записанных сигналах.

### Конструкции головок чтения/записи

По мере развития технологии производства дисковых накопителей совершенствовались и конструкции головок чтения/записи. Первые головки представляли собой сердечники с обмоткой (электромагниты). По современным меркам их размеры были огромными, а плотность записи — чрезвычайно низкой. За прошедшие годы конструкции головок прошли долгий путь развития от первых головок с ферритовыми сердечниками до современных типов.

В данном разделе описаны типы головок, применяемые в накопителях на жестких дисках. Существуют следующие типы головок:

- ферритовые;
- с металлом в зазоре (MIG);
- тонкопленочные (TF);
- магниторезистивные (MR);
- гигантские магниторезистивные (GMR).

## Ферритовые головки

Классические *ферритовые головки* впервые были использованы в накопителе Winchester 30-30 компании IBM. Их сердечники делаются на основе прессованного феррита (на основе окиси железа). Магнитное поле в зазоре возникает при протекании через обмотку электрического тока. В свою очередь, при изменениях напряженности магнитного поля вблизи зазора в обмотке возникает электродвижущая сила. Таким образом, головка является универсальной, т.е. может использоваться как для записи, так и для считывания. Размеры и масса ферритовых головок больше, чем у тонкопленочных; поэтому, чтобы предотвратить их нежелательные контакты с поверхностью дисков, приходится увеличивать зазор.

Первоначальная (монокристаллическая) конструкция ферритовых головок за время их существования была значительно усовершенствована. Были разработаны, в частности, так называемые *стеклоферритовые (композитные) головки*, небольшой ферритовый сердечник которых установлен в керамический корпус. Ширина сердечника и магнитного зазора таких головок меньше, что позволяет повысить плотность размещения дорожек записи. Кроме того, снижается их чувствительность к внешним магнитным помехам.

В 1980-х годах стеклоферритовые головки широко использовались в дешевых накопителях, например ST-225 компании Seagate. По мере увеличения емкости накопителей ферритовые головки были полностью вытеснены другими разновидностями. Ферритовые головки непригодны для записи на носители с большой коэрцитивной силой, их частотная характеристика ограничена, а чувствительность низка (плохое соотношение «сигнал–шум»). Главное достоинство ферритовых головок — их дешевизна.

## Головки с металлом в зазоре

*Головки с металлом в зазоре (Metal-In-Gap — MIG)* появились в результате усовершенствования конструкции композитной ферритовой головки. В таких головках магнитный зазор, расположенный в задней части сердечника, заполнен металлом. Благодаря этому существенно уменьшается склонность материала сердечника к магнитному насыщению, что позволяет повысить магнитную индукцию в рабочем зазоре и, следовательно, выполнить запись на диск с большей плотностью. Кроме того, градиент магнитного поля, создаваемого головкой с металлом в зазоре, выше, а это означает, что на поверхности диска формируются намагниченные участки с более четко выраженными границами (уменьшается ширина зон смены знака). Эти головки позволяют использовать носители с большой коэрцитивной силой и тонкопленочным рабочим слоем. За счет уменьшения общей массы и улучшения конструкции такие головки могут располагаться ближе к поверхности носителя.

Головки с металлом в зазоре бывают двух видов: односторонние и двусторонние (т.е. с одним и с двумя металлизированными зазорами). В односторонних головках прослойка из магнитного сплава расположена только в заднем (нерабочем) зазоре, а в двусторонних — в обоих. Слой металла наносится методом *вакуумного напыления*. Индукция насыщения магнитного сплава примерно вдвое больше, чем у феррита, что, как уже отмечалось, позволяет осуществлять запись на носители с большой коэрцитивной силой, которые используются в накопителях высокой емкости. Двусторонние головки в этом отношении лучше односторонних.

Благодаря своим неоспоримым преимуществам некоторое время назад головки с металлом в зазоре полностью заменили традиционные ферритовые головки в высококачественных накопителях. Но постоянно возрастающие требования к емкости жестких дисков привели к тому, что их сейчас постепенно вытесняют тонкопленочные головки.

## Тонкопленочные головки

*Тонкопленочные (Thin Film — TF)* головки производятся почти по той же технологии, что и интегральные схемы, т.е. путем фотолитографии. На одной подложке можно «напечатать» сразу несколько тысяч головок, которые получаются в результате маленькими и легкими.

Рабочий зазор в тонкопленочных головках можно сделать очень узким, причем его ширина регулируется в процессе производства путем наращивания дополнительных слоев немаг-

нитного алюминиевого сплава. Алюминий полностью заполняет рабочий зазор и хорошо защищает его от повреждений (сколов краев) при случайных контактах с диском. Собственно сердечник делается из сплава железа и никеля, индукция насыщения которого в 2–4 раза больше, чем у феррита.

Формируемые тонкопленочными головками участки остаточной намагниченности на поверхности диска имеют четко выраженные границы, что позволяет добиться очень высокой плотности записи. Благодаря небольшому весу и малым размерам головок можно значительно уменьшить просвет между ними и поверхностью дисков по сравнению с ферритовыми и MIG-головками: в некоторых накопителях его величина не превышает 0,05 мкм. В результате, во-первых, повышается остаточная намагниченность участков поверхности носителя, а во-вторых, увеличивается амплитуда сигнала и улучшается соотношение “сигнал–шум” в режиме считывания, что в итоге сказывается на достоверности записи и считывания данных. При тех плотностях расположения дорожек и размещения данных вдоль дорожки, которые характерны для современных накопителей, сигнал воспроизведения с обычной ферритовой головки просто “потерялся” бы в шумах и помехах. Наконец, благодаря небольшой высоте тонкопленочных головок при тех же размерах корпуса накопителя удастся установить большее количество дисков.

В свое время тонкопленочные головки были значительно дороже остальных. Усовершенствование технологии производства и повышение требований к емкости накопителей привели, с одной стороны, к снижению стоимости тонкопленочных головок (она стала сопоставимой, а иногда и более низкой, чем цена ферритовых головок и головок с металлом в зазоре), а с другой — к их более широкому распространению.

Во многих накопителях объемом от 100 Мбайт до 2 Гбайт используются тонкопленочные головки, особенно в накопителях малого формфактора. Тонкопленочные головки пришли на смену головкам с металлом в зазоре в накопителях наиболее популярных формфакторов, однако теперь им самим на смену пришли магниторезистивные головки.

### **Магниторезистивные головки**

*Магниторезистивные (Magnetoresistive — MR)* головки появились сравнительно недавно. Они разработаны IBM и позволяют добиться самых высоких значений плотности записи и быстродействия накопителей. Впервые магниторезистивные головки были установлены в накопителе на жестких дисках емкостью 1 Гбайт (3,5") компании IBM в 1991 году.

Все головки являются детекторами, т.е. регистрируют изменения в зонах намагниченности и преобразуют их в электрические сигналы, которые могут быть интерпретированы как данные. Однако при магнитной записи существует одна проблема: при уменьшении магнитных доменов носителя снижается уровень сигнала головки и существует вероятность принять шум за настоящий сигнал. Для решения этой проблемы необходимо иметь эффективную головку чтения, которая более достоверно сможет определить наличие сигнала.

Довольно давно был открыт еще один эффект магнетизма: при воздействии на проводник внешнего магнитного поля его сопротивление изменяется. При прохождении обычной головки над зоной смены знака на выходах обмотки формируется импульс напряжения. Иначе обстоит дело при считывании данных с помощью магниторезистивной головки. Ее сопротивление оказывается различным при прохождении над участками с разным значением остаточной (постоянной) намагниченности. Это явление и послужило основой для создания компанией IBM нового типа считывающих головок. Через головку протекает небольшой постоянный измерительный ток, и при изменении сопротивления падение напряжения на ней также изменяется.

Поскольку на основе магниторезистивного эффекта можно построить только считывающее устройство, магниторезистивная головка — это на самом деле две головки, объединенные в одну конструкцию. При этом записывающая часть представляет собой обычную индуктивную головку, а считывающая — магниторезистивную. Поскольку функции считывания и записи разделены между двумя отдельными узлами, каждый из них может быть спроектирован так, чтобы наилучшим образом выполнять предусмотренную операцию. Амплитуда выходного сигнала у такой головки примерно в четыре раза больше, чем у индуктивной.



Магниторезистивные головки дороже и сложнее головок других типов, поскольку в их конструкции есть добавочные элементы, а технологический процесс включает несколько дополнительных этапов. Основные отличия магниторезистивных головок от обычных таковы:

- к ним должны быть подведены дополнительные провода для подачи измерительного тока на резистивный датчик;
- в процессе производства используется 4–6 дополнительных масок (фотошаблонов);
- благодаря высокой чувствительности магниторезистивные головки более восприимчивы к внешним магнитным полям, поэтому их приходится тщательно экранировать.

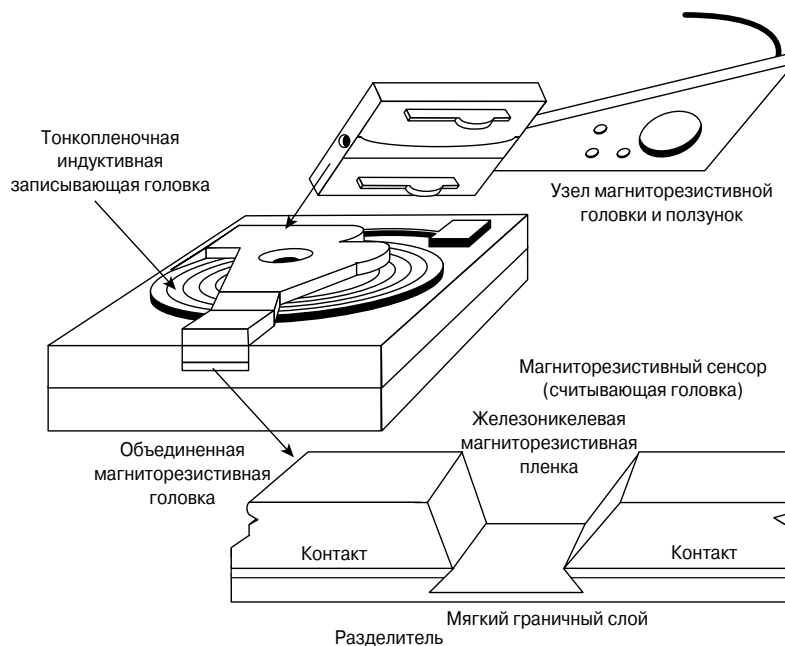
Устройства, созданные на основе магниторезистивного эффекта, позволяют считывать данные, но не могут быть использованы для их записи, поэтому магниторезистивная головка в действительности представляет собой две различные головки, объединенные в одну конструкцию. В эту конструкцию входит стандартная тонкопленочная (TF) головка, используемая для записи данных, и магниторезистивная головка для их чтения. Поскольку две различные головки встроены в один блок, каждая из них оптимизирована в соответствии с выполняемой задачей. Ферритовые и тонкопленочные головки, а также головки с металлом в зазоре (MIG) называются одноззорными головками, так как для чтения и записи данных используется один и тот же зазор. В магниторезистивных головках для выполнения каждой операции требуется зазор определенной величины.

При разработке головок с одним рабочим зазором приходится идти на компромисс при выборе его ширины. Дело в том, что для улучшения параметров головки в режиме считывания нужно уменьшать ширину зазора (для увеличения разрешающей способности), а при записи зазор должен быть шире, поскольку при этом магнитный поток проникает в рабочий слой на большую глубину (“намагничивая” его по всей толщине). В магниторезистивных головках с двумя зазорами каждый из них может иметь оптимальную ширину. Еще одна особенность рассматриваемых головок заключается в том, что их записывающая (тонкопленочная) часть формирует на диске более широкие дорожки, чем это необходимо для работы считывающего узла (магниторезистивного). В данном случае считывающая головка “собирает” с соседних дорожек меньше магнитных помех.

Схема типичной магниторезистивной головки IBM, т.е. весь узел головки вместе с ползунком, представлена на рис. 8.5. Считывающий элемент головки (магниторезистивный сенсор) состоит из железоникелевой пленки, отделенной небольшим промежутком от магнитного слоя. Сопротивление этой пленки изменяется в зависимости от магнитного поля. Защитные слои предохраняют сенсор считывающего элемента от “случайных” магнитных полей. В большинстве конструкций вторая защита выполняет функции записывающего элемента. Такой тип головок называют *объединенными* магниторезистивными головками. Записывающий элемент представляет собой обычную тонкопленочную индуктивную головку.

Считывающий элемент, представляющий собой магниторезистивный сенсор, состоит из железоникелевой (NiFe) пленки, разделенной на участки, промежутки между которыми заполнены магнитно-мягким слоем. Сопротивление железоникелевой пленки в магнитном поле изменяется. Считывающий элемент магниторезистивного сенсора защищается от разрушительного воздействия соседнего или случайного магнитного поля экранирующим слоем. Во многих конструкциях второй экранирующий слой выполняет также роль одного из полюсов записывающего элемента, который называется *объединенной* магниторезистивной головкой. Элемент записи представляет собой не магниторезистивный блок, а традиционную тонкопленочную индуктивную головку.

Магниторезистивная головка, созданная компанией IBM, включает в себя конструкцию Soft Adjacent Layer (SAL), состоящую из магниторезистивной железоникелевой пленки, разделенной на отдельные слои, промежутки между которыми заполнены магнитно-мягким слоем, имеющим высокое электрическое сопротивление. В этой конструкции при прохождении магнитного поля через магниторезистивный сенсор сопротивление железоникелевого слоя изменяется.



**Рис. 8.5.** Поперечное сечение магниторезистивной головки

С повышением плотности записи магниторезистивные элементы, входящие в головки чтения/записи, становились все меньше и меньше. В современных головках ширина пленки, находящейся между боковыми контактами, составляет полмикрона или даже меньше.

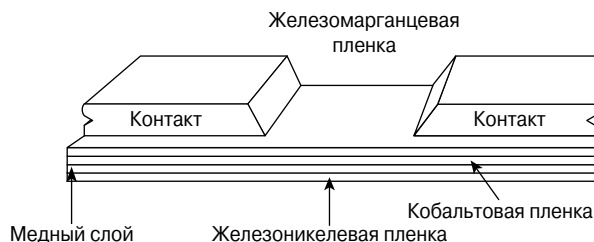
### Гигантские магниторезистивные головки

В 1997 году IBM анонсировала новый тип магниторезистивных головок, обладающих намного большей чувствительностью. Они были названы *гигантскими магниторезистивными головками* (*Giant Magnetoresistive — GMR*). Такое название они получили на основе используемого эффекта (хотя по размеру были меньше стандартных магниторезистивных головок). Конструкция довольно проста: традиционная магниторезистивная головка, в которой кроме железоникелевого слоя используется еще несколько дополнительных слоев. В магниторезистивных головках при изменении знака потока, проходящего через магнитный носитель, изменяется сопротивление железоникелевой пленки. В гигантских магниторезистивных головках эту функцию выполняют две пленки, разделенные сверхтонким медным проводящим слоем.

Эффект GMR был открыт в 1988 году в кристаллах, подвергнутых воздействию сильного магнитного поля (мощность которого была в 1 000 раз выше, чем у полей, используемых в накопителях на жестких дисках). Ученые Петер Грюнберг (Peter Gruenberg) из Германии и Альберт Ферт (Albert Fert) из Франции обнаружили, что в магнитном поле сопротивление проводников, состоящих из чередующихся сверхтонких слоев различных металлов, изменяется в довольно широком диапазоне. Основная конструкция, используемая в гигантских магниторезистивных головках, представляет собой разделительный слой немагнитного материала, расположенный между двумя слоями магнитных металлов. Один из этих магнитных слоев является *закрепленным*, т.е. имеющим заданную магнитную ориентацию. Другой же считается *свободным*, что означает возможность свободного изменения направления или ориентации. Магнитные материалы стремятся выровняться в одном направлении. Таким образом, если разделительный слой будет достаточно тонок, свободный слой приобретет ту же ориентацию, что и закрепленный. Было обнаружено, что ориентация свободного слоя периодически изме-

няется, то совпадая с магнитной ориентацией закрепленного слоя, то приобретая строго противоположное направление. Когда слои ориентированы в одном направлении, их общее сопротивление имеет относительно низкую величину; при противоположной магнитной ориентации общее сопротивление слоев значительно возрастает.

Считывающий элемент гигантской магниторезистивной головки показан на рис. 8.6.



**Рис. 8.6.** Поперечное сечение магнитной головки GMR

При прохождении слабого магнитного поля (характерного, например, для жестких дисков) через гигантскую магниторезистивную головку происходит изменение ориентации частиц свободного магнитного слоя по отношению к магнитному направлению закрепленного слоя, что значительно повышает общее сопротивление. Как вы уже знаете, подобное явление возникает в результате эффекта GMR. Физическая природа перепадов сопротивления обусловлена направлением собственного вращения электронов в различных слоях.

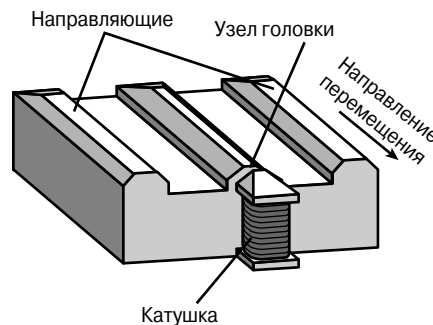
В декабре 1997 года все та же IBM анонсировала накопитель емкостью 16,8 Гбайт (3,5"), в котором используются головки GMR. Использование эффекта GMR дает возможность сохранять до 20 Гбайт данных на каждом квадратном дюйме поверхности магнитного носителя, что позволяет создавать накопители стандартного 3,5-дюймового формфактора (3,5 дюйма в ширину и 1 дюйм в высоту) объемом 100 Гбайт.

## Ползунки

*Ползунком* называется деталь конструкции, благодаря которой головка поддерживается в подвешенном положении на нужном расстоянии от поверхности диска. Сам ползунк при этом тоже не соприкасается с поверхностью носителя. В большинстве случаев эта деталь по форме напоминает катамаран с двумя боковыми “поплавками” и центральной “рулевой рубкой” — магнитной головкой (рис. 8.7).

Тенденция к постоянному уменьшению размеров накопителей приводит к тому, что все их составные части, в том числе и ползунки, тоже уменьшаются. Например, размер стандартного мини-винчестера составляет 0,160×0,126×0,034 дюйма (4×3,2×0,86 мм). Сейчас в большинстве накопителей высокой емкости и малогабаритных моделях используются ползунки меньших размеров (уменьшенных на 50%): 0,08×0,063×0,017 дюйма (2×1,6×0,43 мм). В новейших моделях жестких дисков размеры ползунков, уменьшенных на 70%, достигают 0,049×0,039×0,012 дюйма. При сборке ползунков этого типа используется гибкий соединительный кабель (FIC) и микросхема на керамической основе (COC), что позволяет полностью автоматизировать процесс сборки.

В табл. 8.1 представлены характеристики различных типов ползунков, используемых в накопителях на жестких дисках.

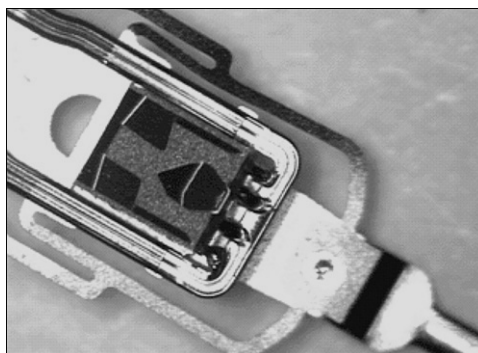


**Рис. 8.7.** Внешний вид ползунка

**Таблица 8.1. Типы ползунков накопителей на жестких дисках**

Тип ползунка	Год появления на рынке	Относительный размер	Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм	Масса, мг
Mini	1980	100%	4,00	3,20	0,86	55,0
Micro	1986	70%	2,80	2,24	0,60	16,2
Nano (+ Pressure)	1991	62%	2,50	1,70	0,43	7,8
Nano (– Pressure)	1994	50%	2,00	1,60	0,43	5,9
Pico	1997	30%	1,25	1,00	0,30	1,6
Femto	2003	20%	0,85	0,70	0,23	0,6

Уменьшение размеров ползунка приводит к снижению массы подвижной системы, состоящей из головки, ползунка и рычага перемещения головки. Это, в свою очередь, позволяет перемещать их с большим ускорением, т.е. уменьшить время перехода с одной дорожки на другую и в итоге — время доступа к данным. Кроме того, при этом можно уменьшить размеры зоны “парковки” головок (“посадочной полосы”) и соответственно увеличить полезную площадь дисков. Наконец, благодаря меньшей площади контактной поверхности ползунка уменьшается неизбежный износ поверхности носителя в процессе раскручивания и остановки дисков. На рис. 8.8 представлена увеличенная фотография ползунка Femto, закрепленного на блоке головок.



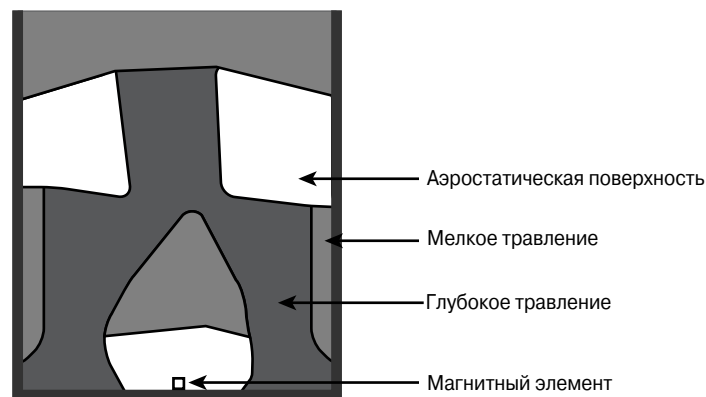
**Рис. 8.8.** Увеличенное изображения блока головок с ползунком Femto. Фотография любезно предоставлена компанией Hitachi Global Storage Technologies

В новейших конструкциях нижней стороне ползунков придается специальная форма, благодаря которой высота “полета” головок над поверхностью диска (величина воздушного просвета) поддерживается примерно одинаковой при работе как на внешних, так и на внутренних цилиндрах. При использовании обычных ползунков просвет между головкой и рабочим слоем диска существенно изменяется при переходе от внешних дорожек к внутренним и наоборот. Это связано с различиями в линейных скоростях разных участков поверхности диска относительно головок (линейная скорость зависит от радиуса вращения). Чем выше скорость, тем больше величина просвета. Такой эффект крайне нежелателен, особенно в новых накопителях с зонной записью, в которых линейная плотность записи (вдоль дорожек) одинакова на всех цилиндрах. В этом случае для нормального считывания и записи величина воздушного просвета между головкой и рабочим слоем диска должна оставаться постоянной. Эту проблему можно решить, придав поверхностям ползунков специальную форму, что и делается в накопителях с зонной записью.

Структура ползунка Femto показана на рис. 8.9.

Ползунок Femto состоит из трех основных областей сложной формы, благодаря которым обеспечивается постоянная высота размещения головки над поверхностью пластины и минимальное изменение высоты в условиях низкого давления. Область мелкого травления создает “порог”, что позволяет создать положительное давление под аэростатической поверхностью и

тем самым сместить ползунок от поверхности диска. Область глубокого травления создает отрицательное давление с противоположной стороны, что позволяет сместить ползунок ближе к поверхности диска. Комбинация положительного и отрицательного давления позволяет сбалансировать давление рычага на ползунок, смещающее его к поверхности диска, благодаря чему ползунок располагается на необходимом расстоянии от нее. Баланс положительного и отрицательного давления стабилизирует положение ползунка и уменьшает колебания головки, характерные для ползунков более старых конструкций. Первым диском, в котором использовался ползунок Femto, был 2,5-дюймовый диск Hitachi 7K60, представленный в мае 2003 года.



**Рис. 8.9.** Структура ползунка Femto

## Способы кодирования данных

Данные на магнитном носителе хранятся в аналоговой форме. В то же время сами данные представлены в цифровом виде, так как являются последовательностью нулей и единиц. При выполнении записи цифровая информация, поступающая на магнитную головку, создает на диске магнитные домены соответствующей полярности. Если во время записи на головку поступает положительный сигнал, магнитные домены поляризуются в одном направлении, а если отрицательный — в противоположном. Когда меняется полярность записываемого сигнала, происходит также изменение полярности магнитных доменов.

Чтобы оптимальным образом расположить импульсы в сигнале записи, необработанные исходные данные пропускаются через специальное устройство, которое называется *кодером/декодером* (*encoder/decoder*). Это устройство преобразует двоичные данные в электрические сигналы, оптимизированные в контексте размещения зон смены знака на дорожке записи. Во время считывания кодер/декодер выполняет обратное преобразование: восстанавливает из сигнала последовательность двоичных данных. За прошедшие годы было разработано несколько методов кодирования данных, причем главной целью разработчиков было достижение максимальной эффективности и надежности записи и считывания информации.

В других описаниях процесс кодирования данных может выглядеть значительно проще, но при этом упускаются многие факторы, определяющие надежность жесткого диска, в частности синхронизация. Инженеры и разработчики постоянно стремятся разместить все больший и больший объем информации, имея на каждом квадратном дюйме носителя ограниченное количество областей изменения полярности магнитного потока (т.е. перемагничивания). В результате была получена схема, в которой при декодировании информации учитывается не только изменение знака магнитного потока, но и наличие сигнала синхронизации между зонами различной полярности. Чем выше точность синхронизации процесса реверсирования магнитного потока, тем больше объем информации, которую можно закодировать (или впоследствии декодировать) с помощью данных синхронизации.

При работе с цифровыми данными особое значение приобретает синхронизация. Во время считывания или записи очень важно точно определить момент каждой смены знака. Если синхронизация отсутствует, то момент смены знака может быть определен неправильно, в результате чего неизбежна потеря или искажение информации. Чтобы предотвратить это, работа передающего и принимающего устройств должна быть строго синхронизирована. Существует два пути решения данной проблемы. Во-первых, синхронизировать работу двух устройств, передавая специальный *сигнал синхронизации* (или *синхросигнал*) по отдельному каналу связи. Во-вторых, объединить синхросигнал с сигналом данных и передать их вместе по одному каналу. Именно такова суть большинства способов кодирования данных. Например, если запись нулевого бита выполняется с помощью магнитных доменов одной полярности, создаваемых на диске в течение определенного периода времени, или ячейки данных, то 10 нулевых бит, записанных в одну строку, будут представлять собой 10 одинаковых последовательно расположенных участков одной полярности или 10 ячеек, не имеющих зон изменения знака.

Теперь представьте, что во время считывания данных произошло некоторое рассогласование схемы синхронизации кодирующего устройства. Увеличение частоты тактовых импульсов может привести к тому, что кодирующее устройство воспримет длинный участок, состоящий из 10 ячеек, не имеющих зон изменения знака, как 9 ячеек данных. При понижении частоты синхронизации запись может быть распознана уже как 11 ячеек данных. И в том и в другом случае это приведет к ошибке считывания, т.е. первоначально записанные биты данных будут считаны по другой схеме. Чтобы избежать появления ошибок синхронизации при кодировании/декодировании, необходимо строго синхронизировать процессы чтения и записи данных. Для этого следует синхронизировать работу двух устройств, передавая специальный *сигнал синхронизации* по отдельному каналу. Можно также объединить сигнал данных с сигналом синхронизации, а затем передать их по одному каналу. Подобное объединение сигналов используется в большинстве схем кодирования данных.

Добавление сигнала синхронизации к передаваемым данным служит гарантией того, что устройства связи будут точно интерпретировать все отдельные однобитовые элементы. Каждый бит информации ограничен двумя ячейками, содержащими определенные тактовые переходы. При передаче синхронизирующих сигналов вместе с данными синхронизация сохраняется даже в том случае, когда носитель содержит длинные цепочки совершенно одинаковых нулей. К сожалению, ячейки переходов, необходимые только для синхронизации процессов, занимают место на диске, которое могло бы использоваться для записи данных.

Поскольку количество зон смены знака, которые можно записать на диске, ограничено возможностями технологий производства носителей и головок, при разработке дисковых накопителей изобретаются такие способы кодирования данных, с помощью которых можно было бы «втиснуть» как можно больше битов данных в минимальное количество зон смены знака. При этом приходится учитывать, что часть из них все равно будет использоваться только для синхронизации.

Хотя разработано множество разнообразных методов, сегодня реально используются только три из них:

- частотная модуляция (FM);
- модифицированная частотная модуляция (MFM);
- кодирование с ограничением длины поля записи (RLL).

Далее эти методы рассматриваются на примере ASCII-кода символа “X”.

### **Частотная модуляция (FM)**

Метод кодирования *FM* (*Frequency Modulation* — *частотная модуляция*) был разработан прежде других и использовался при записи на гибкие диски так называемой *одинарной плотности* (*single density*) в первых ПК. Емкость таких односторонних дискет составляла всего 80 Кбайт. В 1970-х годах запись по методу FM использовалась во многих устройствах, но сейчас от него полностью отказались.

## Модифицированная частотная модуляция (MFM)

Основной целью разработчиков метода *MFM* (*Modified Frequency Modulation* — *модифицированная частотная модуляция*) было сокращение количества зон смены знака для записи того же объема данных по сравнению с FM-кодированием и соответственно увеличение потенциальной емкости носителя. При этом способе записи количество зон смены знака, используемых только для синхронизации, сокращается. Синхронизирующие переходы записываются только в начало ячеек с нулевым битом данных и только в том случае, если ему предшествует нулевой бит. Во всех остальных случаях синхронизирующая зона смены знака не формируется. Благодаря такому уменьшению количества зон смены знака при той же допустимой плотности их размещения на диске информационная емкость по сравнению с записью по методу FM удваивается.

Вот почему диски, записанные с помощью метода MFM, часто называют *дисками двойной плотности* (*double density*). Поскольку при рассматриваемом способе записи на одно и то же количество зон смены знака приходится вдвое больше “полезных” данных, чем при FM-кодировании, скорость считывания и записи информации на носитель также удваивается.

При записи и воспроизведении данных по методу MFM требования, предъявляемые к точности синхронизации, более жесткие, чем при FM-кодировании. Однако все сложности были успешно преодолены, и MFM стал самым популярным методом кодирования на долгие годы.

В табл. 8.2 приведено соответствие между битами данных и зонами смены знака.

**Таблица 8.2. Последовательность зон смены знака при записи по методу MFM**

Бит данных	Последовательность зон смены знака
1	NT*
0 с предшествующим 0	TN
0 с предшествующей 1	NN

\* T — смена знака есть; N — смены знака нет.

## Кодирование с ограничением длины поля записи (RLL)

Сегодня наиболее популярен метод кодирования с ограничением длины поля записи (*Run Length Limited* — *RLL*). Он позволяет разместить на диске в полтора раза больше информации, чем при записи по методу MFM, и в три раза больше, чем при FM-кодировании. При использовании этого метода происходит кодирование не отдельных битов, а целых групп, в результате чего создаются определенные последовательности зон смены знака.

Метод RLL был разработан IBM и сначала использовался в дисковых накопителях больших машин. В конце 1980-х годов его стали использовать в накопителях на жестких дисках ПК, а сегодня он применяется почти во всех ПК.

Как уже отмечалось, при записи по методу RLL одновременно кодируются целые группы битов. Термин *Run Length Limited* (с ограничением длины пробега) составлен из названий двух основных параметров, которыми являются минимальное (длина пробега) и максимальное (предел пробега) число ячеек перехода, которые можно расположить между двумя зонами смены знака. Изменяя эти параметры, можно получать различные методы кодирования, но на практике используются только два из них: RLL 2,7 и RLL 1,7.

Методы FM и MFM, в сущности, являются частными вариантами RLL. Так, например, FM-кодирование можно было бы назвать *RLL 0,1*, поскольку между двумя зонами смены знака может располагаться максимум одна и минимум нуль ячеек перехода. Метод MFM в этой терминологии можно было бы обозначить *RLL 1,3*, так как в этом случае между двумя зонами смены знака может располагаться от одной до трех ячеек перехода. Однако при упоминании этих методов обычно используются более привычные названия *FM* и *MFM*.

До последнего времени самым популярным был метод RLL 2,7, поскольку он позволял достичь высокой плотности записи данных (в 1,5 раза больше по сравнению с методом MFM) и достоверности (надежности) их воспроизведения. При этом соотношение размеров зон

смены знака и участков с постоянной намагниченностью оставалось тем же, что и при методе MFM. Однако для накопителей очень большой емкости метод RLL 2,7 оказался недостаточно надежным. В большинстве современных жестких дисков высокой емкости используется метод RLL 1,7, который позволяет увеличить плотность записи в 1,27 раза по сравнению с MFM при оптимальном соотношении между размерами зон смены знака и участков с постоянной намагниченностью. За счет некоторого снижения плотности записи (по сравнению с RLL 2,7) удалось существенно повысить надежность считывания данных. Это особенно важно, поскольку в накопителях большой емкости носители и головки уже приближаются к пределу возможностей современной технологии. И так как при разработке современных жестких дисков приоритет принадлежит надежности считывания данных, можно ожидать, что в ближайшем будущем метод RLL 1,7 достигнет наибольшего распространения.

Еще один редко используемый вариант RLL — метод RLL 3,9. Иногда его называют *усовершенствованным RLL* или *ARRL (Advanced RLL)*. С его помощью можно достичь еще большей плотности записи информации, чем при использовании метода RLL 2,7. Но, к сожалению, надежность ARRL-кодирования очень невысока; его пытались использовать в некоторых контроллерах, но их выпуск был вскоре прекращен.

Понять сущность RLL-кодирования без наглядных примеров довольно сложно, поэтому рассмотрим метод RLL 2,7, так как именно он чаще всего используется. Даже для этого конкретного варианта можно построить множество (тысячи!) таблиц перекодировки различных последовательностей битов в серии зон смены знака. Остановимся на таблице, которая использовалась IBM при создании кодеров/декодеров.

Согласно этой таблице (табл. 8.3) группы данных длиной 2, 3 и 4 бит преобразуются в серии зон смены знака длиной 4, 6 и 8 битовых ячеек соответственно. При этом кодирование последовательностей битов происходит так, чтобы расстояние между зонами смены знаков было не слишком маленьким, но и не очень большим.

Первое ограничение вызвано тем, что величины разрешений головки и магнитного носителя, как правило, являются фиксированными. Второе ограничение необходимо для того, чтобы обеспечить синхронизацию устройств.

**Таблица 8.3. Последовательность зон смены знака при записи по методу RLL 2,7**

Бит данных	Последовательность зон смены знака
10	NTNN*
11	TNNN
000	NNNTNN
010	TNNTNN
011	NNTNNN
0010	NNTNTNN
0011	NNNTNNN

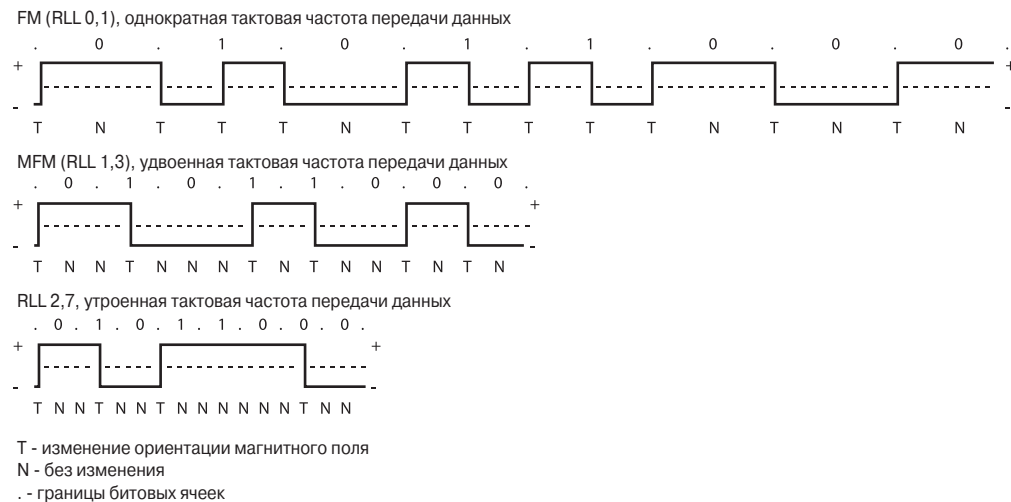
\* T — смена знака есть; N — смены знака нет.

При внимательном изучении этой таблицы можно заметить, что кодировать, например, байт 00000001 нельзя, поскольку его нельзя составить из комбинации приведенных в таблице групп битов. Однако на практике при этом никаких проблем не возникает. Дело в том, что контроллер не оперирует байтами, а формирует сразу целые секторы записи. Поэтому, если ему попадается такой байт, он просто начинает искать подходящую для разбивки на группы комбинацию с учетом следующего байта последовательности. Затруднение может возникнуть только в том случае, если указанный байт последний в секторе. В этой ситуации кодер, установленный в контроллере, просто дописывает в конец последнего байта несколько дополнительных битов. При последующем считывании они отбрасываются, и последний байт воспроизводится таким, каким он должен быть.



## Сравнение способов кодирования

На рис. 8.10 показаны диаграммы сигналов, формируемых при записи на жесткий диск ASCII-кода символа “X” для трех различных способов кодирования.



**Рис. 8.10.** Сигналы, формируемые во время записи ASCII-кода символа “X” при способах кодирования FM, MFM и RLL 2,7

В верхней строке каждой из этих диаграмм показаны отдельные биты данных (01011000) в битовых ячейках, границами которых являются синхронизирующие сигналы, обозначенные точками. Под этой строкой изображен сам сигнал, представляющий собой чередование положительных и отрицательных значений напряжения, причем в моменты смены полярности напряжения происходит запись зоны смены знака. В нижней строке показаны ячейки перехода, причем T обозначает ячейку, содержащую зону смены знака, а N — ячейку, в которой зоны смены знака нет.

Разобраться в FM-кодировании очень просто. В каждой битовой ячейке содержится две ячейки перехода: одна для синхронизирующего сигнала, другая для самих данных. Все ячейки перехода, в которых записаны сигналы синхронизации, содержат зоны смены знака. В то же время ячейки перехода, в которых записаны данные, содержат зону смены знака только в том случае, если значение бита равно логической единице. При нулевом значении бита зона смены знака не формируется. Поскольку в нашем примере значение первого бита — 0, он будет записан в виде комбинации TN. Значение следующего бита равно 1, и ему соответствует комбинация TT. Третий бит — тоже нулевой (TN) и т.д. С помощью приведенной выше диаграммы FM-кодирования легко проследить всю кодирующую комбинацию для рассматриваемого примера байта данных. Отметим, что при таком способе записи зоны смены знака могут следовать непосредственно одна за другой; в терминах RLL-кодирования это означает, что минимальный “пробег” равен нулю. С другой стороны, максимально возможное количество пропущенных подряд зон смены знака не может превышать единицы — вот почему FM-кодирование можно обозначить как *RLL 0,1*.

При MFM-кодировании в ячейках также записывается синхросигнал и биты данных. Но, как видно из схемы, ячейки для записи синхросигнала содержат зону смены знака только в том случае, если значения и текущего и предыдущего битов равны нулю. Первый бит слева — нулевой, значение же предыдущего бита в данном случае неизвестно, поэтому предположим, что он тоже равен нулю. При этом последовательность зон смены знака будет выглядеть как TN. Значение следующего бита равно единице, которой всегда соответствует комбинация NT.

Следующему нулевому биту предшествует единичный, поэтому ему соответствует последовательность NN. Аналогичным образом можно проследить процесс формирования сигнала записи до конца байта. Легко заметить, что минимальное и максимальное число ячеек перехода между любыми двумя зонами смены знака равно 1 и 3 соответственно. Следовательно, MFM-кодирование в терминах RLL может быть названо методом *RLL 1,3*.

Труднее всего разобраться в диаграмме, иллюстрирующей метод *RLL 2,7*, поскольку в нем кодируются не отдельные биты, а их группы. Первая группа слева, совпадающая с одной из приведенных в табл. 9.2 комбинаций, состоит из трех битов: 010. Она преобразуется в такую последовательность зон смены знака: TNNTNN. Следующим двум битам (11) соответствует комбинация TNNN, а последним трем (000) — NNNTNN. Как видите, в данном примере для корректного завершения записи дополнительные биты не потребовались.

Обратите внимание, что в этом примере минимальное и максимальное число пустых ячеек перехода между двумя зонами смены знака равно 2 и 6 соответственно, хотя в другом примере максимальное количество пустых ячеек перехода может равняться 7. Именно поэтому такой способ кодирования называется *RLL 2,7*. Поскольку в данном случае записывается еще меньше зон смены знака, чем при MFM-кодировании, частоту сигнала синхронизации можно увеличить в 3 раза по сравнению с методом FM и в 1,5 раза по сравнению с методом MFM. Это позволяет на таком же пространстве диска записать больше данных. Но необходимо отметить, что минимальное и максимальное физическое расстояние на поверхности диска между любыми двумя зонами смены знака одинаково для всех трех упомянутых методов кодирования.

## Декодеры PRML

В последнее время в накопителях вместо традиционных усилителей считывания с пиковыми детекторами стала использоваться так называемая технология *PRML (Partial-Response, Maximum-Likelihood* — частичное определение, максимальное правдоподобие). Это позволяет повысить плотность расположения зон смены знака на диске в среднем на 40% и на столько же увеличить емкость носителя.

Увеличение плотности записи приводит к тому, что пиковые значения напряжения при считывании данных могут накладываться друг на друга. При использовании метода PRML контроллер анализирует поток данных с головки посредством фильтрации, обработки и алгоритма определения (элемент частичного определения), а затем предсказывает последовательность битов, которые этот поток данных наилучшим образом представляет (элемент максимального правдоподобия). Обработка данных осуществляется цифровыми методами. В настоящее время в самых новых накопителях на жестких дисках с успехом используется описанная схема PRML.

Практичность методов считывания информации определяется точностью распознавания данных на битовом уровне. Может показаться, что точность описанного метода невысока, но использование фильтров обработки цифрового сигнала позволило значительно снизить уровень шума, тем самым повысив плотность размещения зон изменения полярности на жестком диске. Это, в свою очередь, дало возможность повысить плотность записи данных. Технология PRML с успехом используется в схемах кодирования/декодирования, применяемых в накопителях емкостью 2 Гбайт и выше.

## Измерение емкости накопителя

В декабре 1998 года Международная электротехническая комиссия (МЭК), занимающаяся стандартизацией в области электротехники, представила в качестве официального стандарта систему названий и символов единиц измерения для использования в области обработки и передачи данных. До недавнего времени при одновременном использовании десятичной и двоичной систем измерений один мегабайт мог быть равен как 1 000 000 байт ( $10^6$ ), так и 1 048 576 байт ( $2^{20}$ ). Стандартные сокращения единиц, используемые для измерения емкости магнитных и других накопителей, приведены в табл. 8.4.

Таблица 8.4. Стандартные единицы измерения емкости накопителей

Аббревиатура	Название	Величина	Величина
K	Кило	1 000	1 000
Ki	Kibi	1 000	1 024
M	Mega	1 000 000	1 000 000
Mi	Mibi	1 000 000	1 048 576
G	Гига	1 000 000 000	1 000 000 000
Gibi	Gibi	1 000 000 000	1 073 741 824
T	Тера	1 000 000 000 000	1 000 000 000 000
T	Tebi	1 000 000 000 000	1 099 511 627 776
P	Пета	$10^{15}$	1 000 000 000 000 000
Pi	Pibi	$2^{50}$	1 125 899 906 842 624

В соответствии с новым стандартом 1 MiB (mebibyte) содержит  $2^{20}$  (1 048 576) байт, а 1 Мбайт (мегабайт) —  $10^6$  (1 000 000) байт. К сожалению, не существует общепринятого способа отличать двоичные кратные единицы измерения от десятичных. Другими словами, английское сокращение MB (или M) может обозначать как миллионы байт, так и мегабайты. Как правило, объемы памяти измеряются в двоичных единицах, но емкость накопителей — и в десятичных и в двоичных, что часто приводит к недоразумениям. Заметьте также, что в английском варианте биты (bits) и байты (Bytes) отличаются регистром первой буквы (она может быть строчной или прописной). Например, при обозначении миллионов битов используется строчная буква “b”, в результате чего единица измерения *миллион бит в секунду* обозначается Mbps, в то время как MBps означает *миллион байт в секунду*.

### Поверхностная плотность записи

Основной критерий оценки накопителей на жестких дисках — *поверхностная плотность записи* (рис. 8.11). Она определяется как произведение линейной плотности записи вдоль дорожки, выражаемой в битах на дюйм (Bits Per Inch — BPI), и количества дорожек на дюйм (Tracks Per Inch — TPI). В результате поверхностная плотность записи выражается в Мбит/дюйм<sup>2</sup> или Гбит/дюйм<sup>2</sup>. На основании этого значения можно сделать вывод об эффективности того или иного способа записи данных. В современных накопителях размером 3,5 дюйма величина этого параметра составляет 10–20 Гбит/дюйм<sup>2</sup>, а в экспериментальных моделях достигает 40 Гбит/дюйм<sup>2</sup>. Это позволяет выпускать накопители емкостью более 400 Гбайт.

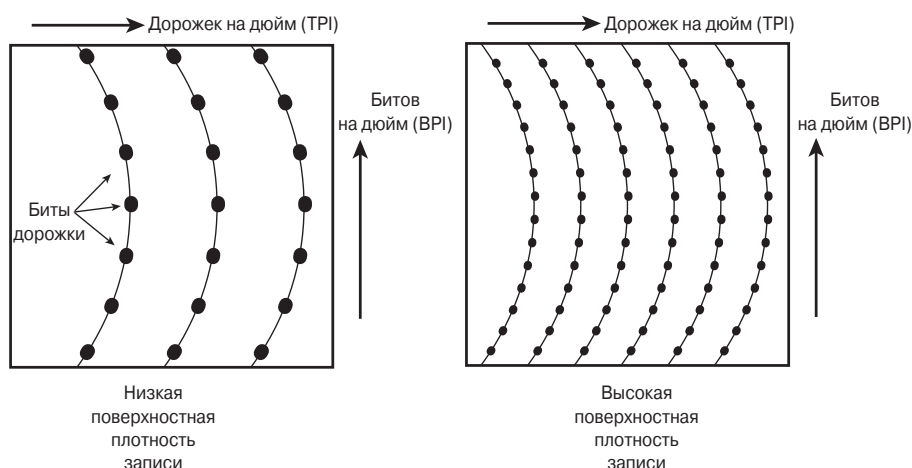
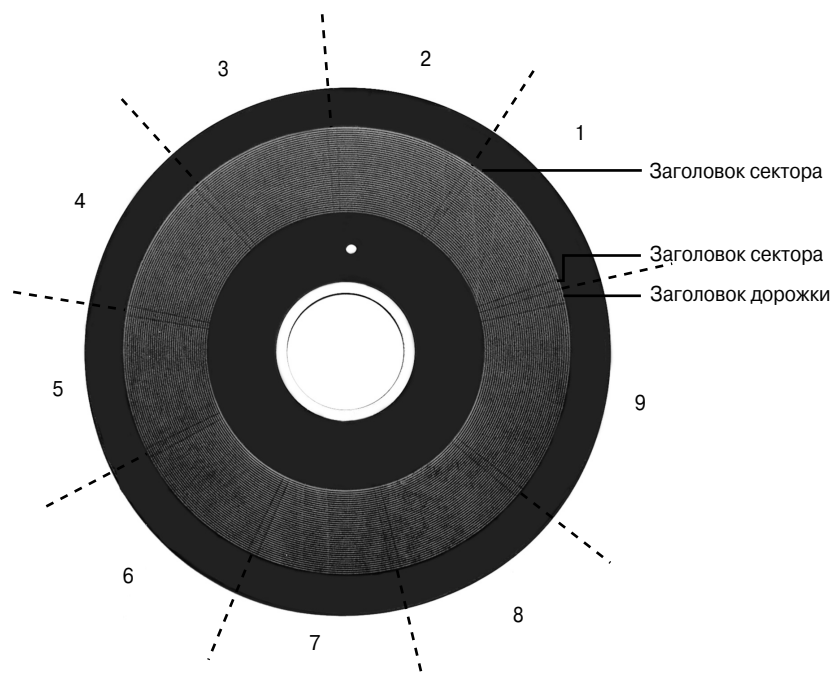


Рис. 8.11. Графическое представление поверхностной плотности записи

В накопителях данные записываются в виде дорожек; каждая дорожка, в свою очередь, состоит из секторов. На рис. 8.12 показан магнитный диск 5,25-дюймовой дискеты на 360 Кбайт, состоящий из 40 дорожек на каждой стороне, а каждая дорожка разделена на 9 секторов. В начале каждого сектора находится особая область, в которую записываются идентификационная и адресная информация. В области перед первым сектором записываются заголовки дорожки и сектора. Перед остальными секторами записываются лишь заголовки сектора. Область между заголовками предназначена непосредственно для записи данных.



**Рис. 8.12.** Схема магнитного носителя 5,25-дюймовой дискеты на 360 Кбайт

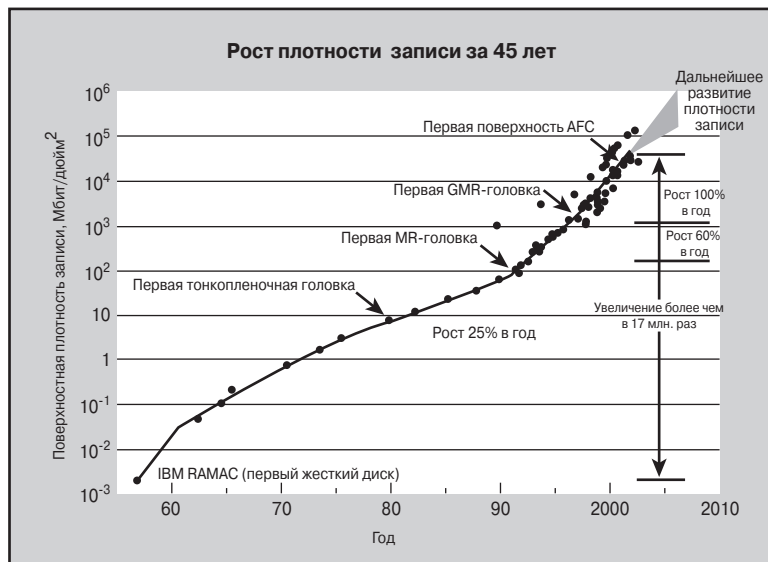
Обратите внимание, что девятый сектор длиннее всех остальных. Это сделано для того, чтобы компенсировать отличия в скорости вращения различных накопителей. Большая часть поверхности рассматриваемой дискеты не используется; это связано с длиной внешних и внутренних секторов.

Поверхностная плотность записи неуклонно увеличивается. При появлении первого устройства магнитного хранения данных IBM RAMAC в 1956 году рост поверхностной плотности записи достигал 25% в год, а с начала 1990-х годов — 60%. Разработка и внедрение магниторезистивных (1991 год) и гигантских магниторезистивных (1997 год) головок, а также накопителей, использующих антиферромагнитные двойные слои (2001 год), еще больше ускорили увеличение поверхностной плотности записи. За 48 лет, прошедших с момента появления первых устройств магнитного хранения данных, поверхностная плотность записи повысилась более чем в 17 млн. раз.

В следующие пять лет (при сохранении существующих темпов роста) плотность записи достигнет 100 Гбит/дюйм<sup>2</sup>. Эта плотность записи соответствует точке суперпарамагнитного эффекта (магнитные домены настолько малы, что становятся нестабильными при комнатной температуре). Использование новых технологий, например материалов с высокой коэрцитивностью и записи с вертикальной поляризацией, позволит увеличить плотность записи до 400 Гбит/дюйм<sup>2</sup> и более. Одна из перспективных технологий недалекого будущего — голо-

графические устройства хранения информации, в которых данные записываются с помощью лазера в “трехмерном пространстве” (кристаллические пластина или куб).

На рис. 8.13 представлен график увеличения поверхностной плотности записи устройств магнитного хранения данных с момента их первого появления до настоящего времени.



**Рис. 8.13.** Эволюция поверхностной плотности записи устройств магнитного хранения данных

Дальнейшее повышение поверхностной плотности записи связано с созданием новых типов носителей (с использованием некристаллических стекловидных материалов) и конструкций головок, с применением метода псевдоконтактной записи, а также более совершенных методов обработки сигналов. Для достижения более высокого уровня поверхностной плотности необходимо создать такие головки и диски, которые могли бы функционировать при минимальном зазоре между ними.

Чтобы увеличить количество данных, размещаемых на жестком диске определенного размера, необходимо уменьшить расстояние между дорожками и повысить точность позиционирования головки чтения/записи по отношению к дорожкам носителя. Это означает также, что с увеличением емкости жесткого диска расстояние между головкой и поверхностью носителя во время операций чтения/записи должно уменьшаться. В некоторых накопителях зазор между головкой и поверхностью жесткого диска не превышает 10 нанометров (0,01 микрона), что примерно соответствует толщине клеточной мембраны. Для сравнения: толщина человеческого волоса в среднем равна 80 микрон, что в 8 000 раз больше величины зазора между головкой чтения/записи и поверхностью носителя в некоторых накопителях. В перспективе дальнейшее повышение поверхностной плотности будущих накопителей возможно только при контактной (или почти контактной) записи данных.

### Повышение плотности записи с помощью AFC

В 1990 году специалисты компании IBM обнаружили, что металлический рутений является наиболее эффективным немагнитным материалом, который может использоваться в качестве промежуточного слоя в различных устройствах, например в гигантских магниторезистивных головках (GMR). Тем не менее прошло более 10 лет, прежде чем это открытие было использовано для повышения плотности размещения информации в дисковых накопителях, что позволило увеличить плотность записи жестких дисков.

В мае 2001 года IBM начала выпуск серии портативных компьютеров с 2,5-дюймовыми жесткими дисками Travelstar, созданными по технологии AFC. В ноябре 2001 года были представлены накопители Deskstar GXP емкостью 80 и 120 Гбайт, созданные по той же технологии.

Благодаря тончайшему (толщиной в три атома) слою рутения, который использовался для разделения магнитных слоев, находящихся с обеих сторон каждого жесткого диска, плотность записи данных повысилась до 25 Гбит/дюйм<sup>2</sup>. Жесткие диски, используемые в обычных накопителях, имеют только один магнитный слой. Носители, в которых используется слой металлического рутения, или, говоря техническим языком, носители с антиферромагнитными двойными слоями (AFC) получили шутовское название *пыльца эльфов* (“pixie dust”). В настоящее время IBM использует носители AFC в накопителях портативных, настольных и серверных компьютеров. Помимо этого, лицензию на выпуск носителей AFC приобрели другие компании, выпускающие накопители и жесткие диски.

Разработка носителей AFC связана с тем, что дальнейшее повышение плотности информации в магнитных запоминающих устройствах возможно только при уменьшении размеров магнитных областей жесткого диска. Тем не менее чрезмерное уменьшение размеров этих областей может вызвать так называемый *эффект суперпарамагнетизма*, который заключается в постепенном размагничивании магнитных областей.

Тонкий слой рутения, расположенный между двумя магнитными слоями, позволяет направить магнитные частицы этих слоев в противоположные по отношению друг к другу стороны. Трехслойная конструкция отличается от традиционного магнитного слоя большей физической толщиной, но, несмотря на это, противоположная магнитная ориентация слоев позволяет носителям функционировать как одинарный слой со значительно меньшей общей толщиной. В результате головки чтения/записи накопителей получают возможность записывать меньшие сигналы высокой плотности, тем самым увеличивая емкость запоминающих устройств данного размера без риска ухудшения сигнала. На рис. 8.14 показаны обычный однослойный носитель и жесткий диск, созданный по технологии AFC.

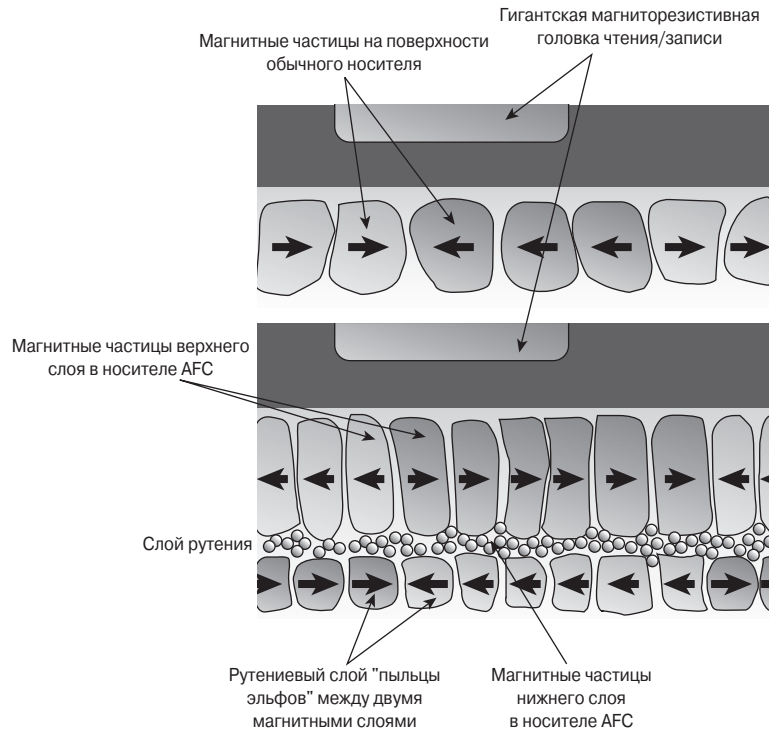
Увеличение плотности записи в гигантских магниторезистивных головках (GMR) достигается за счет использования двух магнитных слоев, разделенных тонким проводящим слоем. В носителях AFC используется тот же принцип. В сущности, носители этого типа представляют собой пример использования принципов, относящихся к магниторезистивным головкам чтения/записи, для развития записывающих слоев запоминающих устройств. Предполагается, что со временем емкость запоминающих устройств на носителях AFC увеличится в четыре раза, что позволит создать накопители с емкостью до 100 Гбит/дюйм<sup>2</sup>.

### Перпендикулярная магнитная запись

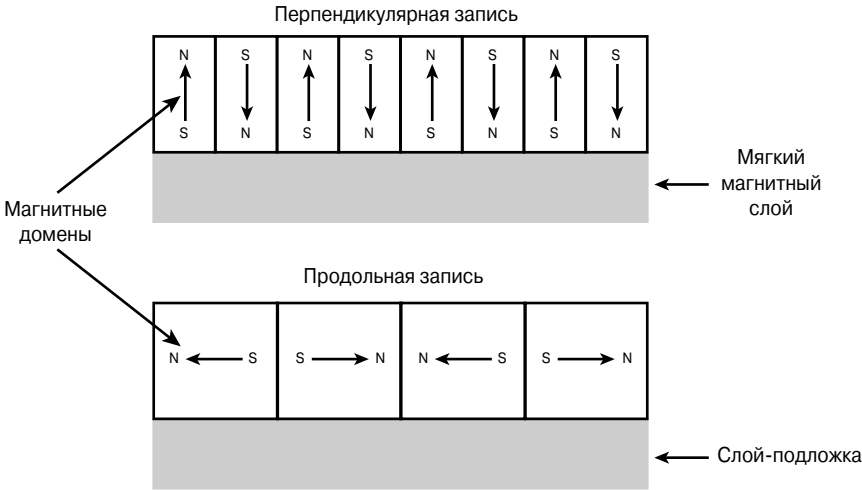
Практически все жесткие диски и накопители на магнитных носителях записывают данные, применяя алгоритмы продольной записи; при этом магнитные домены располагаются вдоль поверхности носителя. Однако в случае перпендикулярной записи ситуация кардинально меняется: магнитные домены располагаются вертикально, т.е. перпендикулярно поверхности носителя. Благодаря этому становится возможным увеличение плотности записи, поскольку при вертикальной ориентации домены занимают гораздо меньшую плотность, чем при горизонтальной (рис. 8.15). В настоящее время все ведущие производители жестких дисков занимаются разработкой продуктов с перпендикулярной записью, так как это позволяет увеличить плотность сигнала еще больше, чем при использовании носителей на основе “магнитной пыли” AFC.

При использовании традиционных методов магнитной записи магнитные домены располагаются продольным образом, т.е. вдоль поверхности пластины. Это не только накладывает ограничения на плотность размещения доменов, но и приводит к проявлению так называемого суперпарамагнитного эффекта, при котором отдельные домены, будучи расположенными слишком близко друг к другу, начинают оказывать влияние друг на друга; это приводит к возможному изменению полярности домена, а значит, и к нестабильности. Довольно давно исследователи пришли к выводу, что, если удастся расположить домены перпендикулярно

относительно поверхности носителя (так называемая вертикальная запись), можно не только увеличить плотность записи, но и значительно увеличить “сопротивляемость” доменов суперпарамагнитному эффекту. И хотя основная концепция была разработана достаточно давно, практическая реализация оказалась крайне сложной задачей.



**Рис. 8.14.** В традиционных носителях используется только один магнитный слой, тогда как в носителях AFC применено два магнитных слоя, отделенных друг от друга тонким слоем рутения



**Рис. 8.15.** Перпендикулярная и продольная запись

В отличие от головок GMR и носителей AFC (которые можно использовать и в рамках существующих технологий производства накопителей), перпендикулярная запись требует применения головок чтения/записи совершенно другой конструкции. Различие между перпендикулярной и продольной записью показано на рис. 8.15. Перпендикулярная запись позволяет увеличить плотность размещения доменов минимум в два раза.

При использовании перпендикулярной записи головки конструируются таким образом, чтобы запись осуществлялась “внутри” носителя. Для этого используется толстый внутренний магнитный слой, который как будто “отражает” часть магнитного поля. Это позволяет доменам располагаться вертикально, а значит, увеличивается плотность их размещения без нежелательного взаимодействия.

Перпендикулярная запись была впервые продемонстрирована в конце XIX века датским ученым Вальдемаром Паульсеном (Valdemar Poulsen), который, кроме всего прочего, продемонстрировал возможность магнитной записи звука. После этого в развитии перпендикулярной записи не было особых сдвигов, пока в 1976 году профессор Шунити Ивасаки не доказал преимущества перпендикулярной магнитной записи. Затем в 1978 году доктор Т. Фудзивара, выполнив немалый объем работ в рамках исследований, финансируемых компанией Toshiba Corporation, представил дискету, оптимизированную под перпендикулярную запись.

Единственным устройством, в котором использовалась эта технология, был недолговечный накопитель на 2,88-дюймовых гибких магнитных дисках, представленный компанией Toshiba в 1989 году. Начиная с 1991 года этот накопитель стал использоваться в системах IBM PS/2; целый ряд производителей начали выпуск подобных накопителей для IBM и других производителей ПК, в том числе Toshiba, Mitsubishi, Sony и Panasonic. Поскольку накопитель 2,88 MB ED способен работать с обычными 3,5-дюймовыми дискетами 1,44 MB HD, так как разработчики BIOS реализовали поддержку накопителей 2,88 MB в BIOS, а поскольку поддержка данных накопителей была реализована в DOS 5.0 и более поздних версиях операционной системы, переход к дискетам 2,88 Мбайт казался довольно простой задачей. К сожалению, вследствие высокой стоимости накопителей и относительно небольшого увеличения емкости к тому моменту, как на смену классическим дискетам пришли компакт-диски, данные накопители не получили какого-либо серьезного распространения. Несмотря на отсутствие коммерческого успеха у накопителей 2,88 MB ED, компания Toshiba, а также некоторые другие компании продолжали разработку алгоритмов перпендикулярной магнитной записи для других накопителей, особенно для жестких.

В апреле 2002 года компания Read-Rite Corporation, основной производитель головок чтения/записи, сообщила о достижении плотности записи 130 Гбит/дюйм<sup>2</sup> для прототипа накопителя на жестких магнитных дисках, созданного MMC Technology, подразделением компании Maxtor. В ноябре 2002 года компания Seagate Technology сообщила о достижении плотности записи больше 100 Гбит/дюйм<sup>2</sup> для прототипа накопителя на жестких магнитных дисках. В соответствии с результатами двух независимых исследований, опубликованных в 2000 году, при использовании перпендикулярной записи в будущем возможно достижение плотности записи до 500 или даже 1 000 Гбит (1 Тбит) на квадратный дюйм.

Перпендикулярная запись была впервые представлена в коммерчески доступных продуктах (накопителях на жестких магнитных дисках) 16 августа 2005 года, когда подразделение Storage Device Division компании Toshiba анонсировало начало поставок первого в мире жесткого диска с перпендикулярной записью. Подобные накопители в формфакторе 1,8 дюйма нашли применение преимущественно в портативных устройствах, таких, как мультимедийные плееры Apple iPod, однако использовались они и в миниатюрных портативных компьютерах, например в серии Toshiba Libretto. Первыми накопителями в формфакторе 1,8 дюйма с использованием перпендикулярной записи оказались диски объемом 40 и 80 Гбайт (они содержали соответственно одну и две пластины с плотностью записи 49 Гбайт/пластина). Данные накопители характеризовались высочайшим на тот момент значением поверхностной плотности записи — 133 Гбит/дюйм<sup>2</sup> (206 Мбит/мм<sup>2</sup>).



Компания Seagate представила свой первый жесткий диск с перпендикулярной записью Momentus 5400.3 в формфакторе 2,5 дюйма объемом 160 Гбайт. Хотя компания Seagate анонсировала его в июне 2005 года, реально доступен в продаже он стал в первом квартале 2006 года. Компания Seagate также предоставила запись с плотностью 245 Гбит/дюйм<sup>2</sup> и скоростью считывания 480 Мбит/с; также было заявлено о возможности увеличения поверхностной плотности записи 500 Гбит/дюйм<sup>2</sup>, что значительно превышает характеристики современных накопителей с продольной записью. При поверхностной плотности записи 500 Гбит/дюйм<sup>2</sup> накопитель в формфакторе 3,5 дюйма способен хранить до 2 Тбайт, накопитель в формфакторе 2,5 дюйма способен хранить до 500 Гбайт, а накопитель Microdrive в формфакторе 1 дюйм — до 50 Гбайт данных.

Другие производители также заняты разработкой накопителей с перпендикулярной записью. В апреле 2005 года компания Hitachi продемонстрировала перпендикулярную запись с плотностью 230 Гбит/дюйм<sup>2</sup>, что, по мнению компании, позволит ей к 2007 году выпустить накопитель Microdrive объемом 20 Гбайт. Обратите внимание, что накопители Microdrive используются преимущественно в портативных плеерах, таких, как Apple iPod Mini, а также Muvo и Zen Micro компании Creative.

В будущем практически все производители жестких дисков представят накопители, в которых будет применяться перпендикулярная магнитная запись, так как это позволит и дальше увеличивать емкость накопителей на жестких магнитных дисках. (Компания Seagate уже начала поставки накопителей Barracuda 7200.10 емкостью до 750 Гбайт, в которых используется перпендикулярная магнитная запись. — *Примеч. ред.*)

