

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ МАГНИТНОЙ ЗАПИСИ И СЧИТЫВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ

*Казак М.А., студент гр.358301 Хорин В.А., студент гр.358301*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>1</sup> г. Минск, Республика Беларусь*

*Григорьев А.А. – канд. физ.-мат. наук*

**Аннотация.** Данная научная работа посвящена изучению физических принципов магнитной записи и считывания информации, ключевых для современных технологий хранения данных. В работе рассматриваются основные понятия магнитной записи, включая ферромагнетизм и процесс намагничивания. Особое внимание уделено гистерезисным свойствам ферромагнитных материалов, оказывающим существенное влияние на процесс записи и считывания информации. В работе также подробно разбирается принцип записи и считывания, представляющий собой сложный технический процесс, опирающийся на фундаментальные законы электромагнетизма и магнетизма. Полученные результаты могут быть полезны для дальнейшего развития и совершенствования технологий хранения и обработки информации на основе магнитных носителей.

**Ключевые слова.** Сигналограмма, магнитная запись, магнитное поле, ферромагнетизм, намагничивание, домен, гистерезис, запись, считывание, жесткий диск

Под записью сигнала (информации) понимают процесс изменения характеристик носителя записи в соответствии с изменениями характеристик записываемого сигнала во времени. В результате записи на носителе формируется сигналограмма.

Воспроизведение является обратным процессом и сводится к восстановлению записанного сигнала по изменениям характеристик носителя. Процесс ликвидации ранее сделанной записи – сигналограммы – называется стиранием. При взаимодействии с элементом записи на движущемся носителе образуется траектория изменения характеристик носителя, получившая название дорожки записи.

Магнитная запись – способ записи информации путем изменения магнитного состояния носителя и создания в нем распределения намагниченности, соответствующего записываемому сигналу. Намагниченность каждого участка носителя определяется совокупностью намагниченности отдельных частиц (доменов), расположенных в нем. Под действием магнитного внешнего поля (поля головки записи) происходит поворот векторов намагниченности этих частиц и эта ориентация (информация) сохраняется относительно бесконечно долго.

Явления магнетизма основаны на существовании магнитных моментов в атомах. Магнитный момент (п.5) характеризует магнитные свойства вещества, т.е. способность создавать и воспринимать магнитное поле. Опытами Эйнштейна и де Гааза было доказано, что ответственными за магнитные свойства ферромагнетиков (п.12) являются собственные (спиновые) магнитные моменты электронов (а не орбитальные, как у диа- и парамагнетиков (п.2 и п.8)). Атомы элементов, обладающих ферромагнитными свойствами (Fe, Co, Ni), имеют некоторую особенность. В них нарушается последовательность заполнения мест в оболочках и слоях: прежде чем полностью "застроится" нижняя оболочка, начинается заполнение выше расположенной оболочки. В результате электронные спины некоторых внутренних оболочек оказываются нескомпенсированными. Таким образом, ферромагнитными свойствами могут обладать только такие вещества, в атомах которых имеются недостроенные внутренние электронные оболочки. Электроны, определяющие магнитные свойства железа и его сплавов (например, сплава железо-никель-кобальт), находятся на третьей электронной оболочке атома. На рисунке 1 показана модель электронных оболочек атома железа, на которых расположено определенное число электронов.

Электроны на внешней оболочке 4s, как у всех металлов, являются свободными. В ансамбле атомов кристаллической структуры они являются носителями зарядов и обуславливают наличие электронной проводимости. На внутренних оболочках 1s-3p размещается одинаковое количество электронов с положительным и отрицательным зарядами, вследствие чего их магнитные моменты взаимно компенсируются. На оболочке 3d находятся пять электронов с положительным спином и только один — с отрицательным. В результате спинового взаимодействия все оси вращения параллельны между собой. Таким образом, сумма моментов спинов не равна нулю и атом представляет собой — как бы постоянный магнит. На модели, показанной на рисунке 1, магнитное поле атома направлено перпендикулярно плоскости рисунка сверху вниз (векторы-спинов направлены перпендикулярно к плоскости рисунка).



Рисунок 1- Модель магнитного поля атома

Под действием сил так называемого обменного взаимодействия магнитные моменты соседних атомов ориентируются параллельно или антипараллельно друг другу. Если атомы кристаллической структуры располагаются на минимальном расстоянии один от другого, то множество атомов объединяется в домен, который называют также областью Вейса. В пределах домена намагниченность постоянна. Возможность образования доменов является предпосылкой возникновения ферромагнетизма.

Процесс намагничивания ферромагнетика начинается, когда размагниченный материал помещается в магнитное поле. В ферромагнетиках магнитные моменты атомов группируются в области, называемые доменами. В отсутствие внешнего магнитного поля, домены ориентированы случайным образом, так что их магнитные моменты компенсируют друг друга, и материал не проявляет магнетизма, как показано на рисунке 2(а).

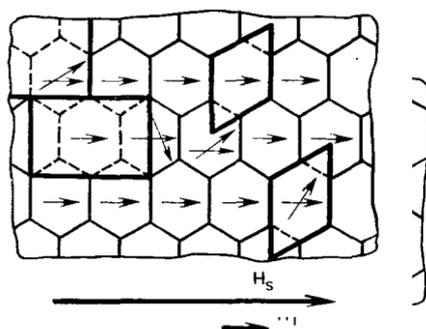


Рисунок 2(а) - Модель ферромагнетика в отсутствие магнитного поля

Когда ферромагнетик помещается в магнитное поле, домены начинают переориентироваться таким образом, чтобы их магнитные моменты выровнялись по направлению поля, как показано на рисунке 2(б). Это приводит к увеличению общей намагниченности материала. Сначала происходит рост доменов, ориентированных вдоль поля, за счет уменьшения доменов с противоположной ориентацией. Этот процесс называется обратимым смещением границ доменов.

При увеличении напряженности магнитного поля начинаются необратимые процессы, связанные с перемещением границ доменов, которые встречают препятствия в виде дефектов кристаллической структуры. Для преодоления этих препятствий требуется дополнительная энергия от внешнего поля.

Эти процессы приводят к тому, что даже после удаления внешнего поля некоторая намагниченность сохраняется в материале, что называется остаточным магнетизмом.

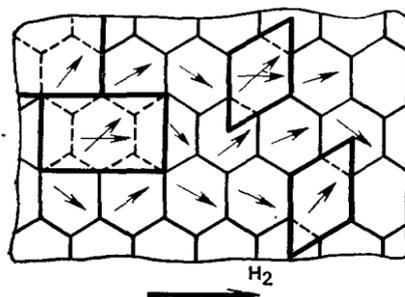


Рисунок 2(б) - Модель реакции доменов в ферромагнетике на магнитное поле

В области высоких напряженностей поля намагничивание продолжается за счет поворота магнитных моментов доменов непосредственно по направлению внешнего поля. Этот процесс ведет к насыщению намагниченности, когда большинство магнитных моментов выровнены и дальнейшее увеличение поля не приводит к значительному росту намагниченности.

Ферромагнетики также демонстрируют явление магнитного гистерезиса, когда изменение намагниченности отстает от изменения напряженности магнитного поля. Это приводит к появлению петли гистерезиса на графике зависимости намагниченности от напряженности поля, которая характеризует магнитные свойства материала.

Вследствие даже незначительного преобладания доли таких доменов результирующая намагниченность материала становится отличной от нуля. Это показано графически на рисунке 3, где приведена зависимость намагниченности от напряженности поля  $H$ . После выключения внешнего магнитного поля стенки Блоха возвращаются в начальное положение (штриховка на рис. 2а) и результирующая намагниченность опять исчезает; этот процесс, таким образом, имеет обратимый характер. Более сильные внешние магнитные поля ( $H_2$  на рис. 2б и 3) наряду с дальнейшим смещением стенок Блоха вызывает скачкообразное изменение направления вектора намагниченности (скачки Баркгаузена).

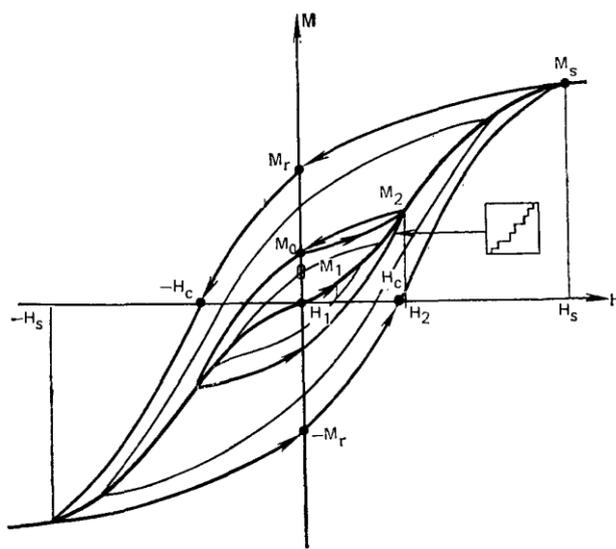


Рисунок 3 - График зависимости намагниченности от напряженности магнитного поля материала

Обычно скачки намагниченности почти одновременно совершаются в нескольких доменах (однодоменных частицах), векторы намагниченности которых после этого почти совпадают с направлением внешнего поля. Для магнитных материалов, используемых в качестве магнитопровода в трансформаторах и сердечниках магнитных головок, эта остаточная намагниченность нежелательна, и задача состоит в том, чтобы, используя обратимые процессы, получить как можно более крутую зависимость намагниченности от напряженности приложенного внешнего поля.

Если магнитный материал повторно поместить в поле  $H_2$ , то результирующая намагниченность достигнет примерно прежнего значения, но кривая намагничивания вследствие влияния «инерционности» доменов будет иметь другую форму, чем при включении поля  $H_2$ . Получаемая внутренняя замкнутая петля показана на рисунке 3. При этом считают, что в пределах этой замкнутой петли свойства материала постоянны, а материал ведет себя магнитно стабильно. Если продолжать увеличивать напряженность внешнего поля, то в направлении поля будут выстраиваться векторы намагниченности все большего числа доменов. Ясно, что состояние полной ориентации во всех доменах (частицах) сохраняется стабильным только на время существования поля насыщения  $H_s$ .

Если выключить поле, то некоторые домены займут наиболее благоприятное для них положение; наступает состояние остаточной намагниченности насыщения  $M_r$  (см. рис. 3).

Кривую, описывающую переход образца из начального (размагниченного) состояния в состояние насыщения (см. рис. 3), называют начальной кривой.

Рассмотрим теперь, как петля гистерезиса от достигнутой точки остаточной намагниченности насыщения  $M_r$  пойдет дальше, если усиливать внешнее магнитное поле в обратном направлении. Результирующая намагниченность образца будет уменьшаться. Происходящие в этом случае процессы совершенно аналогичны рассмотренным ранее. Напряженность поля, при которой намагниченность образца достигает нуля, называется коэрцитивной силой и обозначается  $H_c$ .

После увеличения напряженности поля обратного направления до значения  $-H_s$ , соответствующего насыщению, затем переключения его опять в первоначальное направление и увеличения до  $+H_s$  кривая зависимости намагниченности  $M$  от приложенного поля  $H$  приобретает вид симметричной замкнутой петли, называемой предельной петлей гистерезиса. Если намагничивание ведется не до насыщения, то для каждого цикла получается своя частная петля внутри предельной, при этом вершины всех этих петель располагаются на начальной кривой (рис. 3) (площадь петли гистерезиса пропорциональна энергии, идущей на преодоление сопротивления при повороте магнитных моментов ферромагнетика. Эта энергия расходуется на нагревание ферромагнетика). Соответственно и значения остаточной намагниченности частных петель  $M_0$  лежат внутри области между значениями остаточных намагниченностей насыщения от  $+M_s$  до  $-M_s$ . Это и дает возможность дискретно различать градации записанного сигнала на носителе. Если построить график зависимости остаточной намагниченности  $M_0$  от максимальной напряженности действующего поля  $\hat{H}$ , то получим кривую остаточной намагниченности материала (см. рис. 4). Кривая остаточной намагниченности представляет собой одну из наиболее важных характеристик носителей магнитной записи. Воспроизводимые сигналы получаются наибольшими, когда в процессе записи кривая остаточной намагниченности используется до насыщения. Линейный же участок кривой позволяет вести запись без искажений.



Рисунок 4 - График кривой остаточной намагниченности материала

Если образец магнитного материала подвергается воздействию переменного поля, то петля гистерезиса полностью описывается за каждый период. Требуемая для совершения такого цикла работа перемагничивания пропорциональна площади петли и частоте перемагничивания. Эта работа в основном представляет собой тепловые потери. Поэтому для устройств, работающих в переменных полях (магнитные головки, трансформаторы и т.д.), применяют магнитные материалы с малой площадью петли гистерезиса, главным образом с малой коэрцитивной силой  $H_c$ .

Общие потери энергии на гистерезис и вихревые токи условно называют потерями в железе. Потери на вихревые токи вызываются индукционными токами, наводимыми в ферромагнитных материалах, обладающих электрической проводимостью. Согласно законам индукции и Ома вихревые токи тем больше, чем выше частота, больше магнитный лоток и меньше омическое сопротивление.

Возможность возникновения вихревых токов понижается, если сердечник собран не из сплошных металлических деталей, а набран из тонких пластин (см. рис. 5). Еще лучше изготавливать сердечник из порошкового железа со связующим или из спеченных порошковых материалов, например, ферритов.

В процессе магнитной записи изменяющиеся во времени электрические величины преобразуются в локальные изменения намагниченности носителя. Временные соотношения сигналов сохраняются преимущественно вследствие движения носителя при неподвижной записывающей или воспроизводящей головке. Чисто физически значение имеет только относительное перемещение.

Важнейшие преимущества устройств магнитной записи с механическим передвижением носителя или головки — это большая емкость памяти и относительная простота конструкции. Они определяются принципиальным разделением функций носителя, блоков записи, воспроизведения и управления. Существует несколько технологий магнитной записи, каждая из которых имеет свои особенности и применения

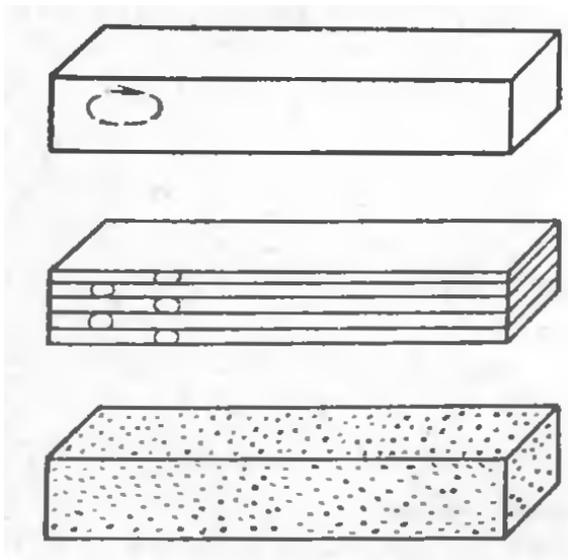


Рисунок 5 - Виды сердечников

Магнитные жесткие диски - состоят из нескольких магнитных дисков, которые вращаются с высокой скоростью, и магнитных головок, которые считывают и записывают данные на диски.

Магнитные ленты – это длинные и узкие полосы, покрытые магнитным материалом, которые используются для хранения данных. Магнитные ленты обычно используются для резервного копирования данных и архивирования.

Магнитные карты – это пластиковые карты, на которых записана информация с помощью магнитных полей.

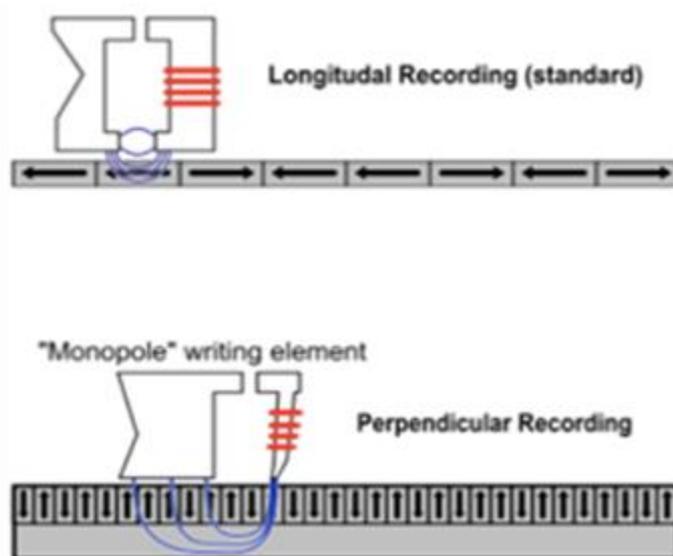
Рабочая поверхность диска движется относительно считывающей головки (например, в виде катушки индуктивности с зазором в магнитопроводе). При подаче переменного электрического тока (при записи) на катушку головки возникающее переменное магнитное поле из зазора головки воздействует на ферромагнетик поверхности диска и изменяет направление вектора намагниченности доменов в зависимости от величины сигнала. При считывании перемещение доменов у зазора головки приводит к изменению магнитного потока в магнитопроводе головки, что приводит к возникновению переменного электрического сигнала в катушке за счёт электромагнитной индукции.

На сегодняшний день в жестких дисках используются два основных метода записи, как показано на рисунке 6. Рассмотрим их подробнее.

В методе продольной записи вектор намагниченности домена расположен продольно, то есть параллельно поверхности диска. Каждая из этих областей является логическим нулём или единицей, в зависимости от направления намагниченности, храня бит информации. Максимально достижимая при использовании данного метода плотность записи составляет около 23 Гбит/см<sup>2</sup>. К 2010 году этот метод был практически вытеснен методом перпендикулярной записи.

Метод перпендикулярной записи — технология, при которой биты информации сохраняются в вертикальных доменах. Это позволяет использовать более сильные магнитные поля и снизить площадь материала, необходимую для записи 1 бита. Плотность записи при этом методе резко подскочила - до 62 Гбит/см<sup>2</sup>. А теоретический предел отодвинулся на порядки и составляет 1 Тбит на квадратный дюйм.

Рисунок 6 - Два основных метода чтения/записи информации с жестких дисков в настоящее время. Метод



продольной записи (сверху). Метод перпендикулярной записи (снизу).

Оба метода записи рано или поздно оказываются ограничены физическими особенностями материала, из-за чего нельзя увеличивать плотность записи – суперпарамагнитный предел. Дело в том, что существует некоторый критический размер частицы, после которого ферромагнетик уже при комнатной температуре переходит в парамагнитное состояние. Тепловой энергии оказывается достаточно для проворачивания, смены ориентации магнитного момента области. Метод перпендикулярной записи позволил отодвинуть данное ограничение, увеличив плотность записи диска, но не обойти его. Поэтому сейчас ведется разработка других технологий записи.

#### Приложение

1. Гистерезис — свойства систем (физических, биологических и т.д.), мгновенный отклик которых на приложенные к ним воздействия зависит в том числе от их текущего состояния, а поведение системы на интервале времени во многом определяется её предысторией.
2. Диамагнетик — свойство веществ намагничиваться навстречу приложенному магнитному полю.
3. Коэрцитивная сила — значение напряжённости магнитного поля, необходимое для полного размагничивания ферро- или ферримагнитного вещества.
4. Магнитный гистерезис — явление зависимости вектора намагничивания и вектора напряжённости магнитного поля в веществе не только от приложенного внешнего поля, но и от предыстории данного образца.
5. Магнитный момент — основная величина, характеризующая магнитные свойства вещества.
6. Намагниченность — характеристика магнитного состояния вещества, определяемая отношением магнитного момента тела к его объёму.
7. Остаточная намагниченность — намагниченность, которую имеет ферромагнитный материал при напряжённости внешнего магнитного поля, равного нулю.
8. Парамагнетик — вещество, магнитные моменты атомов которого в отсутствие внешнего поля равны нулю, т.к. магнитные моменты всех электронов атома взаимно скомпенсированы (например, инертные газы, водород, азот, NaCl и др.)
9. Петля гистерезиса — графическое изображение зависимости физической величины, характеризующей состояние тела, от физической величины, характеризующей внешние условия, при периодическом изменении последней, когда состояние тела неоднозначно зависит от внешних условий.
10. Прецессия — явление, при котором момент импульса тела меняет своё направление в пространстве под действием момента внешней силы.
11. Точка (температура) Кюри — температура, выше которой ферромагнитное тело становится парамагнитным
12. Ферромагнетик — вещество, которое (при температуре ниже точки Кюри) способно обладать намагниченностью в отсутствие внешнего магнитного поля.
13. Ферромагнетизм — появление спонтанной намагниченности при температуре ниже температуры Кюри вследствие упорядочения магнитных моментов, при котором большая их часть параллельна друг другу

**Список использованных источников:**

1. Бургов В.А. Теория фонограмм. – М.: Искусство, 1984. -302 с.
2. Гитлиц М.В. Магнитная запись сигналов: Учебное пособие для высших учеб. заведений. – М.: Радио и связь, 1990. - 231 с.
3. Василевский Ю.А. Носители магнитной записи. – М.: Искусство, 1989. – 287 с.
4. Подгорная Е.А. Магнитная аналоговая запись: Учебное пособие. - СПб: Изд. СПбГУКиТ, 2004. – 48с.
5. Сиаккоу М. Физические основы записи информации. Перевод с немецкого И.Д.Гурвица. Под редакцией В.Г. Королькова., Москва, Связь, 1980 – 188с

## PHYSICAL PRINCIPLES OF MAGNETIC RECORDING AND READING OF INFORMATION

*Kazak M.A. and Horin.V.A.*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,  
Minsk, Republic of Belarus*

*Grigoriev A.A. – PhD in Physics and Mathematics*

**Annotation.** This research paper is devoted to the study of the physical principles of magnetic recording and reading of information, key to modern data storage technologies. The paper reviews the basic concepts of magnetic recording, including ferromagnetism and magnetisation process. Particular attention is paid to the hysteresis properties of ferromagnetic materials, which have a significant impact on the process of recording and reading information. The paper also details the principle of recording and reading, which is a complex technical process based on the fundamental laws of electromagnetism and magnetism. The results obtained can be useful for further development and improvement of information storage and processing technologies based on magnetic media.

**Keywords.** Signalogram, magnetic recording, magnetic field, ferromagnetism, magnetisation, domain, hysteresis, recording, reading, hard disk drive.