

УДК 537.622:004.083.72

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ МАГНИТНОЙ ЗАПИСИ И СЧИТЫВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Кужель Д.А., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Григорьев А.А. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. В работе исследованы физические механизмы, лежащие в основе технологий магнитной записи и считывания информации. Рассмотрена природа ферромагнетизма на уровне доменной структуры вещества, проанализированы закономерности перемагничивания и явление гистерезиса. Описана конструкция комбинированной магнитной головки с отдельными индукционным элементом записи и магнорезистивным элементом считывания. Выполнено сравнение продольного и перпендикулярного методов записи, показаны физические ограничения плотности хранения данных и пути их преодоления.

Ключевые слова. Магнитная запись, ферромагнетизм, доменная структура, петля гистерезиса, коэрцитивная сила, магнитная головка, TMR, продольная запись, перпендикулярная запись, суперпарамагнитный предел, HAMR.

1. Физическая природа ферромагнетизма и доменная структура

Способность вещества намагничиваться и сохранять намагниченность определяется его электронным строением. Ферромагнитные материалы — железо, никель, кобальт и их сплавы — обладают незаполненными внутренними d-оболочками атомов, в которых спины значительной части электронов не скомпенсированы. Это придаёт каждому атому результирующий магнитный момент. Квантово-механическое обменное взаимодействие между соседними атомами выравнивает их моменты параллельно, что при температуре ниже точки Кюри приводит к самопроизвольному намагничиванию — ферромагнетизму [1].

В реальном образце самопроизвольная намагниченность существует лишь в пределах малых областей — доменов. Между соседними доменами расположены переходные слои — стенки Блоха, в которых ориентация магнитных моментов постепенно поворачивается от одного направления к другому. Доменная структура формируется вследствие конкуренции обменной энергии, магнитостатической энергии размагничивающего поля и энергии кристаллографической анизотропии. В отсутствие внешнего поля домены ориентированы хаотично и суммарный магнитный момент образца близок к нулю; при воздействии поля H домены начинают ориентироваться по полю, как показано на рисунке 1 [1, 2].

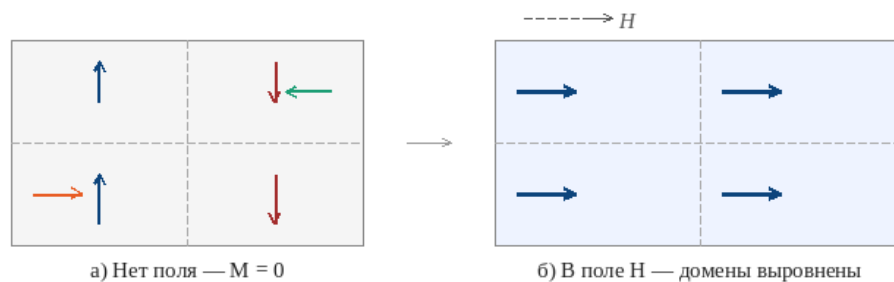


Рисунок 1 – Доменная структура ферромагнетика: а) без внешнего поля, суммарный момент $M = 0$; б) в поле H , домены ориентированы по полю

Процесс намагничивания ферромагнетика последовательно проходит три стадии. При слабых полях происходит обратимое смещение стенок Блоха: домены, ориентированные близко к направлению поля, растут за счёт соседних, и после снятия поля стенки возвращаются в исходное положение. При более сильных полях смещение стенок становится необратимым — стенки преодолевают локальные барьеры (дефекты решётки) скачкообразно; эти резкие скачки намагниченности называются скачками Баркгаузена. Наконец, при высоких напряжённостях поля происходит поворот вектора намагниченности доменов непосредственно вдоль поля — наступает техническое насыщение $M_{\text{тн}}$. После снятия поля образец сохраняет остаточную намагниченность M_r — физическую основу хранения записанной информации.

2. Гистерезис и характеристики носителей магнитной записи

Несовпадение кривых намагничивания и размагничивания ферромагнетика образует петлю гистерезиса (рисунок 2). Её форма количественно характеризует магнитные свойства материала и определяет его пригодность для применения в магнитной записи. Площадь петли пропорциональна удельным потерям энергии на перемагничивание за один цикл [1, 3]:

$$W = \oint H dB, \quad (1)$$

где W — удельная энергия потерь за цикл перемагничивания [Дж/м³]; H — напряжённость поля [А/м]; B — магнитная индукция [Тл]; интеграл берётся по замкнутому контуру петли гистерезиса.

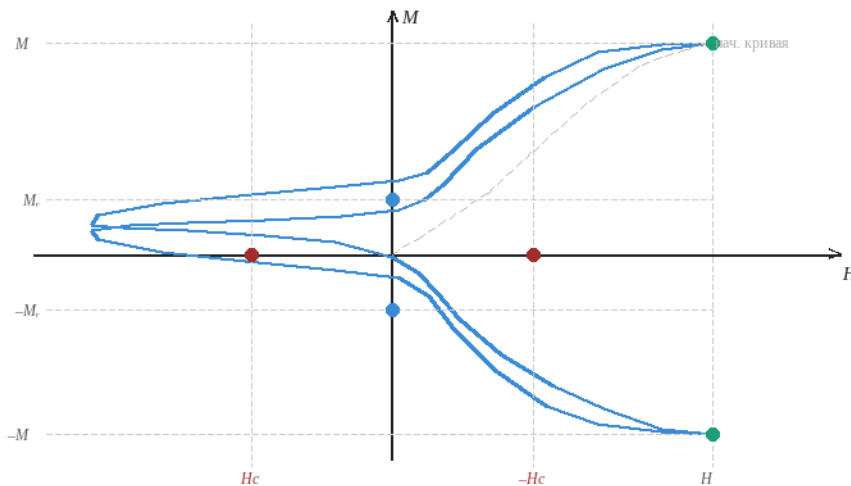


Рисунок 2 – Петля гистерезиса: M_s — намагниченность насыщения; M_r — остаточная намагниченность; H_c — коэрцитивная сила

Ключевыми параметрами носителя записи являются коэрцитивная сила H_c и остаточная намагниченность M_r . Коэрцитивная сила определяет устойчивость записанной информации к случайным внешним полям и тепловым флуктуациям. Для носителей на основе технологии перпендикулярной записи (PMR) значение H_c составляет порядка 400–800 кА/м; для перспективных высокоанизотропных материалов типа FePt и SmCo, предназначенных для HAMR-дисков, коэрцитивность может быть на порядок выше. Для материалов сердечников магнитных головок предъявляются противоположные требования: малая H_c и высокая начальная магнитная проницаемость μ . Этим условиям удовлетворяют мягкомагнитные сплавы — пермаллой ($Ni_{80}Fe_{20}$) и аморфные металлические стёкла [3, 4].

3. Принцип работы магнитной головки

Современная магнитная головка является комбинированной: функции записи и считывания выполняются физически отдельными элементами, объединёнными в одном корпусе, как показано на рисунке 3. В дисках с продольной записью применялась кольцевая индукционная головка; в PMR-дисках используется монополюсная головка записи, поле которой замыкается через мягкий подслой носителя. При пропускании тока через обмотку поле в зазоре намагничивает участок носителя; полярность тока определяет бит «0» или «1».

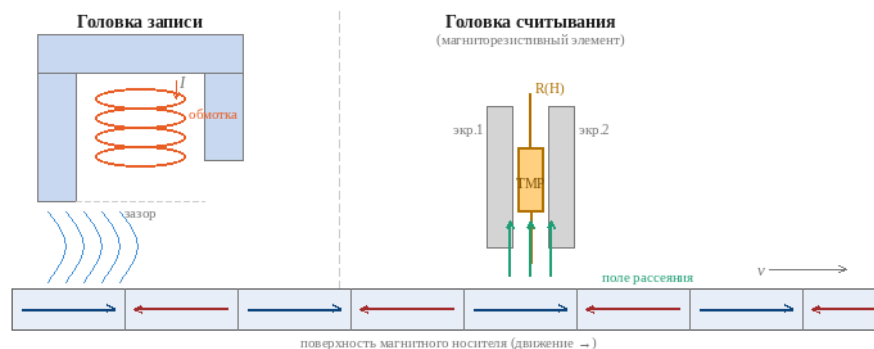


Рисунок 3 – Схема комбинированной магнитной головки: индукционный элемент записи (слева) и TMR-элемент считывания (справа)

Считывание выполняется отдельным элементом на основе туннельного магнетосопротивления (ТМР — Tunneling Magnetoresistance), расположенным между двумя экранирующими магнитными слоями. Поле рассеяния от намагниченных участков носителя изменяет взаимную ориентацию магнитных слоёв ТМР-перехода и тем самым его электрическое сопротивление: R минимально при параллельной ориентации слоёв и максимально — при антипараллельной. Отношение $\Delta R/R$ для коммерческих ТМР-головок составляет 50–100%, что значительно превышает показатели предшествующих ГМР-элементов и обеспечивает надёжное считывание при высокой плотности записи [4]. Связь ЭДС индукционного элемента записи с параметрами магнитного тракта определяется законом электромагнитной индукции:

$$\varepsilon = -N \cdot d\Phi/dt = -N \cdot S \cdot dB/dt, \quad (2)$$

где N — число витков обмотки; S — площадь поперечного сечения сердечника; dB/dt — скорость изменения индукции. Выражение справедливо при условии однородности поля в сердечнике.

4. Методы магнитной записи и физические ограничения плотности

При продольной записи (LMR) вектор намагниченности домена ориентирован параллельно поверхности носителя. К середине 2000-х годов этот метод достиг предела около 100–150 Гбит/дюйм², после чего был вытеснен технологией перпендикулярной записи (PMR). При PMR домены ориентированы поперёк плоскости носителя, а под рабочим слоем располагается мягкомангнитный подслой, замыкающий силовые линии поля монополюсной головки. Это позволяет применять материалы носителя с высокой константой магнитной анизотропии K_a при меньшем размагничивающем поле, что одновременно повышает тепловую устойчивость доменов и плотность записи. К 2024 году коммерческие PMR-диски достигли плотности 1,5–2 Тбит/дюйм². Принципиальное отличие методов показано на рисунке 4 [5].

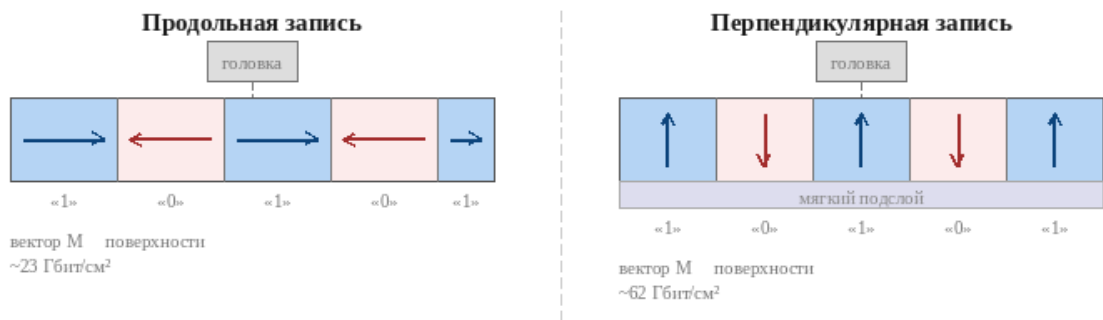


Рисунок 4 – Продольная (LMR, слева) и перпендикулярная (PMR, справа) магнитная запись

Фундаментальным ограничением обоих методов является суперпарамагнитный предел. При уменьшении объёма домена V его тепловая стабильность характеризуется отношением энергии магнитной анизотропии к тепловой энергии. Для надёжного хранения данных в течение ~10 лет необходимо выполнение условия [1, 3]:

$$K_a V / kT \geq 60-80 \text{ (критерий долговременной стабильности записи)}, \quad (3)$$

где K_a — константа магнитной анизотропии [Дж/м³]; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура [К]. Точное время хранения τ оценивается по формуле Аррениуса–Нееля: $\tau = \tau_0 \cdot \exp(K_a V / kT)$, где $\tau_0 \approx 10^{-9} \dots 10^{-10}$ с — характерное время попытки перемагничивания.

Для преодоления суперпарамагнитного предела разрабатывается ряд технологий. В термически-активированной записи (HAMR — Heat-Assisted Magnetic Recording) рабочий слой локально нагревается лазером вблизи точки Кюри, где H_c резко падает и головка может перемагничивать домены высокоанизотропного материала (FePt, $K_a \sim 7 \cdot 10^6$ Дж/м³). После быстрого охлаждения высокая K_a восстанавливается, обеспечивая долговременную стабильность записи при малых размерах доменов. В микроволновой записи (MAMR — Microwave-Assisted Magnetic Recording) высокочастотное переменное поле (~20–40 ГГц) снижает пороговое поле перемагничивания за счёт ферромагнитного резонанса. В битово-паттернированных носителях (BPM — Bit-Patterned Media) рабочий слой заменяется массивом физически изолированных магнитных островков, каждый из которых хранит ровно один бит, что исключает паразитное взаимодействие между соседними ячейками [5].

В таблице 1 приведены сравнительные характеристики основных методов записи.

Таблица 1 – Сравнение методов магнитной записи на жёстких дисках [3, 5]

| Параметр | Продольная (LMR) | Перпендикулярная (PMR) |
|----------------------------|---------------------------------|--|
| Ориентация намагниченности | Параллельно плоскости носителя | Перпендикулярно плоскости носителя |
| Макс. плотность записи | ~100–150 Гбит/дюйм ² | 1,5–2 Тбит/дюйм ² |
| Мягкий подслой | Не требуется | Обязателен |
| Тепловая устойчивость | Низкая при малых доменах | Выше: меньшее размагничивающее поле позволяет использовать материалы с высокой K_a |
| Тип головки записи | Кольцевая индукционная | Монополюсная индукционная |
| Тип головки считывания | MP / GMP | TMR ($\Delta R/R = 50\text{--}100\%$) |

Заключение

Магнитная запись информации основана на совокупности физических явлений: обменном взаимодействии, формировании доменной структуры, гистерезисе и электромагнитной индукции. Переход от продольной к перпендикулярной записи обеспечил рост плотности хранения более чем на порядок — с ~100 до ~2000 Гбит/дюйм². Дальнейшее развитие технологий — HAMR (нагрев носителя вблизи точки Кюри), MAMR (ферромагнитный резонанс) и BPM (физически изолированные магнитные островки) — направлено на преодоление суперпарамагнитного предела при сохранении долговременной надёжности хранения данных.

Список использованных источников:

1. Вонсовский С.В. *Магнетизм*. – М.: Наука, 1984. – 208 с.
2. Белозёров Д.П. *Физика магнитных явлений: учеб. пособие / Д.П. Белозёров, В.В. Ковалёв*. – М.: Изд-во МГУ, 2002. – 264 с.
3. Ефимова А.И. *Магнитные материалы и их применение / А.И. Ефимова, Л.А. Хейфец*. – М.: Энергия, 1980. – 184 с.
4. Носов Ю.Р. *Магниторезистивные датчики и головки считывания // Электроника*. – 2005. – № 3. – С. 28–34.
5. Осипов В.В. *Перпендикулярная магнитная запись: физические принципы и перспективы / В.В. Осипов, М.Н. Рябин // Успехи физических наук*. – 2009. – Т. 179, № 6. – С. 672–680.

UDC 537.622:004.083.72

PHYSICAL PRINCIPLES OF MAGNETIC RECORDING AND READING OF INFORMATION

Kuzhel D.A., student

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

Grigoriev A.A. – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor

Annotation. The paper investigates the physical mechanisms underlying magnetic recording and data retrieval technologies. The nature of ferromagnetism at the domain-structure level is examined, and the three-stage magnetisation process — reversible domain-wall displacement, irreversible Barkhausen jumps, and domain rotation — is described. The combined read/write head design is presented, with a separate inductive write element and a TMR read element. A comparison of longitudinal (LMR) and perpendicular (PMR) recording is performed, the superparamagnetic stability criterion is derived, and approaches to overcoming it — HAMR, MAMR, and BPM — are outlined.

Keywords. Magnetic recording, ferromagnetism, domain structure, hysteresis loop, coercive force, magnetic head, TMR, longitudinal recording, perpendicular recording, superparamagnetic limit, HAMR.