

Устройства функциональной электроники

Функциональная магнитоэлектроника

Функциональная магнитоэлектроника представляет собой направление в функциональной электронике, в котором изучаются **магнитоэлектронные эффекты и явления в магнитоупорядоченных континуальных средах**, а также возможность создания приборов и устройств обработки и хранения информации с использованием динамических неоднородностей магнитоэлектронной природы.

Магнитное упорядочение заключается в существовании определенной закономерности расположения элементарных магнитных моментов атомов, ионов, электронов. Простейшие типы магнитного упорядочивания наблюдаются в ферри- и ферромагнетиках.

Все вещества представляют собой магнетики и делятся на три больших класса:

- **диамагнетики**, имеющие нулевой магнитный момент в отсутствии магнитного поля и отрицательную магнитную проницаемость, в результате чего во внешнем магнитном поле возникает собственное (внутренне) магнитное поле противонаправленное внешнему – диамагнетики ослабляют внешнее магнитное поле;
- **парамагнетики**, имеющие нулевой магнитный момент в отсутствии магнитного поля и положительную магнитную проницаемость, в результате чего во внешнем магнитном поле возникает собственное (внутренне) магнитное поле сонаправленное внешнему – парамагнетики усиливают внешнее магнитное поле;
- **ферромагнетики (ферримангнетики и др.)**, имеющие ненулевой магнитный момент в отсутствии магнитного поля.

Ферромагнетик представляет собой вещество, в котором ниже определенной температуры (точки Кюри) большинство атомных магнитных моментов параллельно друг другу и вещество обладает самопроизвольной (спонтанной) намагниченностью.

Под **ферримангнетиками** понимают магнетики с несколькими магнитными подрешетками и с отличным от нуля суммарным магнитным моментом. Магнитное упорядочивание в любых классах магнетиков исчезает при температуре выше точки Кюри для ферромагнетиков и точки Нееля для ферри- и антиферромагнетиков.

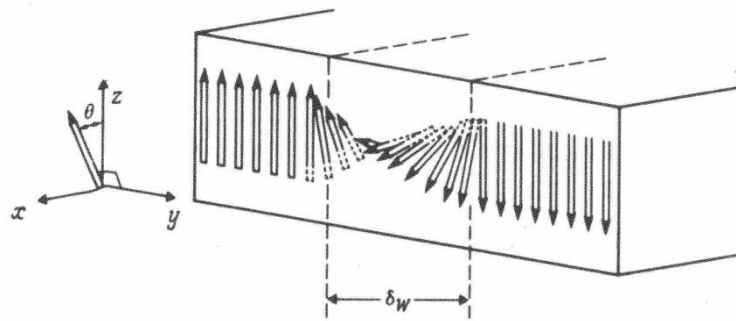
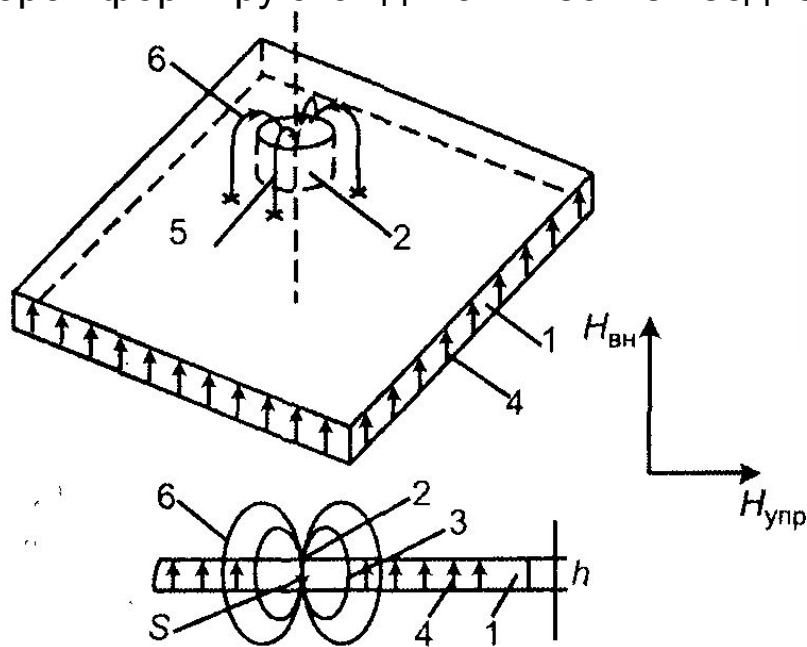
Функциональная магнитоэлектроника

1. Динамические неоднородности

В континуальных магнитоупорядоченных средах существует несколько видов физических носителей информационного сигнала – динамических неоднородностей.

1. Цилиндрические магнитные домены (ЦМД) представляют собой изолированные однородно намагниченные подвижные области в ферро- или ферритмагнетиках. ЦМД имеют форму круговых цилиндров и направление намагниченности, противоположное направлению намагниченности магнетика.

ЦМД возникают при определенных условиях в тонких монокристаллических пластинках или пленках ферритов (ортоферритах, феррит-гранатах и др.), обладающих сильной одноосной перпендикулярной анизотропией. Единственная ось **легкого намагничивания** направлена перпендикулярно поверхности континуальной среды, в которой формируются динамические неоднородности в виде ЦМД.



- 1 – пленка феррита-граната; 2 – ЦМД;
- 3 – стенка Блоха; 4 – вектор намагниченности соседнего домена;
- 5 – вектор намагниченности домена;
- 6 – поле рассеяния домена

Функциональная магнитоэлектроника

1. Динамические неоднородности

В определенных магнитных материалах спонтанно возникает **доменная структура**, имеющая вид извилистых полос, лабиринтов. Размеры и форма лабиринтных доменов соответствует минимуму полной энергии доменов. При определенном магнитном поле лабиринтные домены превращаются в цилиндрические.

Устойчивое равновесие ЦМД поддерживается под действием трех сил:

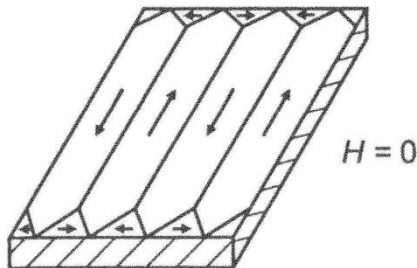
- сжимающей силы со стороны внешнего магнитного поля,
- магнитостатической силы растягивания домена за счет «магнитных зарядов»,
- сжимающей силы поверхностного натяжения домена.

Полная энергия цилиндрического магнитного домена W_n может быть представлена в виде

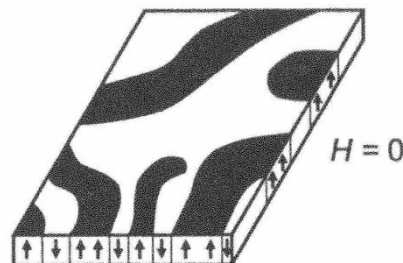
$$W_n = W_H + W_M + W_C,$$

где $W_H = 0,5\mu_0 I_m H \cdot p d^2 h$ – энергия намагничивания во внешнем магнитном поле H ;
 $W_C = p d h \sigma$ – энергия стенки Блоха, определяемая плотностью энергии стенки и площадью стенки; d – диаметр ЦМД; h – высота ЦМД; σ – удельная энергия доменной стенки; W_M – магнитостатическая энергия, обусловленная магнитным полем внутри домена.

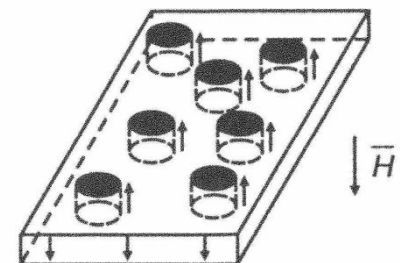
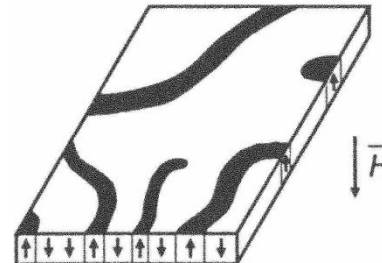
Точное аналитическое решение этого уравнения является весьма сложным из-за трудности определения зависимости магнитостатической энергии W_M от линейных размеров ЦМД, однако минимум полной энергии W_n соответствует определенному диаметру ЦМД.



Ось легкого намагничивания расположена в плоскости пленки



Ось легкого намагничивания расположена перпендикулярно плоскости пленки



Функциональная магнитоэлектроника

1. Динамические неоднородности

С изменением внешнего магнитного поля изменяется и диаметр ЦМД. Существует определенная область устойчивости ЦМД по магнитному полю, ограниченная максимально и минимально возможными значениями диаметра ЦМД для данной ферромагнитной пленки:

$$d_{min} < d < d_{max}.$$

Изолированный домен существует в определенном интервале значения внешнего поля

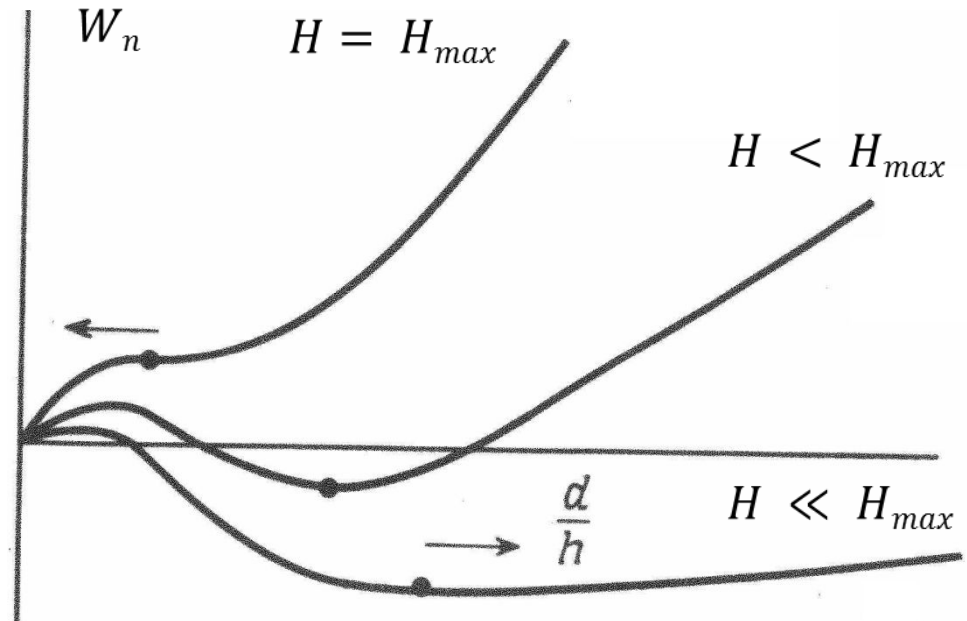
$$H_{min} < H < H_{max},$$

где H_{min} – поле, при котором ЦМД растягивается в полосовой домен, H_{max} – поле, при котором ЦМД схлопывается – коллапсирует.

Размеры и форма ЦМД определяется двумя противодействующими факторами:

- с одной стороны, магнитостатическая энергия W_M стремится увеличить площадь доменов,
- с другой стороны, энергия приложенного магнитного поля W_H и энергия стенок доменов W_C стремится уменьшить объем домена и площадь стенки.

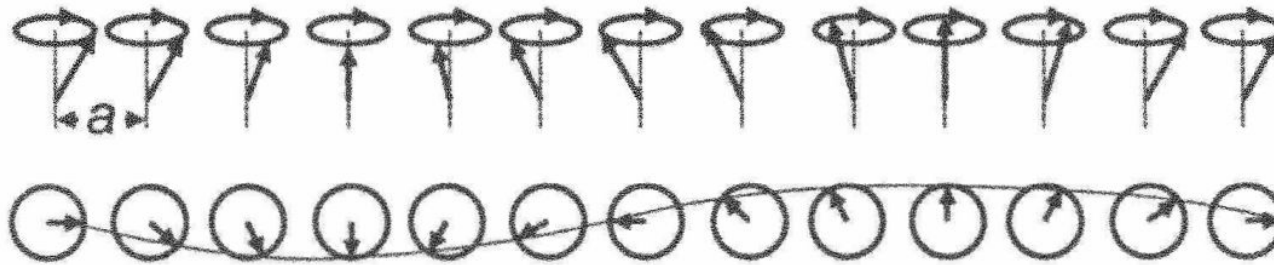
В результате стенка Блоха принимает такую форму, при которой общая энергия W_n оказывается минимальной. Домен с минимальной энергией имеет форму цилиндра.



Функциональная магнитоэлектроника

1. Динамические неоднородности

2. Магнитостатические волны (МСВ) представляют собой электромагнитные волны, сопровождающие колебания спинов в магнитоупругих средах.



При отсутствии управляющего магнитного поля все спины направлены по внешнему магнитному полю.

При наложении управляющего магнитного поля, например, за счет протекания тока по проводнику создается спиновая волна, распространяющаяся по пленке. Такие волны называют спиновыми.

3. Магноны.

В магнитоупругих средах можно возбудить динамические неоднородности в виде магнонов – квазичастиц, представляющих собой кванты колебаний спиновых волн.

Функциональная магнитоэлектроника

2. Континуальные среды

При выборе континуальных сред руководствуются условием максимальной эффективности возбуждения заданного типа динамической неоднородности. Первые ЦМД приборы (1965 г.) изготавливались на **редкоземельных ортоферритах** с общей формулой $LnFeO_3$ (Ln – лантаноиды – элементы с номерами 57 – 71, например, $YFeO_3$ – иттрий железный ортоферрит). Однако на их основе не могла быть обеспечена высокая плотность записи информации, экономичность приборов.

Наиболее оптимальной средой для создания ЦМД приборов оказались **монокристаллические пленки феррит-гранатов (МПФГ), эпитаксиальные пленки феррит-шпинелей**. В настоящее время магнитоодноосные пленки ферритов-гранатов, выращенных на намагниченных подложках галлий-гадолиниевого граната (ГГГ), не испытывают заметной конкуренции со стороны других материалов.

Различают гранаты следующих систем: $(LaLuSmCd)_3(FeGa)_5O_{12}$; $(YLuSm)_3(FeGaSe)_5O_{12}$; $(YSm)_3(FeAl)_5O_{12}$. При формировании континуальных сред стараются получить ЦМД субмикронного диаметра, для чего используют, например, гранаты без ионов Sm^{3+} .

Для доменопередвигающих структур используются пермаллоевые пленки (79 % Ni + 21 % Fe) с нулевым коэффициентом магнитострикции.

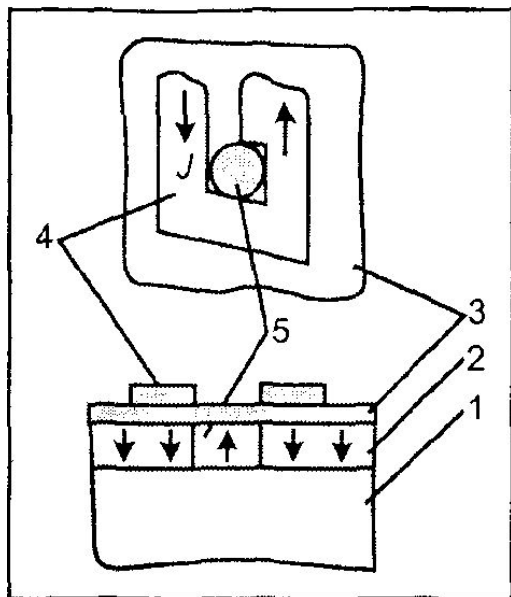
Функциональная магнитоэлектроника

3. Генерация динамических неоднородностей (ЦМД)

Информация в устройствах на динамических неоднородностях, например, типа доменов, кодируется двумя основными способами, наличием или отсутствием доменов в заданный момент времени в заданном месте, либо состояниями границ доменов.

Процесс генерации доменов осуществляется в основном локализацией электромагнитного поля, например, с помощью **аппликации в виде петли**, по которой протекает ток.

При подаче импульса тока будет создано размагничивающее поле $H_{\text{разм}}$ превосходящее значение рабочего поля $H_{\text{раб}}$ и имеющее противоположный знак. Под аппликацией пленка локально перемагнитится и образуется домен.



Генерация доменов с помощью петли тока:

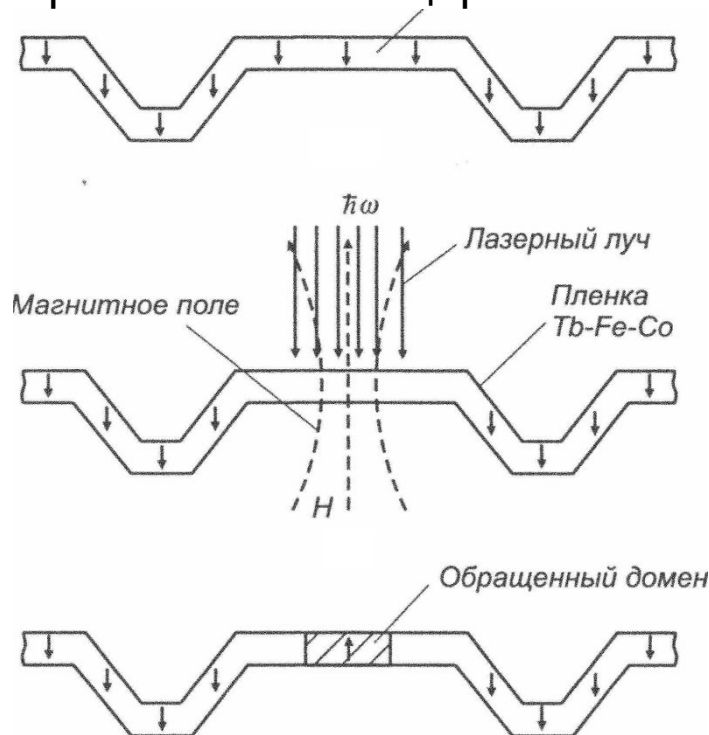
- 1 – подложка галлий-гадолиниевого граната;
- 2 – эпитаксиальная ферритовая пленка;
- 3 – изолирующая пленка;
- 4 – аппликация;
- 5 – ЦМД.

Функциональная магнитоэлектроника

3. Генерация динамических неоднородностей (ЦМД)

Магнитооптическая генерация магнитных доменов на магнитооптических дисках.

Информационные слои магнитооптических дисков синтезируют преимущественно с применением аморфных сплавов редкоземельных и переходных металлов в комбинации с железом или кобальтом. Наиболее приемлемыми для этой цели считают металлические аморфные сплавы: тербий – железо – кобальт, гадолиний – тербий – железо, гадолиний – тербий – железо – церий.



В исходном состоянии домены магнитной аморфной пленки информационного носителя ориентированы в вертикальном направлении. Под воздействием луча лазера и одновременно слабого магнитного поля размагничивание информационной среды происходит там, где пятно лазера нагревает магнитную пленку до точки Кюри.

В результате слабое магнитное поле, направленное против вектора намагниченности в исходном состоянии, вызывает в этом месте перемагничивание магнитного домена.

Для стирания весь процесс повторяется, но при обратном направлении магнитного поля.

Обычно на подложке создаются концентрические или спиральные канавки для точной наводки лазерного луча.

Для создания **управляемых динамических неоднородностей** не должно быть канавок и материал пленки должен быть соответствующий.

Функциональная магнитоэлектроника

4. Управление динамическими неоднородностями (ЦМД)

Управление ЦМД – перемещение ЦМД.

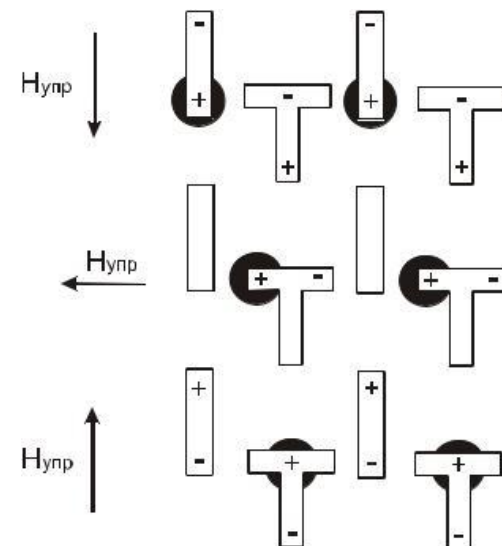
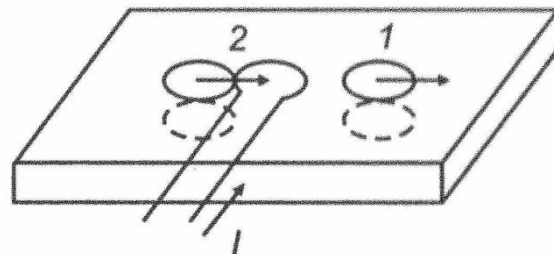
ЦМД могут носителями информации, их можно перемещать аналогично зарядовым пакетам, только устройства перемещения (управления) нужно использовать соответствующие.

Принцип работы устройств перемещения основан на том, что если создать неоднородное магнитное поле, то ЦМД будут перемещаться в направлении минимальной интенсивности внешнего магнитного поля, т.е. домен перемещается в том направлении, в котором его энергия будет минимальна.

Скорость перемещения ЦМД составляет несколько метров в секунду, диаметр ЦМД – несколько микрометров.

Применяют 2 основных способа перемещения ЦМД:

- **токовые аппликации** («петли с током»), такие же как для генерации;
- **магнитные аппликации** (доменопередвигающие структуры).



Функциональная магнитоэлектроника

4. Управление динамическими неоднородностями (ЦМД)

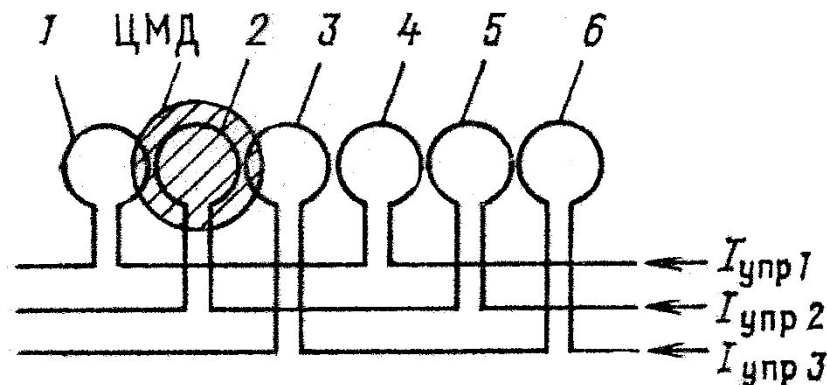
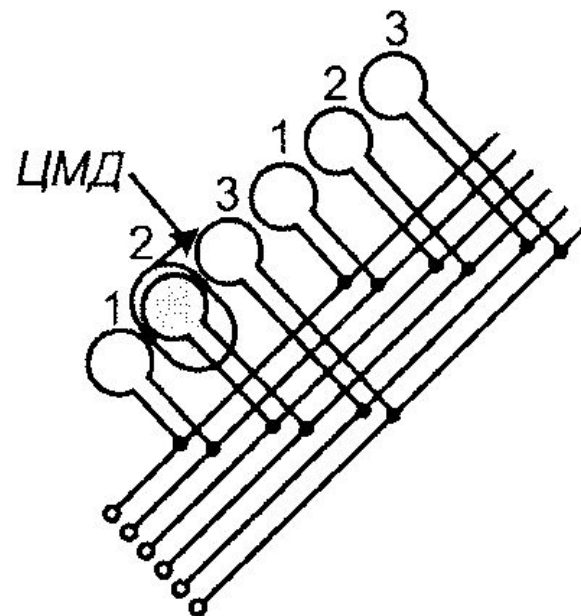
Токовые аппликации

По своей природе ЦМД имеют магнитное поле, которое, взаимодействуя с внешним полем, создает силы, перемещающие домен в направлении минимальной интенсивности внешнего поля.

Токовые аппликации, генерирующие магнитное поле, имеют вид петель из металлической пленки. Направление тока в аппликации таково, что создается поле, противоположное внешнему, и образуется «яма» («ловушка»), которая движется в заданном направлении вследствие последовательной подачи импульсов на соответствующие петли с током.

Предпочтение отдается трехактной схеме (фазы Φ_1, Φ_2, Φ_3), чтобы избежать взаимодействия следующих друг за другом доменов, а также возвратного их движения.

Тактовые аппликатуры просты, но сложны и ненадежны из-за большого количества проводников.

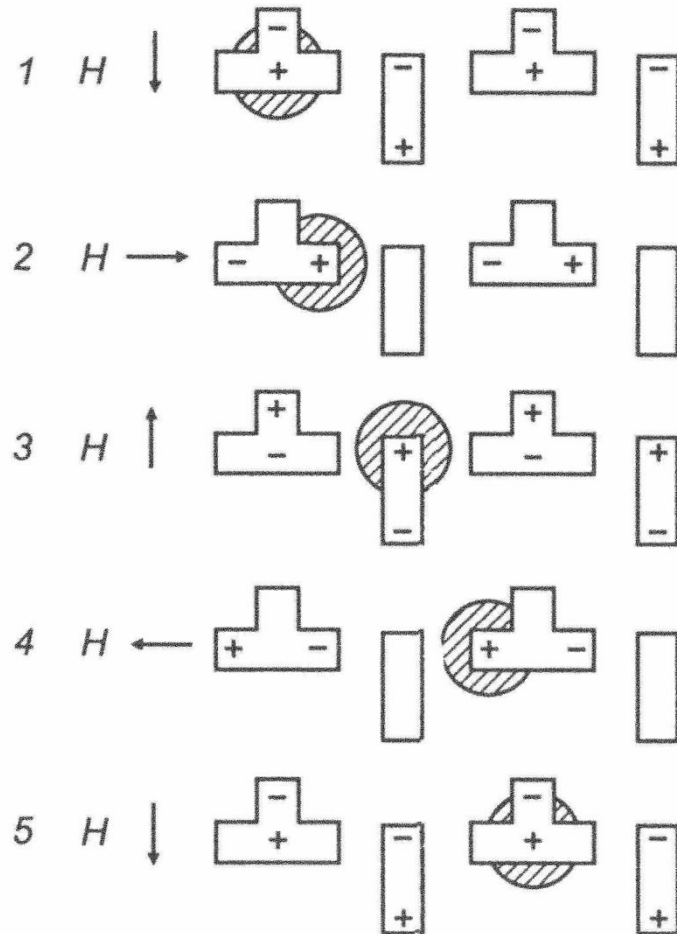


Функциональная магнитоэлектроника

4. Управление динамическими неоднородностями (ЦМД)

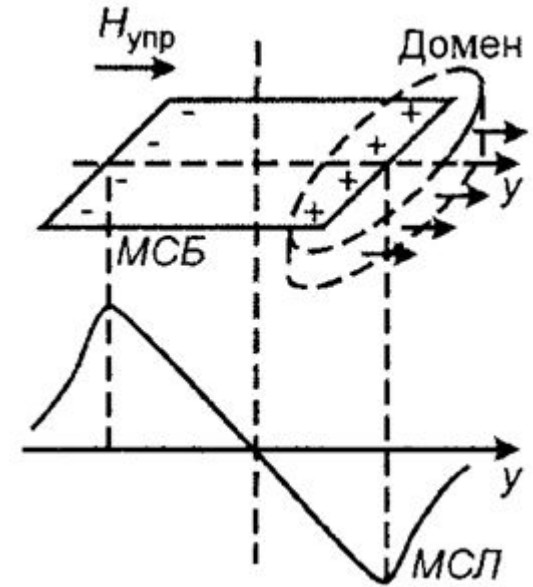
Магнитные (пермалловые) аппликации

Перемещение ЦМД по классическим TI -образным ДПС в различные моменты времени, связанные с вращением вектора управляющего магнитного поля.



В таких конструкциях домен продвигается от аппликации к аппликации, форма которых оптимизируется в конкретном случае и представляет собой домено-передвигающую структуру (ДПС).

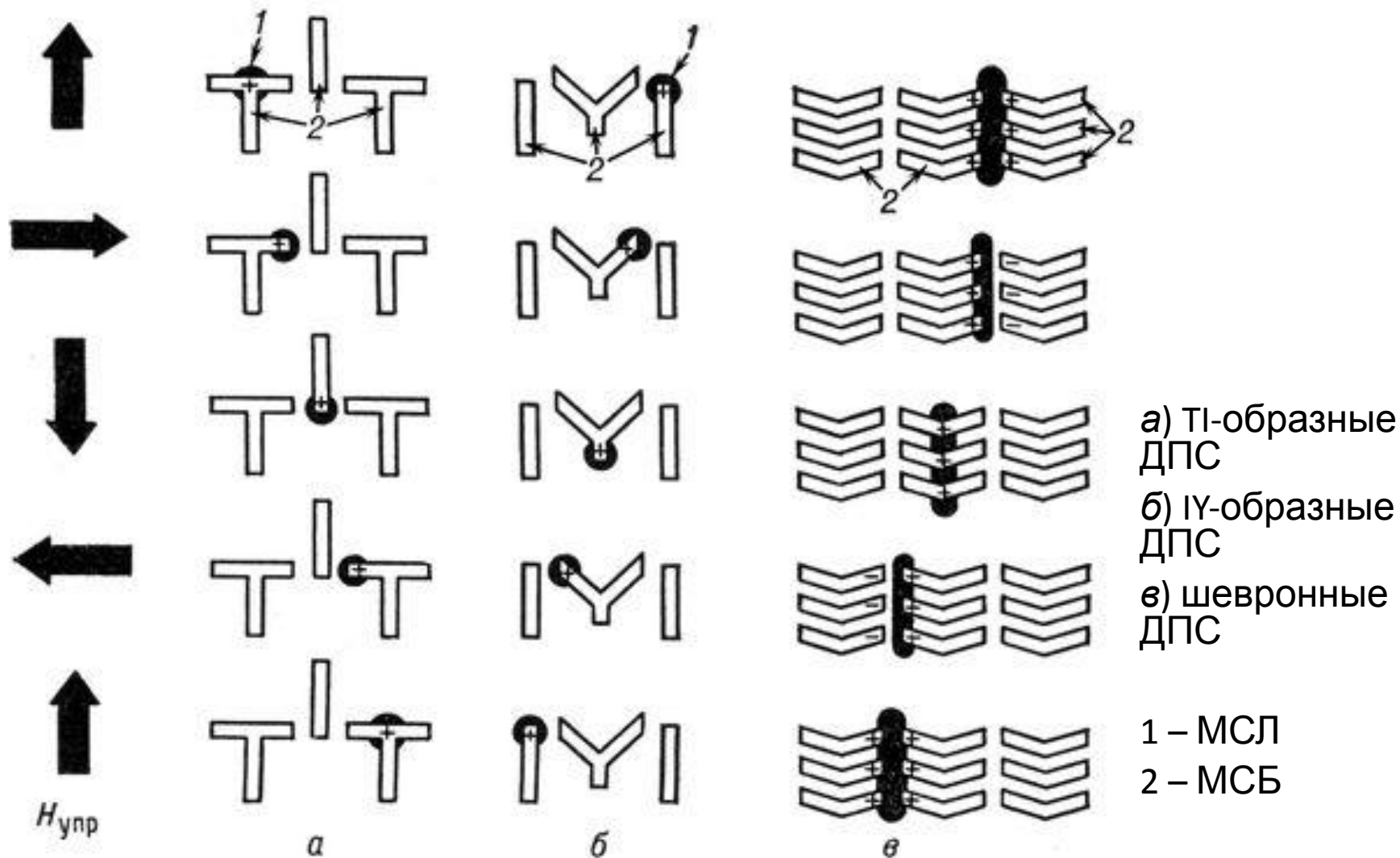
При диаметре доменов 7,5 мкм и интервале между ними 15 мкм можно получить плотность информации 10^3 бит/мм² и скорость передачи 10^5 бит/с.



Функциональная магнитоэлектроника

4. Управление динамическими неоднородностями (ЦМД)

Магнитные (пермаллоевые) аппликации



Функциональная магнитоэлектроника

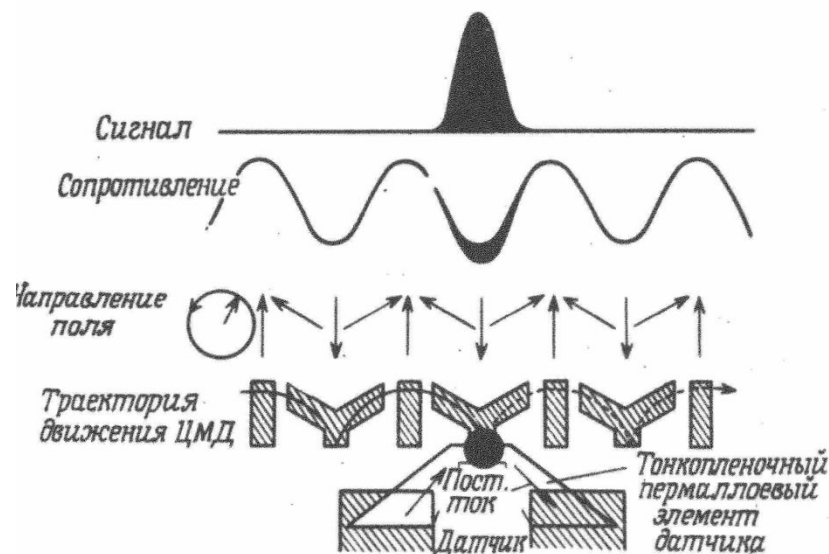
5. Детектирование динамических неоднородностей (ЦМД)

Детектирование ЦМД в определенных точках схем – считывание информации.

При детектировании ЦМД используются, как правило, физические процессы и явления, обратные процессу генерации. Таких физических процессов достаточно много. Считывание можно производить, например, измеряя **ЭДС индукции**, наводимой в петле проводника, расположенной в канале распространения ЦМД, при прохождении ЦМД.

С помощью петли тока можно и уничтожать ЦМД – стирать информацию, перемещая в петлю ЦМД и подавая импульс тока формирующий магнитное поле, приводящее к аннигиляции ЦМД.

На практике для детектирования ЦМД обычно используются **магниторезистивные датчики**. Если в каком-нибудь месте ЦМД-трека нанести тонкую пермаллоевую магниторезистивную пленку, то ее сопротивление будет периодически изменяться при вращении продвигающего поля. ЦМД, проходящий вблизи датчика, дает дополнительный вклад в магнитное поле, возмущающий периодическое изменение сопротивления.



Функциональная магнитоэлектроника

Устройства на ЦМД

Так же как зарядовые пакеты могут являться носителями информации. Наличие или отсутствие в данной области пленки ЦМД может идентифицироваться как логическая «1» или логический «0». Информация в двоичном коде может представляться цепочкой ЦМД. В отличие от магнитной ленты или магнитных дисков в случае ЦМД происходит движение не носителя, а информации.

Логические устройства на ЦМД

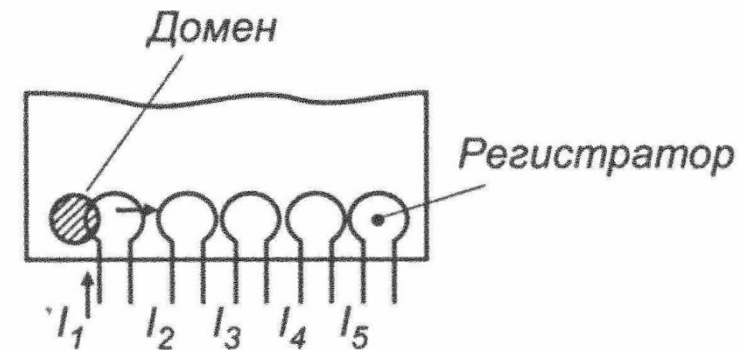
Логическая функция «И»

Токовые аппликации в форме петель проводников размещены в ряд относительно исходного положения ЦМД, а в последней петле ряда находится регистратор наличия домена.

Снимая с него выходной сигнал, получим информацию о реализации логической операции «И».

При подаче импульсов тока в районе каждой петли формируются градиенты нормальной составляющей магнитного поля, а внутри петель – магнитоэлектронные ловушки. Тем самым создаются условия для последовательного движения ЦМД через все петли. При достижении ЦМД последней петли, т. е. регистратора, на выходе схемы появится сигнал.

ЦМД взаимодействует только с рядом расположенной токовой аппликацией и при отсутствии импульса тока в любой токовой аппликации ЦМД не переместится в нее, а останется в предыдущей петле. Появление импульсов в последующих петлях не в состоянии вызвать дальнейшее движение ЦМД к регистратору. Логическая функция «И» будет выполнена только при условии подачи импульсов тока во все токовые петли управления.



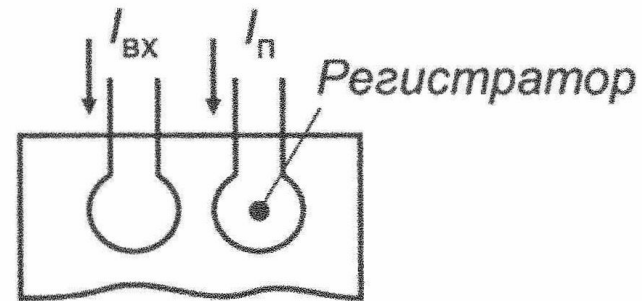
Функциональная магнитоэлектроника

Устройства на ЦМД

Логическая функция «НЕ»

Выходной сигнал на логическом элементе должен отсутствовать при подаче входного сигнала и наоборот. Логический элемент «НЕ» состоит из двух токовых петель, находящихся в контакте с ферромагнитной пластинкой.

Внутри выходной петли размещен регистратор ЦМД и на нее подан постоянный ток I_{Π} формирующий магнитостатическую ловушку, в которую предварительно введен цилиндрический магнитный домен.



Таким образом регистратор будет фиксировать наличие ЦМД в исходном состоянии при отсутствии входного импульса.

Если же подать во входную токовую петлю сигнал $I_{\text{вх}}$ такой величины, чтобы созданный вблизи нее градиент магнитного поля превышал градиент магнитного поля в магнитостатической ловушке выходной петли, то ЦМД переместится из выходной цепи во входную цепь. Таким образом, при наличии входного сигнала выходной сигнал отсутствует.

После прекращения входного импульса магнитное поле во входной петле исчезает, и под действием магнитного поля, созданного постоянным током выходной петли, ЦМД возвратится в выходную петлю, и на выходе возникнет импульс.

Функциональная магнитоэлектроника

Устройства на ЦМД

Логическая функция «И-ИЛИ»

Принцип работы таких устройств основан на формировании в тонких пермалловых аппликациях легкого и тяжелого пути перемещения ЦМД. Легкий путь перемещения – это направление движения одиночного входного ЦМД только под влиянием вращающегося магнитного поля.

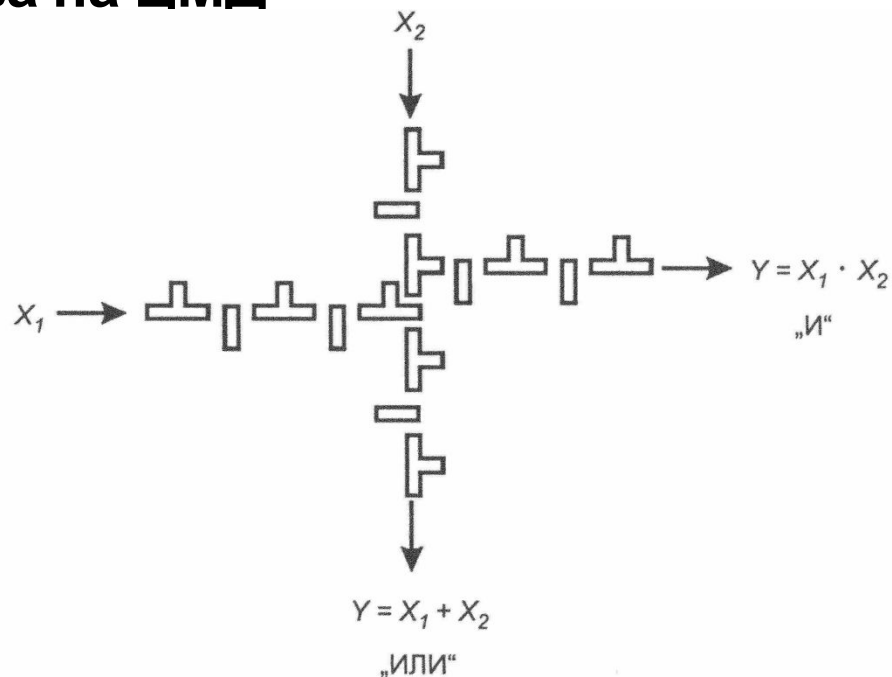
Это путь домена с входа X_1 или X_2 по направлению к выходу $X_1 + X_2$.

Путь тяжелого перемещения – это ответвление от основного канала продвижения.

Перемещение домена по тяжелому пути (выход $X_1 \cdot X_2$) возможно только тогда, когда в области пересечения тяжелого и легкого пути встречаются одновременно два домена, и из-за взаимного отталкивания один из доменов будет перемещаться по тяжелому пути.

Если одиночный домен поступает только по входу X_1 или X_2 , то он при вращении магнитного поля перемещается вдоль легкого пути $X_1 \rightarrow X_1 + X_2$ или $X_2 \rightarrow X_1 + X_2$ и реализуется логическая функция «ИЛИ».

Если же на входах X_1 или X_2 появляются одновременно два домена, то домен с входа X_2 поступает в канал тяжелого пути $X_1 \cdot X_2$, выполняя функцию «И», а домен с входа X_1 проходит по легкому пути на выход $X_1 + X_2$, реализуя логическую функцию «ИЛИ».¹⁸



Функциональная магнитоэлектроника

Устройства на ЦМД

Логическая функция «И-ИЛИ»

Принцип работы таких устройств основан на формировании в тонких пермалловых аппликациях легкого и тяжелого пути перемещения ЦМД. Легкий путь перемещения – это направление движения одиночного входного ЦМД только под влиянием вращающегося магнитного поля.

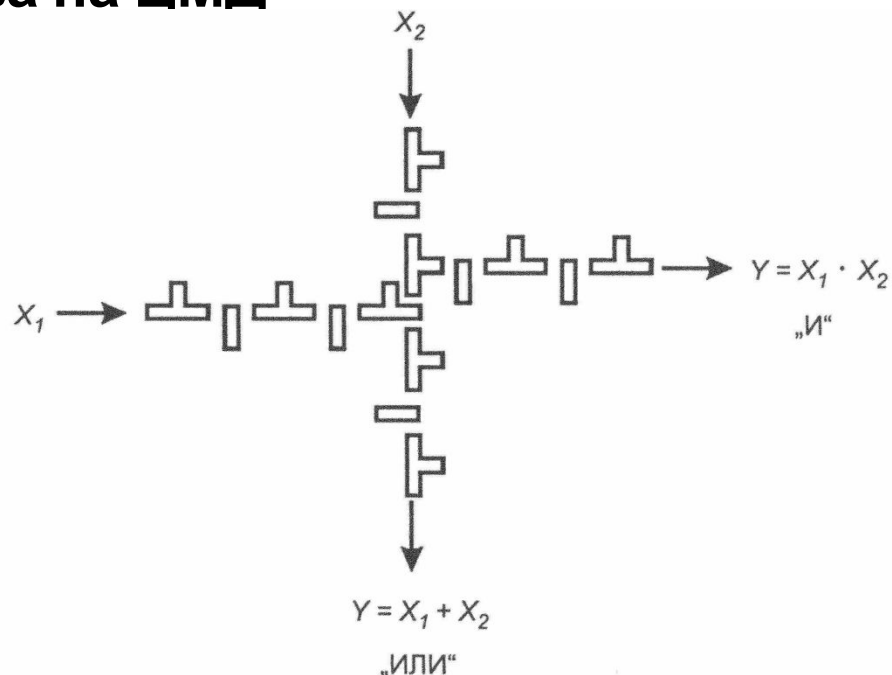
Это путь домена с входа X_1 или X_2 по направлению к выходу $X_1 + X_2$.

Путь тяжелого перемещения – это ответвление от основного канала продвижения.

Перемещение домена по тяжелому пути (выход $X_1 \cdot X_2$) возможно только тогда, когда в области пересечения тяжелого и легкого пути встречаются одновременно два домена, и из-за взаимного отталкивания один из доменов будет перемещаться по тяжелому пути.

Если одиночный домен поступает только по входу X_1 или X_2 , то он при вращении магнитного поля перемещается вдоль легкого пути $X_1 \rightarrow X_1 + X_2$ или $X_2 \rightarrow X_1 + X_2$ и реализуется логическая функция «ИЛИ».

Если же на входах X_1 или X_2 появляются одновременно два домена, то домен с входа X_2 поступает в канал тяжелого пути $X_1 \cdot X_2$, выполняя функцию «И», а домен с входа X_1 проходит по легкому пути на выход $X_1 + X_2$, реализуя логическую функцию «ИЛИ».¹⁹

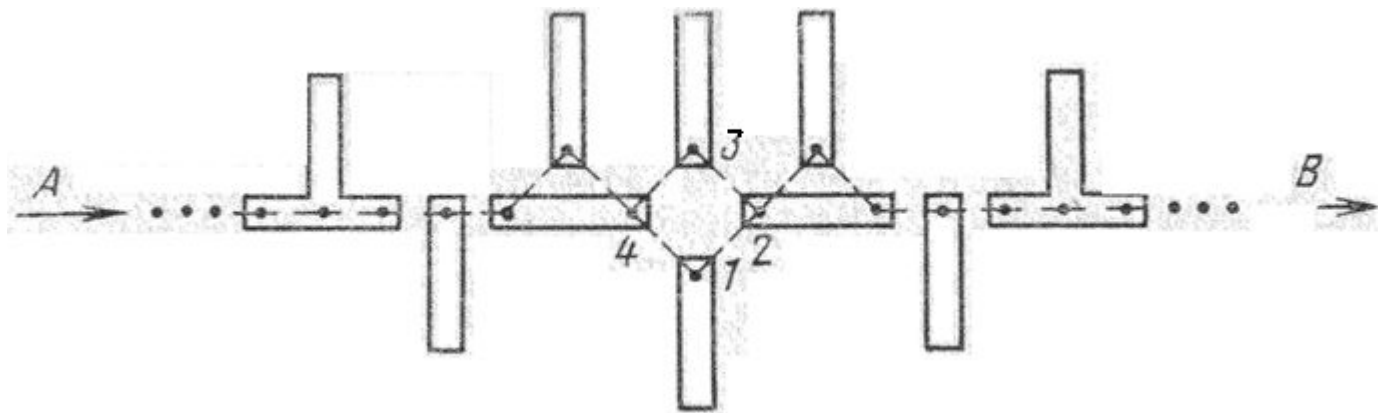


Функциональная магнитоэлектроника

Устройства на ЦМД

Динамическая ловушка (устройство задержки)

В динамической ловушке осуществляется фиксированная задержка ЦМД в канале продвижения до момента поступления следующего ЦМД на ее вход.



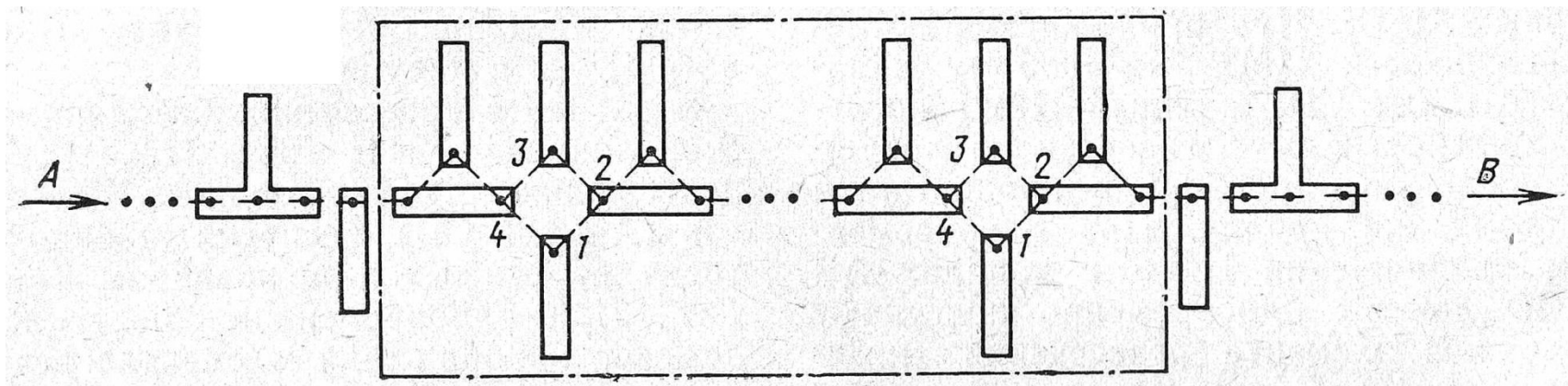
ЦМД, продвигающийся по каналу АВ и попавший в ловушку, циркулирует в ней, занимая последовательно 1 — 2 — 3 — 4.

Следующий поступивший на вход ловушки ЦМД в результате магнитостатического взаимодействия выталкивает находящийся в ней домен в канал продвижения и занимает его место.

Функциональная магнитоэлектроника

Устройства на ЦМД

Регистр сдвига (компрессор)



За один такт работы устройства (один период вращения поля $H_{\text{упр}}$) осуществляет передачу ЦМД на расстояние, превышающее длину одного периода ДПС.

Он состоит из ряда последовательно соединенных динамических ловушек с буферными ЦМД.

При поступлении ЦМД на вход компрессора происходит синхронный сдвиг доменов в ловушках на один период ДПС. В результате на выходе компрессора появляется ЦМД.

Наиболее эффективно применение компрессора при построении последовательностных логических устройств с обратными связями в виде каналов продвижения разной длины.

Функциональная магнитоэлектроника

Устройства на ЦМД

Триггеры

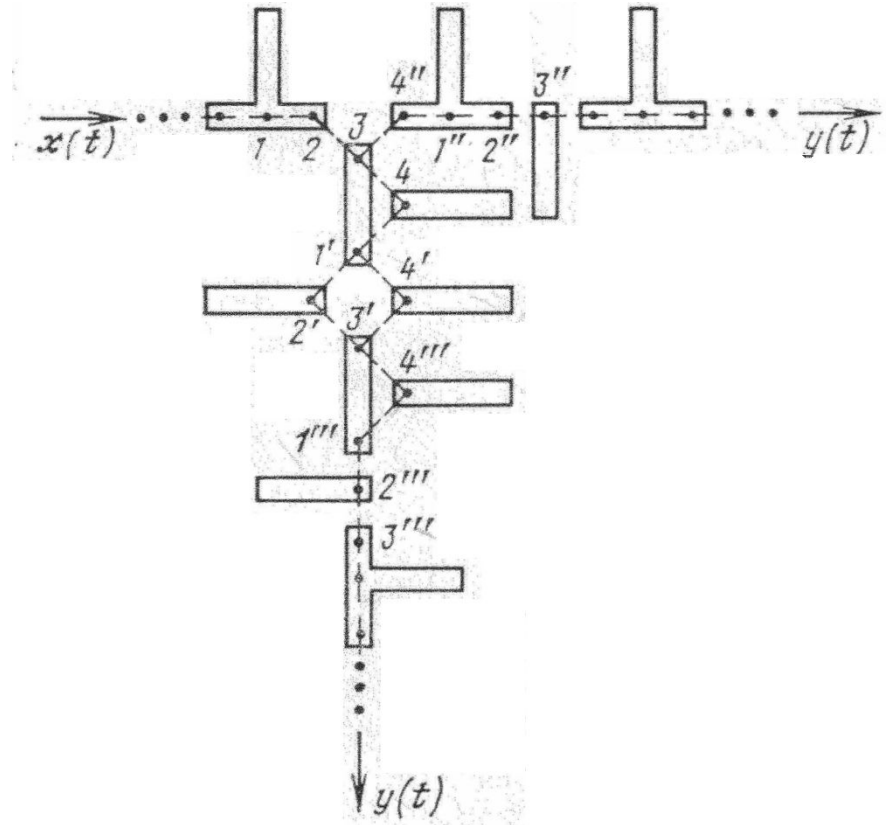
Принцип действия триггера на ЦМД, так же как и принцип действия логических элементов, основывается на взаимодействии ЦМД.

Основным элементом триггера является динамическая ловушка, наличие или отсутствие ЦМД в которой определяет единичное или нулевое состояние триггера соответственно.

Если в динамической ловушке, образованной полюсами $1' - 2' - 3' - 4'$, нет ЦМД – триггер в состоянии «0», то ЦМД, поданный в момент времени t на вход триггера $1 - 2 - 3$, из позиции 3 переходит в более предпочтительную позицию 4 и далее поступает в динамическую ловушку, переводя триггер в единичное состояние.

Если в ловушке имеется ЦМД – триггер в состоянии «1», то входной ЦМД за счет взаимодействия с доменом в ловушке из позиции 3 переходит в менее предпочтительную позицию $4''$ верхнего выходного канала $4'' - 1'' - 2'' - 3''$.

Одновременно ЦМД, находящийся в ловушке в позиции $3'$, выталкивается в позицию $4'''$ нижнего выходного канала $4''' - 1''' - 2''' - 3'''$, переводя триггер в состояние «0».



Функциональная магнитоэлектроника

Устройства на ЦМД

Запоминающее устройство

Запоминающее устройство на ЦМД в простейшем варианте реализуется на базе одной из схем продвижения доменов. Оно представляет собой регистр, рассчитанный на запоминание необходимого объема информации. Считывание может производиться как с разрушением, так и без разрушения информации.

Структура ЗУ включает кольцевой регистр сдвига (1), узел записи – генератор ЦМД (2), узел стирания – аннигилятор (3), узел считывания (4) и репликатор (5). Все узлы выполнены в виде соответствующих ферромагнитных аппликаций на магнитном слое.

Последовательный код, который необходимо запомнить, подается на формирователь тока записи генератора ЦМД (2). Если вводимый в ЗУ бит информации содержит «1», то ток записи формирует ЦМД. Запись информации в регистре сдвига (1) синхронизирована с магнитным полем продвижения: за один полный цикл изменения вращающегося магнитного поля сформированный генератором ЦМД передается в первую позицию регистра (1). В этот момент на формирователь тока записи подается следующий разряд кода. После завершения второго цикла изменения поля продвижения первый записанный код окажется во второй позиции регистра, а второй бит – в первой позиции. После n -циклов изменения магнитного поля продвижения в регистре (1) записывается n -разрядное число. Записанное число каждым следующим тактом перемещается на одну позицию вперед в кольцевом регистре.

Когда ЦМД достигает позиции репликатора (5), домен распадается на два, при этом один из образованных доменов передается на следующую позицию регистра, а второй домен перемещается в узел считывания (4). Для прочтения информации на схему считывания (4) подается сигнал опроса. Для записи новой информации предыдущая должна быть разрушена. Для этого в момент времени, когда подлежащий стиранию ЦМД находится в узле стирания (3), на него подается ток записи «0», т.е. ток аннигиляции ЦМД.

