

Министерство образования и науки Российской Фе-  
дерации  
Федеральное государственное бюджетное образова-  
тельное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Иркутский государственный университет»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

# **МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ



УДК 539.293.2(075.8)

ББК 31.233я73

М12

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
ФГБОУ ВПО «ИГУ»

**Рецензенты:**

*А. Е. Гафнер*, кандидат физ.-мат. наук, доцент

*Л. А. Щербаченко*, доктор технических наук, профессор

М12            **Магнитные материалы микро- и наноэлектроники** :  
учеб. пособие / А. Л. Семенов, А. А. Гаврилюк, Н. К. Ду-  
шутин, Ю. В. Ясюкевич. – Иркутск : Изд-во ИГУ, 2012. –  
147 с.

**ISBN 978-5-9624-0624-4**

Пособие содержит основы теории намагничивания ферро-  
магнетиков, описание структуры и свойств магнитных материа-  
лов, включая классификацию методов записи информации для  
ЭВМ. Обсуждаются магнетики с гигантским магнитным сопро-  
тивлением и магнитоэлектрические материалы; приведены также  
основы логической магнитоэлектроники; отдельные главы по-  
священы преобразователям магнитного поля, классическому эф-  
фекту Холла и магнитным датчикам.

Предназначено для студентов физического факультета и ас-  
пирантов физических специальностей, преподавателей средних и  
высших учебных заведений.

УДК 539.293.2(075.8)

ББК 31.233я73

ISBN 978-5-9624-0624-4

© ФГБОУ ВПО «ИГУ», 2012

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	5
1. Основы теории намагничивания ферромагнетиков .....	6
1.1. Статические характеристики процесса намагничивания .....	6
1.2. Динамические характеристики процесса намагничивания .....	15
1.3. Магнитная проницаемость ферромагнетика при динамическом намагничивании .....	19
2. Структура и свойства магнитных материалов .....	24
2.1. Магнитомягкие материалы .....	24
2.2. Магнито жесткие материалы .....	34
2.3. Магнитные материалы, используемые для магнитной записи и хранения информации .....	38
2.4. Классификация методов записи информации для ЭВМ .....	41
3. Магнетики с гигантским магнитосопротивлением .....	45
3.1. Гранулированные магнитные материалы .....	46
3.2. Магнитосопротивление гранулированных композитов <i>металл – диэлектрик</i> .....	48
3.3. Магнитосопротивление в гранулированных многослойных структурах .....	52
3.4. Магнитосопротивление гранулированных материалов типа <i>ферромагнитный металл – немагнитный металл</i> .....	55
3.5. Магнитные датчики на основе эффекта гигантского магнитного импеданса .....	58
3.6. Применение материалов с эффектом гигантского магнитосопротивления .....	61
4. Магнитоэлектрические материалы .....	66
4.1. Магнитоэлектрический эффект и эффект гигантской магнитоемкости .....	66
4.2. Магнитоэлектрические материалы .....	67
4.3. Практическое применение магнитоэлектрических материалов ..	68
5. Логическая магнитоэлектроника .....	71
5.1. Цилиндрические магнитные домены .....	71
5.1.1. Запоминающие устройства на ЦМД .....	75
5.1.2. Логические устройства на ЦМД .....	83
5.1.3. Считывание информации в материалах с ЦМД .....	89

5.2. Плоские магнитные домены .....	91
5.2.1. Формирование и продвижение верхушек одиночных плоских доменов в узких каналах .....	91
5.2.2. Запоминающие устройства на плоских магнитных доменах ..	93
5.2.3. Логические элементы на плоских магнитных доменах .....	95
5.2.4. Наблюдение и регистрация плоских магнитных доменов ...	98
6. Преобразователи магнитного поля .....	101
6.1. Элементы Холла .....	102
6.1.1. Погрешности преобразователей Холла .....	106
6.1.2. Применение элементов Холла .....	108
6.2. Магниторезисторы .....	109
6.2.1. «Монолитные» магниторезисторы .....	110
6.2.2. «Пленочные» магниторезисторы .....	112
6.2.3. Применение магниторезисторов .....	115
6.3. Магнитодиоды .....	115
6.3.1. Магнитодиоды на основе МОП-технологии .....	117
6.3.2. Магнитодиоды на основе технологии «кремний на сапфире» .....	117
6.3.3. Применение магнитодиодов .....	118
6.4. Эффект Виганда .....	119
6.5. Феррозондовые ПМП .....	120
7. Магнитные датчики .....	123
7.1. Принцип действия и конструкции магнитных датчиков перемещения .....	123
7.2. Датчики линейного перемещения (ДЛП) .....	127
7.3. Магнитные датчики приближения .....	128
7.4. Щелевые магнитные датчики .....	128
7.5. Магнитные датчики угла поворота .....	131
7.6. Датчики вращения .....	134
7.6.1. Датчики скорости вращения, основанные на счете зубьев ферромагнитных шестерен .....	134
7.6.2. Датчики вращения на эффекте Виганда .....	135
7.7. Магнитоэлектронные воспроизводящие и считывающие головки	137
7.8. Тонкопленочная магнитная головка с магниторезистивным элементом .....	140
7.9. Тонкопленочная магнитная головка с многовитковой обмоткой	142
7.10. Комбинированные магнитные головки .....	143
7.11. Считывающее карточное устройство, использующее эффект Виганда .....	144
Список рекомендованной литературы .....	147

## **ВВЕДЕНИЕ**

Развитие микроэлектроники и вычислительной техники – основной фактор прогресса в большинстве областей науки, техники и производства. Ведущую роль в элементной базе современной микроэлектроники и вычислительной техники играют устройства из ферро- и антиферромагнетиков. Традиционно магнитомягкие ферромагнитные материалы находят свое применение в качестве сердечников трансформаторов и дросселей, а магнито жесткие ферро- и антиферромагнитные материалы – в качестве материалов для постоянных магнитов. Наиболее быстроразвивающимся направлением практического применения магнитных материалов в этой области, в настоящее время, является запись информации на магнитных носителях. Также в последние годы магнитные материалы все активнее используются в качестве элементной базы микроэлектроники. Постоянно совершенствуются и оттачиваются отдельные вопросы теории преобразователей магнитного поля, разрабатываются и внедряются новые принципы их конструирования и технология производства. На мировом рынке появились принципиально новые приборы и устройства. В результате синтеза микроэлектроники и интегральных магниточувствительных элементов (преобразователей магнитного поля) возникло новое научно-техническое направление: микро- и наномикромагнитоэлектроника. Развитие микро- и наномикромагнитоэлектроники позволяет разрабатывать и производить современные магнитоэлектронные устройства и приборы. Изделия микромагнитоэлектроники используются в системах управления производственными процессами, в автомобильной электронике, измерительной и вычислительной технике, в дефектоскопии, медицинских и бытовых приборах и т. д. Зарубежные фирмы производят в год несколько миллиардов изделий микромагнитоэлектроники. Оценка возможностей и перспектив применения устройств и приборов микромагнитоэлектроники и их очевидных преимуществ перед другими группами изделий электронной техники, выполняющих сходные функции, показывает, что в России это научно-техническое направление практически не освоено.

# 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

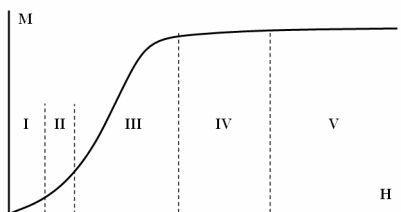
## 1.1. СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА НАМАГНИЧИВАНИЯ

*Статическими характеристиками процесса намагничивания ферромагнетика называют его характеристики, полученные в постоянных или медленно изменяющихся магнитных полях.*

Рассмотрим, в самом общем виде, *кривую начального намагничивания*, наблюдаемую на полностью размагниченом ферромагнетике.

Достижение полностью размагниченого состояния ферромагнетика является достаточно сложной практической задачей. Обычно полностью размагниченое состояние достигается при приложении к ферромагнетиком медленно убывающего по амплитуде, знакопеременного магнитного поля, или же путем нагрева ферромагнетика до температуры Кюри с последующим его охлаждением в отсутствие внешнего магнитного поля.

Кривая начального намагничивания может быть разделена на ряд участков, которые соответствуют физически различным процессам, обуславливающим изменение намагниченности ферромагнетика. На этих участках зависимость величины намагниченности  $M$  ферромагнетика от внешнего магнитного поля  $H$  различна (рис. 1.1).



**Рис. 1.1.** Схематичное изображение кривой намагничивания: *I* — область начального намагничивания; *II* — область Рэлея; *III* — область наибольших проницаемостей; *IV* — область приближения намагниченности к насыщению; *V* — область парапроцесса

Рассмотрим подробнее особенности каждого участка кривой начального намагничивания.

### 1. Область начального намагничивания

В очень слабых магнитных полях (область I на рис. 1.1) величина  $M$  прямо пропорциональна  $H$ .

$$M = \chi H . \quad (1.1)$$

Постоянный коэффициент  $\chi$  носит название *начальной магнитной восприимчивости*. Соответственно, коэффициент пропорциональности  $\mu_H$  между магнитной индукцией ферромагнетика  $B$  и величиной внешнего магнитного поля  $H$  получил название *начальной магнитной проницаемости*.

$$B = \mu_0 \mu_H H , \quad (1.2)$$

где  $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$  Гн/м – магнитная проницаемость вакуума.

Область начального намагничивания может быть определена как область обратимых процессов намагничивания; и при возрастании и при убывании  $H$  изменение намагниченности  $\Delta M$  и индукции  $\Delta B$  ферромагнетика прямо пропорционально изменению внешнего магнитного поля  $\Delta H$ :

$$\Delta M = \chi_H \Delta H \quad (1.3)$$

$$\Delta B = \mu_0 \mu_H \Delta H \quad (1.4)$$

Отвечать на вопрос о том, какие магнитные поля можно рассматривать как очень слабые, можно только применительно к конкретному виду исследуемого ферромагнетика. Помимо этого, от вида ферромагнетика существенно зависят области начального намагничивания.

Изменение намагниченности у большинства магнитомягких ферромагнетиков на этом участке кривой начального намагничивания, как правило, обусловлено процессами обратимого смещения доменных границ. У магнито жестких материалов, а также у магнитомягких материалов с сильно выраженной одноосной магнитной анизотропией процессы смещения доменных границ в слабых магнитных полях могут практически отсутствовать. У таких материалов значение начальной восприимчивости определяется, в основном, процессами вращения намагниченности в доменах.

Для железоникелевых сплавов, таких как пермаллой, начальная проницаемость может достигать значений в несколько десятков тысяч единиц. Отметим также, что значения  $\mu_H$  для ши-

роко используемой в настоящее время электротехнической кремнистой стали составляют 300–1000.

## 2. Область Рэлея

Характерной особенностью для второго участка кривой, представленной на рис. 1.1, лежащего также в области слабых магнитных полей, является наличие квадратичного слагаемого по  $H$  в выражениях для намагниченности и индукции ферромагнетика

$$M = \chi_H H + \frac{\pi}{8} \alpha H^2 \quad (1.5)$$

$$B = \mu_0 \mu_H H + \frac{1}{2} \alpha H^2, \quad (1.6)$$

где  $\alpha$  – постоянная Рэлея. Появление второго слагаемого в выражениях (1.5) и (1.6) обусловлено тем, что в рассматриваемой области с ростом  $H$  возникает необратимое намагничивание ферромагнетика. В рэлеевской области свойства ферромагнетика можно охарактеризовать восприимчивостью:

$$\chi = \chi_H + \frac{\pi}{8} \alpha H \quad (1.7)$$

и проницаемостью

$$\mu = \mu_H + \frac{1}{2} \alpha H \quad (1.8)$$

Во второй области кривой начального намагничивания восприимчивость и проницаемость не являются постоянными величинами, а линейно возрастают с ростом  $H$ . Для большинства ферромагнетиков намагниченность в широком интервале  $H$  следует закону Рэлея. Однако существуют магнитные материалы, например ферриты, к которым этот закон неприменим.

## 3. Область наибольших проницаемостей

При дальнейшем росте  $H$  наблюдается наиболее значительное увеличение намагниченности ферромагнетика (рис. 1.1, область III). В этой области величина дифференциальной магнитной восприимчивости  $\chi_d$  достигает максимума.

$$\chi_d = \frac{dM}{dH} \quad (1.9)$$

Область наибольших проницаемостей характеризуется крупными ступенчатыми изменениями намагниченности (*скач-*



ками Баркгаузена). Ступенчатое изменение намагниченности (скачки Баркгаузена) связано с необратимым смещением доменных границ под действием внешнего магнитного поля. Вблизи максимума дифференциальной магнитной восприимчивости наблюдаются наибольшие запаздывания во времени изменений намагниченности ферромагнетика  $\Delta M$  по отношению к изменению  $\Delta H$ . Такое запаздывание изменения намагниченности по отношению к действию внешнего магнитного поля получило название магнитной вязкости.

Изменение намагниченности при малых изменениях  $\Delta H$  в рассматриваемой области может носить нерегулярный характер. Такая нерегулярность определяется, в основном, существованием скачков Баркгаузена – малые изменения  $\Delta H$  могут либо вовсе не вызывать заметного изменения намагниченности, либо вызвать ее резкий и достаточно большой скачок.

Другого рода нерегулярность в области наибольших магнитных проницаемостей заключается в запаздывании во времени изменения намагниченности ферромагнетика по отношению к действию магнитного поля.

Процессы намагничивания на рассматриваемом участке зависимости  $M = f(H)$  являются в значительной степени необратимыми. Поэтому значения дифференциальной магнитной восприимчивости (проницаемости), полученные при возрастании магнитного поля

$$\chi_d = \frac{dM}{dH}, \quad dH > 0, \quad H > 0, \quad M > 0 \quad (1.10)$$

и при его убывании

$$\chi_{d-} = \frac{dM}{dH}, \quad dH < 0, \quad H > 0, \quad M > 0, \quad (1.11)$$

значительно различаются.

Окончанием области наибольших проницаемостей следует считать значения магнитных полей, при которых магнитная восприимчивость (проницаемость), пройдя максимум, значительно уменьшается. При этом намагниченность ферромагнетика приближается к своему предельному значению. В конце рассматриваемой области значительную роль начинают играть процессы вращения намагниченности. В массивных ферромагнитных материалах процессы вращения намагниченности являются обратимыми, поэтому об их вкладе в намагничивание ферромагнетика можно судить по изменению разницы в значениях  $\chi_d$  и  $\chi_{d-}$ .

#### 4. Область приближения к насыщению

В этой области на кривой начального намагничивания ферромагнетика (рис. 1.1, область IV) его восприимчивость постепенно уменьшается, а намагниченность приближается к насыщению. Изменение намагниченности ферромагнитного образца осуществляется путем поворота векторов намагниченности к направлению действия  $H$ . Такой поворот векторов намагниченности является обратимым, в результате чего в области приближения к насыщению хорошо выполняется соотношение

$$\left(\frac{dM}{dH}\right)_{dH>0} \approx \left(\frac{dM}{dH}\right)_{dH<0} \quad (1.12)$$

Поведение намагниченности ферромагнетика в области приближения к насыщению описывается соотношением

$$M = M_s \left(1 - \frac{\alpha_1}{H} - \frac{\alpha_2}{H^2} - \frac{\alpha_3}{H^3} - \dots\right) + M_n, \quad (1.13)$$

где  $M_s$  – намагниченность насыщения,  $M_n$  – намагниченность парапроцесса,  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – постоянные.

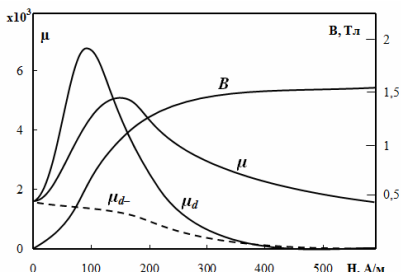
#### 5. Область парапроцесса

В области очень сильных магнитных полей, когда закончились процессы смещения доменных границ и процессы вращения намагниченности, малые приращения намагниченности могут происходить за счет парапроцесса, т. е. за счет непосредственного увеличения намагниченности ферромагнетика под действием  $H$  (рис. 1.1, область V). Восприимчивость парапроцесса

$$\chi_{nap} = \left(\frac{dM}{dH}\right)_{M \approx M_s} \quad (1.14)$$

очень мала и составляет порядка сотых и тысячных долей единиц.

Характерные зависимости величины магнитной проницаемости ферромагнетика от  $H$  приведены на рис. 1.2. Отметим тот факт, что ход зависимостей  $\mu_d(H)$  и  $\mu_{d-}(H)$  совпадает в областях, где отсутствуют необратимые процессы намагничивания ферромагнетика. Тангенс угла наклона касательной на первом участке начальной кривой намагничивания определяет начальную проницаемость  $\mu_H$ . На этом участке справедливо равенство  $\mu_H = \mu_d = \mu_{d-}$ .



**Рис. 1.2.** Зависимости магнитной проницаемости  $\mu$ , дифференциальной проницаемости  $\mu_d$  и дифференциальной проницаемости убывания  $\mu_{d-}$  на кривой первоначального намагничивания

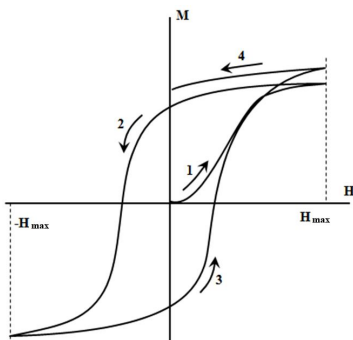
Максимальный угол наклона касательной определяет максимальное значение дифференциальной магнитной проницаемости  $\mu_{dmax}$  ферромагнетика. В свою очередь, максимальный угол наклона касательной, проведенной из начала координат к начальной кривой намагничивания, определяет величину максимальной магнитной проницаемости  $\mu_{max}$ .

Магнитная проницаемость начальной кривой намагничивания  $\mu$  связана с дифференциальной магнитной проницаемостью при возрастании магнитного поля соотношением

$$\mu = \frac{1}{H} \int_0^H \mu_d dH \quad (1.15)$$

Процессы намагничивания ферромагнетика часто являются необратимыми. В этом случае при возрастании и последующем убывании магнитного поля намагниченность ферромагнетика может оказаться различной для одних и тех же значений  $H$ . Такое поведение магнитного вещества называется гистерезисом. Ход зависимости  $M(H)$ , представленный в графическом виде, называется петлей гистерезиса. На рис. 1.3 представлено изменение намагниченности предварительно размагниченного вещества, наблюдаемое: 1 – при возрастании  $H$  от 0 до  $H_{max}$ ; 2 – при последующем изменении поля до  $-H_{max}$ ; 3 – при повторном увеличении поля до  $H_{max}$ ; 4 – при дальнейшем уменьшении  $H$  до нуля.

Как следует из рис. 1.3, для одного и того же значения  $H$  величина  $M$  различна. Петля гистерезиса, представленная на рис. 1.3, является симметричной, но неустановившейся – второй цикл намагничивания отличается от первого. После нескольких циклов перемагничивания петля гистерезиса стабилизируется, и изменения намагниченности при каждом новом цикле перемагничивания повторяются.



**Рис. 1.3.** Петля гистерезиса: 1 – при первоначальном намагничивании полем, возрастающем до  $+H_{\max}$ ; 2 – при последующем уменьшении поля до  $-H_{\max}$ ; 3 – при новом возрастании поля; 4 – при уменьшении поля до нуля

Характерными точками предельной петли гистерезиса являются точки ее пересечения с координатными осями. Значение намагниченности при  $H = 0$  носит название *остаточной намагниченности*  $M_r$ . Величина магнитного поля, при котором значение  $M = 0$ , получило название коэрцитивной силы  $H_c^M$  по намагниченности. Значение магнитного поля, при котором магнитная индукция ферромагнетика равна нулю, называется коэрцитивной силой по индукции  $H_c$ .

Коэрцитивная сила по намагниченности  $H_c^M$  для некоторых ферромагнетиков может значительно отличаться от коэрцитивной силы по индукции  $H_c^B$ . Так, для массивных образцов из железокобальтового феррита разность между  $H_c^M$  и  $H_c^B$  может достигать 28 000 А/м. Однако для большинства известных магнитных материалов различие между  $H_c^M$  и  $H_c^B$  незначительно.

Площадь петли гистерезиса ферромагнетика  $S$  характеризует энергию, затрачиваемую на его перемагничивание:

$$S = \oint H dM \quad (1.16)$$

Все возможные петли гистерезиса, за исключением предельной петли, получили название *частных циклов*. Значение коэрцитивной силы частного цикла зависит от характера предшествующего намагничивания. В большинстве случаев в качестве характеристики магнитного материала принимается значение коэрцитивной силы, полученное на предельной петле гистерезиса.

В настоящее время не имеется точного аналитического выражения для описания поведения зависимостей  $B(H)$  и  $M(H)$  при перемагничивании ферромагнетика. Существует ряд приближенных математических методов для получения выражения указан-

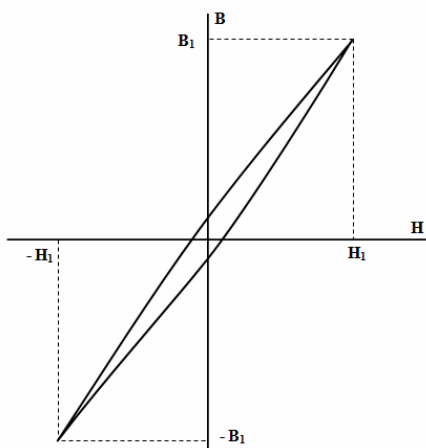
ных зависимостей на кривой начального намагничивания. Еще более сложно получить аналитическое выражение для петли гистерезиса. Одно из выражений, позволяющее подбором соответствующих коэффициентов приблизиться к экспериментальным зависимостям, можно записать в виде (*приближение Астбэри*):

$$B(t) = B_m \sin \omega t \quad (1.17)$$

$$H = H_m \sin(\omega t + z), \quad (1.18)$$

где  $z = a - b \sin 2\omega t$ .

Варьируя коэффициенты  $a$  и  $b$ , можно получить хорошее совпадение расчетных и экспериментальных зависимостей. Недостатком указанного приближения является то, что оно приводит к сложным уравнениям даже при описании сравнительно простых процессов перемагничивания ферромагнетика.



**Рис. 1.4.** Петля гистерезиса, соответствующая закону Рэлея

В области слабых магнитных полей для большинства ферромагнетиков петля гистерезиса имеет эллиптический вид (рис. 1.4), благодаря чему изменение намагниченности может быть записано в достаточно простой аналитической форме. Такая аналитическая форма получила название *закона Рэлея*. Пусть  $H_1$  – амплитуда магнитного поля. Если намагничивание ферромагнетика происходит на восходящем участке петли гистерезиса, где

магнитное поле изменяется от  $-H_i$  до  $H_i$ , то выражение для намагниченности может быть представлено в виде:

$$M + M_i = \chi_H (H + H_i) + \frac{1}{2} \alpha (H + H_i)^2 \quad (1.19)$$

В свою очередь, на нисходящем участке петли гистерезиса изменение намагниченности запишется в форме:

$$M - M_i = \chi_H (H - H_i) + \frac{1}{2} \alpha (H - H_i)^2 \quad (1.20)$$

Подставляя значение  $M = M_i$  в (1.19) при  $H=H_i$ , определим выражение для  $M_i$

$$M_i = \chi_H H_i + \frac{1}{2} \alpha H_i^2 \quad (1.21)$$

Подставляя (1.21) в (1.19) и (1.20), найдем, что в возрастающем поле выражение для намагниченности представляется в форме:

$$M = (\chi_H + \alpha H_i) H + \frac{1}{2} \alpha (H^2 - H_i^2), \quad (1.22)$$

а в убывающем поле выражение для намагниченности запишется как:

$$M = (\chi_H + \alpha H_i) H - \frac{1}{2} \alpha (H^2 - H_i^2) \quad (1.23)$$

Из соотношений (1.22) и (1.23) можно определить потери на гистерезис  $W$ :

$$W = \frac{4}{3} \alpha \mu_0 H_i^3 \quad (1.24)$$

Из соотношения (1.24) следует, что в случае эллиптической петли гистерезиса даже небольшой рост амплитуды перемагничивающего поля приводит к резкому увеличению потерь на гистерезис.

## 1.2. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА НАМАГНИЧИВАНИЯ

Как правило, рабочий режим магнитных материалов микроэлектроники осуществляется при периодическом изменении внешнего магнитного поля от его максимального положительного значения до его максимального отрицательного значения. Намагниченность материала при этом пробегает замкнутую гистерезисную петлю. При быстром изменении внешнего магнитного поля динамическая петля гистерезиса магнитных материалов значительно отличается от петли гистерезиса, полученной в условиях квазистатического перемагничивания. Причиной этого являются следующие факторы:

1. При низких частотах (примерно до 1 кГц) перемагничивающего переменного магнитного поля основным вкладом в потери на перемагничивание в многодоменных ферромагнетиках являются потери, связанные с необратимым смещением доменных границ. Потери на вихревые токи, как правило, малы.

2. При более высоких частотах (от 1 кГц и выше) изменения внешнего магнитного поля значительную роль в потерях на перемагничивание начинают играть потери на вихревые токи, связанные с процессами вращения намагниченности, которые можно разделить на макроскопическую и микроскопическую составляющие. Чем выше частота перемагничивающего переменного магнитного поля и чем толще ферромагнитный образец, тем значительнее потери на вихревые токи. Причина возникновения макроскопической составляющей связана с изменением намагниченности ферромагнетика как целого (т. е. приобретением им в результате действия внешнего магнитного поля составляющей, ориентированной параллельно  $H$ ). Микроскопическая составляющая обусловлена изменением ориентации намагниченности в отдельно взятых доменах. Микроскопический вклад в потери на перемагничивание проявляется на более высоких частотах переменного магнитного поля, чем макроскопический. Вместе с тем величина того или иного вклада, связанного с процессами поворота намагниченности, определяется толщиной ферромагнетика.

В свою очередь, гистерезисная составляющая потерь на перемагничивание с ростом частоты переменного магнитного поля монотонно уменьшается. Это связано с тем, что при высоких частотах  $H$  доменные границы не успевают изменить свое равновес-

ное положение при изменении внешнего магнитного поля, а, следовательно, и не вносят вклад в потери на перемагничивание.

Форма динамической петли гистерезиса зависит от амплитуды магнитной индукции. В слабых магнитных полях динамическая петля гистерезиса имеет форму, близкую к эллипсу. Эллиптический характер петли гистерезиса приобретает и при возрастании частоты переменного магнитного поля.

При синусоидальном изменении магнитной индукции

$$B = B_m \sin \omega t \quad (1.25)$$

напряженность магнитного поля содержит ряд высших гармонических составляющих

$$H = H_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1) + H_{m2} \sin(\omega t + \varphi_2) + H_{m3} \sin(\omega t + \varphi_3) + \dots \quad (1.26)$$

Только тогда, когда форма петли гистерезиса представляет собой эллипс, синусоидальному изменению индукции соответствует синусоидальное изменение магнитного поля.

$$H = H_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1) \quad (1.27)$$

В том случае, когда петля гистерезиса снимается в режиме синусоидального магнитного поля, возникающая в образце индукция представляется в виде суммы высших гармонических составляющих.

В случае заметного влияния вихревых токов форма динамической петли гистерезиса при одинаковых максимальных значениях  $B$  (или  $H$ ) различна при синусоидальном изменении индукции и при синусоидальном изменении магнитного поля. В последнем случае петля гистерезиса должна быть шире, так как при наличии высших гармонических составляющих индукции возрастают вихревые токи, а, следовательно, и потери, связанные с ними. Таким образом, при проведении измерений динамических магнитных параметров ферромагнетика следует обращать внимание на то, в каком режиме находится ферромагнетик – в режиме синусоидальной индукции или в режиме синусоидального магнитного поля.

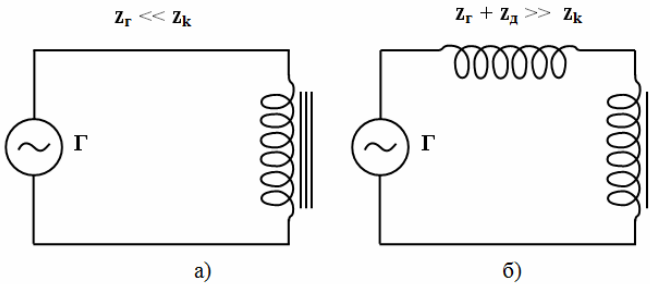


В самом общем виде схемы электрических цепей, обеспечивающие синусоидальность  $B$  и синусоидальность  $H$ , представлены на рис. 1.5.

В первой схеме генератор вследствие малого внутреннего сопротивления  $z_r$  является источником напряжения  $U$ . При выполнении условия  $z_r \ll z_k$  (где  $z_k$  – сопротивление катушки индуктивности) справедливо соотношение:

$$U = n s \left( \frac{dB}{dt} \right), \quad (1.28)$$

где  $s$  – площадь поперечного сечения витка катушки,  $n$  – количество витков в ней. Следовательно, появлению синусоидальной разности потенциалов  $U$  на зажимах катушки соответствует возникновение синусоидального изменения индукции  $dB/dt$ .



**Рис. 1.5.** Схема электрической цепи, обеспечивающей синусоидальность индукции (а) и синусоидальность напряженности поля (б)

Во второй схеме генератор вследствие большого внутреннего сопротивления или дополнительно включенного в цепь сопротивления  $z_d$  и синусоидальности  $U$  производит синусоидальное изменение тока в катушке, а, следовательно, и синусоидальное изменение магнитного поля.

Пусть ферромагнитный образец намагничивается в режиме синусоидально изменяющейся индукции. Действующее значение магнитного поля при этом определяется как

$$H_{\varrho} = (H_{m1}^2 + H_{m2}^2 + H_{m3}^2 + \dots)^{1/2}, \quad (1.29)$$

а эквивалентная синусоида напряженности магнитного поля как

$$H_{\varrho}(t) = H_{\varrho m} \sin(\omega t + \delta_{\varrho}), \quad (1.30)$$

где  $\delta_3$  – фазовый угол, определяющий величину потерь энергии при намагничивании ферромагнетика. При этом справедливо следующее соотношение

$$H_{эм} / \sqrt{2} = (H_{m1}^2 + H_{m2}^2 + H_{m3}^2 + \dots)^{1/2} \quad (1.31)$$

Мощность потерь энергии на перемагничивание ферромагнетика можно записать в виде:

$$P_{cm} = H_3 B \cos \delta_3 \quad (1.32)$$

В ряде случаев характеристиками процесса намагничивания ферромагнетика могут служить значения соответствующей гармоники, отнесенные к эффективному значению магнитного поля или к амплитуде первой гармоники.

$$h_m = H_n / H_0 \quad (1.33)$$

$$h_n = H_n / H_1 \quad (1.34)$$

Значения  $h_n$  называют коэффициентами гармоник магнитного поля. Величина действующего значения магнитного поля  $H_0$  связана с амплитудой первой гармоники соотношением

$$H_d = H_1 (1 + h_2^2 + h_3^2 + \dots)^{1/2} \quad (1.35)$$

Соотношение (1.35) позволяет при известных  $H_d$  и  $H_1$  оценить вклад более высоких гармоник в процесс намагничивания ферромагнетика.

Аналогичные характеристики, касающиеся магнитной индукции, можно рассмотреть и для случая синусоидального изменения внешнего магнитного поля. Для того чтобы судить о свойствах магнитного сердечника в условиях синусоидального изменения магнитного поля, важно определить отношение амплитуд первой гармонической составляющей магнитной индукции к ее высшим составляющим.

$$b_n = B_n / B_1 \quad (1.36)$$

### 1.3. МАГНИТНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ФЕРРОМАГНЕТИКА ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАМАГНИЧИВАНИИ

Как отмечалось выше, зависимость между  $H$  и  $B$  выражается эллиптической петлей гистерезиса в случае если синусоидальному изменению внешнего магнитного поля

$$H = H_m \sin \omega t \quad (1.37)$$

соответствует синусоидальное изменение магнитной индукции ферромагнетика, отстающее по фазе на угол  $\delta$ .

$$B = B_m \sin(\omega t + \delta) \quad (1.38)$$

Правую часть выражения (1.38) для магнитной индукции можно представить в виде двух составляющих. Первая из них совпадает по фазе с напряженностью магнитного поля, а вторая – отстает на четверть периода.

$$B = B_{m1} \sin \omega t + B_{m2} \cos \omega t, \quad (1.39)$$

где  $B_{m1} = B_m \cos \delta$ ;  $B_{m2} = B_m \sin \delta$ .

Плотность энергии  $\omega$ , затрачиваемой на перемагничивание ферромагнитного образца за один период действия внешнего магнитного поля, определится в этом случае как:

$$\omega = \int_{t=0}^T H_m \sin \omega t (B_{m1} \sin \omega t + B_{m2} \cos \omega t) d(\omega t) \quad (1.40)$$

Составляющая

$$\int_{t=0}^T H_m \sin \omega t B_{m2} \cos \omega t d(\omega t) = 0 \quad (1.41)$$

соответствует обратимым процессам намагничивания ферромагнетика, при которых рассеяния энергии не происходит. В свою очередь, составляющая

$$\int_{t=0}^T H_m \sin \omega t B_{m1} \sin \omega t d(\omega t) \neq 0 \quad (1.42)$$

характеризует процессы необратимого намагничивания ферромагнитного материала, связанные с рассеянием энергии. С учетом (1.41) и (1.42) выражение (1.40) может быть записано в виде

$$\omega = \pi H_m B_{m1} \quad (1.43)$$

Так как в случае эллиптической петли гистерезиса  $H$  и  $B$  являются в процессе перемагничивания ферромагнитного образца переменными величинами, то и его магнитная проницаемость в течение периода действия магнитного поля является переменной величиной.

Характер процесса перемагничивания ферромагнетика определяется не только отношением амплитуд  $B_m$  и  $H_m$ , но и величиной угла  $\delta$ , определяющей фазовый сдвиг между  $H$  и  $B$ . При этом тангенс угла  $\delta$  можно определить как отношение  $B_{m2}/B_{m1}$  амплитуд гармонических составляющих магнитной индукции:

$$\operatorname{tg} \delta = B_{m2} / B_{m1} \quad (1.44)$$

Величина  $\operatorname{tg} \delta$ , характеризующая потери на перемагничивание ферромагнетика, получила названия *тангенса угла магнитных потерь*.

В свою очередь, эллиптическую петлю гистерезиса можно представить в виде суммы двух слагаемых. Первое слагаемое  $\mu^0$  характеризует обратимые процессы перемагничивания

$$\mu^0 = B_{m2} / \mu_0 H_m, \quad (1.45)$$

а второе слагаемое  $\mu^H$  связано с необратимыми процессами перемагничивания

$$\mu^H = B_{m1} / \mu_0 H_m \quad (1.46)$$

Исторически первую компоненту магнитной проницаемости  $\mu^0$  называют *консервативной (или упругой) компонентой*, а вторую компоненту  $\mu^H$  – *консумптивной (т. е. потребляющей, поглощающей)*.

Можно записать магнитную проницаемость ферромагнетика при синусоидальных изменениях  $H$  и  $B$  и в несколько иной форме:

$$\frac{B}{\mu_0 H} = \mu \exp^{-j\delta} = \mu_1 - j\mu_2, \quad (1.47)$$

где  $j = (-1)^{1/2}$ . Вещественный член  $\mu_1$  совпадает с *консервативной* частью магнитной проницаемости, а мнимый член  $\mu_2$  – с ее *консумптивной* частью. Модуль магнитной проницаемости, определяемый из соотношения

$$|\mu| = (\mu_1^2 + \mu_2^2)^{1/2}, \quad (1.48)$$

совпадает с *полной (амплитудной) магнитной проницаемостью* ферромагнетика.

Величина магнитной проницаемости ферромагнетика при его динамическом намагничивании зависит от частоты переменного магнитного поля. Рассмотрим сначала частный случай частотной зависимости величины магнитной проницаемости ферромагнетика на примере процесса смещения доменных границ. Этот пример актуален уже потому, что процесс смещения доменных границ является одним из наиболее распространенных механизмов намагничивания ферромагнетика.

Все доменные границы в ферромагнетике имеют свою микромагнитную структуру и обладают определенными значениями энергии, величины которых зависят от целого ряда факторов. Основными факторами, определяющими структуру и энергию доменных границ, являются константа обменного взаимодействия ферромагнетика, константа анизотропии, намагниченность насыщения, величина магнитострикции и толщина образца. Как всякая физическая система, обладающая энергией, доменная граница при взаимодействии с внешним магнитным полем проявляет свои инерционные свойства. Она обладает инерционной массой, а, следовательно, и собственной частотой колебаний. Поэтому для того, чтобы доменная граница в результате действия внешнего магнитного поля смогла перейти из одного равновесного положения в другое, требуется определенное время. Временной интервал, необходимый для такого перехода, определяется как структурой и энергией самой доменной границы, так и особенностями строения ферромагнитного материала (дефектами кристаллической структуры, вариациями толщины образца и т. д.), в котором эта граница находится.

Если на доменную границу действует переменное магнитное поле, большее ее коэрцитивной силы, то доменная граница совершает вынужденные колебания с частотой, близкой к частоте действия внешнего магнитного поля. Амплитуда вынужденных колебаний доменной границы, при частотах переменного магнитного поля, далеких от ее собственной частоты, определяется амплитудой действующего магнитного поля. При достижении переменным магнитным полем собственной частоты доменная граница испытывает резонанс, и амплитуда ее колебаний резко возрастает. Благодаря этому резко возрастает и величина магнитной проницаемости, обусловленная смещением этой доменной границы. В том случае, если частота переменного магнитного поля превышает собственную частоту доменной границы, амплитуда колебаний последней уменьшается. Поэтому уменьшается и величина магнитной проницаемости, связанная со смещением доменной границы.

Другим основным процессом намагничивания ферромагнетиков является процесс вращения намагниченности. Зависимость магнитной проницаемости процесса вращения намагниченности от частоты переменного магнитного поля в интервале от нуля до нескольких сотен килогерц объясняется, главным образом, влиянием на процесс перемагничивания возникающих в образце вихревых токов. Чем выше частота переменного магнитного поля, тем больше амплитуда вихревых токов, и тем меньше значение магнитной проницаемости ферромагнетика. Вместе с тем при определенных условиях, когда частота переменного магнитного поля достигает мегагерцовой и гигагерцовой областей, в ферромагнетиках наблюдается явление, получившее название *ферромагнитного резонанса*. Одним из возможных режимов достижения ферромагнитного резонанса является следующий режим: постоянное насыщающее магнитное поле приложено перпендикулярно оси легкого намагничивания ферромагнетика. При этом высокочастотное переменное магнитное поле, с амплитудой много меньшей, чем поле анизотропии, направлено вдоль оси легкого намагничивания. При совпадении частоты переменного магнитного поля с собственной частотой колебаний намагниченности происходит резкое возрастание величины магнитной проницаемости. Так как собственная частота колебаний намагниченности зависит как от магнитных, так и структурных характеристик ферромагнетика, то метод ферромагнитного резо-

нанса является структурно чувствительным методом исследования магнитных материалов.

В самом общем случае, зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от частоты переменного магнитного поля определяется тем, с какой скоростью осуществляется изменение намагниченности при переходе из одного равновесного состояния к другому. Пусть намагниченность ферромагнетика изменяется в результате ступенчатого изменения амплитуды внешнего магнитного поля. Тогда наблюдаемое изменение намагниченности приближенно может быть представлено следующим выражением:

$$\Delta M = \Delta H(a - b f(t)), \quad (1.49)$$

где  $\Delta H$  – изменение амплитуды магнитного поля,  $\Delta M$  – происходящее при этом изменение намагниченности. В выражении (1.49) отражен тот факт, что намагниченность частично следует за изменением внешнего магнитного поля (слагаемое  $a\Delta H$ ), а частично изменение намагниченности происходит с запаздыванием (слагаемое  $-bf(t)\Delta H$ ). С течением времени (по мере возрастания  $t$ ) изменение намагниченности приобретает значение  $a\Delta H$ . Слагаемое  $bf(t)\Delta H$  характеризует процесс перехода ферромагнетика от одного равновесного состояния к другому. Произведение  $bf(t)$  отражает характер изменения намагниченности во времени и определяется параметрами самого ферромагнетика. Иначе говоря, произведение  $bf(t)$  определяется процессами, обуславливающими изменение намагниченности. Явление запаздывания изменения намагниченности при изменении амплитуды магнитного поля, приложенного к ферромагнетика, получило название *магнитного последствия*.

## 2. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Все магнитные материалы, использующиеся в настоящее время в микроэлектронике, с точки зрения их практического применения принято условно делить на три большие группы:

1. Магнитомягкие материалы.
2. Магнито жесткие материалы.
3. Магнитные материалы, используемые для магнитной записи и накопления информации.

Рассмотрим основные свойства магнитных материалов каждой группы.

### 2.1. МАГНИТОМЯГКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Основными требованиями, предъявляемыми к магнитомягким материалам, применяемым в микроэлектронике, являются требования высоких значений намагниченности насыщения и магнитной проницаемости, а также малых значений коэрцитивной силы. Рассмотрим основные магнитомягкие материалы, используемые в современной микроэлектронике.

Разнообразие магнитомягких материалов очень велико, но на практике далеко не всегда используют материалы с рекордно низкой коэрцитивной силой, тем более что получение таких свойств, как правило, сопряжено с потерей некоторых других полезных качеств. Особенностью магнитных материалов является существование в них при температуре ниже точки Кюри спонтанной намагниченности, которая проявляется в формировании атомного магнитного порядка и областей спонтанной намагниченности – доменов. В ферромагнетиках спонтанная намагниченность равна намагниченности насыщения  $M_s$ , а в ферритах – модулю векторной суммы намагниченностей насыщения магнитных подрешеток. На практике часто используют величину магнитной индукции насыщения  $B_s$ , которая пропорциональна намагниченности насыщения, но, по сути, магнитной индукцией не является.

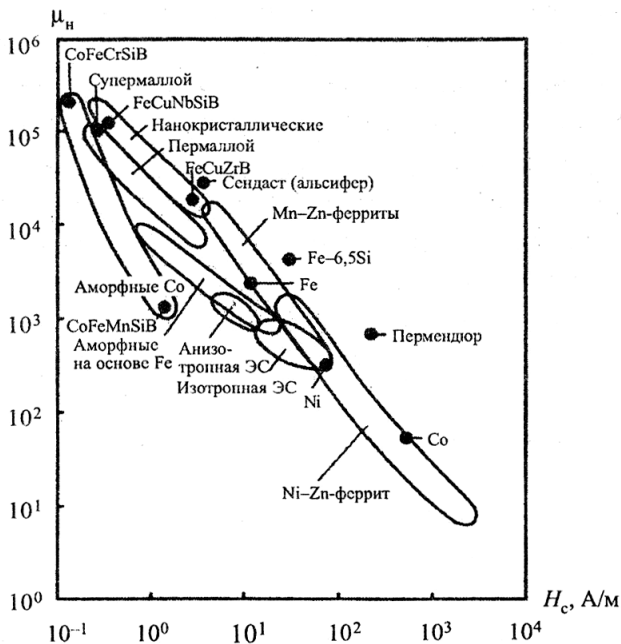


Намагничивание материала осуществляется за счет смещения доменных границ и вращения намагниченности. Необратимость процессов намагничивания приводит к магнитному гистерезису, а коэрцитивная сила  $H_c$  является одним из параметров петли магнитного гистерезиса. Изучение процессов намагничивания показывает, что при необратимом смещении доменных границ  $H_c^{cm} \sim K^{1/2}$ , а при необратимом вращении  $H_c^{ep} \sim K/B_s$ , где  $K$  – константа магнитной анизотропии. Таким образом, в магнитомягких материалах необходимо добиваться максимально низких значений константы магнитной анизотропии.

Для получения магнитомягких материалов используют различные приемы. Естественно, что химический состав материала должен быть таким, чтобы обеспечить низкие значения констант кристаллографической магнитной анизотропии. Как правило, магнитомягкие материалы имеют кубическую кристаллическую решетку с несколькими осями легкого намагничивания, что делает процесс перемагничивания более легким. Формирование в материале кристаллографической или магнитной текстуры позволяет облегчить перемагничивание вдоль выделенных направлений.

С переходом на нанокристаллический структурный уровень при размере кристаллов менее 100 нм заметно снижается макроскопическая магнитная анизотропия по сравнению с локальной анизотропией, которая связана с ближайшим окружением атома. В аморфном состоянии можно говорить о полном отсутствии макроскопической кристаллографической анизотропии. Правильный выбор режима термической обработки позволяет создать необходимую магнитную текстуру или предотвратить стабилизацию доменных границ. Оптимальный выбор размеров и формы магнитной системы поможет обеспечить наилучшее использование потенциальных магнитных свойств материала.

Взаимосвязь магнитных параметров обусловлена единой природой магнитных явлений. Между коэрцитивной силой  $H_c$  и начальной относительной магнитной проницаемостью  $\mu_H$  существует простое эмпирическое соотношение  $\mu_H \mu_0 H_c \sim B_s$ , т. е. начальная магнитная проницаемость обратно пропорциональна коэрцитивной силе. Для различных магнитомягких материалов эту взаимосвязь иллюстрирует рис. 2.1. Замкнутыми кривыми выделены области, соответствующие различным типам материалов, а точками отмечены наиболее известные магнитомягкие материалы.



**Рис. 2.1.** Взаимосвязь начальной относительной магнитной проницаемости и коэрцитивной силы в магнитомягких материалах

Видно, что имеется хорошая корреляционная связь между начальной магнитной проницаемостью и коэрцитивной силой для самых разных материалов – ферромагнитных и ферритмагнитных, кристаллических, нанокристаллических и аморфных.

Магнитомягкие материалы могут иметь как высокую, так и очень низкую относительную магнитную проницаемость (всего несколько единиц). Для некоторых приложений приходится даже искусственно занижать эффективную магнитную проницаемость магнитопровода, чтобы обеспечить получение в нем наибольшей запасенной магнитной энергии. Однако все магнитомягкие материалы независимо от их магнитной проницаемости выполняют одинаковую функцию – являются средой, которая концентрирует магнитное поле вокруг проводника с током.

Магнитные материалы применяются главным образом при температурах от  $-50$  до  $+100$  °C, и для этой же области приводятся справочные значения магнитных параметров. С ростом температуры спонтанная намагниченность монотонно снижается: в ча-

стности, при достаточно низкой температуре  $T$  по отношению к температуре Кюри  $T_c$  ( $T/T_c < 0,5$ ) она подчиняется закону Блоха

$$M_s = M_{s0} [1 - \alpha(T/T_c)]^{\frac{3}{2}},$$

а при приближении к  $T_c$  стремится к нулю. Поэтому закономерно, что материал с низкой точкой Кюри имеет невысокую магнитную индукцию насыщения при нормальной температуре; с другой стороны, вблизи температуры Кюри он имеет наибольшую магнитную проницаемость (эффект Гопкинсона). На рис. 2.2 показана корреляция между начальной относительной магнитной проницаемостью  $\mu_H$  и температурой Кюри  $T_C$  для различных магнитомягких материалов. Особенно ярко она проявляется среди материалов одного типа. Видно, что наибольшее значение магнитной проницаемости имеют материалы с температурой Кюри ниже  $200^\circ\text{C}$ .

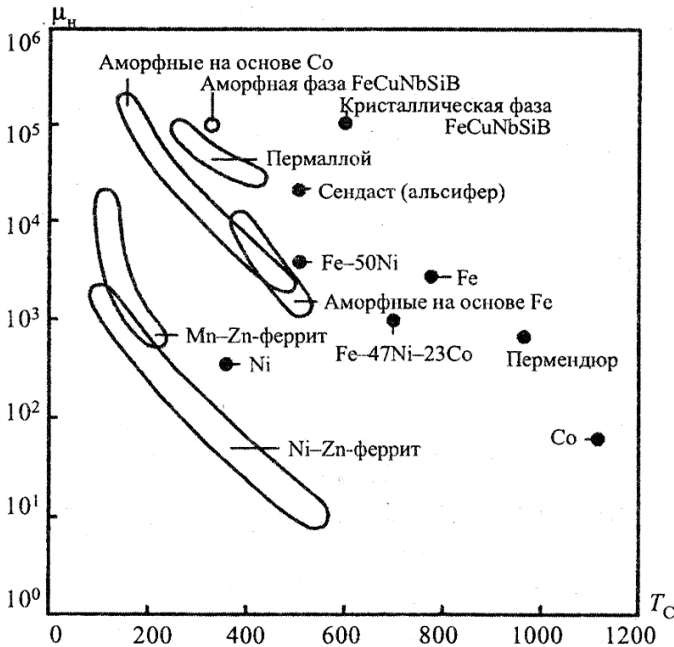


Рис. 2.2. Взаимосвязь начальной относительной магнитной проницаемости и температуры Кюри в магнитомягких материалах

## *1. Сплавы железа с кремнием*

Наиболее распространенными магнитомягкими материалами, используемыми в современных отраслях промышленности, являются сплавы железа с кремнием. Добавка небольшого количества кремния к чистому железу приводит к увеличению начальной магнитной проницаемости и росту электрического сопротивления. Последнее обстоятельство особенно важно при использовании Fe-Si-сплавов в качестве сердечников микротрансформаторов, где они перемагничиваются внешним высокочастотным магнитным полем. Увеличение электрического сопротивления сплава уменьшает потери на перемагничивание, связанные с возникновением вихревых токов.

Для достижения как можно более высокого значения магнитной проницаемости необходимо, чтобы абсолютное значение константы магнитострикции  $\lambda_s$  принимало как можно меньшее значение. При комнатных температурах монокристалл Fe имеет объемцентрированную кубическую решетку. Значения констант магнитострикции монокристалла Fe в кристаллографических направлениях [100], [010] и [001] одинаковы и при таких температурах составляют примерно  $21 \cdot 10^{-6}$ . С ростом содержания кремния до 5–6 % соответствующие величины констант магнитострикции уменьшаются до нуля, а при дальнейшем увеличении содержания Si изменяют свой знак. С увеличением концентрации Si также уменьшаются константы кристаллографической анизотропии в направлениях [100], [010] и [001], что приводит к росту величины магнитной проницаемости.

Вместе с тем значительное увеличение концентрации Si в кремнистом железе ведет к понижению температуры Кюри сплава. Так, у чистого железа температура Кюри составляет 770 °С, а в сплаве Fe-Si с концентрацией Si, равной 15 %, температура Кюри понижается до 500 °С. При увеличении содержания Si до 33 % сплав Fe-Si становится парамагнитным. Кроме того, рост концентрации кремния приводит к охрупчиванию материала и ухудшению его механической прочности. Величина намагниченности насыщения сплава Fe-Si монотонно убывает с ростом концентрации Si. В свою очередь, уменьшение намагниченности насыщения приводит к тому, что амплитуда сигнала, снимаемого с микротрансформатора с Fe-Si-сердечником, уменьшается.

Учет изложенных факторов позволяет понять, почему в современной микроэлектронике для сердечников микротрансформаторов используются сплавы с содержанием Si от 3 % до 4,5 %.

## 2. Сплавы железа с никелем

К наиболее часто применяемым в микроэлектронике магнитным сплавам железа с никелем относятся *инвары* и *пермаллои*.

В *инварных сплавах* процентное содержание Ni находится в интервале от 0 до 35 %. Сплавы *железо – никель* инварного типа при обычных температурах имеют ОЦК-решетку. При высоких температурах осуществляется переход ОЦК-решетки в ГЦК. При этом у сплавов с содержанием Ni около 30 % обнаружены очень низкие намагниченность насыщения и температура Кюри. Особенностью инварных сплавов является их очень малый коэффициент теплового расширения. Так, при температуре 20 °С коэффициент теплового расширения сплава 34 % Ni-66 % Fe имеет значение  $0,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , тогда как для чистого никеля эта величина при той же температуре составляет  $1,1 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ . Поэтому инварные сплавы находят практическое применение в тех случаях, когда тепловое расширение нежелательно.

Сплавы с содержанием Ni от 40 % и более получили название *пермаллоев*. Такие сплавы при комнатной температуре имеют ГЦК-решетку. Преимуществом пермаллоев над остальными магнитомягкими материалами является то, что они обладают высокими значениями магнитной проницаемости ( $\mu \approx 25\ 000\text{--}50\ 000$ ). Кроме того, варьируя концентрацию Fe в пермаллоеве, можно целенаправленно управлять в широком диапазоне значениями его констант анизотропии и магнитострикции. Так, например, сплав состава  $\text{Fe}_{21,5}\text{Ni}_{78,5}$ , получивший название *классического пермаллоя*, обладает константами кристаллографической анизотропии и магнитострикции, близкими к нулю. Вместе с тем, несмотря на высокие значения начальной и дифференциальной магнитных проницаемостей, этот сплав практически не используется в микроэлектронике. Причиной этого является то, что классический пермаллой очень чувствителен к внешним механическим напряжениям. Необходимо также отметить общее для всех Fe-Ni-материалов свойство. При близких к нулю значениях константы кристаллографической анизотропии магнитные свойства таких материалов становятся очень чувствительными к действию внешних деформаций.

Принято называть Fe-Ni-сплавы с содержанием Ni от 40 % до 60 % *низконикелевыми пермаллоями*, а Fe-Ni-сплавы с содержанием Ni от 60 % и выше – *высоконикелевыми пермаллоями*.

Основное преимущество высоконикелевых пермаллоев над низконикелевыми связано с тем, что их магнитная проницаемость значительно выше, чем у низконикелевых.

Электрическое сопротивление у высоконикелевых пермаллоев также значительно меньше, чем у низконикелевых. Как следствие этого, в магнитных полях высокой частоты потери на перемагничивание у высоконикелевых пермаллоев значительно выше, чем у низконикелевых.

Намагниченность насыщения высоконикелевых пермаллоев значительно ниже, чем у низконикелевых. Из этого следует, что высоконикелевые пермаллои нецелесообразно применять в качестве материалов для сердечников трансформаторов и других устройств, для которых основной целью является создание магнитного потока высокой плотности.

Для увеличения электрического сопротивления в состав высоконикелевых пермаллоев вводят добавки молибдена и марганца. Присутствие в высоконикелевом сплаве молибдена и марганца уменьшает чувствительность к механическим напряжениям, но понижает намагниченность насыщения сплава. Сплав состава  $Ni_{79}Fe_{15}Mo_5Mn_1$  получил название *супермаллоя*. Приведем в качестве примера некоторые усредненные магнитные характеристики *супермаллоя*:  $\mu_H = 100\ 000$ ,  $\mu_{max} = 600\ 000$ ,  $H_c = 0,3\ A/m$ .

Основными недостатками пермаллоев, сдерживающими их практическое использование, является их высокая стоимость, необходимость проведения специальной предварительной обработки и сильная зависимость магнитных свойств от механических воздействий.

### 3. Сплавы железа с алюминием

Одним из наиболее перспективных, с точки зрения практического использования, сплавов этой группы является *альсифер*, состоящий из алюминия, кремния и железа. Наиболее высокими магнитными параметрами характеризуется сплав состава  $Fe_{85}Si_{9,6}Al_{5,4}$  ( $\mu_H = 35\ 000$ ,  $\mu_{max} = 117\ 000$ ,  $H_c = 1,8\ A/m$ ). Магнитные параметры альсифера практически нечувствительны к механическим воздействиям. Недостатками сплава является его высокая хрупкость и низкое электрическое сопротивление.

Другими представителями этого класса материалов являются *альфенол* ( $\text{Fe}_{84}\text{Al}_{16}$ ) и *терменол* ( $\text{Fe}_{81}\text{Al}_{16}\text{MO}_3$ ). По своим магнитным характеристикам эти сплавы не уступают пермаллоевым сплавам, но высокое содержание в них алюминия делает их очень хрупкими.

Как правило, сплавы железа с алюминием используются в магнитных головках для звукозаписи, где важна высокая устойчивость материала к истиранию.

#### *4. Аморфные металлические сплавы на основе переходных металлов*

Аморфные металлические сплавы обладают рядом уникальных магнитных и механических свойств. Прежде всего, в аморфных металлических сплавах отсутствуют структурные дефекты, присущие их кристаллическим аналогам. Отсутствие дефектов структуры обуславливает высокую прочность и пластичность аморфных металлических сплавов. Кроме того, отсутствие дефектов обуславливает высокие значения магнитной восприимчивости, малые значения коэрцитивной силы и потерь на перемагничивание. Отсутствие дальнего порядка в расположении атомов является причиной высокого электрического сопротивления таких сплавов. В настоящее время в микроэлектронике наиболее широко используется два типа магнитомягких аморфных металлических сплавов: аморфные металлические сплавы на основе железа и аморфные металлические сплавы на основе кобальта.

##### *а) Аморфные металлические сплавы на основе железа*

Аморфные металлические сплавы на основе железа, помимо перечисленных выше свойств, обладают высоким положительным значением константы магнитострикции  $\lambda_s$ . Высокое значение константы магнитострикции позволяет использовать аморфные металлические сплавы на основе железа в качестве чувствительных элементов различного рода датчиков силы, деформации, температуры, в генераторах звуковых и ультразвуковых колебаний. Еще одной областью использования таких сплавов является применение их в качестве элементов управляемых магнитным полем линий задержки звуковых сигналов.

Для достижения оптимальных магнитных характеристик аморфные металлические сплавы на основе железа подвергаются специальной термомагнитной обработке. Целью проведения термомагнитной обработки является как снятие внутренних напряжений, возникающих в процессе получения сплава, так и наведе-

ние в нем одноосной анизотропии. В результате проведения термомагнитной обработки существенно улучшаются и пьезомагнитные характеристики сплава.

В настоящее время одним из наиболее широко используемых в микроэлектронике аморфных металлических сплавов на основе железа является сплав *Metglass 2605 SC*, имеющий состав  $\text{Fe}_{81,5}\text{B}_{13,5}\text{Si}_3\text{C}_2$ . Данный сплав, прошедший специальную термомагнитную обработку, обладает высокими значениями начальной магнитной проницаемости ( $\mu_n \sim 10\,000$ ), намагниченности насыщения ( $M_S \sim 2 \cdot 10^6$  А/м), константы магнитострикции ( $\lambda_S \sim 30 \cdot 10^{-6}$ ) и малой коэрцитивной силой ( $H_C = 2\text{--}5$  А/м).

Вместе с тем высокое значение константы магнитострикции ведет к росту уровня внутренних напряжений аморфных металлических сплавов.

#### *б) Аморфные металлические сплавы на основе кобальта*

В аморфных металлических сплавах на основе кобальта константа магнитострикции имеет отрицательное значение, но ее абсолютная величина примерно на порядок меньше, чем у аморфных металлических сплавов на основе железа. Как следствие этого, уровень внутренних закалочных напряжений в аморфных металлических сплавах на основе кобальта крайне незначителен, а их начальная и максимальная магнитные проницаемости существенно выше, чем у сплавов на основе железа.

В последнее десятилетие обнаружено, что аморфные металлические сплавы на основе кобальта обладают значительной величиной эффекта магнитоимпеданса (т. е. изменением электрического импеданса сплава под действием внешнего магнитного поля). Одним из наиболее применяемых аморфных металлических сплавов на основе кобальта, в настоящее время, является сплав состава  $\text{Fe}_4\text{Co}_{67}\text{Mo}_{1,5}\text{Si}_{16,5}\text{B}_{11}$  (*Vitrovac 6025Z*). Его максимальная магнитная проницаемость достигает 100 000, величина индукции насыщения равна 0,55 Тл, а остаточная индукция  $B_r$  составляет 80–90 % от величины индукции насыщения  $B_s$ . Максимальная величина изменения электрического импеданса во внешнем магнитном поле у сплава *Vitrovac 6025Z* превышает 100 %, что позволяет использовать этот сплав в качестве чувствительного элемента датчиков магнитного поля.

При высоких температурах все аморфные металлические сплавы переходят в кристаллическое состояние. При этом их магнитные характеристики существенно ухудшаются. Повыша-



ется уровень внутренних напряжений, уменьшаются значения начальной и максимальной магнитных проницаемостей, возрастает коэрцитивная сила. Поэтому низкая термическая стабильность магнитных характеристик является основным недостатком аморфных металлических сплавов на основе переходных металлов.

### 5. Ферриты

*Ферриты* – это оксидное кристаллическое ферри-, ферро- или антиферромагнитное соединение с общей структурной формулой  $n_1\text{Fe}_2\text{O}_3n_2\text{Me}_a\text{O}_bn_3\text{Re}_c\text{O}_d$ , где  $n_1, n_2, n_3, a, b, c, d$  – целые числа, а Me и Re – ионы металлов.

Большинство ферритов являются диэлектриками. В связи с этим при перемагничивании в высокочастотном переменном магнитном поле их потери на вихревые токи малы. Рассмотрим основные типы магнитомягких ферритов.

#### а) Марганец-цинковые ферриты

Примерный состав марганец-цинковых ферритов: (50–75 %)  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  + (50–25 %)  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ . Такого рода сплавы обладают сравнительно высокой намагниченностью насыщения ( $M_S \approx (1,5–3) \cdot 10^5 \text{ A/m}$ ), имеют относительно высокое значение магнитной проницаемости ( $\mu_{\text{max}} \approx 2000$ ). Недостатком марганец-цинковых ферритов является невысокое значение электрического сопротивления ( $\rho \approx 0,1–1 \text{ Ом/м}^3$ ), что затрудняет использование этих материалов при высоких частотах перемагничивающего поля.

#### б) Никель-цинковые ферриты

Среди никель-цинковых ферритов наибольшую величину магнитной проницаемости имеет феррит состава: 30 %  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  + 70 %  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  ( $\mu_{\text{max}} \approx 100$ ). У никель-цинковых ферритов относительно высокие значения удельного электрического сопротивления ( $\rho \approx 10^3–10^7 \text{ Ом/м}^3$ ), однако их магнитные характеристики значительно ниже, чем характеристики марганец-цинковых ферритов.

#### в) Магний-цинковые и магний-марганцевые ферриты

Наиболее высокими значениями магнитной проницаемости обладает феррит состава 50 %  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$  + 50 %  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ . Магний-марганцевые ферриты находят свое практическое применение благодаря высокой прямоугловности их петли гистерезиса.

Магнитомягкие ферриты используют для изготовления сердечников микротрансформаторов, катушек индуктивности, фильтров, магнитных антенн и т. д. Первоначально круглые ферритовые сердечники использовались в качестве магнитных носи-

телей информации для электронно-вычислительных машин. Однако большие размеры ферритовых сердечников, сложность и высокая стоимость технологического процесса получения ферритов и создания на их основе внешних и внутренних запоминающих устройств препятствуют практическому использованию этих материалов в микроэлектронике.

В постоянных магнитных полях и магнитных полях промышленной частоты магнитомягкие ферриты, как правило, не применяют. Кроме того, так как по сравнению с металлическими магнитными материалами ферриты обладают низкой индукцией насыщения, их использование в сильных магнитных полях неэффективно.

## 2.2. МАГНИТОЖЕСТКИЕ МАТЕРИАЛЫ

*Магнито жесткими материалами* принято называть такие магнитные материалы, которые намагничиваются в сильных магнитных полях, и которые, будучи однажды намагничены, устойчиво сохраняют свою остаточную намагниченность. Магнито жесткое состояние материала количественно характеризуется высокими значениями коэрцитивной силы  $H_c$ , остаточной индукции  $B_r$  и удельной магнитной энергии  $0,5(BH)_{\max}$ . В настоящее время принято считать магнито жесткими материалами такие магнитные материалы, которые имеют коэрцитивную силу от  $5 \cdot 10^3$  А/м и выше, хотя возможны и другие критерии определения, связанные либо с техническими условиями применения магнитных материалов, либо с физическими механизмами процессов перемангничивания сплавов. Изменение намагниченности магнито жесткого материала в результате действия внешнего магнитного поля в направлении остаточной намагниченности (индукции) происходит только в том случае, если величина внешнего магнитного поля превышает значение его коэрцитивной силы или значение поля одноосной анизотропии. Величина коэрцитивной силы магнито жестких материалов на несколько порядков превышает соответствующую характеристику магнитомягких сплавов.

Одной из основных возможностей практического применения магнито жестких материалов является их использование в качестве постоянных магнитов. Постоянные магниты в настоящее время являются важнейшими элементами многих устройств в

электронике. Объем производства постоянных магнитов в мире ежегодно растет. Это связано, прежде всего, с тем, что постоянные магниты экономически и технически гораздо выгоднее и надежнее, чем электромагниты постоянного поля. С помощью постоянных магнитов возможно обеспечение значительной экономии материалов и потребления энергии. Кроме того, использование постоянных магнитов с высокими значениями остаточной индукции и коэрцитивной силы позволяет значительно уменьшить размеры изделий микроэлектроники. Эксплуатационной характеристикой постоянного магнита является магнитное поле, которое он создает в рабочем пространстве. В зависимости от задач, предъявляемых к постоянным магнитам, для их изготовления используются различные магнитомягкие материалы.

Магнитомягкие свойства ряда магнитных материалов обусловлены особенностями их внутренней структуры. Принято разделять магнитомягкие материалы, применяемые в микроэлектронике, на следующие категории.

*а) Сплавы, магнитная жесткость которых обусловлена перестройкой их кристаллической решетки*

Если магнитомягкий сплав железа с углеродом, имеющий при комнатной температуре ГЦК-решетку, нагреть до температуры перехода кристаллической решетки в ОЦК-фазу, а затем резко его охладить, то структура получившегося сплава будет представлять собой совокупность областей с ГЦК- и ОЦК-решетками. На границах областей с различными кристаллическими структурами возникают внутренние напряжения, которые значительно увеличивают коэрцитивную силу сплава. Такого рода эффект используется также для создания магнитомягких сплавов железа с вольфрамом, кобальтом, хромом и т. д. Наиболее применяемыми в настоящее время в микроэлектронике являются сплавы Fe-Co-W (*сталь KS*), и Fe-C-Al (*сплав MT*), у которых магнитомягкие свойства обусловлены перестройкой кристаллической решетки в процессе их быстрого охлаждения. Подобного рода сплавы обладают умеренными значениями коэрцитивной силы ( $H_C \approx (12-50) \cdot 10^3$  А/м) и максимальной магнитной энергии ( $1/2(BH)_{\max} \approx 1$  кДж/м<sup>3</sup>).

*б) Сплавы, магнитная жесткость которых вызвана выделением мелкокристаллических фаз*

Наиболее используемым в настоящее время магнитомягким сплавом такого типа является сплав железа, никеля и алюминия,

получивший название «альнико». Высококоэрцитивное состояние такого сплава может быть получено при содержании Ni в пределах 20–33 %, а алюминия – в пределах 11–17 %. При температурах 1200–1300 °С железо-никель-алюминевый сплав находится в однородном состоянии и имеет ОЦК-решетку. В условиях медленного охлаждения сплава альнико до комнатной температуры равновесная ОЦК-фаза распадается на две близкие по параметрам, но различные по своему составу, ОЦК-фазы. Кристаллиты обеих фаз чрезвычайно малы и находятся в однодоменном состоянии. Значительный объем сплава занимают межкристаллитные границы, что и обуславливает высокое значение коэрцитивной силы сплава. Кроме того, величину  $H_c$  сплава можно изменять в сотни раз, варьируя режимы его термической и термомагнитной обработок. В результате проведения термомагнитной обработки удается добиться *магнитоанизотропного состояния* сплава альнико. Сплавы железа с никелем и алюминием имеют коэрцитивную силу порядка  $10^4$  А/м и обладают магнитной энергией порядка 4 кДж/м<sup>3</sup>.

Другими магнитожесткими сплавами, свойства которых обусловлены выделением мелкокристаллических фаз, являются сплавы Fe-Cr-Co, Co-Ni-Al, Fe-Co-Ni-Al-Cu. Их оптимальные характеристики достигаются в результате охлаждения сплава от высоких температур во внешнем магнитном поле. При этом коэрцитивная сила сплава  $H_c$  достигает значений 52 000 А/м, а величина  $((1/2) BH) \approx 21$  кДж/м<sup>3</sup>.

*в) Магнитожесткие химические соединения*

Наибольшее распространение из этого класса магнитожестких материалов получили соединения составов: BaO(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>6</sub> (*бариевый феррит*) и CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (*кобальтовый феррит*). С целью увеличения магнитожестких параметров ферриты подвергаются термомагнитной обработке. Особенно чувствителен к условиям термомагнитной обработки кобальтовый феррит. Если до проведения термомагнитной обработки сплав CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> имеет  $H_c = 9 \cdot 10^4$  А/м и  $((1/2)BH)_{\max} = 2,5$  Дж/м<sup>3</sup>, то после проведения соответствующей термомагнитной обработки аналогичные магнитные характеристики сплава составляют:  $H_c = 6 \cdot 10^4$  А/м,  $((1/2)BH)_{\max} = 15$  кДж/м<sup>3</sup>. Основным недостатком магнитожестких химических соединений, и в особенности ферритов, является их высокая температурная нестабильность, обусловленная сравнительно низкой температурой Кюри ( $T_K = 450$  °С).

г) *Интерметаллические соединения кобальта с редкоземельными металлами*

Для получения сильных постоянных магнитов малого размера необходимы магнито жесткие материалы с наибольшими значениями коэрцитивной силы и удельной магнитной энергии. Наиболее подходящими для этих целей являются интерметаллические соединения кобальта с редкоземельными металлами (церием, самарием, празеодимом, лантаном и т. д.). Общими свойствами для рассматриваемых интерметаллических соединений являются наличие атомов металлов с большой разностью порядковых номеров в периодической таблице Менделеева (например, 27 у Co и 62 у Sm), большое различие в строении электронных структур, а также значительная разность атомных радиусов компонентов.

Наиболее широко в электронике используются интерметаллические соединения  $P3M_2Co_7$ ,  $P3MCo_5$ ,  $P3M_2Co_{17}$ , где  $P3M$  – редкоземельный металл. Такого рода соединения обладают высокими значениями константы магнитной кристаллографической анизотропии ( $K \sim 10^4 - 10^5$  Дж/м<sup>3</sup>), индукции насыщения ( $B_S \sim 1$  Тл) и температуры Кюри ( $T_K \sim 800 - 950$  °С). Сочетание высоких значений кристаллографической анизотропии, индукции насыщения и температуры Кюри обусловило интенсивную разработку на основе этих соединений магнито жестких материалов с высокими коэрцитивной силой и удельной магнитной энергией.

д) *Магнито жесткие материалы на основе соединений  $R_2Fe_{14}B$*

В настоящее время наибольшими коэрцитивной силой и удельной магнитной энергией из известных магнито жестких сплавов обладают сплавы состава  $R_2Fe_{14}B$ , где  $R$  – редкоземельный металл. Их коэрцитивная сила достигает значений 2000 кА/м, а максимальная удельная энергия составляет примерно 200–260 кДж/м<sup>3</sup>. Наибольшей индукцией насыщения обладает сплав  $Y_2Fe_{14}B$  ( $B_S = 16$  Тл), наибольшим полем кристаллографической анизотропии – сплав  $Dy_2Fe_{14}B$  (величина поля анизотропии 12 000 кА/м), наиболее высокой температурой Кюри – сплав  $Gd_2Fe_{14}B$  ( $T_K = 930$  °С), а наиболее высокой удельной магнитной энергией – сплав  $Nd_2Fe_{14}B$  ( $((1/2)BH)_{max} \sim 260$  кДж/м<sup>3</sup>). Магнито жесткие свойства соединений  $R_2Fe_{14}B$  обусловлены их сложной кристаллической структурой. Наличие сложной кристаллической структуры приводит к увеличению некомпенсированного заряда

на незаполненной  $4f$ -электронной оболочке и к уменьшению среднего атомного радиуса соединения.

Для получения тонких лент и пластин соединений  $R_2Fe_{14}B$  используют *метод скоростной закалки*. При этом расплав выливают на поверхность быстровращающегося и непрерывно охлаждаемого металлического диска. При скорости закалки расплава  $\sim 10^6$  °C/сек, и при дальнейшей прокатке сплава получают мелкозернистый конгломерат, размер зерна в котором не превышает 20–100 мкм. Кристаллические зерна сплава находятся в однодоменном состоянии и обладают высокой индукцией насыщения. Наличие мелкозернистой кристаллической структуры, большого количества дефектов на границах зерен ведет к росту коэрцитивной силы и увеличению удельной магнитной энергии материала. Более массивные магнитомягкие материалы соединений  $R_2Fe_{14}B$  получают прессованием быстрозакаленных лент или пластин, а также *порошковым методом*. Порошок соединения  $R_2Fe_{14}B$ , размеры частиц которого не превышают 1–3 мкм, получают механическим измельчением. После этого порошок спрессовывают и одновременно с этим прокаткой наводят одноосную анизотропию. Полученный сплав подвергают термической обработке с последующим его быстрым охлаждением. Варьируя технологические условия получения сплавов  $R_2Fe_{14}B$  порошковым методом, можно в широком пределе управлять его магнитными параметрами.

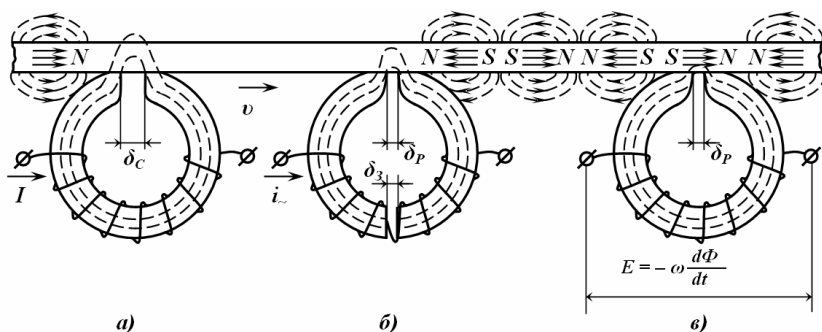
### **2.3. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ МАГНИТНОЙ ЗАПИСИ И ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ**

Запись аналоговых или цифровых сигналов на магнитных лентах и дисках основана на использовании остаточной намагниченности (индукции) магнитного материала. Остановимся коротко на принципе записи и считывания информации, который широко используется в звуко- и видеозаписи, в вычислительной технике, автоматике и других областях современной техники (рис. 2.3).

При записи информации магнитный порошок, нанесенный на поверхность пластмассовой основы, намагничивается в поле, возникающем в зазоре записывающей магнитной головки. Магнитный носитель при помощи специального механизма непрерывно перемещается относительно записывающей головки. В

обмотке записывающей магнитной головки возникают колебания электрического тока, амплитуда и частота которых соответствуют амплитуде и частоте записываемого сигнала. Движущийся вдоль записывающей головки магнитный носитель намагничивается в соответствии с записываемыми сигналами. При этом в плоскости магнитного носителя устанавливается распределение остаточной намагниченности, которое соответствует форме сигнала, создаваемой записывающей магнитной головкой.

Чтобы считать ранее записанную на магнитном носителе информацию, его пропускают вдоль считывающей магнитной головки, которая благодаря остаточной намагниченности носителя намагничивается по форме записанного сигнала. В процессе движения магнитного носителя со считывающей катушки снимается электрический сигнал.



**Рис. 2.3.** Запоминающее устройство с продольной магнитной записью:  
*a* – стирающая; *б* – записывающая; *в* – считывающая головки

В настоящее время наибольшее распространение среди магнитных носителей информации для звуко- и видеоаппаратуры получили двухслойные магнитные ленты, состоящие из механически прочной основы и слоя магнитного лака. В качестве материала основы применяют диацетил-целлюлозу, триацетилцеллюлозу или поливинилхлорид.

Магнитный лак состоит из магнитного порошка, связующего вещества, растворителя и пластификатора. Объем частиц порошка для увеличения отношения сигнал/шум должен быть минимально возможным. Нижний предел размеров частиц порошка ограничен условиями существования ферромагнетизма в малых частицах. При уменьшении размера частиц до 10–30 нм в резуль-

тате сильного влияния тепловой энергии ферромагнетик переходит в *суперпарамагнитное состояние*, а его остаточная намагниченность становится равной нулю. Поэтому при таких размерах частиц процесс записи информации невозможен.

Однородность частиц порошка по размерам и свойствам должна быть максимально возможной. Чем выше однородность частиц порошка, тем выше отношение сигнал/шум. Поверхность частиц порошка должна быть идеально гладкой. Существование на поверхности частиц порошка пор и наростов приводит к различному протеканию процессов намагничивания в отдельных частицах, что снижает их магнитную однородность. Эти дефекты увеличивают поля рассеяния частиц порошка, затрудняют процесс намагничивания и приводят к снижению отношения сигнал/шум.

Как правило, в носителях информации применяют магнитные порошки с анизотропными частицами. Анизотропия частиц является одноосной и обусловлена их игольчатой или сферической формой. Средний размер частицы вдоль ее длины не превышает обычно 0,2–0,4 мкм.

Коэрцитивная сила порошка определяет коэрцитивную силу носителя информации. Коэрцитивная сила порошка должна быть достаточно большой для того, чтобы сохранить записанную на магнитном носителе информацию. Вместе с тем, чем больше коэрцитивная сила порошка, тем большая напряженность магнитного поля необходима для записи информации. Это увеличивает расходы энергии и усложняет запоминающее устройство. Коэрцитивная сила магнитного порошка зависит от размеров частиц и определяется его анизотропией, наличием дефектов и примесей. Например, максимальное значение коэрцитивной силы порошка 70 % Fe-30 % Co достигается при размере частиц в 30–40 нм ( $H_c = 90$  кА/м).

Намагниченность насыщения  $M_s$  порошка также должна быть максимально большой. Требование высокого значения  $M_s$  обусловлено тем, что чем выше намагниченность насыщения порошка, тем выше амплитуда сигнала, наводимого в считывающей головке.

В носителях магнитной записи применяют следующие разновидности магнитных порошков:

1. Порошок гамма-оксида железа ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ).
2. Порошок гамма-оксида железа, модифицированного кобальтом ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 + \text{Co}$ ).
3. Порошок диоксида хрома ( $\text{CrO}_2$ ).



4. Порошок феррита бария ( $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ).

5. Металлические магнитные порошки железа и его сплавов.

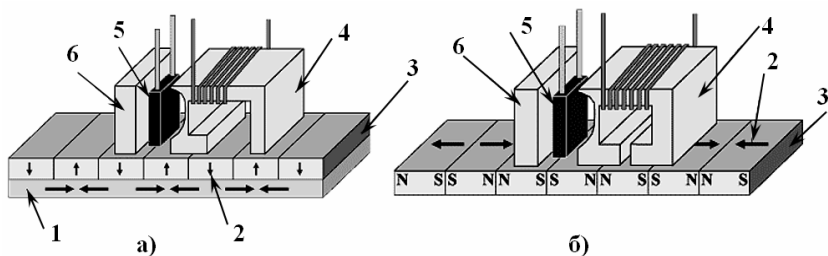
Порошки гамма-оксида железа ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) и гамма-оксида железа, модифицированного кобальтом ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3+\text{Co}$ ), диоксида хрома ( $\text{CrO}_2$ ) имеют игольчатую, с отношением длины к поперечному размеру порядка 7–20, или же сферическую формы, а порошок феррита бария ( $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ) – пластинчатую форму.

Один из перспективных путей дальнейшего повышения плотности записи – выбор среды, обладающей большей магнитной твердостью (например,  $\text{Fe}_{14}\text{Nd}_2\text{B}$ ,  $\text{CoPt}$ ,  $\text{FePt}$  или  $\text{SmCo}_5$ ), но при этом, чтобы облегчить запись бита, предлагается кратковременно локально нагревать носитель лазером – реализуется так называемая термоассистируемая магнитная запись (*HAMR – heat assisted magnetic recording*).

#### 2.4. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ЗАПИСИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ЭВМ

В настоящее время большинство носителей магнитной записи для ЭВМ представляют собой систему из двух или нескольких слоев различных материалов. Слой, в котором происходит накопление и хранение информации, называют *рабочим слоем*.

По способу магнитной записи носители информации для ЭВМ принято разделять на носители с продольной и носители с перпендикулярной записью. При продольном способе записи намагниченность носителя ориентирована в его плоскости, а разноименные полюса намагниченных участков расположены на одной и той же стороне рабочего слоя. При перпендикулярном способе записи намагниченность направлена преимущественно перпендикулярно к поверхности рабочего слоя, а разноименные полюса намагниченных участков расположены на разных его сторонах. Первоначально в магнитных носителях информации использовался продольный метод записи. Недостатком такого метода записи является то, что распределение магнитного поля от отдельных доменов носителя приводит к замкнутому распределению намагниченности в рабочем слое, и, как следствие этого, к уменьшению плотности записи информации, а также к ослаблению воспроизводимого сигнала. Максимально достижимая при использовании данного метода плотность записи составляет около  $23 \text{ Гбит/см}^2$  (около 130 Гбит на квадратный дюйм) (рис. 2.4, б).



**Рис. 2.4.** Методы записи информации на жестких магнитных дисках:  
*а* – перпендикулярная запись; *б* – продольная запись; 1 – магнитомягкий слой, 2 – намагничивание, 3 – магнито жесткий рабочий слой, 4 – записывающая головка, 5 – считывающая головка, 6 – экран

От указанных недостатков свободен используемый с середины 1970-х гг. перпендикулярный способ записи информации (рис. 2.4, *а*). В настоящее время с помощью перпендикулярного метода записи удалось достичь плотности записываемой информации около  $80 \text{ Гбит/см}^2$  (около 0,5 Тбит на квадратный дюйм). Вместе с тем, как отмечается в последних публикациях, посвященных вопросам высокоплотной магнитной записи, при использовании исключительно перпендикулярного способа записи, в настоящее время практически достигнут возможный предел плотности записываемой информации.

Более высокой плотности записи информации можно достичь несколькими способами:

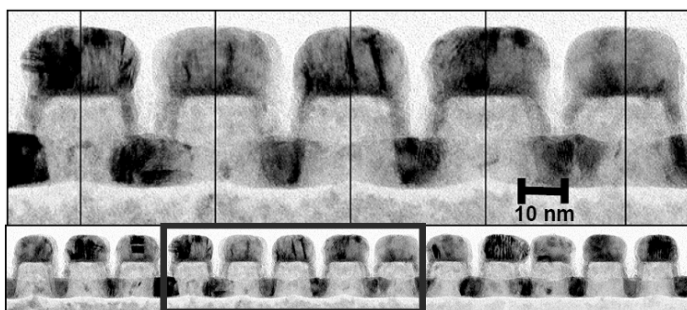
1. Используя запись на основе особого класса магнитных неоднородностей, которые имеют место в доменных границах – *блховских линиях*.

2. Используя запись на структурированном магнитном носителе данных (англ. *Patterned media*). Данная перспективная технология хранения данных на магнитном носителе использует для записи данных массив одинаковых магнитных ячеек, каждая из которых соответствует одному биту информации, в отличие от современных технологий магнитной записи, в которых бит информации записывается на нескольких магнитных доменах (рис. 2.5).

3. Используя термоассистируемую магнитную запись (также: термомагнитная запись, тепловая магнитная запись, магнитная запись с подогревом; HAMR (англ. *Heat-assisted magnetic recording*)) – гибридную технологию записи информации, комбинирующую магнитное чтение и магнитооптическую запись.

**Блоховскими линиями** называются области доменной границы, в которых происходит переход от одного направления поворота магнитного момента к противоположному направлению поворота. Размеры блоховских линий составляют величину порядка  $10^{-8}$  м, что теоретически обеспечивает плотность записи информации порядка 100 Гбит/см<sup>2</sup> (около 650 Гбит на квадратный дюйм). В последнее время обсуждается возможность создания устройств с объемной записью информации, в которых ее носителями были бы точки пересечения двух различных блоховских линий – *блоховские точки*.

В современных жестких дисках один бит информации записывается на несколько десятков или сотен магнитных доменов. Технология **структурированного носителя** предлагает заменить их одной крупной магнитной ячейкой. Достичь этого возможно с помощью соответствующего литографирования поверхности носителя, либо с помощью создания специальной структуры материала (рис. 2.5). Преимуществом такого подхода является уменьшение шумовых эффектов при переходе считывающей головки от одного магнитного домена к другому во время чтения данных, а также увеличение плотности записи. По оценке исследователей, развитие технологий производства структурированных носителей позволит уменьшить размер каждой ячейки, хранящей один бит информации, до 10 нм, что, в свою очередь, приведет к повышению плотности записи магнитных жестких дисков до 380 Гбит/см<sup>2</sup> (2,5 терабит на квадратный дюйм), что составит 25 терабайт для 3,5-дюймового жесткого диска.



**Рис. 2.5.** Пример микрофотографии магнитного структурированного носителя на многослойной пленке CoPd, с плотностью записи 500 Гбит на квадратный дюйм

Принцип работы устройств, использующих *термоассистирруемую магнитную запись*, состоит в локальном нагревании лазером и перемагничивании в процессе записи поверхности пластин жесткого диска. Нагрев поверхности снижает коэрцитивность материала поверхности, что позволяет значительно уменьшить размеры магнитной области, хранящей один бит информации, и увеличить стабильность хранения данных, избегая вредного влияния суперпарамагнитного эффекта. При этом используется перпендикулярный способ магнитной записи. Нагрев выполняется с помощью лазера, который за 1 пс разогревает область записи до 100 °С. Данная технология позволяет достичь плотности записи в 2,32–7,75 Тбит/см<sup>2</sup> (15–50 Тбит на квадратный дюйм). Такая плотность приведет к возможности размещения свыше 50 ТБ данных на 3,5-дюймовых жестких дисках, свыше 12 ТБ – на 2,5-дюймовых жестких дисках (рис. 2.6).

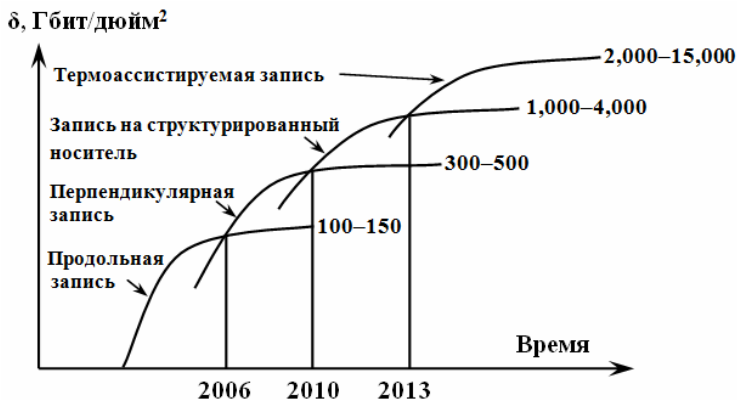


Рис. 2.6. Перспективы магнитной записи

### 3. МАГНЕТИКИ С ГИГАНТСКИМ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕМ

Эффект магнитосопротивления, или магниторезистивный эффект, заключается в изменении электрического сопротивления твердых тел под действием внешнего магнитного поля. В обычных материалах (металлы, металлические сплавы, полупроводники, т. е. однородные проводники) причина магниторезистивного эффекта заключается в искривлении траекторий носителей тока в магнитном поле. При этом обычно оперируют понятием «относительное магнитосопротивление», которое имеет вид

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \frac{R_H - R_0}{R_0} 100\% \quad (3.1)$$

Здесь  $R_H$  – электросопротивление в фиксированном поле  $H$ ;  $R_0$  – электросопротивление при  $H = 0$ . У металлов и их сплавов относительное изменение электросопротивления при комнатной температуре весьма невелико и составляет 2–2,5 %. Как правило, увеличение магнитного поля приводит к возрастанию электросопротивления. Повторим, что все сказанное выше относится к *проводникам с однородной структурой*. В настоящее время, используя современные технологии, имеются возможности получения *сложных гетерогенных композиционных материалов и соединений*, с многофазной структурой и значительной неоднородностью физических свойств на микроскопическом уровне. В середине 90-х гг. прошлого века было установлено, что в таких материалах относительное изменение электросопротивления под действием магнитного поля может достигать десятков, сотен и даже десятков тысяч процентов. Обнаруженный эффект получил название *эффекта гигантского магнитосопротивления*. Причины возникновения эффекта гигантского магнитосопротивления в гетерофазных материалах более сложные, чем причины возникновения эффекта магнитосопротивления в однородных проводниках. В зависимости от типа материала, эффект гигантского магнитосо-

противления может быть связан либо с рассеянием электронов на структурных неоднородностях проводника, либо с туннелированием электронов через непроводящие участки композита, либо с изменением проводящих свойств всего материала (переход *изолятор – металл*).

Материалы и механизмы, отвечающие за появление эффекта гигантского магнитосопротивления, активно исследуются в настоящее время. Эффект гигантского магнитосопротивления представляет несомненный интерес и для практического применения в различных областях электроники и микроэлектроники. Традиционные направления использования материалов с эффектом гигантского магнитосопротивления – изготовление головок для считывания информации с магнитных носителей, создание высокоплотных носителей информации, производство сверхчувствительных датчиков магнитного поля и температуры и т. д.

### **3.1. ГРАНУЛИРОВАННЫЕ МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

*Гранулированные магнитные материалы* представляют собой твердые тела, содержащие ферромагнитные гранулы, размещенные в немагнитной среде (матрице), которая может быть как изолятором, так и проводником (размеры гранул составляют от нескольких нанометров до нескольких десятков нанометров). Изменяя размеры ферромагнитных гранул от нескольких нанометров до десятков нанометров, а также варьируя их относительный объем в немагнитной матрице, можно целенаправленно управлять физическими свойствами гранулированных материалов. Изменять размер гранул, а, следовательно, и свойства гранулированных материалов можно в процессе получения материала.

Если матрица гранулированного материала является диэлектриком ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  и т. д.), то такие материалы часто называют *гранулированными композитами* или *керметами*. У композитов с малой величиной относительного объема ферромагнитных частиц гранулы электрически изолированы друг от друга в объеме матрицы, и поэтому такие среды близки по своим электрическим свойствам к диэлектрикам. Проводимость в гранулированных композитах осуществляется в основном за счет туннелирования электронов между металлическими гранулами или за счет прыжковой проводимости по локализованным состояниям в

диэлектрической матрице. Все гранулы в керметах при этом являются однодоменными, обладают кристаллической структурой, характеризуются кристаллографической анизотропией и проявляют высококоэрцитивные свойства. Для сплавов с большой величиной относительного объема ферромагнитных частиц из металлических гранул формируется своеобразная сплошная «сетка», вдоль которой осуществляется металлическая проводимость. При возникновении металлической проводимости гранулы начинают взаимодействовать друг с другом, в результате чего формируются магнитомягкие свойства композита.

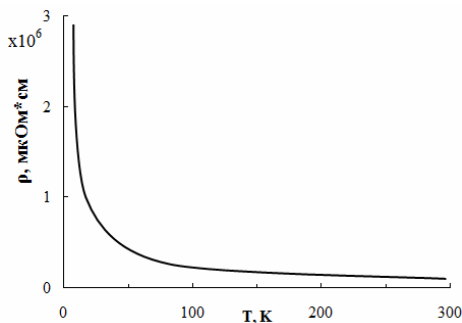
Протяженная проводящая «сетка» и магнитная замкнутая структура возникают в композитах при достижении *перколяционного предела (порога протекания)*. Порог протекания – это такая объемная доля металлической фазы  $x$  в композите, при которой образуется сетка из металлических гранул во всем объеме образца, т. е. образуются сплошные каналы с металлической проводимостью. Экспериментально установлено, что для большинства гранулированных композитов величина  $x$  варьируется в пределах 0,5–0,6. Для многих металлов, таких как Fe, Au, Co, Cu, гранулы имеют размер от 1 до нескольких десятков нанометров. Это та область размеров, в которой гранулы становятся однодоменными и возможен их переход в *суперпарамагнитное состояние*.

Гранулированные системы получают, как правило, ионным распылением. Распыление можно проводить, используя только одну мишень – гомогенную или составную. Применяют также одновременное распыление двух разных мишеней (металлической и диэлектрической). В том случае, когда необходимо обеспечить формирование многослойной структуры, оптимальным является использование последовательного осаждения разных материалов на подложку. Поскольку структура гранулированных материалов крайне чувствительна к технологическим параметрам, таким как скорость осаждения, давление в камере распыления, температура подложки, то все эти условия должны очень тщательно контролироваться.

### 3.2. МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ ГРАНУЛИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ МЕТАЛЛ – ДИЭЛЕКТРИК

Интерес к гранулированным материалам возник в середине 90-х гг. прошлого века в связи с тем, что в ряде гранулированных композитов при комнатной температуре был обнаружен эффект гигантского магнитосопротивления, величина которого достигала 8 % в магнитных полях 80 000 А/м. За последние несколько лет было исследовано достаточно много гранулированных композитов (Co-Al-O, Co-Si-O, Fe-Hf-O, Fe-Mg-F, Ni-Si-O) и накоплен обширный экспериментальный материал.

Удельное электрическое сопротивление  $\rho$  гранулированных композитов монотонно возрастает с увеличением объемной доли диэлектрика, причем с изменением этой доли от 0 до 1 сопротивление увеличивается на несколько порядков. В концентрационной области до порога протекания (когда гранулы не контактируют друг с другом) изменение сопротивления при изменении температуры носит экспоненциальный характер.



**Рис. 3.1.** Типичная температурная зависимость удельного электросопротивления гранулированных пленок в нулевом магнитном поле

При большом относительном объеме металлической фазы (выше порога протекания) гранулы формируют сплошные проводящие каналы, и проводимость материала в целом является металлической. Значения удельного электросопротивления при этом находятся в пределах  $10^1$ – $10^3$   $\text{мкОм}\cdot\text{см}^{-1}$ , а температурная зависимость  $\rho$  невелика, что характерно для кристаллических и аморфных металлических пленок. До порога протекания металлические гранулы изолированы в диэлектрической матрице, величина  $\rho$  превышает  $10^4$   $\text{мкОм}\cdot\text{см}^{-1}$ , а температурный коэффициент электросопротивления отрицателен. На рис. 3.1 приведена



типичная температурная зависимость удельного электросопротивления гранулированного композита  $\text{Co}_{52}\text{Al}_{20}\text{O}_{28}$ .

Такой вид температурной зависимости  $\rho$  подразумевает наличие сложных механизмов электропереноса и логарифмическую зависимость электросопротивления от температуры. Теоретически в реальных гранулированных композитах возможны прыжковая проводимость, подобная проводимости в аморфных полупроводниках, проводимость за счет туннелирования электронов между металлическими гранулами и полупроводниковая проводимость, реализующаяся в обычных кристаллических полупроводниках. Определение конкретного механизма электропереноса осуществляется на основе анализа экспериментальных данных. Известно, что прыжковая проводимость характеризуется зависимостью  $\log \rho \sim T^{1/4}$ , туннельная проводимость –  $\log \rho \sim T^{1/2}$ , а полупроводниковая проводимость –  $\log \rho \sim T^1$ . Для гранулированного композита  $\text{Co-Al-O}$  доминирует туннельная проводимость, так как выполняется зависимость  $\log \rho \sim T^{1/2}$ .

В общем случае, доминирующий механизм проводимости в гранулированных композитах определяется типом материала диэлектрической матрицы. В гранулированных композитах  $\text{Co-Al-O}$  и  $\text{Fe-Hf-O}$  доминирует туннелирование, а в композитах  $\text{Fe-SiO}_n$  и  $\text{CoFeB-SiO}$  основным механизмом проводимости является прыжковая проводимость, при которой электроны совершают термоактивированные прыжки между локализованными состояниями в аморфной матрице. Туннельная проводимость пропорциональна

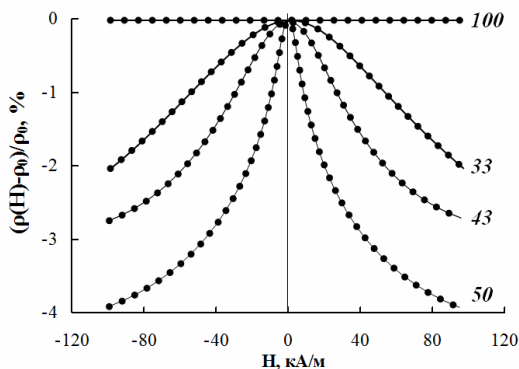
величине  $\exp\left\{-2\left(\frac{2\pi}{h}\right)(2mF)^{0.5}s\right\}$ , где  $h$  – постоянная Планка;

$m$  – эффективная масса электрона;  $F$  – эффективная высота потенциального барьера;  $s$  – его ширина.

Если рассмотреть две ферромагнитные гранулы, разделенные диэлектрическим барьером, то переход электрона из одной гранулы в другую может осуществляться только за счет туннелирования. В системе *металл – диэлектрик – металл* электрон с определенным спиновым состоянием может туннелировать через диэлектрический барьер только в точно такое же спиновое состояние. Вероятность туннелирования электрона в состояние с противоположным спином равна нулю. Это означает, что интен-

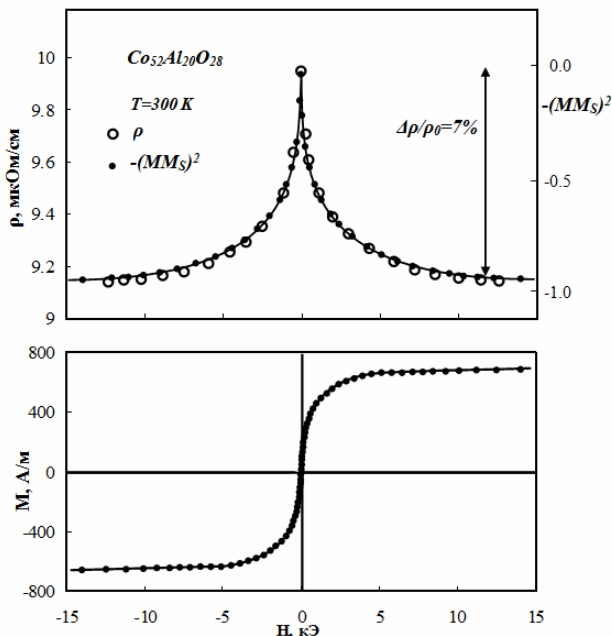
сивность туннелирования, а, следовательно, и туннельный ток зависят от относительной ориентации магнитных моментов гранул. В том случае, если имеется гранулированный композит с неметаллической проводимостью (гранулы изолированы в матрице), а магнитные моменты гранул ориентированы случайным образом, то в отсутствие внешнего магнитного поля туннельный ток мал. Приложение магнитного поля приводит к тому, что магнитные моменты гранул становятся параллельными друг другу, растет туннельный ток и, соответственно, проводимость композита.

Величина изменения электросопротивления при приложении магнитного поля зависит от состава композитов (рис. 3.2). Максимум эффекта гигантского магнитосопротивления соответствует такому соотношению металлической и диэлектрической фаз, при котором гранулы еще не сформировали сплошную сеть с металлической проводимостью, но ширина энергетических барьеров, препятствующих туннелированию электрона между гранулами, – минимальна. Такая структура реализуется в гранулированных материалах вблизи порога протекания.



**Рис. 3.2.** Магнитосопротивление гранулированных композитов  $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_n)_{100-x}$ . Состав композитов показан в атомных %

Экспериментально установлено, что магнитосопротивление гранулированных композитов пропорционально квадрату намагниченности, т. е.  $\frac{\Delta\rho}{\rho_0} \propto -\left(\frac{M}{M_s}\right)^2$ , где  $M_s$  – намагниченность насыщения композита. На рис. 3.3 показаны зависимости  $\rho$  и  $-(M/M_s)^2$  от  $H$ .



**Рис. 3.3.** Зависимость магнитосопротивления (светлые кружки) и квадрата приведенной намагниченности (черные кружки) от магнитного поля в гранулированном композите  $\text{Co}_{52}\text{Al}_{20}\text{O}_{28}$ , измеренные при комнатной температуре

Такая же зависимость может быть получена и исходя из следующих соображений. Изменение  $\rho$  при приложении магнитного поля обусловлено спин-зависимым туннелированием. Туннельный ток, а, следовательно, и величина эффекта гигантского магнитосопротивления пропорциональны углу между векторами намагниченности гранул, участвующих в туннелировании, т. е.

$$\rho - \rho_S \propto (1 - \cos \Theta), \quad (3.2)$$

где  $\Theta$  – угол между векторами намагниченности соседних гранул,  $\rho_S$  – значение удельного электросопротивления при  $\Theta = 0$ . В случае большого ансамбля барьеров, необходимо произвести усреднение, и тогда можно получить следующее выражение:

$$(\rho - \rho_S) \propto \langle (1 - \cos \Theta_{ij}) \rangle = \langle (1 - \cos(\Theta_i - \Theta_j)) \rangle = (1 - M/M_S)^2 \quad (3.3)$$

Здесь  $\rho_S$  – электросопротивление при параллельной ориентации магнитных моментов гранул;  $\Theta_{ij}$  – угол между векторами намаг-

ниченности ближайших  $i$ -й и  $j$ -й гранул;  $\Theta_i$  и  $\Theta_j$  – углы между направлениями векторов намагниченности ближайших  $i$ -й и  $j$ -й гранул и некоторым выделенным направлением. Усреднение  $\langle \rangle_i$  проведено для всех ближайших соседних  $ij$ -пар. Усреднение  $\langle \rangle_j$  проведено для всех гранул ансамбля.

Выражение (4.3) показывает, что изменение  $\rho$ , связанное с действием магнитного поля, обусловлено поворотом магнитных моментов гранул к направлению действия магнитного поля. При этом изменение  $\rho$  пропорционально квадрату намагниченности гранулированного материала.

### 3.3. МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ В ГРАНУЛИРОВАННЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУРАХ

Гранулированные композиционные материалы обладают высокими значениями магнитосопротивления, но для достижения этих величин необходимо большое магнитное поле (800–1200 кА/м). Альтернативным вариантом использования спинзависимого туннелирования может являться применение туннельных контактных переходов, которые представляют собой два тонких металлических слоя, разделенных слоем диэлектрика. Толщина всех слоев не превышает нескольких нанометров. Особенностью таких туннельных контактных переходов является то, что они обладают высокой чувствительностью даже к слабым магнитным полям.

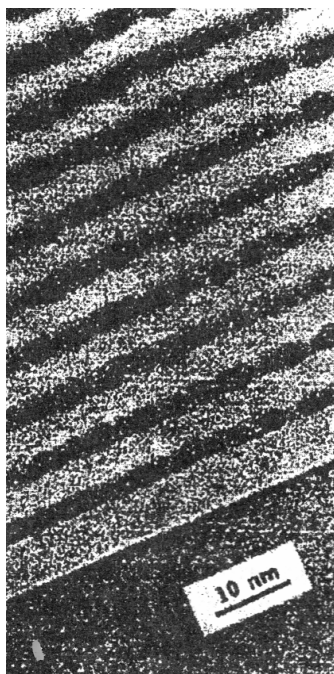
В последнее время широко используются *гранулированные многослойные структуры*, являющиеся комбинацией многослойных пленок и гранулированных композитов. Они просты с технологической точки зрения, стабильны как химически, так и электрически, обладают высокой низкополевой чувствительностью. Такие пленки обычно изготавливаются путем распыления металлической и диэлектрической мишеней. В процессе напыления тонкие металлические слои чередуются с изоляционными слоями. Это достигается либо за счет вращения подложки между мишенями, либо за счет попеременного перекрывания доступа потока распыляемого материала к подложке, либо за счет использования прерывистого режима распыления, когда в момент распыления одной мишени другая не распыляется. Толщина металлического слоя подбирается таким образом, чтобы сплошная пленка не могла сформироваться. Подбирается такая пара *металл – ди-*

*электрик*, чтобы поверхностная энергия металлических элементов была бы намного выше, чем поверхностная энергия диэлектрического материала. В этом случае металл не смешивается с оксидом и, следовательно, структура формируется в виде разделенных диэлектриком наногранул. В результате получаемая структура представляет собой многослойный сандвич, каждый слой которого состоит из металлических гранул, разделенных между собой и погруженных в плоскую диэлектрическую матрицу. Так многослойные гранулированные структуры  $(\text{Co}/\text{SiO}_2)_n$  ( $n$  – число слоев) получают при чередующемся напылении на подложку материалов из двух отдельных мишеней. Кобальт распыляется диодным, а  $\text{SiO}_2$  – высокочастотным распылением. Толщина слоев варьируется от 1,5 до 2 нм – для Co и от 3,5 до 5 нм – для  $\text{SiO}_2$  при напылении 15–20 слоев.

На рис. 3.4 представлена микрофотография поперечного сечения гранулированной многослойной композиции  $\text{Si}/\text{Co} - 1,5 \text{ нм}/ \text{SiO}_2 - 5 \text{ нм}$ . Хотя каждый металлический слой и состоит из гранул, многослойная структура, тем не менее, легко прослеживается даже при большом числе повторений слоев.

Диэлектрическая матрица ( $\text{SiO}_2$  – светлый контраст) является аморфной. Малые кобальтовые гранулы (темный контраст) представляют собой монокристаллы с ГЦК-решеткой (а не ГПУ, как в массивном кобальте). Большие гранулы могут быть поликристаллами.

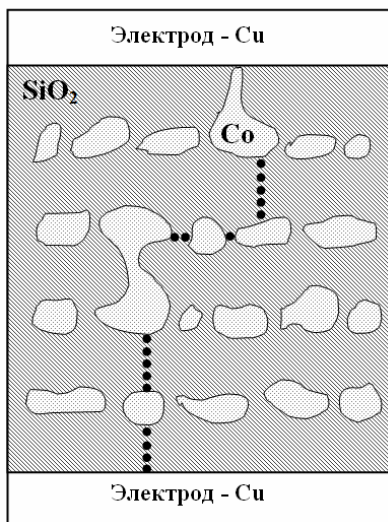
Протекание электрического тока вдоль цепочки металлических гранул зависит от толщины металлического слоя. Проводимость представленной структуры увеличивается на шесть порядков, когда толщина слоя Co изменяется от 1,5 до 2,2 нм, т. е. переход к металлической проводимости



**Рис. 3.4.** Микрофотография поперечного сечения гранулированной многослойной композиции  $\text{Si}/\text{Co} - 1,5 \text{ нм}/\text{SiO}_2 - 5 \text{ нм}$ . Аморфный  $\text{SiO}_2$  – светлый контраст, кристаллический Co – темный контраст

осуществляется при толщине 2 нм. Наноструктура металлических слоев зависит также от разницы поверхностной энергии между металлом и изолятором и от температуры подложки, на которой осуществляется рост пленки. Поэтому при получении таких материалов необходимо тщательно контролировать эти параметры.

Если сравнить свойства одиночного туннельного контактно-го перехода (*спинового вентиля*) и многослойных гранулированных пленок, то существенным преимуществом последних является уменьшение влияния металлических точек соприкосновения через диэлектрик. В переходах типа *металл – диэлектрик – металл* точка соприкосновения через изоляционный барьер создает круговой ток и делает такой переход неработоспособным. В гранулированных многослойных пленках точки соприкосновения могут быть у нескольких гранул, однако они, тем не менее, остаются изолированными внутри диэлектрического слоя и не оказывают сильного влияния на проводимость. Схематическое представление такой ситуации показано на рис. 3.5.



**Рис. 3.5.** Схематическое представление поперечного сечения гранулированных многослойных структур Co/SiO<sub>2</sub>. Точки изображают наиболее предпочтительный путь для электронов проводимости

Наряду с несколькими имеющимися точками соприкосновения в структуре пленок остаются прерывистые пути для движения электронов от нижнего слоя до верхней части структуры, если ток протекает именно в этом направлении. Электроны проводимости вынуждены туннелировать из одного слоя в другой или внутри слоя. Следовательно, спинзависимое туннелирование приводит к появлению эффекта гигантского магнитосопротивления даже при наличии конечной плотности точек соприкосновения металлических гранул.

### 3.4. МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ ГРАНУЛИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ ТИПА *ФЕРРОМАГНИТНЫЙ МЕТАЛЛ – НЕМАГНИТНЫЙ МЕТАЛЛ*

Получить гетерогенные структуры, неоднородные по воздействию на поток электронов проводимости, можно не только за счет применения композиционных материалов типа *металл – диэлектрик*. Принципы, лежащие в основе получения гранулированных композитов, позволяют получать гранулированные материалы и в системах *металл – металл*. Имеются бинарные металлические системы, в которых взаимная растворимость компонентов крайне мала (не более 1–2 атомных процентов), а промежуточные соединения не образуются. К таким системам можно отнести сплавы ферромагнитных элементов (Co, Fe, Ni) с немагнитными элементами (Cu, Ag, Au). Данные ферромагнитные и немагнитные металлы практически не растворяются друг в друге и не смешиваются. При одновременном напылении такой пары металлов на подложку происходит формирование ферромагнитной гранулированной структуры, подобной структуре керметов. Размеры ферромагнитных гранул, так же как и в керметах, не превышают 10 нм.

Несмотря на то, что оба компонента в сплавах являются проводящими металлами, в них также обнаруживается эффект гигантского магнитосопротивления, причем его величина зависит от взаимной ориентации направлений протекания электрического тока и приложения магнитного поля. Для такого рода металлических систем используется термин «*анизотропное магнитосопротивление*». Механизм анизотропного магнитосопротивления отличается от механизма магнитосопротивления, реализующегося в композитах типа *металл – диэлектрик*.

В гранулированных металлических сплавах при определенном соотношении концентрации металлов не существует сплошных каналов для электронов проводимости, состоящих из чистого ферромагнитного металла или из чистого немагнитного металла. Следовательно, при электропереносе через такой материал электроны проводимости должны пересекать границы раздела гранула – матрица, что влияет на резистивные параметры сплавов. Проводимость ферромагнитных гранул примерно в три раза ниже, чем проводимость неферромагнитной матрицы. Причиной анизотропного магнитосопротивления в данном случае является

спинзависимое рассеяние на поверхности или в объеме ферромагнитных гранул, находящихся в высокопроводящей немагнитной матрице. Интенсивность рассеяния зависит от ориентации магнитных моментов гранул, а следовательно, и от величины постоянного магнитного поля. В модели, объясняющей причины анизотропного магнитосопротивления в гранулированных металлических сплавах на основе представления о рассеянии электронов на границе двух фаз, предполагается, что в ферромагнитных гранулах имеются две подзоны электронов проводимости с противоположно направленными, по отношению к магнитному моменту гранулы, спинами. Проводимости электронов  $\sigma_+$  и  $\sigma_-$ , находящихся в двух подзонах, различны. Проводимость неферромагнитной матрицы также зависит от направления спинов электронов проводимости вследствие их взаимодействия с магнитным моментом гранул. При движении электрон встречает на своем пути ферромагнитную гранулу с магнитным моментом, ориентированным вдоль выделенного направления  $n$ . Происходит рассеяние электрона на границе раздела *матрица – гранула*, и электрон может оказаться в одной из двух энергетических подзон. Пусть  $\Theta$  – угол между ориентацией магнитного момента гранулы и направлением внешнего магнитного поля. Тогда вероятность рассеяния электрона в одну из двух подзон пропорциональна либо  $\cos^2(\Theta/T)$  для параллельной, либо  $\sin^2(\Theta/2)$  для антипараллельной ориентации спина электрона относительно магнитного момента гранулы. Выражение для электрического тока, протекающего через ферромагнитную гранулу, может быть записано в виде:

$$j^\uparrow(n) = P(n) \left[ \cos^2 \frac{\Theta}{2} j^\uparrow(\sigma_+) + \sin^2 \frac{\Theta}{2} j^\uparrow(\sigma_-) \right] \quad (3.5)$$

Индекс « $\uparrow$ » характеризует направление спина электрона относительно направления магнитного поля, а индексы « $\pm$ » – направление спина электрона относительно магнитного момента гранулы. Величина  $P(n)$  определяет вероятность рассеяния электрона гранулой с магнитным моментом вдоль выделенного направления  $n$ . Средняя величина электрического тока через образец будет определяться как

$$\langle j^\uparrow \rangle_V = f \langle j^\uparrow \rangle_M + (1-f) j^\uparrow \quad (3.6)$$

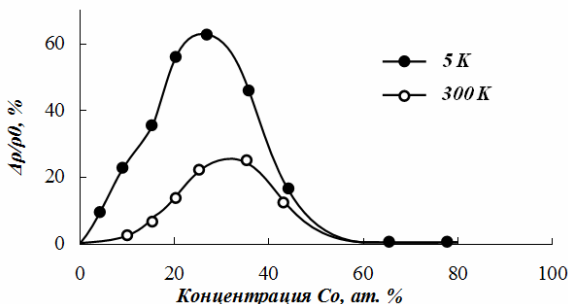


где  $f$  – относительная объемная доля ферромагнитных гранул,  $\langle \rangle_M$  – усреднение по всем возможным направлениям магнитного момента данной гранулы  $M$ ,  $\langle \rangle_V$  – усреднение по величинам магнитных моментов гранул, находящихся в объеме  $V$ .

Увеличение магнитного поля приводит к росту вероятности рассеяния электронов  $P(n)$ , что, в свою очередь, ведет к увеличению проводимости. Когда магнитные моменты гранул становятся параллельными, происходит поляризация электронов проводимости, находящихся в матрице. Это вызывает рост вероятности рассеяния электронов в подзону гранулы с тем же электронным состоянием, что и в матрице, и, соответственно, рост общей проводимости сплава. Таким образом, описанные механизмы приводят к уменьшению электросопротивления при приложении внешнего магнитного поля.

В соответствии с другой моделью, объясняющей причины анизотропного магнитосопротивления на основе представлений о рассеянии электронов внутри ферромагнитных гранул, предполагается, что вероятность рассеяния электронов в одну из двух подзон зависит от плотности электронных состояний на уровне Ферми. Внешнее магнитное поле вызывает изменение плотности электронных состояний в гранулах, а это приводит к росту проводимости. Отметим, что до настоящего времени окончательно не установлено, какая из предложенных моделей играет доминирующую роль в эффекте анизотропного магнитосопротивления. Эффект гигантского магнитосопротивления гранулированных металлических сплавов проявляется лишь в некотором интервале концентраций ферромагнитного и немагнитного металлов (рис. 3.6). Как и в случае гранулированных композитов, здесь также справедливо понятие *порога протекания*, т. е. объемной доли ферромагнитного металла, при которой гранулы начинают формировать непрерывные каналы проводимости. Значения объемной доли ферромагнитного материала, соответствующие порогу протекания, составляют 0,5–0,6.

Так как формирование гранулированной структуры происходит, в основном, при осаждении из газовой фазы, то получаемая структура является метастабильной. Поэтому термическая обработка гранулированных сплавов способна влиять на их структуру и на их магниторезистивные свойства.



**Рис. 3.6.** Концентрационная зависимость эффекта магнитосопротивления гранулированных металлических сплавов Co-Ag

Термическая обработка ведет к росту размеров гранул и к распаду твердых растворов на компоненты, составляющих сплав. Так, в системе Co-Si в результате термической обработки происходит формирование кластеров кобальта и меди, размеры которых в 2–3 раза больше, чем размеры исходных гранул. Как немагнитная матрица, так и сами ферромагнитные гранулы становятся при этом более чистыми, т. е. содержание в них второго компонента снижается. В то же время границы раздела *гранула – матрица* оказываются более четкими и резкими, что приводит к значительному росту эффекта гигантского магнитосопротивления сплавов.

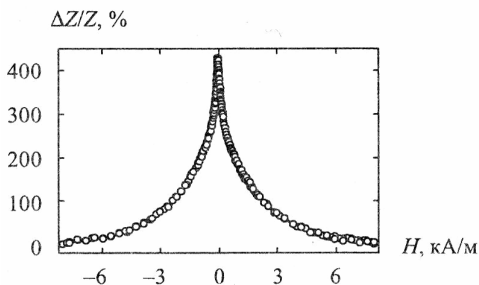
Наряду с гранулированными металлическими сплавами получают многослойные металлические сплавы с чередованием ферромагнитных и немагнитных слоев. В таких структурах также имеет место эффект гигантского магнитосопротивления, достигающий нескольких десятков процентов. При этом механизм его возникновения аналогичен механизму, который реализуется в изотропных гранулированных сплавах.

### 3.5. МАГНИТНЫЕ ДАТЧИКИ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ГИГАНТСКОГО МАГНИТНОГО ИМПЕДАНСА

Явление магнитного импеданса (МИ) заключается в изменении комплексного сопротивления ферромагнитного проводника ( $Z = R + jX$ ) при воздействии на него внешним магнитным полем  $H$ . Причиной такой связи является зависимость динамической магнитной проницаемости  $\mu$  проводника во внутреннем магнитном поле, создаваемом переменным током, от магнитного состояния этого проводника. Внешнее поле  $H$ , намагничивая проводник, влияет на его магнитное состояние и тем самым изменяет  $\mu$ .

В свою очередь, от  $\mu$  зависят величина скин-эффекта в проводнике и его индуктивность, что в конечном итоге сказывается на активной ( $R$ ) и реактивной ( $X$ ) составляющих полного сопротивления соответственно.

Большой магнитный импеданс может быть реализован в быстрозакаленных лентах, микропроводах или пленках, как аморфных ( $\text{FeCuNbSiB}$ ), так и в поликристаллических (пермаллой). Если максимальная относительная величина МИ превышает 100 %, то говорят о гигантском магнитном импедансе (GMI, ГМИ). Типичная зависимость относительного изменения импеданса ( $Z_{\max} - Z_{\min} / Z_{\min}$ ) от напряженности внешнего магнитного поля для быстрозакаленной ленты  $\text{Fe}_4\text{Co}_{67}\text{Mo}_{1,5}\text{Si}_{16,5}\text{B}_{11}$  (Vitrovac 6025) показана на рис. 3.7.



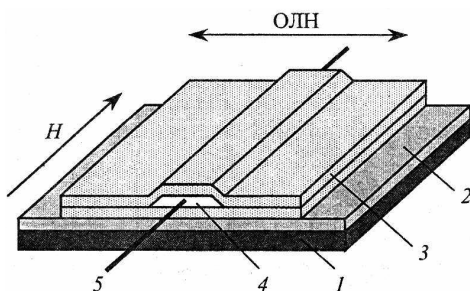
**Рис. 3.7.** Зависимость относительного изменения полного электросопротивления быстрозакаленной ленты Vitrovac 6025 от напряженности внешнего магнитного поля

Существенно, что для ГМИ свойственны высокие значения чувствительности к внешнему магнитному полю (до  $10\% (\text{A}/\text{M})^{-1}$ ). Это позволяет использовать такого рода среды для создания высокочувствительных сенсоров магнитного поля и применять их, в частности, для детектирования магнитных свойств биологических объектов.

Наиболее технологичным вариантом первичных преобразователей на основе ГМИ-эффекта, по-видимому, следует считать магнитные пленки. Многочисленные исследования в этой области показывают, что величина МИ зависит от геометрии и структурных особенностей пленочных проводников (в частности, от наличия слоистости). По этому признаку пленки можно условно разделить на несколько групп: однородные магнитные среды, имеющие в своем составе один магнитный слой; многослойные пленки, состоящие из многократно чередующихся слоев магнитного и немагнитного металлов; сэндвичи. Сэндвичи представля-

ют собой пленки с центральным высокопроводящим слоем (например, Cu), заключенным между одинаковыми однородными или наноструктурированными (слоистыми) магнитными слоями.

Датчики на основе сред с ГМИ-эффектом предполагается использовать в тех же областях, что и магниторезистивные датчики. Это быстродействующие магниточувствительные системы, используемые для высокоплотной записи информации, в системах контроля автомобилей и др. Наряду с высокой чувствительностью для таких датчиков важно отсутствие гистерезиса, линейность и температурная стабильность функции преобразования. Обратимся к структуре пленочного ГМИ-сенсора, конструкция которого может быть, например, такой, какая показана на рис. 3.8. В ее основу положен пленочный сэндвич FeCoSiB/Cu/FeCoSiB, где Cu – немагнитный проводник, а FeCoSiB – два аморфных магнитомягких немагнитострикционных ферромагнитных слоя. Таким образом, магнитные слои образуют вокруг меди замкнутую магнитную структуру. Толщина медного проводника составляет 3 мкм, ширина – 0,2 мм, толщина магнитного слоя – 2 мкм. Общий размер элемента 10x2 мм.



**Рис. 3.8.** Схема структуры ГМИ-сенсора: 1 – пластинчатый магнит; 2 – подложка; 3 – аморфные ферромагнитные слои FeCoSiB; 4 – проводящий медный слой; 5 – токовые проводники; длина и ширина сенсора – 10 мм и 2 мм соответственно

При решении задач формирования высокого качества ГМИ-элементов по линейности, термостабильности, безгистерезисности исходят из следующих физических положений. Во-первых, индуктивная составляющая импеданса элемента связана только с магнитной проницаемостью и слабо зависит от температуры. Активная компонента, напротив, проявляет высокую температурную чувствительность, поскольку отражает также температурное поведение удельного электросопротивления металла. Во-вторых, зависимость индуктивного сопротивления от магнитного поля  $\chi\{H\}$  имеет большую линейность и меньший гистерезис в той

области полей, где магнитная проницаемость формируется за счет процессов вращения намагниченности. Исходя из этих положений, для улучшения характеристик элемента необходимо выделить индуктивную часть импеданса и соответствующим образом расположить рабочую точку элемента (создать внешнее магнитное смещение).

### **3.6. ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ С ЭФФЕКТОМ ГИГАНТСКОГО МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ**

Одним из наиболее перспективных направлений применения материалов с эффектом гигантского магнитосопротивления является создание высокочувствительных головок для считывания информации с магнитных носителей. Как отмечалось выше, считывающая головка распознает информацию, сохраненную на носителях, посредством детектирования полей рассеяния, возникающих на границах доменов с различной ориентацией намагниченности. Эти поля воспринимаются рабочим материалом головки, обладающим эффектом гигантского магнитосопротивления. Чувствительность считывающей головки зависит от магниторезистивных свойств материала, используемого в качестве сенсорного элемента.

В настоящее время в считывающих магнитных головках в качестве магниторезистивного материала используется пермаллой, эффект магнитосопротивления у которого не превышает 2–2,5 % в магнитных полях 400–800 А/м. Поэтому применение материалов, обладающих эффектом гигантского магнитосопротивления, должно привести к улучшению характеристик аппаратуры для магнитной записи.

В процессах перемагничивания современных металлических магнитных материалов, используемых для магнитной записи, большую роль играют процессы смещения доменных границ. Когда частота переменного магнитного поля достигает десятков МГц, доменные границы не успевают реагировать на его действие. Это обстоятельство существенно ухудшает эксплуатационные характеристики изделий из таких металлических сплавов. Гранулированные материалы лишены этого недостатка. Так как размеры гранул таких материалов составляют от нескольких нанометров до нескольких десятков нанометров, то все гранулы

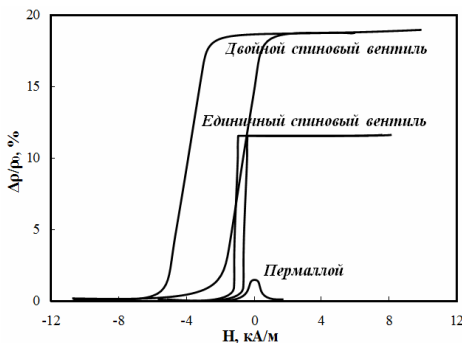
находятся в однодоменном состоянии. В этих условиях процесс перемагничивания ферромагнитного сплава не осложняется перемещением доменных границ и, следовательно, частотные границы качественной работы гранулированных материалов значительно выше, чем у гомогенных сплавов. В связи с этим в середине 90-х гг. прошлого века начали разрабатывать магнитные головки с использованием гранулированных магниторезистивных материалов. Недостатком разработанных головок было то, что для достижения эффекта гигантского магнитосопротивления требовались магнитные поля величиной в десятки тысяч А/м. Поэтому следующим шагом в практическом использовании эффекта гигантского магнитосопротивления явилось получение искусственных структур, обладающих свойствами гранулированных материалов.

Используя явление спинзависимого рассеяния электронов, удалось создать структуры, состоящие из нескольких металлических слоев. Эти структуры получили название *«спиновые вентили»*. Такие структуры характеризуются высокой чувствительностью к магнитному полю при комнатных температурах. Основная особенность спиновых вентилях заключается в том, что магнитный момент одного из металлических слоев фиксируется, тогда как в другом металлическом слое, он легко изменяет свое направление под действием внешнего магнитного поля. Структура спинового вентиля содержит, обычно, три магнитных слоя.

Рассмотрим режим работы спинового вентиля, магнитные слои которого изготовлены из пермаллоя. При изготовлении такого устройства сначала на немагнитную подложку осаждается первый пермалловый слой толщиной 5 нм, затем слой меди толщиной 2,5 нм, поверх которого вновь наносится слой пермаллоя той же толщины, что и первый, после чего последовательно осаждаются антиферромагнитный Mn-Fe и немагнитный защитный слои одной и той же толщины – 5 нм.

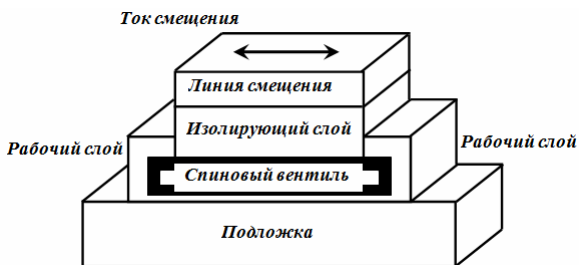
В такой многослойной структуре в результате обменного взаимодействия между антиферромагнитным и верхним пермалловым слоями возникает блокировка магнитного момента верхнего слоя Ni-Fe. В то же время перемагничивание нижнего пермаллового слоя, не связанного обменным взаимодействием с Mn-Fe-слоем, легко осуществляется внешним магнитным полем. Таким образом, изменение внешнего поля меняет взаимную ориентацию магнитных моментов двух пермалловых слоев, которая определяет величину электрического сопротивления структуры в целом.

Можно сказать, что спиновый вентиль работает как устройство, сопротивление которого меняется при изменении магнитного поля (рис. 3.9).



**Рис. 3.9.** Сравнение «отклика» пермаллоя и структур типа «спиновый вентиль» на изменение внешнего магнитного поля

На основе спиновых вентилях разработаны считывающие головки, гораздо более эффективные, чем головки, используемые в настоящее время. Созданы высокочувствительные датчики магнитного поля, порогом срабатывания которых можно управлять. На рис. 3.10 приведена схема такого датчика, а на рис. 3.11 показан принцип его работы. В обычных условиях зависимость электросопротивления датчика от магнитного поля показана сплошной линией (рис. 3.11),  $H_r$  и  $H_f$  значения магнитного поля, при которых электросопротивление резко увеличивается и уменьшается, соответственно. Через верхний слой структуры пропускается переменный ток, создающий в рабочем слое переменное магнитное поле. Значения амплитуды электрического тока (как положительного, так и отрицательного полупериода) подобраны таким образом, чтобы результирующее магнитное поле в сенсорном слое было равно  $H_r - \Delta h$  и  $-H_f - \Delta h$ , соответственно.



**Рис. 3.10.** Датчик на основе спинового вентиля

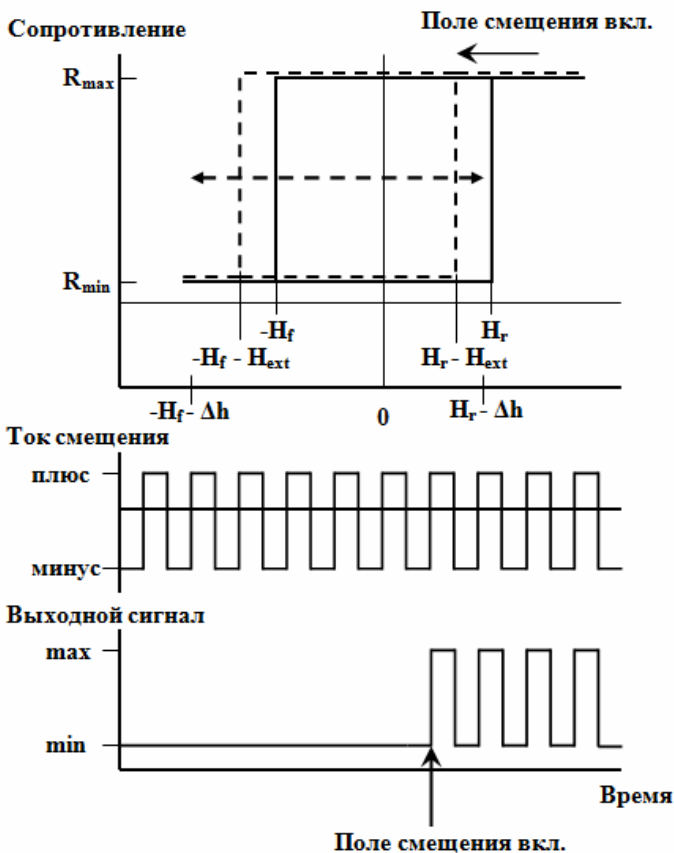


Рис. 3.11. Принцип работы датчика на основе спинового вентиля

В этом случае сопротивление датчика остается постоянным (базовое значение), так как положительное значение результирующего магнитного поля  $H_r - \Delta h$  оказывается меньше, чем пороговое  $H_r$ . Если к датчику приложено внешнее поле  $H_{ext}$ , причем  $\Delta h < H_{ext} < \Delta H$ , то это равносильно тому, что внешнее поле смещает «петлю сопротивления» в область отрицательного магнитного поля (пунктирная петля на рис. 3.11). При этом максимальное магнитное поле в сенсорном слое будет равно  $H_r - H_{ext}$ , что меньше порогового значения, обусловленного током смещения  $H_r - \Delta h$ . Таким образом, сопротивление датчика будет ме-



няться, повторяя изменения электрического тока смещения (рис. 3.11). Чувствительность такого датчика задается величиной смещающего электрического тока.

Подобные трехслойные структуры, состоящие из магнито-жесткого слоя, магнитомягкого слоя и диэлектрической прослойки применяют для создания спин-туннельных переходов, управляемых магнитным полем. Гранулированные изотропные материалы могут быть использованы в качестве сверхчувствительных датчиков температуры, поскольку температурная зависимость электросопротивления у них превышает чувствительность применяемых в настоящее время угольных и полупроводниковых термодатчиков примерно на порядок. Они также могут быть использованы в качестве датчиков магнитного поля, превосходящих по своим характеристикам датчики Холла.

## 4 . МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

В последние годы в ведущих научных отечественных и зарубежных журналах появился целый ряд публикаций, посвященных магнитоэлектрическим материалам. Однако вплоть до настоящего времени магнитоэлектрики представляли интерес для сравнительно узкого круга ученых-специалистов, так как малые величины магнитоэлектрических эффектов не позволяли говорить об их практическом применении. Только в самое последнее время появились публикации об обнаружении *гигантского магнитоэлектрического эффекта* и эффекта *гигантской магнетоемкости*.

### 4.1. МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ И ЭФФЕКТ ГИГАНТСКОЙ МАГНЕТОЕМКОСТИ

Под *магнитоэлектрическим (МЭ) эффектом* понимают эффект возникновения намагниченности под действием электрического поля и электрической поляризации под действием магнитного поля:

$$M = \alpha \cdot E \quad (4.1)$$

$$P = \alpha \cdot H \quad , \quad (4.2)$$

где  $M$  – намагниченность,  $E$  – электрическое поле,  $P$  – поляризация,  $H$  – магнитное поле,  $\alpha$  – магнитоэлектрический коэффициент.

Существует, по меньшей мере, 5 видов единиц, в которых измеряется линейный МЭ-эффект: в системе Си единицей служит с/м, в СГС это величина безразмерная ( $\alpha = 4\pi P/H$ ), используется также внесистемная единица Кл/(м<sup>2</sup>·Э). Часто в литературе используется единица измерения В/(см·Э), для перевода которой в первые три необходимо знать диэлектрическую проницаемость материала: Кл/(м<sup>2</sup>·Э) =  $\epsilon\epsilon_0 \cdot 10^2$  В/(см·Э). Кроме того, используют рационализированные единицы СГС  $\alpha^r = \alpha/(4\pi) = P/H$ . Такое разнообразие единиц приводит к путанице в литературе по данной тематике и постоянным ошибкам в оценке эффектов.

Под гигантской магнитоёмкостью (*giant magnetocapacitance*) понимается относительное изменение диэлектрической проницаемости в магнитном поле:

$$MC = \frac{\varepsilon(H) - \varepsilon(0)}{\varepsilon(0)}, \quad (4.3)$$

где  $\varepsilon(H)$  – диэлектрическая проницаемость материала в магнитном поле  $H$ ,  $\varepsilon(0)$  – диэлектрическая проницаемость в отсутствие поля. Магнитоёмкость принято измерять в процентах.

#### 4.2. МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Величина магнитоэлектрического эффекта в классическом магнитоэлектрике хромите  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  составляет  $3,7 \cdot 10^{-12}$  с/м ( $10^{-3}$  СГС). Максимальный магнитоэлектрический эффект был обнаружен в материале  $\text{TbPO}_4$  –  $10^{-1}$  в системе СГС или  $3,3 \cdot 10^{-10}$  с/м. В принятой терминологии такие эффекты называют *гигантскими*. Однако магнитоэлектрический эффект в данном соединении существует лишь при температурах, меньших 2 К. Только в последнее время получены материалы с гигантским магнитоэлектрическим эффектом при комнатных температурах: тонкие (50–500 нм) пленки феррита висмута  $\text{BiFeO}_3$  с магнитоэлектрическим эффектом  $dE/dH = 3$  В/(см·Э) (0,4 СГС).

Большие значения МЭ-эффекта удастся получить также в композитных материалах, т. е. в структурах, состоящих из чередующихся магнитоэлектрических и пьезоэлектрических слоев. Такой составной материал ведет себя как эффективная магнитоэлектрическая среда, в которой МЭ-взаимодействие осуществляется через механическую подсистему. Получаемые эффекты достигают значений 0,1 В/(см·Э) при постоянном магнитном поле и 90 В/(см·Э) в переменном магнитном поле на частоте электро-механического резонанса, определяемой размерами образца и параметрами композита.

Эффект гигантской магнитоёмкости (10 % в поле 5 Тл) наблюдался в соединении  $\text{TbMnO}_3$ .

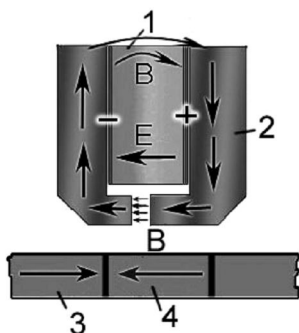
#### 4.3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Обнаружение гигантских МЭ-эффектов в материалах позволяет говорить о возможности их использования в различных электронных устройствах. Еще в 1965 г. была предложена память на магнитоэлектрических доменах. В качестве битов информации в таких материалах могут выступать антиферромагнитные домены. Они не создают полей размагничивания, но, являясь одновременно и магнитоэлектрическими доменами, поляризуются под действием внешнего магнитного поля.

Существенным ограничением такой памяти является сложность процесса записи: нагревание выше температуры Нееля и охлаждение в присутствии магнитного и электрических полей до температуры ниже точки Нееля. В то же время магнитоэлектрики могут служить основой для постоянных запоминающих устройств без возможности перезаписи (ROM – *read only memory*) с чрезвычайно большим быстродействием: магнитоэлектрический коэффициент остается постоянным вплоть до сотни гигагерц – частоты антиферромагнитного резонанса.

Другим применением магнитоэлектрических эффектов могут служить головки записи/считывания. Дальнейшее уплотнение плотности записи информации требует уменьшения размеров битов, вплоть до критического размера, ниже которого биты могут спонтанно перемагничиваться из-за термических флуктуаций (*суперпарамагнитный предел*). Преодоление суперпарамагнитного предела возможно с использованием сред с большой коэрцитивной силой. Такие среды требуют больших магнитных полей для записи информации, что означает увеличение тока в катушках записи и, следовательно, увеличение омических потерь и потерь на вихревые токи.

Замена традиционно используемых индуктивных головок на емкостные магнитоэлектрические элементы (рис. 4.1) позволит уменьшить размер головок записи и потери в них. Приложение электрического напряжения к конденсатору, в котором диэлектрическим слоем является магнитоэлектрический материал, приводит к возникновению магнитного поля, достаточного для записи бита информации.



**Рис. 4.1.** Головка записи на основе емкостного МЭ-элемента:

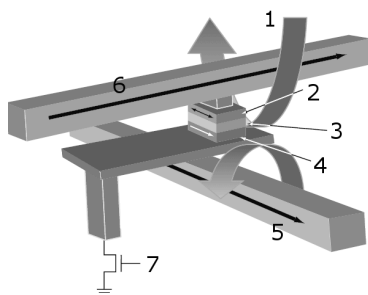
1 – магнитоэлектрический слой между обкладками, на который подано электрическое напряжение,  
 2 – обкладки конденсатора,  
 3–4 – домены в информационном магнитном слое

Особого интереса заслуживают перспективы применения магнитоэлектриков в *спиновой электронике (спинтронике)*, новой бурно развивающейся отрасли микроэлектроники, использующей транспортные свойства спинполяризованных электронов.

Главной проблемой спиновой электроники является преобразование информации, представленной в форме намагниченности, в электрическое напряжение. В настоящее время эта задача решается с использованием явления *гигантского магнитосопротивления (ГМС)* – зависимости сопротивления материала от его намагниченности. Гигантский магнитоэлектрический эффект является альтернативным решением данной проблемы, и, возможно, в будущем приборы, работающие на гигантском магнитоэлектрическом эффекте, либо составят конкуренцию ГМС-устройствам, либо будут выступать в качестве устройств, дополнительных к ним.

Так, в качестве памяти нового поколения энергонезависимого типа предлагаются различные виды *магнитной памяти произвольного доступа (MRAM, Magnetoresistive random access memories)*. Узел MRAM показан на рис. 4.2. В узле расположен туннельный контакт – ГМС-устройство, объединяющее в себе и среду записи (перемагничиваемый слой) и устройство считывания информации (контакт, сопротивление которого зависит от состояния намагниченности в слое записи).

Доступ к каждому элементу памяти осуществляется подачей токов записи/считывания на соответствующие битовую и разрядную шины, в месте пересечения которых находится данный бит информации. Управление намагниченностью в битах основано на токовых сигналах, поэтому нельзя говорить, что проблема уменьшения энергетических потерь решена полностью.



**Рис. 4.2.** Организация ячейки MRAM памяти: 1 – ось легкого намагничивания, 2–4 – магнитный туннельный переход (2 – перемангничиваемый слой, 3 – магнитный барьер, 4 – эталонный слой), 5 – битовая шина, 6 – разрядная шина, 7 – транзисторный ключ «запись – чтение»

Более того, по мере увеличения степени интеграции устройств, становится все труднее создать конфигурацию подводящих проводов, изменяющих направление намагниченности в отдельном узле и не влияющих на соседние. Все эти проблемы позволит решить запись информации на основе МЭ-эффекта. Если в каждом узле MRAM-памяти разместить МЭ-элемент, то приложение электрического напряжения к узлу, в котором находится данный бит, позволит изменять направление намагниченности в бите, не воздействуя на соседние узлы. Так как в МЭ-элементе магнитное поле возникает под действием статического электрического поля, а не тока, то это позволяет также избежать дополнительных энергетических потерь.

В основе использования магнитоэлектрических материалов в СВЧ-приборах лежит идея управления частотой магнитного резонанса. Магнитоэлектрический материал помещается в поле постоянного магнита так, чтобы частота его антиферромагнитного резонанса была близка к частоте используемого СВЧ-излучения. Приложением электрического напряжения можно вызывать небольшие изменения магнитного поля, в котором находится МЭ-материал, и тем самым сдвигать частоту магнитоэлектрического резонанса, что приводит к значительным изменениям в поглощаемой мощности СВЧ-излучения. Так как магнитоэлектрики являются материалами с нарушенной временной инверсией, то они могут быть использованы в качестве невзаимных устройств СВЧ-диапазона: вентилях, циркуляторах и др. Квадратичные магнитоэлектрические эффекты могут быть использованы в приборах удвоения частоты.

Таким образом, обнаружение гигантских магнитоэлектрических эффектов открывает широкие перспективы для использования МЭ-материалов в технике.

## 5. ЛОГИЧЕСКАЯ МАГНИТОЭЛЕКТРОНИКА

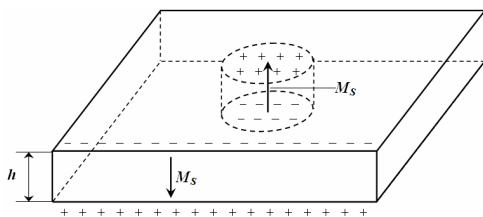
### 5.1. ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ МАГНИТНЫЕ ДОМНЫ

В настоящее время одним из наиболее широко применяемых способов записи информации на магнитных носителях является способ, при котором единичным носителем информации является *цилиндрический магнитный домен (ЦМД)*. Рассмотрим коротко причины образования ЦМД в магнитных материалах.

*Цилиндрические магнитные домены* возникают в том случае, если в тонкой магнитной пластинке, обладающей одноосной анизотропией с осью легкого намагничивания перпендикулярной ее плоскости, приложено постоянное магнитное поле, ориентированное вдоль нормали к поверхности. Форма ЦМД показана на рис. 5.1. Такая форма ЦМД является результатом противодействия двух тенденций:

1. Стремления к уменьшению радиуса ЦМД, что ведет к уменьшению энергии доменной границы.

2. Стремления к увеличению радиуса ЦМД, что приводит к понижению магнитостатической энергии, связанной с образованием магнитных полюсов на поверхности пластинки.



**Рис. 5.1.** Цилиндрический магнитный домен в пленке с перпендикулярной анизотропией

Увеличение радиуса ЦМД вызывает уменьшение магнитостатической энергии из-за того, что размагничивающее поле внутри ЦМД ориентировано в направлении, совпадающем с направлением намагниченности пластинки. Образующиеся на поверхности ЦМД магнитные полюсы противоположны по знаку магнитным полюсам на поверхности соседних областей. Сум-

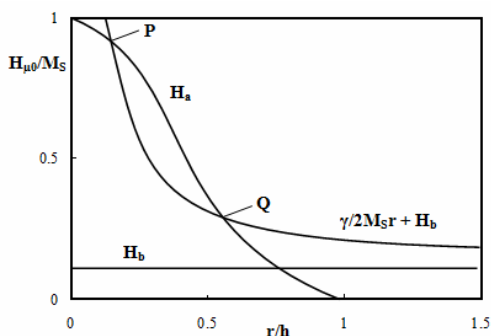
марное размагничивающее поле  $H_d$  может быть представлено в следующем виде:

$$H_d = (1 - 2N)M_s/\mu_0, \quad (5.1)$$

где  $N$  – размагничивающий фактор ЦМД, который является как функцией толщины пластинки  $h$ , так и радиуса самого цилиндрического домена  $r$ .

Пусть поверхностная энергия доменной границы равна  $\gamma$ . Тогда величину поля  $H_\gamma$ , которое стремится уменьшить радиус ЦМД, можно представить в виде:

$$H_r = -\frac{\gamma}{2M_s r} \quad (5.2)$$



**Рис. 5.2.** Магнитные поля, оказывающие воздействие на ЦМД:  $H_a$  – размагничивающее поле;  $H_b$  – поле смещения;  $\gamma/2M_s r$  – поле поверхностного натяжения

Знак « $\rightarrow$ » в выражении (5.2) означает, что действие поля  $H_\gamma$  приводит к уменьшению радиуса ЦМД. Для того чтобы образовался цилиндрический магнитный домен, к пластинке перпендикулярно ее плоскости должно быть приложено поле смещения –  $H_b$ , ориентированное противоположно направлению намагниченности в ЦМД. Цилиндрический магнитный домен будет находиться в устойчивом состоянии, если выполняется условие:

$$H_d + H_r - H_b = 0 \quad (5.3)$$

которое можно переписать в виде:

$$(1 - 2N)M_s/\mu_0 = \frac{\gamma}{2M_s r} + H_b \quad (5.4)$$



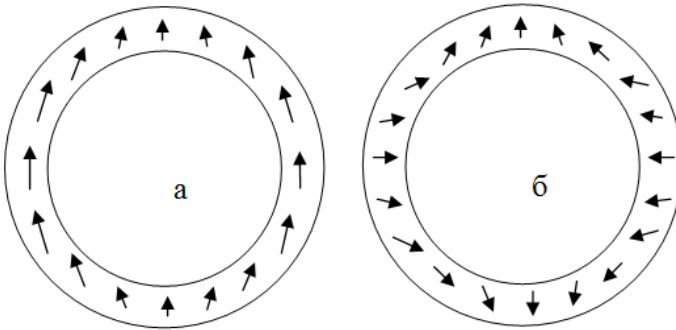
В том случае, когда  $r = h/2$  и  $N \approx 1/3$ , соотношение (5.4) может быть представлено в форме

$$\frac{M_s}{\mu_0} = 3 \left( \frac{\gamma}{2M_s r} + H_b \right) \quad (5.5)$$

При малых  $r$ , если  $N \rightarrow 1$ , то справедливо соотношение

$$-\frac{M_s}{\mu_0} = \frac{\gamma}{2M_s r} + H_b \quad (5.6)$$

На рис. 5.2 приведены зависимости левой и правой частей соотношения (5.5) от  $r$ . Левая и правая части соотношения (5.5) оказываются равными в точках  $P$  и  $Q$ . В точке  $P$  при увеличении  $r$  преобладающим становится поле, стремящееся увеличить радиус домена, а при уменьшении  $r$  – поле  $H\gamma$ , стремящееся уменьшить радиус ЦМД. Поэтому равновесие в точке  $P$  неустойчиво. В свою очередь, в точке  $Q$  при изменениях радиуса ЦМД стремится вернуться к своему исходному состоянию. Поэтому такое равновесие устойчиво. Если постепенно увеличивать поле смещения  $H_b$ , то радиус ЦМД будет постепенно уменьшаться, и при определенном значении  $H_{b\text{кр}}$  ЦМД коллапсирует.



**Рис. 5.3.** Распределение магнитных моментов в доменной границе ЦМД: *а* – обычный ЦМД; *б* – жесткий ЦМД

Существует два типа цилиндрических магнитных доменов, которые отличаются структурой доменной границы: так называемые *обычные ЦМД* и *жесткие ЦМД*. Радиус обычных ЦМД весьма чувствителен к действию поля смещения, в то время как

радиус жестких ЦМД практически не зависит от величины  $H_b$  в широком интервале магнитных полей. Структура доменных границ обычных и жестких ЦМД показана на рис. 5.3. Как следует из рис. 5.3, обычные ЦМД имеют доменную границу с однородной структурой, структура доменных границ жестких ЦМД представляет собой чередование блоховских и неелевских участков.

Как будет показано ниже, цилиндрические магнитные домены можно перемещать по поверхности монокристаллической пластинки и создавать на их основе запоминающие устройства. Способ перемещения жестких ЦМД значительно отличается от способа перемещения обычных ЦМД. В ряде случаев при практическом использовании стараются не допускать образования жестких ЦМД. Чтобы воспрепятствовать их образованию, как правило, используют два метода:

1. *Метод ионной имплантации*, уменьшающий величину поля перпендикулярной магнитной анизотропии.

2. *Метод напыления на монокристаллическую пластинку тонкой магнитомягкой пленки.*

Второй метод основан на том, что если на поверхности монокристаллической пластины создан тонкий магнитомягкий слой, то в нем образуются затравочные центры, поля рассеяния от которых подавляют сложную структуру доменных границ жестких ЦМД.

Отметим, что ЦМД могут возникать только в магнитных материалах с большой константой перпендикулярной анизотропии  $K$ , достаточной для того, чтобы ориентировать вектор намагниченности в направлении, перпендикулярном плоскости поверхности пластинки. Другими словами, поле одноосной перпендикулярной анизотропии должно по своей величине превосходить значение размагничивающего поля, связанного с образованием на поверхности пластинки магнитных полюсов. Такое условие хорошо реализуется в магнитных материалах с относительно низким значением намагниченности насыщения, например, в *ортоферритах* (оксидные кристаллические антиферромагнитные соединения со структурной формулой  $R_2C > 3Fe_2O_3$ , где  $R$  – редкоземельный металл), в *феррит-гранатах* (оксидные кристаллические соединения со структурной формулой  $3R_2O_3 \cdot 5Fe_2O_3$ ) или в *гексаферритах* (оксидные кристаллические соединения с ферримагнитным упорядочением и структурной формулой  $n_1Me^{(1)}O_2n_2Me^{(2)}O_2n_3Fe_2O_3$ , где  $n_1 \geq 1$ ,  $n_2 \geq 0$ ,  $n_3 \geq 3$  – целые числа,  $Me^{(1)}$  – Ba, Sr, Pb, и  $Me^{(2)}$  – Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Mg и др.).

Технологический процесс изготовления ЦМД-материалов состоит из следующих операций:

1. Выращивание монокристаллических *немагнитных гранатов* (оксидные кристаллические соединения со структурной формулой  $3R_2O_3 \cdot 5GaO_3$  или  $3R_2O_3 \cdot 5Ge_2O_3$ ) для использования их в дальнейшем в качестве подложек.

2. Изготовление подложек из массивных монокристаллов.

3. Выращивание монокристаллических ЦМД-пленок на подложках

4. Обработка ЦМД-пленок (ионная имплантация, напыление на поверхность магнитомягкого слоя).

Подложка для ЦМД-пленок должна быть немагнитной, монокристаллической, соответствующим образом кристаллографически ориентированной, обладать малой электропроводностью и большой теплопроводностью. Постоянная кристаллической решетки подложки должна соответствовать постоянной решетки ЦМД-пленки. Как правило, немагнитные монокристаллические гранаты (*були*) выращивают *по методу Чохральского*.

Разработано два основных метода выращивания ориентированных монокристаллических пленок на подложках: *жидкофазная эпитаксия* и *газотранспортная эпитаксия*.

В методе жидкофазной эпитаксии подложки укрепляют в держателях на стержне. Расплав содержит оксиды образующих гранат редкоземельных элементов Ga или Ge, замещающих железо и соединения PbO и  $V_2O_3$ .

В свою очередь, метод газотранспортной эпитаксии основан на том, что компоненты ферритграната, гексаферрита или ортоферрита в газообразном виде вводят в пространство печи, куда уже помещены подложки, при температурах 1170–1180 °С. Введение компонент производится с помощью носителя, в качестве которого используют аргон с добавкой кислорода.

### **5.1.1. Запоминающие устройства на ЦМД**

Используя цилиндрические магнитные домены, можно создавать самые разнообразные устройства для запоминания и обработки информации. От аналогичных устройств, выполненных на полупроводниковых элементах, эти устройства отличаются высокой функциональной гибкостью, обусловленной возможностью выполнения логических и запоминающих операций в одной маг-

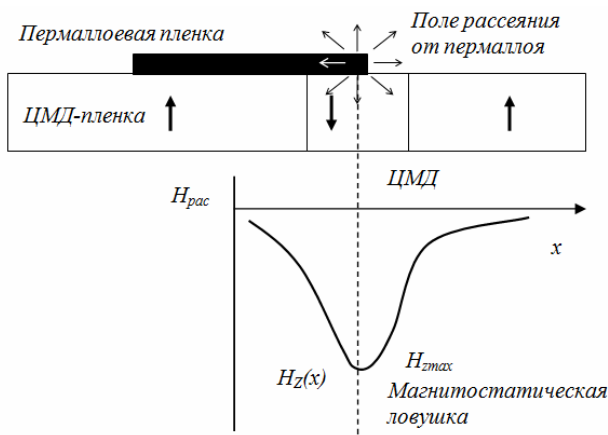
нитной среде, высокой плотностью размещения информации, а также сравнительно низкой стоимостью. В основном ЦМД применяют в запоминающих устройствах, Однако они весьма перспективны и для решения логических задач.

Принцип работы устройств на ЦМД основан на том, что ЦМД можно легко перемещать в любом направлении по магнитной пленке, в которой они содержатся. При этом отдельный цилиндрический магнитный домен представляет собой бит информации, который можно вводить в информационные регистры и выводить оттуда, а также подводить и отводить от устройств записи и считывания информации.

Устройства на ЦМД можно классифицировать по способу хранения информации. Чаще всего отдельный бит информации изображается наличием или отсутствием ЦМД. В этом случае требуется, чтобы ЦМД располагались достаточно далеко друг от друга – обычно на расстоянии, равном 4-5 диаметрам домена. Это необходимо, чтобы исключить взаимодействие между соседними ЦМД. Такого рода устройства принято называть *«устройствами на изолированных ЦМД»*. Другой способ хранения информации основан на том, что для ее кодирования применяются ЦМД разного вида. Это позволяет располагать домены ближе друг к другу, обеспечивает более высокую плотность записи информации и более низкую стоимость запоминающего устройства. Подобные устройства принято называть *«устройствами на решетках ЦМД»*. Для кодирования информации в этом случае используется наличие у доменной границы ЦМД внутренней структуры (обычные и жесткие ЦМД).

ЦМД-устройства можно также классифицировать по способам воздействия на одиночные цилиндрические магнитные домены. На домен можно воздействовать с помощью *токовых проводников*, при помощи *пермаллоевых структур*, поляризуемых внешним магнитным полем, или при помощи так называемых *«заряженных доменных границ»* (доменных границ, несущих на себе магнитные полюса в результате неравенства нулю нормальных к плоскости доменной границы компонент намагниченности в соседних доменах). В большей части современных ЦМД-устройств для перемещения доменов используется градиент магнитного поля. Рассмотрим один из возможных механизмов перемещения доменов в устройствах на изолированных ЦМД.

На верхнюю поверхность ЦМД-материала фотолитографическим методом наносится система пермалловых аппликаций, состоящая, например, из периодически повторяющихся  $T$ - и  $I$ -образных полос. Внешнее магнитное поле в плоскости намагничивает пермалловые аппликации, создавая локализованные и образованные  $z$ -компонентой поля *ловушки*, в которых может находиться отдельный цилиндрический магнитный домен (рис. 5.4). Можно считать, что ловушка представляет собой среднюю  $z$ -компоненту поля, действующего на доменную границу ЦМД, а ее характерной особенностью являются точки перегиба, где максимален градиент поля, который действует на ЦМД при его движении из стороны в сторону внутри ловушки. Необходимо отметить, что поле рассеяния от пермалловых аппликаций всегда имеет компоненты в плоскости пленки, которые действуют на доменную границу так, как это показано на рис. 5.4. Помимо этого магнитостатические ловушки для перемещающихся ЦМД могут быть образованы структурой имплантированных областей, намагниченность которых лежит в плоскости пленки. Магнитное поле, приложенное в плоскости пленки, поляризует имплантированные участки. Такие устройства называются *устройствами со смежными дисками*.

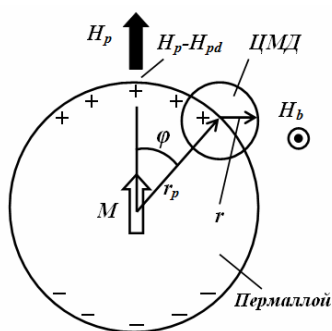


**Рис. 5.4.** Схематическое изображение ЦМД в магнитостатической ловушке, создаваемой полем рассеяния пермалловой полоски, намагниченной полем в плоскости

Расположение  $T$ - и  $I$ -образных аппликаций таково, что при повороте направления магнитного поля в плоскости на  $360^\circ$  магнитостатическая ловушка сдвигается на расстояние, равное полному периоду структуры. В качестве примера опять обратимся к рис. 5.4. Если направление поля в плоскости изменяется на обратное, т. е. от направления  $+x$  к направлению  $-x$ , то магнитостатическая ловушка перемещается к другому концу полоски, увлекая за собой ЦМД. Кроме того, движущиеся магнитостатические ловушки можно создавать, распределяя соответствующим образом линейные проводники, по которым пропускается импульсный ток. Такие устройства относятся к классу устройств, которые принято называть «устройствами с выборкой по току».

Пусть магнитостатическая ловушка перемещается со скоростью  $V$ , задаваемой рабочей частотой устройства. До тех пор пока величина действующего на ЦМД градиента поля недостаточна для его перемещения со скоростью  $V$ , ЦМД будет отставать от движения магнитостатической ловушки. Если действующий градиент поля превышает максимальную величину градиента, при которой ловушка еще существует, то ЦМД выскочит из магнитостатической ловушки и произойдет сбой работы устройства.

Если профиль магнитостатической ловушки известен недостаточно хорошо, то весьма трудным представляется определение работы устройства на высоких частотах переменного магнитного поля. Для пермаллоевой аппликации, представляющей собой круглый пермаллоевый диск, профиль магнитостатической ловушки известен достаточно хорошо. На рис. 5.5 показано распределение магнитных зарядов на аппликации, индуцируемых внешним магнитным полем. ЦМД стремится занять положение под краем пермаллового диска, где поле смещения минимально.



**Рис. 5.5.** Схематическое изображение пермаллового диска и ЦМД, находящихся во вращающемся поле в плоскости

В этом случае магнитостатическая ловушка имеет вид длинного желоба, охватывающего край пермаллового диска, причем поле минимально при  $\varphi = 0$ , где  $\varphi$  – угол, характеризующий положение ЦМД и отсчитываемый от точки максимума плотности магнитного заряда. Из условия симметрии распределения магнитных зарядов следует, что результирующее поле смещения в магнитостатической ловушке можно приближенно описать выражением:

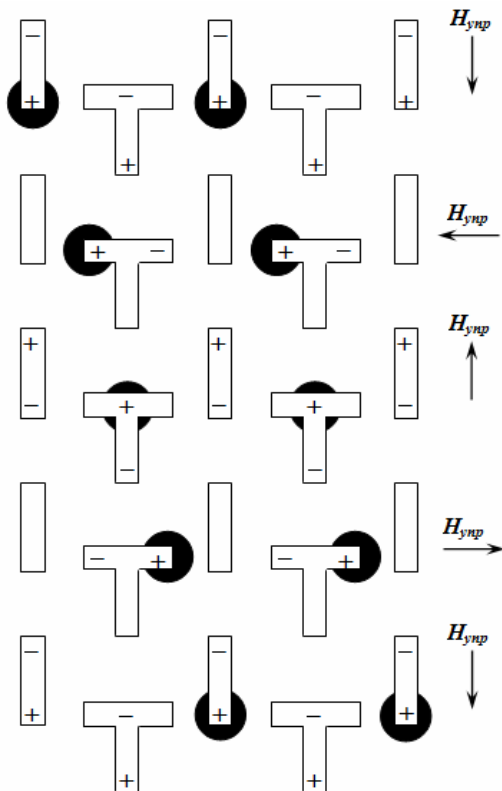
$$H = H_b - H_{pd} \cos \varphi,$$

где  $H_b - H_{pd}$  – поле смещения ЦМД на дне магнитостатической ловушки, а  $H_b$  – поле смещения ЦМД при  $\varphi = \pm 90^\circ$ , которое равно полю смещения ЦМД в отсутствие пермаллового диска. Поле  $H_{pd}$  определяется как разность статических полей коллапса ЦМД в отсутствие пермаллового диска и у дна магнитостатической ловушки.

В самом общем виде схема продвижения ЦМД при помощи пермалловых аппликаций показана на рис. 5.6. Для реализации этого метода на поверхность пластины (подложки) наносят ферромагнитные (обычно пермалловые) аппликации определенной конфигурации, например такой, как показано на рис. 5.6. Посредством системы намагничивающих катушек создают магнитное поле, действующее в плоскости пластины. Направление этого поля можно менять (коммутировать) так, как показано на рис. 5.6 стрелками. Каждому направлению магнитного поля соответствует определенное распределение магнитных полюсов на элементах аппликации (полярность зарядов обозначена знаками «+» и «-»).

Допустим, что цилиндрический магнитный домен имеет полярность «-» и притягивается к магнитному полюсу аппликации со знаком «+». Прикладывая внешнее вращающееся поле, изменяют знаки заряда на пермалловых аппликациях, тем самым заставляя перемещаться домен. Такого рода магнитостатические ловушки имеют в настоящее время наибольшее практическое применение. Для методов управления движением ЦМД, которые описаны выше, характерно то, что ЦМД стремится находиться в таком градиенте полей, который необходим ему для поддержания внешне задаваемой скорости. Характер движения ЦМД можно изменить внешним приложенным градиентом полей, задаваемым *системой токовых проводников*. Такие проводники могут быть или миниатюрными проводами или же их можно нанести фотолитографическим методом и расположить непосредственно на

образце или на стеклянной подложке. Для больших ЦМД, которые возникают, например, в ортоферритах, можно использовать систему линейных проводников тока. В этом случае центральный проводник, узкий по сравнению с ЦМД, создает переменное градиентное поле, а два внешних проводника создают постоянное магнитное поле, которое препятствует боковым смещениям ЦМД.



**Рис. 5.6.** Схема продвижения ЦМД на пермалловых аппликациях

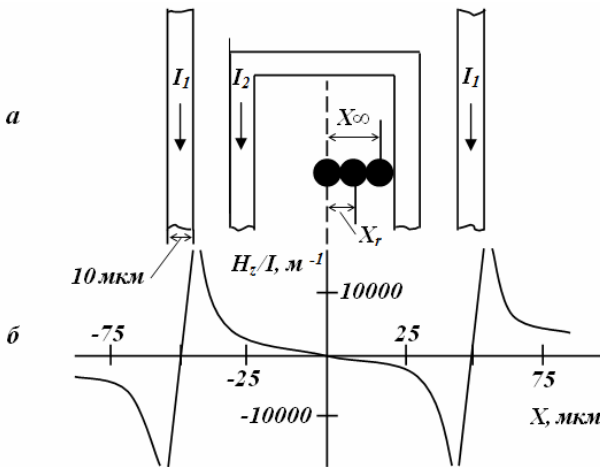
Для ЦМД меньших размеров можно использовать один широкий проводник, под которым находится ЦМД, или же полосковые линейные проводники с определенной конфигурацией. Наиболее широкое распространение получила конфигурация, изображенная на рис. 5.7, а. Рассмотрим вначале действие двух внешних токовых проводников.



Токи величиной  $I$ , протекающие через проводники в одном и том же направлении, создают распределение поля смещения, схематически показанное на рис. 5.7, б. Выражение для градиента магнитного поля в системе СГС в центре конфигурации между полосковыми линейными проводниками имеет вид:

$$|\nabla H_z| \sim (1,6M_s)/d^2,$$

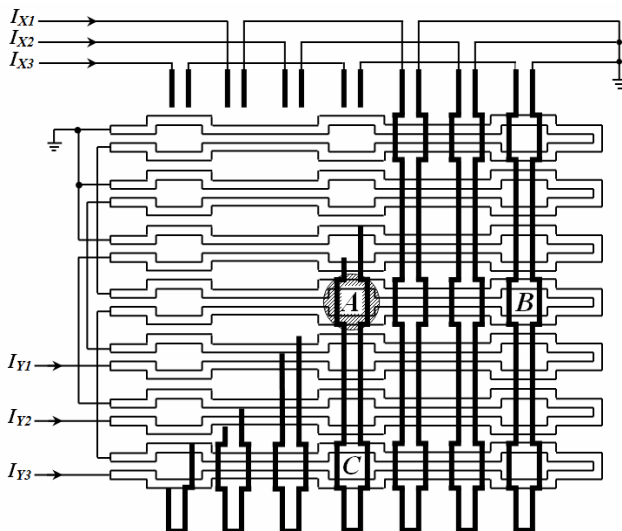
где  $d$  – расстояние между центрами проводников. Если через проводники протекает переменный ток, то градиент магнитного поля будет переменным, и ЦМД будет испытывать колебательное движение. Одним из недостатков такого метода управления движением ЦМД является то, что со временем ЦМД стремится сместиться от центра конфигурации проводников. Токковые магнито-статические ловушки могут создаваться *двухпроводными плоскими продвигающими обмотками (петлями) с током*, накладываемыми на поверхность пластины или подложки (рис. 5.8). Для получения таких схем пользуются методами тонкопленочной технологии.



**Рис. 5.7.** Перемещение ЦМД в градиентном магнитном поле:

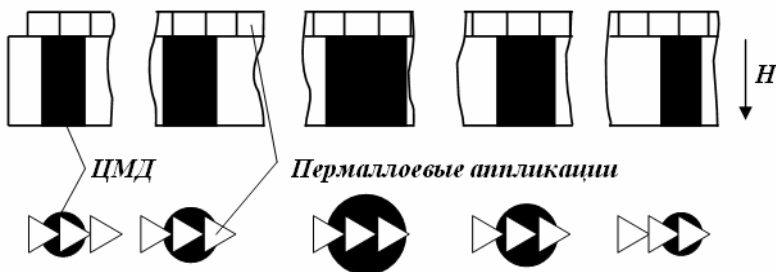
*а* – схематическое изображение структуры полосковых линейных проводников, используемых для перемещения ЦМД в градиентном магнитном поле. Кругжки – положения ЦМД до приложения градиентного магнитного поля, в процессе действия градиента поля и через некоторое время после окончания его действия; *б* – схематическое изображение распределения градиентного магнитного поля, создаваемого импульсами тока, протекающего в одном направлении по двум внешним линейным проводникам

При пропускании по петле тока возникает локальное магнитное поле, которое, взаимодействуя с полем ЦМД, втягивает его под петлю. Для захвата ЦМД необходимо, чтобы локальное магнитное поле частично перекрывало домен. Это требование обуславливает размеры токовых петель. Изображенная на рис. 5.8 схема обеспечивает двухмерное перемещение ЦМД, т. е. путем подачи в соответствующей последовательности импульсов тока в шины можно переместить и зафиксировать ЦМД в любой точке схемы (на рис. 5.8 домен находится в точке *A*).



**Рис. 5.8.** Схема токовых петель для продвижения ЦМД

Еще один способ управления движением ЦМД основан на том, что при модуляции поля, подмагничивающего пластину, ЦМД расширяется при уменьшении поля и сжимается при его увеличении. Если на пластину (подложку) нанесена клиновидная пермаллоевая аппликация (рис. 5.9), то при модуляции поля происходит следующее. Энергетически выгодным является расположение домена на острие клина. При уменьшении подмагничивающего поля  $H$  диаметр ЦМД растет, домен расширяется в сторону следующего пермаллового клина (вправо), пересекает его, и при дальнейшем возрастании  $H$ , сжимаясь, «стекает» на острие пересеченного пермаллового клина.



**Рис. 5.9.** Схема продвижения ЦМД при помощи пермаллоевых аппликаций клиновидной формы

### 5.1.2. Логические устройства на ЦМД

*Логический элемент* представляет собой совокупность управляющих элементов (ферромагнитных аппликаций или токовых шин), расположенных на поверхности магнитоодноосной пленки определенным образом по отношению друг к другу и обеспечивающих реализацию логической функции путем направленного перемещения цилиндрических магнитных доменов и их взаимодействия между собой. Сигналы на информационных входах и выходах логических элементов представлены наличием или отсутствием ЦМД в соответствующие моменты времени. Все доменные логические элементы содержат два или более выходных канала продвижения ЦМД, из которых один является более предпочтительным. ЦМД, поступивший на любой вход логического элемента, в отсутствие других входных сигналов переходит в более предпочтительный выходной канал. При подаче нескольких входных сигналов в результате магнитостатического взаимодействия ЦМД преодолевает некоторый потенциальный барьер и переходит в менее предпочтительный выходной канал. Наличие ЦМД в определенном выходном канале логического элемента в определенный момент времени свидетельствует о выполнении соответствующей логической функции.

Для реализации логических функций используются два типа магнитостатического взаимодействия: между отдельными ЦМД и между ЦМД и магнитным полем токовой шины. В качестве примера на рис. 5.10 представлена структура двухвходового логического элемента «И – ЗАПРЕТ», реализующего функции «И» ( $AB$ ) и «ЗАПРЕТ» ( $\overline{AB}$ ), где выходная перемен-

ная  $A$  представлена наличием или отсутствием ЦМД во входном канале 1-2-3-4-1', а выходная переменная  $B$  – наличием или отсутствием тока в токовой шине.

В отсутствие тока ( $B = 0$ ) ЦМД из позиции 1' входного канала переходит в позицию 2' более предпочтительного верхнего канала 2' -3' -4', т. е. реализуется функция «ЗАПРЕТ» ( $A\bar{B}$ ). При наличии обоих входных сигналов магнитное поле тока в токовой шине компенсирует магнитный полюс в позиции 2' и ЦМД переходит в позицию 2'' нижнего выходного канала 2'' -3'' -4'' -1'', т. е. реализуется функция «И» ( $AB$ ).

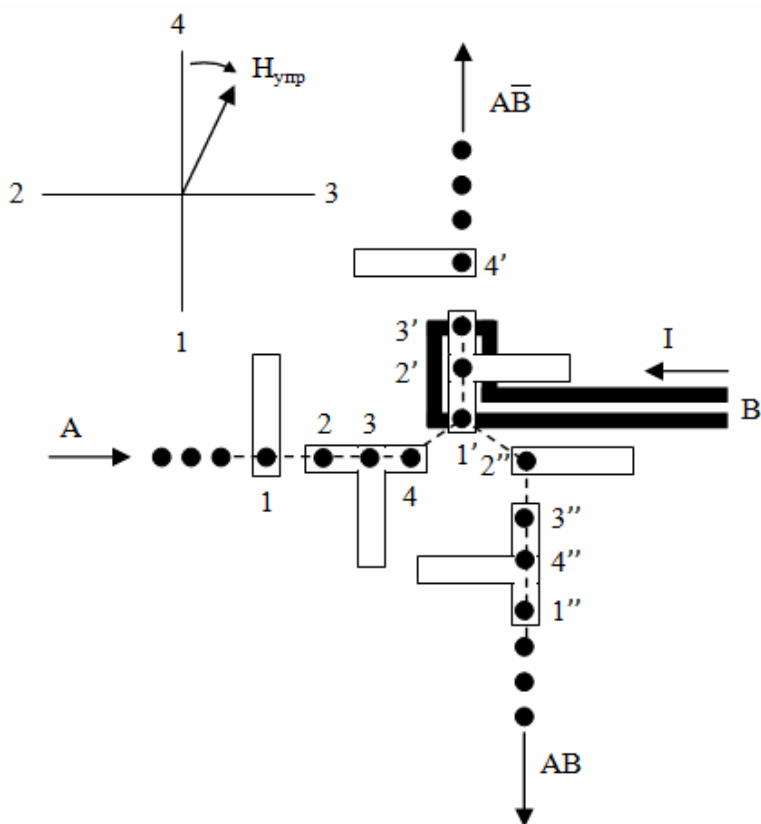


Рис. 5.10. Структура двухвходового логического элемента «И – ЗАПРЕТ»

Взаимодействие между ЦМД и магнитным полем токовой шины используется, главным образом, для построения различных переключательных схем (дешифраторов, перепрограммируемых матриц и др.) с ограниченным числом переменных, представленных токами, так как наличие большого числа токовых шин существенно усложняет структуру ЦМД-микросхем и требует увеличения объема электронных схем управления.

Наличие взаимного магнитостатического отталкивания между ЦМД позволяет строить логические элементы, в которых входные переменные представлены только ЦМД. На рис. 5.11 изображена структура двухвходового элемента «И – ЗАПРЕТ», где входные переменные представлены наличием или отсутствием ЦМД во входных каналах. В отсутствие входной переменной  $B$  поданный на другой вход логического элемента ЦМД (входная переменная  $A$ ) остается в горизонтальном канале продвижения, т. е. реализуется функция  $(AB)$ . При одновременной подаче входных переменных  $A$  и  $B$  ЦМД, находящийся в позиции 4(1)2 верхнего входного канала в результате взаимодействия с ЦМД, находящимся в позициях 4'(1'')2'' нижнего канала, переходит в менее предпочтительную позицию 3' верхнего выходного канала, т. е. реализуется функция  $AB$ .

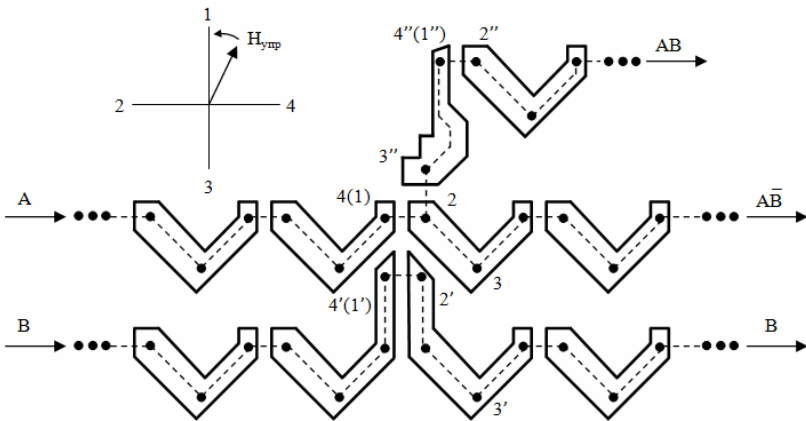


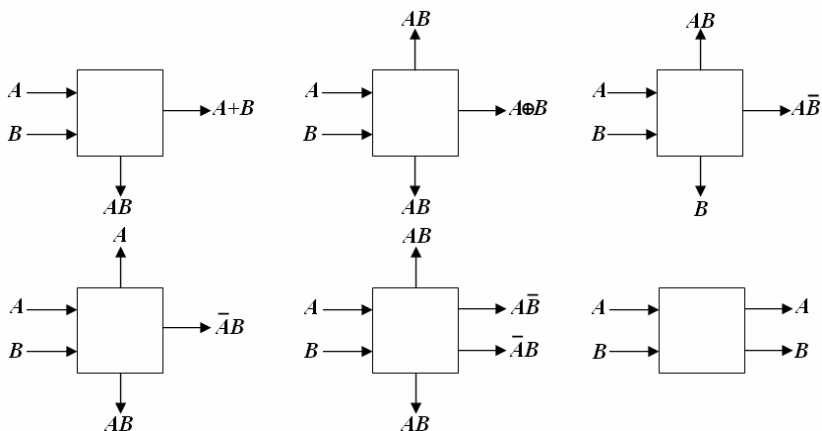
Рис. 5.11. Структура двухвходового элемента «И – ЗАПРЕТ»

Область устойчивой работы по полю смещения элемента «И – ЗАПРЕТ», представленного на рис. 5.11 и выполненного на феррит-гранатовой пленке состава  $Y_{2,6}Sm_{0,4}Ga_{1,2}Fe_{3,8}O_{12}$  с диаметром ЦМД  $d = 4,8$  мкм, составляет 1260 А/м при  $3\ 000\ А/м < H_{зпр} < 5\ 000\ А/м$ . При реализации любой логической функции число ЦМД на входах логического элемента всегда равно числу ЦМД на его выходах после реализации этой функции. Согласно данному условию сохранения числа ЦМД в элементе при кодировании логической единицы наличием ЦМД, а логического нуля – отсутствием ЦМД, двухвходовые логические элементы могут реализовать все булевы функции двух переменных, кроме тех, которые принимают значение единицы при нулевых входных сигналах, т. е. «ПОВТОРЕНИЕ» ( $A, B$ ), «ИЛИ» ( $A+B$ ), «И» ( $AB$ ), «ЗАПРЕТ» ( $\overline{A\overline{B}}, \overline{A\overline{B}}$ ) и «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ» ( $A \oplus B$ ). В соответствии с условием сохранения количества ЦМД в элементе, эти функции образуют шесть разрешенных комбинаций, определяющих шесть возможных вариантов выполнения двухвходовых логических элементов для их реализации (рис. 5.12). Данные элементы, имеющие одну область взаимодействия ЦМД (узел логического взаимодействия), являются одноуровневыми логическими элементами. Реализация логических функций, принимающих значение единицы при нулевых входных сигналах («И – НЕ» ( $\overline{A\overline{B}}$ ), «РАВНОЗНАЧНОСТЬ» ( $A \sim B$ ) и др.), осуществляется с помощью двухуровневых логических элементов, состоящих из одноуровневых логических элементов и генераторов ЦМД, выполняющих функцию «Константа 1» и подключенных к входам логических элементов второго уровня. Одноуровневые логические элементы с генератором ЦМД образуют в различных сочетаниях функционально полные системы логических элементов.

Для удовлетворения критерия функциональной полноты системы логических элементов необходимо и достаточно, чтобы среди функций, реализуемых системой элементов, имелись:

- функция, не сохраняющая ноль
- функция, не сохраняющая единицу
- функция, не являющаяся самодвойственной
- функция, не являющаяся монотонной
- функция, не обладающая свойством линейности

Для построения последовательных схем необходимо и достаточно иметь функционально полную систему логических элементов и хотя бы один *элементарный автомат* с двумя различными состояниями. Такими элементарными автоматами являются *триггеры*.



**Рис. 5.12.** Возможные варианты выполнения двухвходовых логических элементов

Принцип действия триггера на ЦМД, так же как и принцип действия логических элементов, основывается на взаимодействии одиночных ЦМД между собой. На рис. 5.13 приведена структура триггера со счетным входом, функции переходов и выходов которого имеют вид:

$$q(t+1) = \bar{x}(t)q(t) + x(t)\bar{q}(t)$$

$$y(t) = x(t)q(t)$$

где  $x(t)$ ,  $y(t)$  – соответственно сигналы на входе и выходе триггера в момент времени  $t$ ,  $q(t)$  и  $q(t+1)$  – состояния триггера в моменты времени  $t$  и  $t+1$ , соответственно.

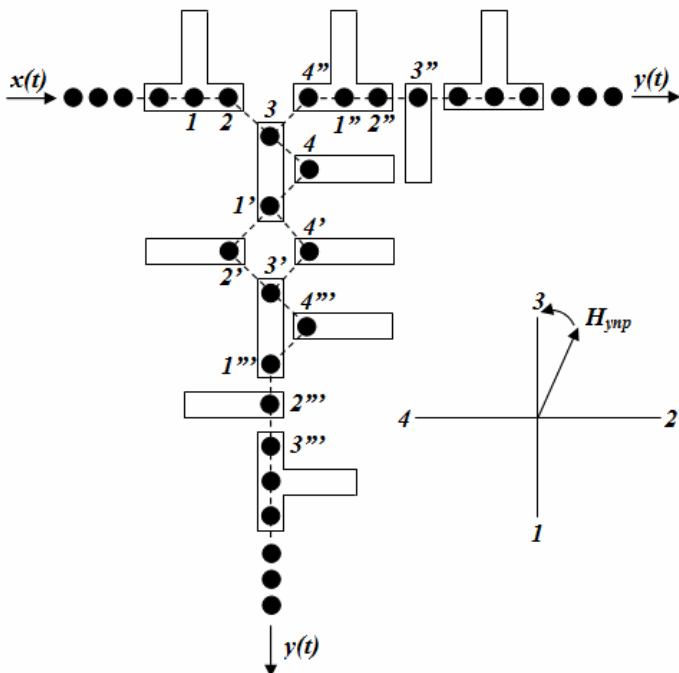


Рис. 5.13. Структура триггера со счетным входом

Основным элементом триггера является динамическая магнитостатическая ловушка, наличие или отсутствие ЦМД в которой определяет единичное или нулевое состояние триггера. Если в магнитостатической ловушке, образованной полюсами  $1' - 2' - 3' - 4'$ , нет ЦМД (т. е.  $q(t) = 0$ ), 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 магнитостатическую ловушку, переводя триггер в единичное состояние ( $q(t+1) = 1$ ). Если в ловушке имеется ЦМД (т. е.  $q(t) = 1$ ), то входной ЦМД за счет взаимодействия с доменом в ловушке из позиции  $3$  переходит в менее предпочтительную позицию  $4''$  верхнего выходного канала  $4'' - 1'' - 2'' - 3''$ , т. е.  $y(t) = 1$ . Одновременно ЦМД, находящийся в ловушке в позиции  $3'$  выталкивается в позицию  $4'''$  нижнего выходного канала  $4''' - 1''' - 2''' - 3'''$ , переводя триггер в состояние  $q(t+1) = 0$ . Область устойчивой работы по полю смещения триггера на ЦМД, выполненного на пленке диспрозиевого ортоферрита, с диаметром ЦМД, равным  $80$  мкм, составляет  $240$  А/м при полях управления  $2\ 000$  А/м  $< H_{ynp} < 4\ 000$  А/м.



### 5.1.3. Считывание информации в материалах с ЦМД

В самом общем виде задача считывания информации в устройствах с ЦМД может быть сформулирована как определение направления намагниченности в заданном объеме материала за заданное время, зависящее от требуемой скорости обработки информации. Считывание информации с магнитного носителя можно осуществлять индукционным методом, с помощью датчиков Холла, магниторезисторов, а также некоторыми другими методами.

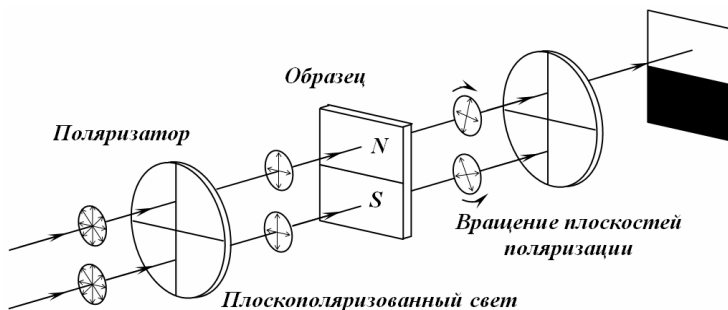
*Индукционный метод*, основанный на законе электромагнитной индукции, дает возможность считывать только движущиеся ЦМД и не позволяет регистрировать присутствие неподвижных или медленнодвигающихся ЦМД. Техническая реализация метода осуществима для частот периодического движения ЦМД выше 1 МГц. Для повышения чувствительности метода на пути перемещения ЦМД наносят токовую петлю, по которой пропускают ток такого направления, что поле, создаваемое им, ослабляет подмагничивающее поле до величины, при которой ЦМД растягивается в полосовой домен. При этом площадь одиночного ЦМД увеличивается в десятки раз, соответственно возрастает и сигнал считывания.

*Метод с использованием датчиков Холла* требует их миниатюризации до размеров ЦМД. При этом датчики Холла должны обладать достаточной механической прочностью, хорошей воспроизводимостью характеристик, высокой температурной стабильностью и т. д. Регистрируемый сигнал, снимаемый с датчика Холла, должен быть порядка 100 мкВ при изменении индукции на величину 5 мТл. Изготовить датчик Холла, удовлетворяющий данным условиям, возможно, но он будет обладать рядом недостатков (наличие четырех выводов, необходимость компенсации неэквипотенциальности и др.). Кроме того, датчики Холла характеризуются большим потреблением энергии, высоким значением собственного магнитного поля и т. п.

*Магниторезисторы* при действии на них магнитного поля изменяют свое электрическое сопротивление. Магниторезисторы, используемые при считывании ЦМД, как правило, представляют собой пермаллоевые аппликации, напыляемые на немагнитную подложку. При прохождении цилиндрического домена под магниторезистором в последнем происходит отклонение намагниченности от оси легкого намагничивания и, как следствие, изменение его электрического сопротивления. Этот способ считыва-

ния в настоящее время представляется наиболее перспективным. Из других методов считывания информации отметим магнитооптические способы с использованием *эффектов Керра и Фарадея*.

*Эффект Фарадея* заключается в следующем. Если поляризованный луч света проходит сквозь намагниченный прозрачный образец (тонкую, толщиной порядка  $10^{-7}$ – $10^{-8}$  м, пластинку), то происходит поворот его плоскости поляризации. Направление вращения плоскости поляризации луча света определяется ориентацией намагниченности образца. Величина угла поворота плоскости поляризации зависит от компоненты намагниченности вдоль направления распространения луча света. На рис. 5.14 представлена схема метода наблюдения магнитных доменов с помощью эффекта Фарадея. В этой схеме анализатор регулируют так, чтобы луч света гасился от системы доменов с заданным направлением намагниченности, которая при этом будет выглядеть темной. При этом другая система доменов, с противоположным направлением намагниченности, будет выглядеть светлой. Устройства для наблюдения доменов на основе эффекта Фарадея особенно пригодны при изучении магнитных пленок ферритгранатов толщиной в несколько миллиметров.



**Рис. 5.14.** Схема метода наблюдения доменов с помощью эффекта Фарадея

*Эффект Керра*, в свою очередь, заключается в повороте плоскости поляризации луча света при его отражении от намагниченного образца.

К преимуществам магнитооптических методов считывания информации относятся их высокая разрешающая способность, позволяющая воспроизводить информацию с плотностью до  $10^8$  бит/см<sup>2</sup>, независимость величины выходного сигнала от ско-

рости перемещения домена; возможность осуществления произвольной выборки; возможность считывания ЦМД со всей пластины и др. Основным недостатком этих методов является их низкая технологичность.

## 5.2. ПЛОСКИЕ МАГНИТНЫЕ ДОМЕНЫ

### 5.2.1. Формирование и продвижение вершук одиночных плоских доменов в узких каналах

Термин «*плоские магнитные домены*» используется для обозначения доменной структуры, возникающей в тонких магнитных пленках с одноосной анизотропией в плоскости образца. В запоминающих устройствах на плоских магнитных доменах (*ПМД-устройствах*) для осуществления направленного движения доменов в высококоэрцитивном слое создаются узкие (2–10 мкм) низкокоэрцитивные каналы. Такие каналы могут быть получены несколькими технологическими приемами, приводящими к росту коэрцитивной силы материала вне каналов: 1 – за счет увеличения шероховатости поверхности магнитной пленки путем ее химического травления; 2 – за счет нанесения второго высококоэрцитивного слоя. Требуемую конфигурацию каналов получают методом фотолитографии.

На низкокоэрцитивную пленку наносится фоторезистор, а затем на него проецируется через шаблон соответствующее изображение. Незасвеченный слой фоторезистора убирается. После этого производится химическое травление не защищенной фоторезистором поверхности с целью увеличения ее шероховатости, либо наносится второй высококоэрцитивный слой (рис. 5.15).

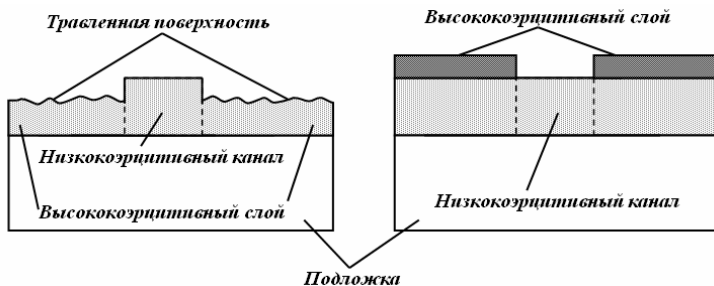
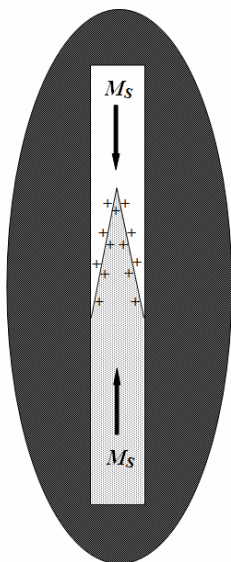


Рис. 5.15. Два способа формирования низкокоэрцитивных каналов:

*a* – методом химического травления поверхности пленки; *b* – нанесением второго высококоэрцитивного слоя

При этом возникают два принципиально разных варианта поведения доменов в низкокоэрцитивных каналах. В протравленных каналах (однослойные магнитные пленки) возрастает устойчивость доменов к самопроизвольному стиранию, но одновременно растет и возможность самопроизвольного зарождения доменов на наклонных к оси легкого намагничивания участках каналов.



**Рис. 5.16.** Плоские магнитные домены, разделенные заряженной доменной границей в низкокоэрцитивном канале

В двухслойных магнитных пленках уменьшается возможность самопроизвольного зарождения доменов, но при этом снижается устойчивость доменов к самопроизвольному стиранию.

Таким образом, метод фотолитографии позволяет получить узкие длинные каналы с низким значением коэрцитивной силы, окруженные магнитной пленкой с высоким значением  $H_c$ . Переход от области с малым значением  $H_c$  к области с высоким значением  $H_c$  происходит постепенно, но в достаточно узкой области. Ширина низкокоэрцитивного канала выбирается настолько малой, что в нем может поместиться только один зубец плоского магнитного домена.

Управление перемещением доменов в низкокоэрцитивном канале может осуществляться с помощью магнитных полей, прикладываемых ко всему образцу одновременно, и с помощью локальных магнитных полей, создаваемых токовыми шинами, расположенными на поверхности пленки. В качестве среды для магнитной записи, как правило, используется сплав Fe-Ni-Co с величиной константы магнитострикции, близкой к нулю, и с коэрцитивной силой 80–160 А/м. Толщина магнитной пленки обычно не превышает 100 нм.

В процессе перемещения магнитного домена по низкокоэрцитивному каналу прилегающие к каналу области высококоэрцитивной матрицы не должны перемагничиваться. В противном случае перемагниченные области становятся источниками зарож-

дения ложной информации. Решение этой задачи является основной проблемой создания запоминающих устройств на плоских магнитных доменах (*ПМД-устройства*), так как верхушки движущихся по низкокоэрцитивному каналу доменов образованы наклонными к оси легкого намагничивания границами (рис. 5.16), на которых имеет место разрыв нормальной составляющей намагниченности к доменной границе (т. е.  $\text{div}\overline{M} \neq 0$ ). Как уже отмечалось выше, такие доменные границы называются *заряженными*. Они являются источниками магнитных полей рассеяния, величина которых вблизи доменных границ очень велика.

### **5.2.2. Запоминающие устройства на плоских магнитных доменах**

В низкокоэрцитивном канале находятся два домена с противоположно ориентированной намагниченностью и с общей доменной границей (рис. 5.16). При воздействии внешнего магнитного поля коэрцитивная сила смещения и скорость движения доменных границ будут зависеть от направления приложенного магнитного поля. В низкокоэрцитивных каналах этот эффект усиливается выбором определенного угла наклона низкокоэрцитивных каналов к оси легкого намагничивания.

Исходным для всех каналов регистра является состояние насыщения в направлении, совпадающем с направлением намагниченности высококоэрцитивного слоя. Такое состояние каналов может быть получено при приложении магнитного поля  $H_1$ , параллельного оси легкого намагничивания. Для обеспечения начала работы регистра необходимо ввести в него единицу информации. Это обычно осуществляется пропусканием импульса тока через проводник записи. Магнитное поле, возникающее в месте пересечения низкокоэрцитивного канала и записывающего проводника, вызывает появление в канале домена обратной намагниченности (рис. 5.17, *а*). Коэрцитивная сила смещения доменных границ в наклонных участках каналов зависит от направления магнитного поля. Поэтому можно подобрать такую величину и ориентацию поля  $H_1$ , что домен будет продвигаться в нужном направлении (рис. 5.17, *б*). После этого прикладывается поле стирания доменов  $H_1$  (рис. 5.17, *в*) и одновременно локальное поле удержания  $H_2$ . В результате плоский магнитный домен перемещается в новое положение.

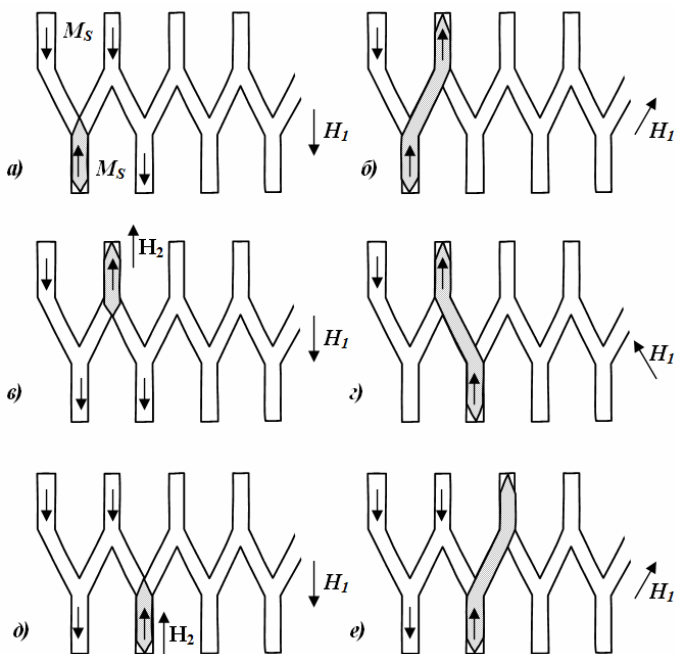


Рис. 5.17. Схема продвижения верхушек доменов по каналам регистра

Достоинствами запоминающих устройств на плоских магнитных доменах является относительная простота технологии их изготовления, дешевизна применяемых материалов, а также устойчивость к радиации.

Существенным недостатком является то, что плотность записи на ПМД-устройствах примерно на порядок ниже, чем у ЦМД-устройств. Причиной этого является то, что, во-первых, коэрцитивная сила смещения доменных границ резко возрастает с уменьшением ширины низкокоэрцитивных каналов. Это приводит к необходимости увеличения токов управления и, как следствие, к необходимости создания условий для отвода выделяющегося тепла. Во-вторых, остроконечные вершины плоских магнитных доменов являются источником магнитных полей рассеяния. Близко расположенные друг от друга вершины доменов начинают взаимодействовать друг с другом, затрудняя продвижение ПМД.

Вместе с тем механизм взаимодействия плоских магнитных доменов между собой лег в основу создания разнообразных логических элементов, реализуемых на плоских магнитных доменах.

### **5.2.3. Логические элементы на плоских магнитных доменах**

Наряду с использованием тонких магнитных пленок с плоскими магнитными доменами в запоминающих устройствах имеется возможность построения на их основе логических схем, действие которых основано на взаимодействии плоских магнитных доменов друг с другом посредством полей рассеяния.

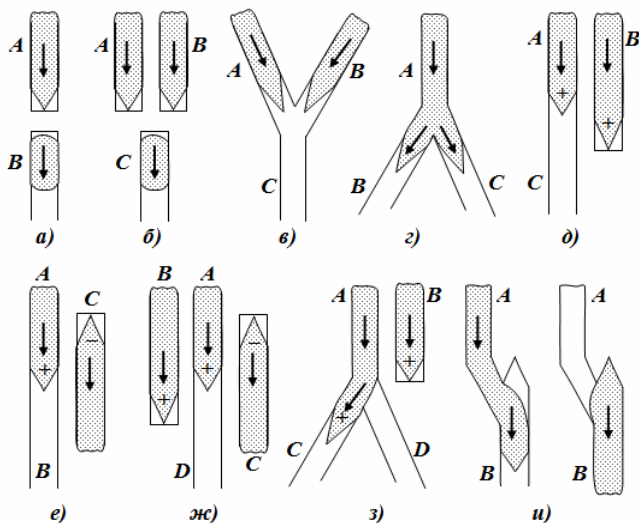
Заряженные границы доменов создают поля рассеяния, взаимодействие которых подобно полюсам магнита: разноименно заряженные притягиваются, а одноименно заряженные – отталкиваются. Поэтому поля рассеяния от доменной границы в одном низкокоэрцитивном канале могут вызывать зарождение домена в другом низкокоэрцитивном канале.

На рис. 5.18 показано несколько вариантов элементарных логических схем на плоских магнитных доменах.

Выполнение логических схем на плоских магнитных доменах базируется на различных вариантах схем объединения, разветвления и взаимодействия низкокоэрцитивных каналов. Так, на рис. 5.18, *a* показана реализация логической операции  $B = A$ , которая осуществляется за счет взаимодействия двух близко расположенных узких каналов. Работа такого устройства основана на эффекте зарождения домена обратной намагниченности при воздействии полей рассеяния верхушки домена в соседнем узком канале. Магнитный заряд, расположенный на верхушке ПМД, создает в соседнем низкокоэрцитивном канале наведенное магнитное поле, под воздействием которого происходит формирование домена обратной намагниченности. Геометрия каналов, расстояние между ними, а также величина энергии магнитного заряда должны обеспечивать необходимые условия формирования нового домена. Приближенно условие зарождения домена в канале *B* можно определить из выражения:

$$2M_s db / r^2 \propto H_K, \quad (5.7)$$

где  $d$  – толщина пленки в низкоээрцитивном канале,  $b$  – ширина низкоээрцитивного канала,  $r$  – расстояние между низкоээрцитивными каналами,  $H_k$  – поле одноосной анизотропии магнитной пленки в низкоээрцитивном канале.



**Рис. 5.18.** Варианты логических схем на плоских магнитных доменах:

*a* – зарождение домена *B* под действием домена *A* в соседнем канале; *б* – зарождение нового домена под действием двух доменов одного знака; *в* – объединение двух каналов; *з* – разветвление каналов; *д* – запрет продвижения в канале *AC*; *е* – схема запрета с использованием вершусек доменов с противоположной полярностью; *ж* – схема объединения двух запретов; *з* – схема запрета движения домена по каналу *D* и разрешения движения по каналу *C*; *и* – магнитный аналог электронного диода

Используя принцип работы устройства, приведенного на рис. 5.18, *a*, можно реализовать логическую операцию «И»:  $C = AB$  (рис. 5.18, *б*). Два низкоээрцитивных канала входных переменных, расположенные параллельно, воздействуют на выходной узкий канал, который расположен по отношению к ним в продольном направлении. Геометрия устройства и плотность магнитного заряда границы каждого домена во входных каналах выбраны таким образом, чтобы домен в выходном канале мог бы сформироваться только при суммарном воздействии зарядов двух других плоских магнитных доменов. В свою очередь, геометрия вы-



ходного канала выбрана из условия, что если домен есть только в одном входном канале, в выходном канале ПМД не формируется.

На рис. 5.18, *в* показана логическая схема объединения (два входных канала объединяются в один выходной). При такой конфигурации каналов домен из любого входного канала может пройти непосредственно в выходной канал, что позволяет реализовать логическую операцию «ИЛИ» ( $C = A+B$ ). Подобная же конфигурация каналов позволяет реализовать и логическую операцию разветвления (рис. 5.18, *з*), которая обеспечивает возможность перемещения домена из одного входного канала в любой выходной канал.

Следующая серия логических устройств, приведенных на рис. 5.18, дает возможность реализовать логические операции «ЗАПРЕТ». Для этого используется взаимодействие верхушек доменов в соседних каналах. Так, расположение узких каналов на рис. 5.18, *д* позволяет с помощью канала *B* осуществить запрет продвижения домена в канале *AC*. При этом используется эффект взаимного отталкивания верхушек доменов, имеющих одинаковую полярность магнитного заряда. Такая конфигурация реализует логическую функцию  $C = A\bar{B}$ .

Вариант реализации операции «ЗАПРЕТ» с использованием верхушек ПМД с противоположной полярностью показан на рис. 5.18, *е*, а схема объединения двух операций «ЗАПРЕТ» – на рис. 5.18, *ж*. Взаимное отталкивание верхушек доменов можно использовать также для управления направлением движения плоских магнитных доменов. Один из вариантов решения этой задачи показан на рис. 5.18, *з*. При наличии верхушки домена в канале *B* не происходит движения домена по каналу *D* и разрешено перемещение домена по каналу *C*, что обеспечивает выполнение логической функции  $C = A, D = A\bar{B}$ .

На рис. 5.18, *и* показана конфигурация канала, позволяющая осуществить эквивалент электронного диода. Такая конфигурация канала не допускает обратного перемещения информации по каналу в некотором диапазоне управляющих магнитных полей. Перемещение домена из канала *A* в канал *B* происходит за счет перемещения остроконечной вершины домена, не встречающей препятствия на своем пути. Проникновение домена из канала *B* в канал *A* происходит в результате натяжения и разрыва боковой доменной границы. Физические механизмы этих процессов раз-

личны, что приводит к разной величине магнитных полей их осуществления.

В заключение отметим также, что в настоящее время помимо рассмотренных методов построения логических элементов существуют и другие эффективные методы их реализации, основанные на применении двухслойных магнитных пленок, разделенных между собой слоем диэлектрика толщиной в несколько микрон.

#### 5.2.4. Наблюдение и регистрация плоских магнитных доменов

Как правило, плоские магнитные домены в низкокоэрцитивных каналах формируются в непрозрачных для видимого света железоникелевых пленках, и поэтому для их наблюдения обычно используется эффект Керра.

Установка для наблюдения доменов при помощи эффекта Керра показана на рис. 5.19. Луч света от источника 1, проходя через поляризатор 2 под некоторым углом, падает на магнитную поверхность 3. В свою очередь, отраженный луч света, пройдя через анализатор 4, поступает в приемник света 5.

Контрастность визуального изображения ПМД будет тем больше, чем больше угол поворота плоскости поляризации луча света, отраженного от поверхности магнитной пленки.

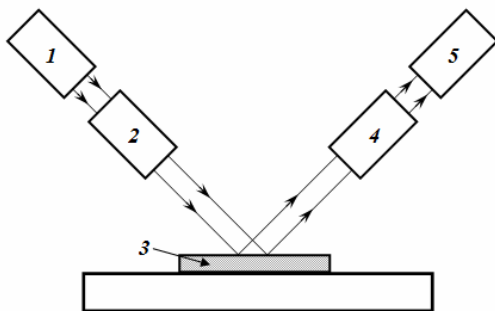


Рис. 5.19. Установка для наблюдения полосковых доменов с помощью эффекта Керра

Для железоникелевых магнитных пленок, часто используемых для создания ПМД-устройств, угол поворота плоскости поляризации луча света, отраженного от магнитной пленки, состав-

ляет десятки угловых секунд. Поэтому контрастность визуального изображения доменов будет низкой. Значительное увеличение контрастности можно достичь при нанесении на поверхность Fe-Ni магнитной пленки диэлектрического покрытия специального состава (например, Zn-S) и определенной толщины.

Используя стробоскопические устройства, с помощью эффекта Керра можно визуально наблюдать не только статическое состояние доменов, но и динамику их перемещения. При желании произвести регистрацию домена с помощью электрических сигналов, необходимо использовать приемник света, способный преобразовать световую энергию в электрическую. В качестве таких преобразователей, как правило, используют фотоумножители. При этом устройство для регистрации доменов получается достаточно сложным и громоздким. Кроме того, необходима точная фиксация оптической системы относительно регистрируемого домена.

Значительно менее сложным представляется использование индукционного метода считывания информации. Как уже отмечалось выше, в наиболее простом варианте конструктивное воплощение этого метода реализуется в виде петли проводника, наносимой в нужном месте канала распространения домена. Обычно такая петля выполняется методом фототравления или вакуумного напыления. По существу, такой вид регистрации ПМД основывается на законе электромагнитной индукции:

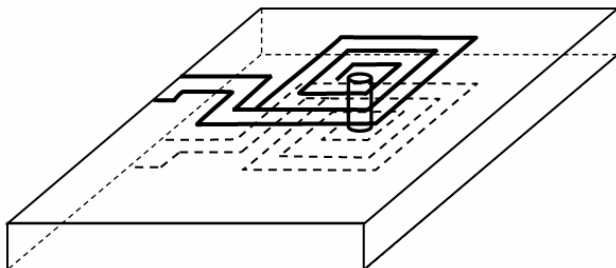
$$\varepsilon = -nS \frac{d\Phi}{dt} \quad (5.8)$$

Выходной сигнал в виде импульса напряжения, величина которого определяется соотношением (5.8), возникает на концах петли проводника в момент прохождения границы домена под петлей или вблизи нее.

В практических схемах индукционного считывания выходных сигналов с НМД уровень напряжения соответствует 50–100 мкВ на одно пересечение петли считывания и канала. Такой малый выходной сигнал является основным недостатком считывания индукционным методом.

Использование разветвленных каналов и многовитковых плоских катушек может значительно увеличить амплитуду выходного сигнала, но только при увеличении размера и уменьшении скорости работы устройства. Наиболее эффективна, с точки зрения повышения уровня выходного сигнала, конструкция счи-

тывающего устройства, показанная на рис. 5.20, которая выполнена в виде двух размещенных в разных слоях пленки плоских катушек, соединенных друг с другом с помощью центрального контакта. По современной технологии сквозное отверстие для связи катушек обычно выполняется методом фототравления.



**Рис. 5.20.** Двухсторонняя катушка индуктивности, используемая при индуктивном считывании

Индукционные устройства считывания позволяют также регистрировать состояние неподвижного плоского магнитного домена методом неразрушающего считывания. Это обеспечивается возбуждением тонкой магнитной пленки переменным магнитным полем высокой частоты вдоль оси трудного намагничивания. В результате действия переменного магнитного поля в доменах осуществляется процесс вращения намагниченности. После снятия возбуждающего магнитного поля намагниченность возвращается в исходное состояние. В свою очередь, поворот вектора намагниченности домена вызывает появление сигнала в выходной петле.

Для регистрации магнитного состояния ПМД используют также гальваномагнитные эффекты, которые позволяют получить выходной сигнал амплитудой до нескольких милливольт. Для получения больших выходных сигналов требуется близкая к  $90^\circ$  разность углов между начальным и конечным состояниями намагниченности в выходном канале. Эта разность является результатом анизотропии формы низкокоэрцитивного канала, и, следовательно, ею можно управлять, варьируя ширину и ориентацию канала относительно оси легкого намагничивания магнитной пленки.

Из целого ряда гальваномагнитных эффектов для регистрации ПМД наиболее удобно использовать *эффект Холла* и *магниторезистивный эффект*. Данные эффекты рассмотрены в следующей главе.

## 6. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

*Преобразователь магнитного поля* (ПМП) является основным элементом любого изделия микромагнитоэлектроники. ПМП преобразует магнитный поток в электрический сигнал. Преобразователь магнитного поля представляет собой магниточувствительный элемент (МЧЭ), размещенный на подложке-держателе и снабженный выводами, необходимыми для соединения с электронной схемой усиления и обработки сигнала.

Магниточувствительный элемент изготавливается из материала, изменяющего свои свойства при воздействии внешнего магнитного поля. При создании магниточувствительных элементов используются различные физические явления, происходящие в полупроводниках и металлах при взаимодействии их с магнитным полем (МП).

Наиболее известны МЧЭ, использующие эффекты Холла и Гаусса, магнитосопротивления, эффект Суля, а также магнитодиодный и магнитогальванорекомбинационный эффекты и др. Наибольшим спросом пользуются МЧЭ, реализованные в виде элементов Холла, магниторезисторов, магнитодиодов и магнитотранзисторов. Каждый из перечисленных магниточувствительных элементов имеет определенный набор параметров и характеристик, преимуществ и особенностей, которые должны учитываться при проектировании как преобразователей магнитного поля, так и аппаратуры.

Основным критерием, характеризующим преобразователь магнитного поля, является его выходная характеристика, определяющая зависимость выходного сигнала ПМП от величины индукции воздействующего магнитного поля.

В данной главе мы будем рассматривать наиболее распространенные типы преобразователей магнитного поля, используемые в изделиях микромагнитоэлектроники, такие как:

- 1) элементы Холла;
- 2) магниторезисторы;
- 3) магнитодиоды;
- 4) датчики Виганда;
- 5) микроминиатюрные феррозонды.

### 6.1. ЭЛЕМЕНТЫ ХОЛЛА

Эффект Холла заключается в возникновении разности потенциалов между противоположными гранями проводящей пластины при протекании электрического тока через две другие ее грани, при одновременном действии магнитного поля перпендикулярно плоскости пластины. На этом эффекте построен датчик Холла (рис. 6.1). Элемент Холла представляет собой пластину из полупроводникового материала толщиной  $d$ , по четырем сторонам которой расположены контакты. Контакты 1 и 2 ( $i_1$ ) называются *токовыми*, а контакты 3 и 4 ( $U$ ) – *выходными* или *измерительными* (иногда эти контакты называют *холловскими*).

Сущность эффекта Холла заключается в том, что в проводнике с током плотностью  $j$ , помещенным в магнитное поле  $B$ , возникает электрическое поле в направлении, перпендикулярном  $j$  и  $B$ :

$$E_H = R_h [B j] \quad (6.1)$$

$R_h$  называется постоянной Холла и служит основной характеристикой эффекта. Эффект был открыт Э. Г. Холлом в 1879 г. в тонких пластинках золота и является одним из наиболее важных гальваномагнитных явлений.

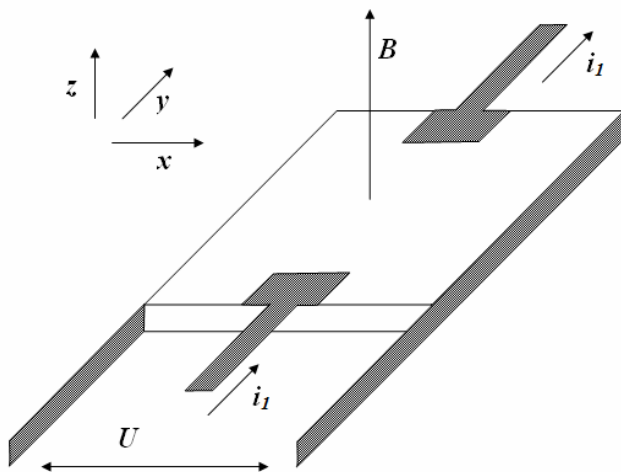


Рис. 6.1. Датчик Холла

Соотношение (6.1) описывает эффект Холла в изотропном (например, поликристаллическом) проводнике в слабом магнитном поле. Для наблюдения эффекта прямоугольные пластины из исследуемого вещества с длиной значительно больше ширины  $b$  и толщины  $d$ , вдоль которых течет ток  $i_1 = jbd$ , помещают в магнитное поле  $H$ , перпендикулярное плоскости пластинки. На середине боковых граней перпендикулярно току расположены электроды, между которыми измеряется ЭДС Холла.

Эффект Холла объясняется взаимодействием носителей заряда (электронов проводимости и дырок) с магнитным полем. В магнитном поле на заряженные частицы действует сила Лоренца:  $F = e[B \nu]$ , где  $\nu = j/en$  – средняя скорость направленного движения носителей в электрическом поле,  $n$  – концентрация носителей,  $e$  – их заряд. Под действием этой силы частицы отклоняются в направлении, перпендикулярном  $B$  и  $j$ . В результате на боковой грани пластины происходит накопление зарядов и возникает электрическое поле Холла  $E_h$ , которое, в свою очередь, действуя на заряды, уравнивает силу Лоренца. При равновесии  $eE_h = eB\nu$ , откуда:

$$R_h = 1/en \quad (6.2)$$

Отметим, что в формулу не входят никакие другие характеристики электрона, например, его масса, или какие-нибудь другие свойства материала – только электронная плотность. Самое замечательное – это то, что  $R_h$  не зависит от формы образца. То есть даже некоторое количество дырок, просверленных в образце, не изменит результат. Если электрические контакты не нарушены, то перфорированная металлическая пластина имеет такое же холловское сопротивление, что и целая пластина.

ЭДС Холла проводящей пластины можно определить в виде:

$$\varepsilon = E_h b = \frac{1}{ne} B j b = \frac{1}{ne} \frac{iB}{d} = \frac{R_h}{d} i B, \quad (6.3)$$

где  $i$  – величина электрического тока,  $n$  – концентрация носителей заряда;  $d$  – толщина пластины;  $R_h$  – постоянная Холла. Знак  $R_h$  совпадает со знаком носителей заряда. Для металлов, у которых  $n \sim 10^{22} \text{ см}^{-3}$ ,  $R_h \sim 10^{-3} \text{ см}^3/\text{Кл}$ ; у полупроводников  $R_h \sim 10^5 \text{ см}^3/\text{Кл}$ .

Соотношение (6.1) показывает, что ЭДС Холла пропорциональна произведению значений протекающего тока  $i$  и магнитной

индукции  $B$ . Для анизотропных кристаллов  $R_h = r/en$ , где  $r$  – величина, близкая к единице, зависящая от направления магнитного поля относительно кристаллографических осей. В области сильных магнитных полей  $r = 1$ .

Так как в полупроводниках в электропроводности участвуют одновременно электроны проводимости и дырки, то постоянная Холла выражается через парциальные проводимости электронов  $\sigma_e$  и дырок  $\sigma_d$  и их концентрации  $n_e$  и  $n_d$ .

Для слабых полей:

$$R_h = \frac{\sigma_e^2 / n_e + \sigma_d^2 / n_d}{e(\sigma_e + \sigma_d)^2} \quad (6.4)$$

Для сильных полей:

$$R_h = \frac{1}{e(n_e + n_d)} \quad (6.5)$$

Критерием сильного поля является:  $\omega_c \tau \ll 1$ , где  $\omega_c = eB/m$  – циклотронная частота. При  $n_e = n_d$  для всех значений  $B$ :

$$R_h = \frac{\sigma_e - \sigma_d}{en(\sigma_e + \sigma_d)} \quad (6.6)$$

Знак  $R_h$  соответствует основным носителям.

Для металлов величина  $R_h$  зависит от зонной структуры (формы Ферми-поверхности). Для замкнутых поверхностей Ферми и в сильных магнитных полях постоянная Холла изотропна, а выражение для  $R_h$  совпадает с ранее полученным:  $R = 1/en$ . Для открытых поверхностей Ферми  $R_h$  представляет собой тензор. Однако если направление магнитного поля относительно кристаллографических осей выбрано так, что не возникает открытых сечений поверхности Ферми, то выражение для  $R_h$  также совпадает с соотношением (6.2).

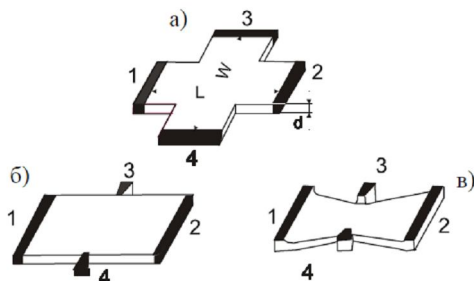
В ферромагнетиках электроны подвергаются совместному действию внешнего магнитного поля и магнитного поля доменов. Это приводит к особому ферромагнитному эффекту Холла. Экспериментально найдено, что  $E_h = (R_h B + R_h^1 M)j$ , где  $R_h$  – обыкновенная, а  $R_h^1$  – аномальная постоянная Холла,  $M$  – величина намагниченности.



В связи с тем, что у полупроводниковых материалов подвижность носителей заряда очень высока, постоянная Холла для них также велика, что и обеспечивает высокий уровень ЭДС Холла. Таким образом, при использовании датчиков Холла для регистрации магнитного состояния ПМД необходимо выбирать тонкую пластину из материала с большим значением постоянной Холла.

Магнитная чувствительность элемента Холла является функцией угла  $\alpha$  между вектором напряженности электрического ( $H$ ) и магнитного полей ( $B$ ) и достигает максимума при угле  $\alpha$ , равном  $90^\circ$ . При использовании концентраторов и других элементов магнитных систем зависимость может быть иной.

Для изготовления магниточувствительных элементов Холла наиболее широко используются: кремний (Si), германий (Ge), арсенид индия (InAs), антимонид индия (InSb), арсенид галлия (GaAs), т. е. полупроводниковые материалы, обладающие высокой подвижностью носителей заряда и наивысшим значением коэффициента Холла. Известно также применение для этих целей пластин и тонких пленок из селенистой ртути (HgSe) и теллуристой ртути (HgTe), а также висмута (Bi). В последние годы некоторые фирмы ведут работы по использованию тройных соединений типа «кадмий – ртуть – теллур» ( $Cd_x Hg_{x-1}Te$ ). Элементы Холла на основе указанных соединений работают в интервале от комнатных до гелиевых температур. Конструктивное оформление элемента Холла зависит от используемого исходного полупроводникового материала и от технологии изготовления. Магниточувствительный элемент преобразователя Холла может быть изготовлен с использованием любой современной технологии микроэлектроники: полупроводниковой биполярной и эппланарной, пленочной, МОП, КНС, КНИ и др. Наибольшее распространение получили *кристаллические* и *пленочные* МЧЭ. На рис. 6.2 показаны классические варианты топологии элементов Холла.



**Рис. 6.2.** Классическая топология дискретных «кристаллических» чувствительных элементов: а – «крест»; б – «прямоугольник»; в – «бабочка»

### 6.1.1. Погрешности преобразователей Холла

**Погрешность нуля**, обусловленная дрейфом остаточного напряжения, является одной из наиболее трудно устранимых составляющих погрешности преобразователей Холла. Дрейф главным образом связан с колебаниями температуры преобразователя и наличием градиента температур между его электродами. Одной из причин возникновения градиента температур является эффект Пельтье, который имеет место при питании преобразователя постоянным током.

Погрешность нуля является основной характеристикой, определяющей применимость преобразователей Холла для измерения слабых магнитных полей.

Погрешность линейности у различных типов преобразователей при изменении магнитной индукции от 0 до 10 Тл составляет 1–10 %. Хорошей линейностью характеристик отличаются преобразователи Холла из антимонида индия, у которых погрешность линейности составляет 0,1–1 % в диапазоне  $B = 0–2$  Тл и 1 % при  $B = 0,1–10$  Тл. Малую погрешность линейности (0,2 %) при магнитной индукции до 1 Тл имеют преобразователи из арсенида-фосфида индия (InAsP).

**Погрешность от собственного магнитного поля преобразователя.** При прохождении через преобразователь тока возникает магнитное поле. Если это поле асимметрично, то интегральное по площади пластины значение индукции не будет равно нулю, а составит некоторую величину  $B_{ac}$ . Асимметрия поля может иметь место, если обратный провод токового вывода расположен вблизи преобразователя и асимметрично по отношению к нему. Возникающая в результате взаимодействия индукции  $B_{ac}$  и тока  $I$  дополнительная ЭДС Холла пропорциональна квадрату тока  $I$ . Если преобразователь находится на значительном расстоянии от ферромагнитных деталей, то магнитная индукция собственного поля преобразователя обычно не превышает  $10^{-6}–10^{-4}$  Тл. При нахождении преобразователя вблизи полюсных наконечников индукция этого поля может достигать  $5 \cdot 10^{-4}–10^{-3}$  Тл, что приводит к существенной погрешности. Основной путь уменьшения влияния собственного магнитного поля – правильный монтаж преобразователя.

**Погрешность направленности** обусловлена зависимостью выходного сигнала преобразователя Холла от его пространственного расположения по отношению к вектору магнитной индукции. Напряжение Холла имеет максимальное значение, когда

вектор магнитной индукции направлен параллельно магнитной оси преобразователя, указывающей направление наибольшей чувствительности. В идеальном случае магнитная ось совпадает с нормалью к плоскости преобразователя.

Вопросы стабильности преобразователей Холла еще недостаточно изучены. По имеющимся данным, нестабильность чувствительности у некоторых типов преобразователей составляет 0,1–1 % в год. Существенное влияние на стабильность могут оказать механические напряжения, возникающие в процессе изготовления преобразователя и при его монтаже в датчике, а также температурные деформации. Преобразователи без подложки более стабильны, чем наклеенные на подложку.

**Температурная погрешность** преобразователей Холла обусловлена зависимостью от температуры постоянной Холла, сопротивления преобразователя и остаточного напряжения. Температурный коэффициент чувствительности у лучших типов преобразователей составляет  $(5-10) \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ . Малые значения температурной погрешности характерны для преобразователей на основе гетероэпитаксиальных структур InSb тройного соединения  $\text{InAs}_{0,8}\text{P}_{0,2}$  ( $\gamma_{\Theta} \leq 0,0003 \text{ K}^{-1}$ ), из арсенида галлия ( $\gamma_{\Theta} \leq 0,0006 \text{ K}^{-1}$  в диапазонах температур 20–300 °C), а также для некоторых типов преобразователей из германия ( $\gamma_{\Theta} \leq 0,0003 \text{ K}^{-1}$ ), предназначенных для работы в относительно узком диапазоне температур.

Если температурные коэффициенты постоянной Холла и сопротивления имеют одинаковые знаки и близки по значению, коррекцию температурной погрешности можно осуществить при питании преобразователя от источника стабильного напряжения. Такой режим питания целесообразно применять для преобразователей Холла из антимонида индия. Уменьшение температурной погрешности достигается также при применении схем коррекции с использованием терморезисторов. Однако, поскольку напряжение Холла сложным образом зависит от ряда температурно-зависимых параметров, осуществить точную коррекцию температурной погрешности практически невозможно, особенно для широкого диапазона рабочих температур.

### 6.1.2. Применение элементов Холла

Датчики Холла представляют собой тонкую прямоугольную пластинку (площадью несколько мм<sup>2</sup>) или пленку, изготовленную из полупроводника (Si, Ge, InSb, InAs). Датчик имеет 4 электрода для подвода тока и съема ЭДС Холла. Чтобы избежать механических повреждений, пластинку монтируют (а пленку напыляют в вакууме) на прочной подложке из диэлектрика (керамики). Для получения наибольшего эффекта толщина пластинки (пленки) делается возможно меньшей. Датчики Холла применяют для бесконтактного измерения магнитных полей – от 10<sup>-6</sup> до 10<sup>5</sup> Э. При измерении слабых магнитных полей датчики Холла монтируются в зазоре ферро- или ферромагнитного стержня (концентратора), что позволяет значительно повысить чувствительность датчика. Так как в полупроводниках концентрация носителей зарядов, а, следовательно, и постоянная Холла, зависит от температуры, датчики для прецизионных измерений необходимо термостабилизировать, либо применять сильно легированные полупроводники (последнее снижает чувствительность датчика).

При помощи датчиков Холла можно измерять любую физическую величину, которая связана с магнитным полем, в частности, силу тока. На основе датчиков Холла созданы бесконтактные амперметры на токи до 100 кА. Датчики Холла применяют также в аналоговых перемножающих устройствах. При этом токи, пропорциональные перемножаемым величинам, используются один для питания датчика, другой для создания магнитного поля, а ЭДС Холла пропорциональна произведению этих величин. Кроме того, датчики Холла применяют в измерителях линейных и угловых перемещений, а также в измерителях градиента магнитного поля, магнитного потока и мощности электрических машин, в бесконтактных преобразователях постоянного тока в переменный и, наконец, в воспроизводящих головках систем записи на магнитных носителях.

Применение датчиков на основе эффекта Холла включает в себя выбор магнитной системы и сенсора Холла с соответствующими рабочими характеристиками. Эти два компонента объединяются в единую систему, которая будет удовлетворять данному конкретному применению. Разработано большое количество различных устройств, которые объединяют сенсор и магнитную систему в едином корпусе. Поскольку характеристики такого устройства predetermined, то его применение не требует разработ-

ки магнита или сенсора, а состоит в электрическом или механическом сопряжении устройства.

Современная групповая технология ИС позволяет выпускать интегральные преобразователи магнитного поля на основе элементов Холла, которые могут группироваться в линейные и в матричные магниточувствительные структуры с различным способом их организации. Основное назначение таких приборов – это использование их в системах визуализации магнитного поля.

## 6.2. МАГНИТОРЕЗИСТОРЫ

Как отмечалось в главе 3, *магниторезистивный эффект* проявляется при помещении проводника в магнитное поле и заключается в изменении его электрического сопротивления в результате действия магнитного поля. Изменение электрического сопротивления проводящей пластины, помещенной в магнитное поле, происходит за счет удлинения пути, проходимого электронами, по сравнению с путем, проходимым ими при отсутствии магнитного поля. Удлинение пути электронов вызвано действием силы Лоренца. Зависимость изменения удельного сопротивления полупроводника от индукции магнитного поля определяется выражением

$$(\rho_B - \rho_0)/\rho_0 = K_p (\mu B)^2, \quad (6.7)$$

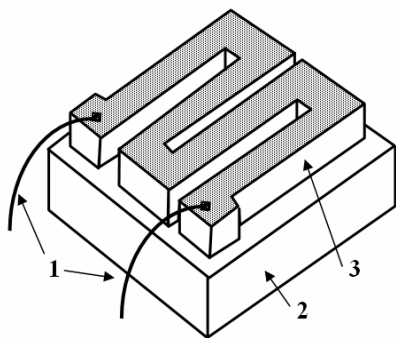
где  $\rho_B$  и  $\rho_0$  – удельные электрические сопротивления проводящей пластины при отсутствии магнитного поля и в магнитном поле с индукцией  $B$ , соответственно;  $K_p$  – коэффициент, зависящий от свойств полупроводника.

*Магниторезисторы* – это электронные компоненты, действие которых основано на изменении электрического сопротивления полупроводника (или металла) при воздействии на него магнитного поля. Механизм изменения сопротивления довольно сложен, так как является результатом одновременного действия большого числа разнообразных факторов. К тому же он не одинаков для разных типов приборов, технологии и материалов. Магниторезисторы характеризуются такими параметрами, как чувствительность, номинальное сопротивление, рабочий ток, термостабильность и быстроедействие, диапазон рабочих температур.

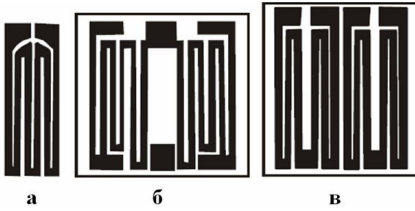
### 6.2.1. «Монолитные» магниторезисторы

Действие «монолитных» магниторезисторов основано на эффекте Гаусса, который характеризуется возрастанием сопротивления проводника (или полупроводника) при помещении его в магнитное поле. Конструкция «монолитного» магниторезистора приведена на рис. 6.3. Магниторезистор представляет собой подложку с размещенным на ней магниточувствительным элементом (МЧЭ). Подложка обеспечивает механическую прочность прибора. Элемент приклеен к подложке и защищен снаружи слоем лака. МЧЭ может размещаться в оригинальном или стандартном корпусе и снабжаться ферритовым концентратором магнитного поля, или «смещающим» постоянным микромагнитом. «Монолитные» магниточувствительные элементы изготавливаются из полупроводниковых материалов, обладающих высокой подвижностью носителей заряда. К таким материалам относятся антимонид индия ( $\text{InSb}$ ) и его соединения, арсенид индия ( $\text{InAs}$ ) и др. В зависимости от назначения прибора МЧЭ могут иметь различную форму. Наиболее известны МЧЭ прямоугольной формы и имеющие вид меандра (рис. 6.4, а–в).

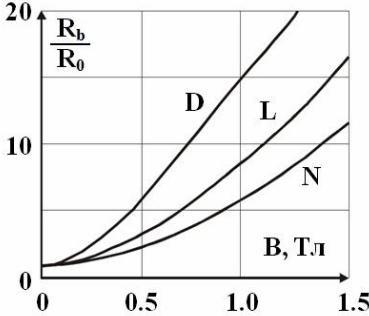
Наибольшее распространение получил эвтектический сплав  $\text{InSb-NiSb}$ , легированный теллурием. В России этот сплав известен под названием СКИН. В зарубежных приборах применяется аналогичный сплав, трех модификаций: L, D, N. Типичная зависимость магниторезистивного отношения ( $R_B/R_0$ ) МЧЭ, изготовленных из сплава  $\text{InSb-NiSb}$ , от индукции управляющего магнитного поля показана на рис. 6.5.



**Рис. 6.3.** Конструкция «монолитного» магниторезистора:  
1 – выводы, 2 – подложка, 3 – магниточувствительный элемент



**Рис. 6.4.** Варианты топологии МЧЭ «монокристаллических» магниторезисторов



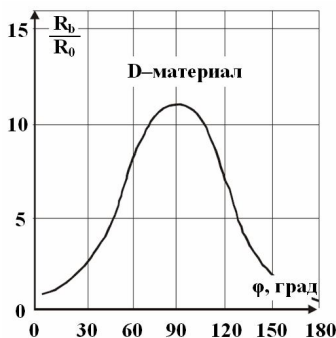
**Рис. 6.5.** Типичная зависимость МЧЭ, изготовленных из различных модификаций сплава InSb–NiSb, от величины индукции управляющего магнитного поля

Как следует из рис. 6.5, зависимость магнитной чувствительности «монокристаллического» МЧЭ в области слабых полей близка к квадратичной, а в области сильных полей – практически линейна. Область перехода от слабых полей к сильным для реальных магниторезистивных элементов лежит в пределах 0,2–0,4 Тл. Чувствительность магниторезистивного элемента изменяется и при изменении угла между вектором магнитной индукции и плоскостью элемента. Эта зависимость выражается формулой:

$$(R_B - R_0)/R_0 = [(R_B - R_0)/R_0]_{\max} \cdot \sin^2 \varphi / [1 + (\mu_n \cdot B)^2 \cdot \cos^2 \varphi], \quad (6.8)$$

где  $R_B$  – сопротивление МЧЭ при воздействии магнитного поля ( $B = B_{\text{ном}}$ );  $R_0$  – сопротивление МЧЭ при отсутствии магнитного поля ( $B = 0$ );  $\varphi$  – угол между векторами напряженности электрического и магнитного полей.

На рис. 6.6 приведена зависимость относительной чувствительности магниторезистора от угла  $\varphi$ . В «монокристаллических» МЧЭ, как правило, вектор напряженности электрического поля лежит в плоскости чувствительного элемента. Поэтому максимальная чувствительность «монокристаллического» МЧЭ достигается при нормально падающем магнитном потоке, при  $\varphi = 90^\circ$ .



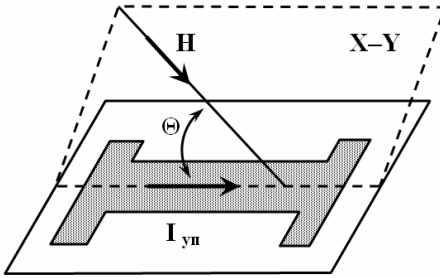
**Рис. 6.6.** Зависимость относительного изменения сопротивления «монолитного» МЧЭ от угла между вектором магнитной индукции и плоскостью магниторезистивного элемента, изготовленного из сплава InSb–NiSb

При использовании концентраторов и других элементов магнитных систем зависимость (6.8) может быть иной. Сопротивление и чувствительность магниторезисторов также зависят и от температуры.

### 6.2.2. «Пленочные» магниторезисторы

«Пленочные» магниторезисторы получили распространение лишь в последние годы. Магниточувствительный элемент таких приборов изготовлен из ферромагнитных пленок (ФМП), использующих анизотропный магниторезистивный эффект. Максимальное значение магнитосопротивления «тонкопленочных» магниторезисторов соответствует нулевому внешнему магнитному полю, т. е. при воздействии магнитного поля сопротивление такого МЧЭ уменьшается. Конструкция магниторезисторов из ФМП не отличается от конструкций других разновидностей магниторезисторов, за исключением того, что МЧЭ изготовлен по специальной тонкопленочной технологии. Напыление магниточувствительного слоя, как правило, происходит при воздействии магнитного поля. Для создания МЧЭ используют тонкие одно- и многослойные пленки никель-кобальтовых (Ni-Co), никель-железных (Ni-Fe) и других сплавов. В качестве подложек применяют стекло, ситалл или кремний, обладающие большой теплопроводностью, и коэффициент термического расширения которых близок по величине к ТКР используемых пленок.





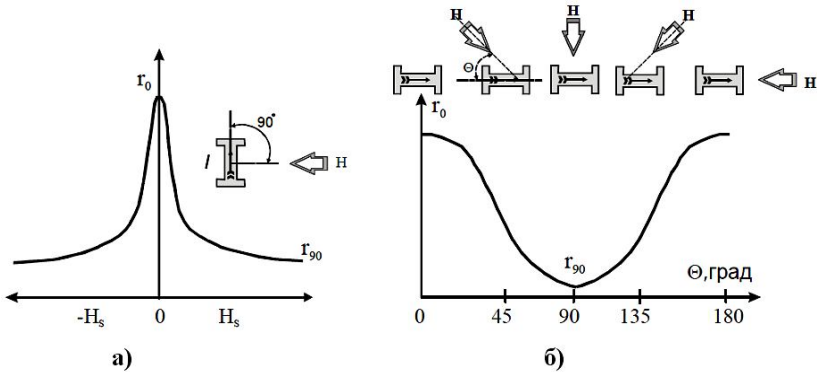
**Рис. 6.7.** К пониманию принципа работы тонкопленочного магниторезистора

Для тонкопленочных магниторезисторов на основе ФМП (рис. 6.7) анизотропное электрическое сопротивление  $r$  материала МЧЭ в зависимости от угла  $\Theta$  между направлением электрического тока через МЧЭ ( $I$ ) и направлением управляющего магнитного поля ( $H$ ) постоянной величины выражается следующей формулой (Фойгта – Томпсона):

$$r = r(\Theta) = r_0 \cdot \sin^2 \Theta + r_{90} \cdot \cos^2 \Theta, \quad (6.9)$$

где  $r_{90}$  – удельное электрическое сопротивление материала МЧЭ при  $\Theta = 90^\circ$ ;  $r_0$  – удельное электрическое сопротивление материала МЧЭ при  $\Theta = 0^\circ$ .

На рис. 6.8, а приведен график зависимости сопротивления МЧЭ от угла падения магнитного потока, соответствующий формуле (6.9).



**Рис. 6.8.** Зависимость сопротивления ( $r$ ) тонкопленочного магниточувствительного элемента:  
 а – от напряженности ( $H$ ) магнитного поля; б – от угла падения ( $\Theta$ ) магнитного потока

В верхней части (рис. 6.8, б) рассмотрено пять случаев ориентации магнитного поля  $H$  относительно направления тока ( $I$ ) в МЧЭ, соответствующих пяти характерным точкам графика зависимости  $r$  от  $Q$  (три точки экстремумов и две точки перегибов). Из рис. 6.8, а видно, что сопротивление МЧЭ имеет максимальное значение при совпадении направлений тока ( $I$ ) и магнитного поля  $H$  ( $\Theta = 0$ ) и при угле  $\Theta$ , равном  $90^\circ$ . Магнитная чувствительность «тонкопленочных» МЧЭ определяется параметрами материала. В табл. 1 приведены основные характеристики некоторых материалов, используемых зарубежными производителями для изготовления тонкопленочных магниторезисторов.

На рис. 6.8, б приведен график зависимости сопротивления  $r$  от напряженности управляющего магнитного поля  $H$ , построенный при воздействии поля согласно схеме, показанной в правом верхнем углу рис. 6.8, а ( $\Theta = 90^\circ$ ). Из этой зависимости следует, что максимальное значение  $r$ , равное  $r_0$ , соответствует нулевому внешнему магнитному полю. Данная зависимость имеет участки насыщения, соответствующие магнитным полям  $H > H_S$ , в пределах которых удельное сопротивление МЧЭ изменяется относительно мало. Величина напряженности магнитного поля насыщения  $H_S$  определяется по формуле:

$$H_S = k \cdot \left( \frac{t}{w} \right) + H_k, \quad (6.10)$$

где  $k$  – постоянный коэффициент;  $t$  – толщина магниточувствительного элемента;  $w$  – ширина магниточувствительного элемента. Значение  $k$  зависит от материала МЧЭ. Это значение выше для МЧЭ из пленок Ni-Co по сравнению с МЧЭ из пленок Ni-Fe.

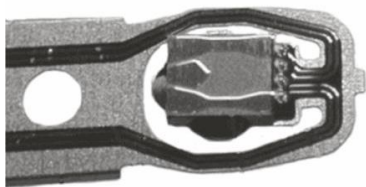
Таблица 1

Основные характеристики некоторых материалов, используемых зарубежными производителями для изготовления тонкопленочных магниторезисторов

Материал пленки	Удельное сопротивление, $\rho$ , $1 \cdot 10^{-8}$ , Ом·м	Относительное изменение сопротивления при $B = 1$ Тл, о. е.
Ni (81) Fe (19)	22	2,2
Ni (86) Fe (14)	15	3
Ni (50) Co (50)	24	2,2
Ni (70) Co (30)	26	3,7

### 6.2.3. Применение магниторезисторов

Магниторезисторы применяются в качестве чувствительных элементов в функционально-ориентированных магнитных датчиках: скорости и направления вращения, угла поворота и положения, линейного перемещения, расхода жидкости и газа, электрического тока и напряжения и т. п. Их используют в бесконтактной клавиатуре ПЭВМ, бесконтактных переменных резисторах, вентильных электродвигателях, электронных модуляторах и преобразователях, измерителях магнитного поля, металлоискателях, электронных навигаторах, в бытовой электронной аппаратуре, системах автоматического управления, устройствах считывания информации ЭВМ (рис. 6.9), определителях подлинности банкнот, электронных и электрифицированных игрушках и др. Современная групповая технология ИС позволяет выпускать интегральные преобразователи магнитного поля на основе тонкопленочных магниторезисторов, которые могут формироваться как в линейные, так и в матричные магниточувствительные структуры с различным способом их организации. Основное назначение таких приборов – это использование их в системах визуализации магнитного поля и устройствах считывания информации с магнитных носителей (лент, карт и т. п.).



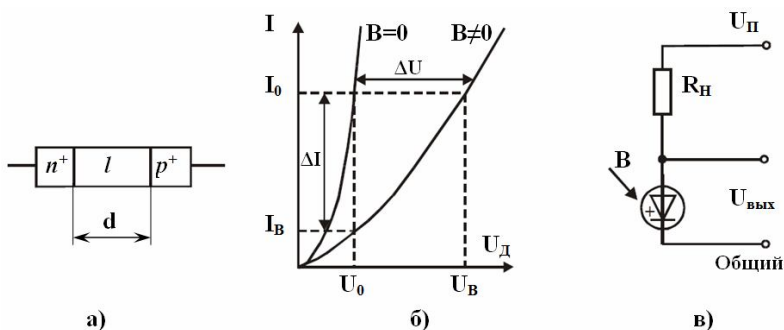
**Рис. 6.9.** Устройство считывания информации с жестких магнитных дисков ЭВМ на основе магниторезистора

### 6.3. МАГНИТОДИОДЫ

Отдельную большую группу преобразователей магнитного поля представляют магнитодиоды. *Магнитодиодом* (МД) называется преобразователь магнитного поля, принцип действия которого основан на магнитодиодном эффекте.

Магнитодиод представляет собой полупроводниковый прибор с *p-n*-переходом и невыпрямляющими контактами, между которыми находится область высокоомного полупроводника (рис. 6.10, *a*). Отличие от обычных полупроводниковых диодов состоит в том, что магнитодиод изготавливается из высокоомного

полупроводникового материала, проводимость которого близка к собственной, ширина базы  $d$  в несколько раз больше диффузионной длины пробега носителей  $L$ , в то время как в обычных диодах  $d < L$ . В «длинных» диодах при прохождении электрического тока определяющими становятся процессы, зависящие от рекомбинации и движения неравновесных носителей заряда в базе и на поверхности. В прямом направлении при высоких уровнях инжекции проводимость магнитодиода определяется инжектированными в базу неравновесными носителями. Падение напряжения происходит не на  $p$ - $n$ -переходе, как в диоде, а на высокоомной базе. Если магнитодиод, через который протекает ток, поместить в поперечное магнитное поле, то произойдет увеличение сопротивления базы. Сопротивление базы увеличивается и за счет повышения роли поверхностной рекомбинации, отклоняющихся к поверхности полупроводника носителей заряда. Эквивалентную схему магнитодиода можно представить в виде магниторезистора с последовательно включенным усилителем. Типичная вольт-амперная характеристика «торцевого» магнитодиода приведена на рис. 6.10, б. Для изготовления магниточастотных элементов магнитодиодов в основном используются германий (Ge) и кремний (Si). В настоящее время существует широкая номенклатура магнитодиодов, отличающихся технологией изготовления и разнообразием конструктивного оформления. При производстве магнитодиодов используются сплавная, биполярная, МОП и другие технологии. Конструкции магнитодиодов и «обычных» диодов во многом похожи. Принципиальная разница заключается в том, что корпус магнитодиодов выполняется из немагнитного материала.

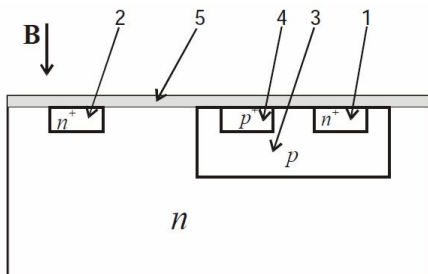


**Рис. 6.10.** К пояснению принципа действия магнитодиода:

*a* – конструкция перехода; *б* – вольт-амперная характеристика; *в* – схема включения

### 6.3.1. Магнитодиоды на основе МОП-технологии

На рис. 6.11 приведена одна из структур интегрального магнитодиода, изготовленного с использованием типовой МОП-технологии. Интегральный магнитодиод формируется по МОП-технологии в процессе изготовления интегральных микросхем.



**Рис. 6.11.** Структура магнитодиода, изготовленного с использованием МОП-технологии:

- 1 – область эмиттера;
- 2 – контакт к коллектору магнитодиода;
- 3 – базовая область магнитодиода;
- 4 – контакт к базовой области;
- 5 – граница раздела оксид кремния – кремний

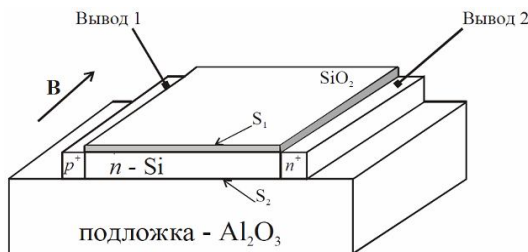
Область эмиттера 1 и контакт к коллектору 2 магнитодиода реализованы на основе  $n^+$ -областей стока-истока МОП-транзистора  $n$ -типа, базовая область 3 формируется на основе диффузионной области кармана  $p$ -типа, контакт к базовой области 4 – на основе  $p^+$ -областей стока-истока МОП-транзистора  $p$ -типа, коллектором является подложка  $n$  типа.

В данной конструкции граница раздела окисел – кремний 5 играет роль поверхности с низкой скоростью рекомбинации, а обратномещенный  $p$ - $n$ -переход «база – коллектор» – роль поверхности с высокой скоростью рекомбинации носителей заряда.

Отличительные особенности данного прибора: магниточувствительный элемент эффективно работает при высоком уровне инжекции; полезный сигнал снимается между электродами эмиттер – база.

### 6.3.2. Магнитодиоды на основе технологии «кремний на сапфире»

Существует оригинальная конструкция магнитодиода, изготовленного по технологии «кремний на сапфире» (КНС). На рис. 6.12 приведен один из вариантов структуры такого прибора.



**Рис. 6.12.** Структура магнитодиода, изготовленного по технологии «кремний на сапфире»

Принцип действия магнитодиода (рис. 6.12) заключается в следующем. Электроны и дырки из  $n^+$  и  $p^+$ -областей переходят в слаболегированную  $n$ -область, где они дрейфуют под воздействием электрического поля. Поверхность раздела ( $\text{Si-SiO}_2$ ) в пластине имеет низкую скорость рекомбинации  $S_1$  по сравнению со скоростью рекомбинации  $S_2$  нижней границы раздела ( $\text{Si-Al}_2\text{O}_3$ ). Магнитное поле в плоскости отклоняет носители заряда к одной из плоскостей, и в вольт-амперной характеристике происходят соответствующие изменения. Прибор имеет высокую магнитную чувствительность. Однако есть и некоторые недостатки. Основным недостатком считается сильная нелинейность энергетической характеристики чувствительности, которая зависит от направления воздействующего магнитного поля. Дополнительной проблемой является и сильная зависимость параметров прибора от температуры.

### 6.3.3. Применение магнитодиодов

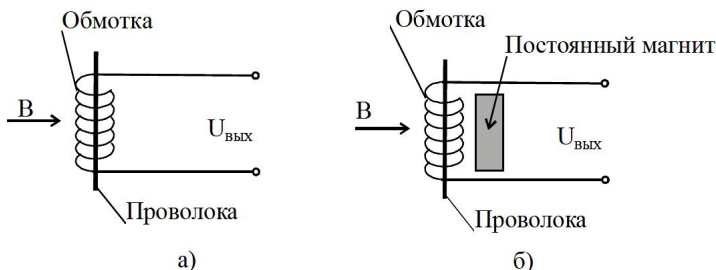
Магнитодиоды применяются в качестве чувствительных элементов в функционально-ориентированных магнитных датчиках: скорости и направления вращения, угла поворота и преобразователях типа *угол – код*, уровня и т. п. Их используют в бесконтактной клавиатуре ПЭВМ, вентильных электродвигателях, бесконтактных реле предельного тока, регуляторах электрической мощности, в бытовой электронной аппаратуре, системах автоматического управления, устройствах считывания информации ЭВМ, в электронных и электрифицированных игрушках и др. Высокая магнитная чувствительность магнитодиодов позволяет использовать их в бесконтактных системах электронного зажигания; системах умножения и деления; схемах измерения электрической мощности и мощности СВЧ-излучения; в магнитной де-

фектоскопии для контроля качества проката труб, стальных деталей, рельсов, элементов ходовой части транспорта; в биологии и медицине в качестве датчиков измерения пульса, кровяного давления и глубины дыхания и т. д. Современная групповая технология ИС позволяет выпускать интегральные преобразователи магнитного поля на основе магнитодиодов, которые могут формироваться как в линейные, так и в матричные магниточувствительные структуры с различным способом их организации. Основное назначение таких приборов – это использование их в системах визуализации магнитного поля и устройствах считывания информации с магнитных носителей (лент, карт и т. п.).

#### **6.4. ЭФФЕКТ ВИГАНДА**

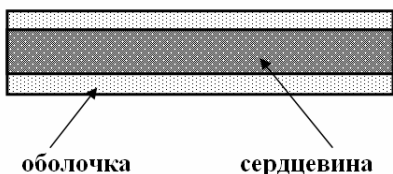
Принцип действия датчика основан на так называемом эффекте Виганда. Этот эффект проявляется в том, что если ферромагнитную проволоку, имеющую специальный химический состав и физическую структуру, внести в магнитное поле, то произойдет спонтанное изменение ее магнитной поляризации, как только напряженность поля превысит определенное пороговое значение. Этот порог называется порогом зажигания. Изменение состояния проволоки можно регистрировать при помощи обмотки, намотанной вокруг проволоки или размещенной рядом с ней.

Датчик Виганда представляет собой двухполюсник, реагирующий на магнитные поля и вырабатывающий сигналы в диапазоне нескольких вольт при условии, что напряженность управляющего магнитного поля превышает величину напряженности поля зажигания. Датчики Виганда не требуют какого-либо источника питания, их выходной сигнал практически не зависит от частоты изменения поля, и их можно использовать в широком диапазоне рабочих температур ( $-196 \dots +175$  °С). Конструкция простейшего датчика Виганда приведена на рис. 6.13. Датчик состоит из проволоки, изготовленной из ферромагнитного сплава типа викаллоя (10 % ванадия, 52 % кобальта и железа) и обмотки. Точный состав материала проволоки, как правило, является секретом фирмы.



**Рис. 6.13.** Конструкция датчика Виганда:  
*а* – с обмоткой, *б* – с обмоткой и постоянным магнитом

Проволока Виганда (рис. 6.14) представляет собой ферромагнитное тело, состоящее из магнитомягкой сердцевинки и магнитотвердой внешней оболочки, окружающей сердцевинку. Получение такой структуры достигается за счет использования специальной технологии изготовления.



**Рис. 6.14.** Структура проволоки Виганда

Диаметр проволоки составляет порядка 0,2–0,3 мм. Длина от 5 до 40 мм. Обмотка датчика обычно составляет примерно 1000–2000 витков медного провода диаметром 0,05–0,1 мм.

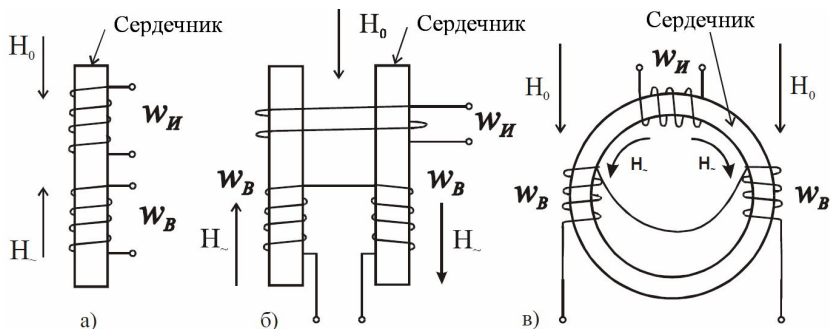
Модульное исполнение датчика, состоящего из проволоки, обмотки и постоянного магнита, позволяет разрабатывать большое число вариантов датчиков перемещения. Область их применения простираются от задач измерения и контроля до систем управления доступом, в которых они служат носителями информации в идентификационных картах.

### 6.5. ФЕРРОЗОНДОВЫЕ ПМП

*Феррозондовый преобразователь* магнитного поля, или феррозонд, предназначен для измерения и индикации постоянных и медленно меняющихся магнитных полей и их градиентов.



Действие феррозонда основано на изменении магнитного состояния ферромагнетика под воздействием двух магнитных полей разных частот. На рис. 6.15 схематически показаны некоторые варианты конструкций феррозондов.



**Рис. 6.15.** Варианты конструкций феррозондов:

*a* – одноэлементный стержневой; *б* – дифференциальный с разомкнутым сердечником; *в* – дифференциальный с замкнутым сердечником

В простейшем варианте феррозонд состоит из ферромагнитного сердечника и находящихся на нем двух катушек: катушки возбуждения, питаемой переменным током, и измерительной (сигнальной) катушки.

Сердечник феррозонда выполняется из материалов с высокой магнитной проницаемостью. На катушку возбуждения от специального генератора подается переменное напряжение с частотой от 1 кГц до 300 кГц (в зависимости от уровня параметров и назначения прибора). В отсутствие измеряемого магнитного поля сердечник под действием переменного магнитного поля ( $H$ ), создаваемого током в катушке возбуждения, перемагничивается по симметричному циклу. Изменение магнитного поля, вызванное перемагничиванием сердечника по симметричной кривой, индуцирует в сигнальной катушке ЭДС, изменяющуюся по гармоническому закону. Если одновременно на сердечник действует измеряемое постоянное или медленно меняющееся магнитное поле ( $H_0$ ), то кривая перемагничивания меняет свои размеры и форму и становится несимметричной. При этом изменяется величина и гармонический состав ЭДС в сигнальной катушке. В частности, появляются четные гармонические составляющие ЭДС,

величина которых пропорциональна напряженности измеряемого поля и которые отсутствуют при симметричном цикле перемагничивания.

Феррозонды подразделяются на: стержневые одноэлементные (рис. 6.15, *а*), дифференциальные с разомкнутым сердечником (рис. 6.15, *б*) и дифференциальные с замкнутым (кольцевым) сердечником (рис. 6.15, *в*).

Дифференциальный феррозонд (рис. 6.15, *б, в*), как правило, состоит из двух сердечников с обмотками, которые соединены так, что нечетные гармонические составляющие практически компенсируются. Тем самым упрощается измерительная аппаратура и повышается чувствительность феррозонда.

Феррозонды отличаются очень высокой чувствительностью к магнитному полю. Они способны регистрировать магнитные поля с напряженностью до  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  А/м ( $\sim 10^{-10}$ – $10^{-11}$  Тл). Современные конструкции феррозондов отличаются компактностью. Объем феррозонда, которым комплектуются отечественные магнитометры Г73, составляет менее  $1 \text{ см}^3$ , а для магнитометра Г74 трехкомпонентный феррозонд вписывается в куб со стороной 15 мм.

## 7. МАГНИТНЫЕ ДАТЧИКИ

### 7.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И КОНСТРУКЦИИ МАГНИТНЫХ ДАТЧИКОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Магнитные датчики для регистрации перемещений контролируемых объектов относятся к так называемым функционально-ориентированным магнитным датчикам, которые составляют основную группу магнитоэлектронных приборов. Функционально-ориентированный магнитный датчик – это специально сконструированное магнитоэлектронное устройство, предназначенное для решения узкого круга задач. Например, для регистрации перемещений или контроля скорости вращения контролируемого объекта, угла наклона и т. п. *Магнитные датчики перемещения* (МДП) являются наиболее универсальными магнитоэлектронными устройствами, поскольку они используются и как самостоятельные датчики, и как составные элементы многих других более сложных датчиков. Некоторые датчики содержат специальные элементы, преобразующие давление управляющего элемента (например, поводка, штока и др.) в перемещение, и выходные преобразователи магнитного поля, преобразующие перемещение в выходной сигнал. Аналогичное устройство имеют многие датчики уровня, расхода и температуры. Датчики перемещения находят широкое применение в различных областях науки, техники и в производстве, в том числе в металлообрабатывающем оборудовании с программным управлением, различного вида транспортерах, роботах и микророботах, подъемных механизмах, поточных линиях с автоматизированным управлением, в бытовой технике и аппаратуре и т. п. Кроме того, датчики перемещения используются как нулевые органы датчиков с силовой компенсацией и в других устройствах.

Отличительные особенности магнитных датчиков перемещения:

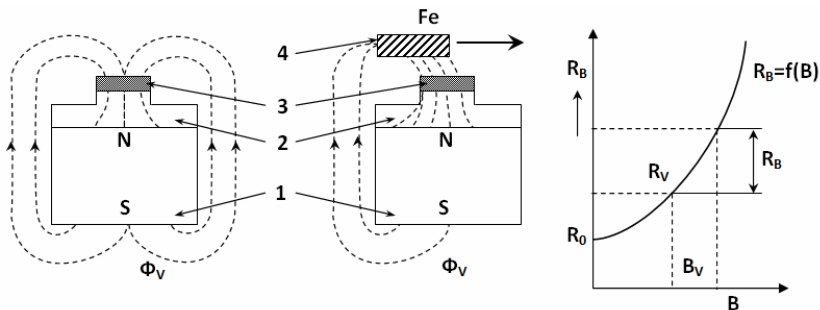
- высокая надежность работы при относительной простоте конструкции и электрической схемы;
- отсутствие механического контакта между перемещающейся деталью и датчиком;

- высокая точность фиксации положения;
- высокая разрешающая способность и низкий порог чувствительности;
- возможность эксплуатации в условиях агрессивной окружающей среды;
- низкая потребляемая мощность;
- малые габариты,
- большой срок службы;
- низкая стоимость и пр.

**Принцип действия и конструкции магнитных датчиков перемещения (МДП)** основан на изменении электрического сигнала на выходе МДП при изменении положения контролируемого объекта. Так как чувствительным элементом датчика перемещения является преобразователь магнитного поля, то изменение выходного сигнала фиксирует изменение величины индукции магнитного поля, воздействующего на магниточувствительный элемент МДП. Основные характеристики магнитных датчиков определяются параметрами используемых ПМП и магнитной системы. Несмотря на большое различие последних, все они могут быть разбиты на две основные группы:

- датчики с разомкнутой магнитной системой;
- датчики с замкнутой магнитной системой.

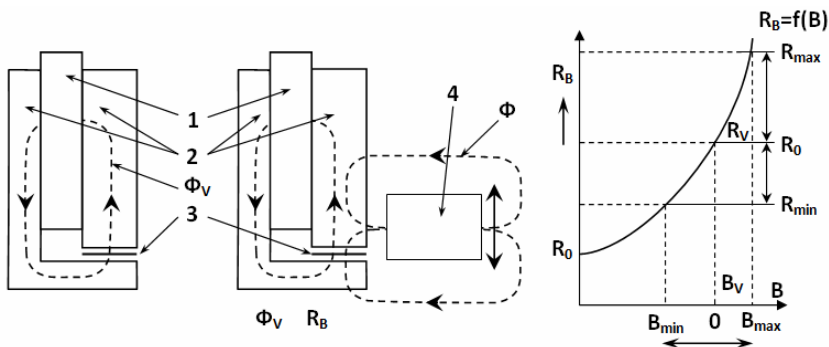
**Датчики с разомкнутой магнитной системой** представляют собой устройства, управление которыми осуществляется при помощи магнитных шунтов, закорачивающих магнитное поле, сформированное встроенным постоянным магнитом. В качестве шунта обычно используется перемещающаяся ферромагнитная деталь, установленная на объекте контроля. Вариант конструкции разомкнутой магнитной системы схематически приведен на рис. 7.1. На одном из полюсов постоянного магнита *1* находится полюсной наконечник *2* с преобразователем магнитного поля *3*. При перемещении ферромагнитной детали *4* вблизи полюсного наконечника *2* усиливается магнитный поток на полюсном наконечнике, приводящий к изменению сигнала на МЧЭ.



**Рис. 7.1.** Разомкнутая магнитная система датчика перемещения:

1 – постоянный магнит; 2 – магнитопровод; 3 – магниточувствительный элемент (магниторезистор); 4 – ферромагнитная подвижная деталь

**Датчики с замкнутой магнитной системой** (рис. 7.2) представляют собой устройства, управление которыми осуществляется при помощи перемещающихся постоянных магнитов, установленных на объекте контроля.



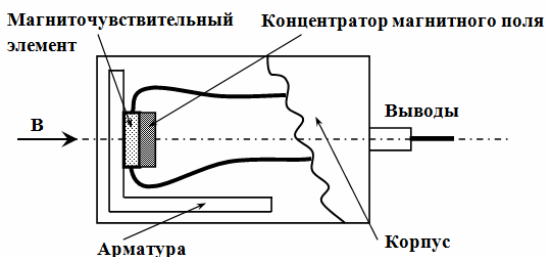
**Рис. 7.2.** Замкнутая магнитная система датчика перемещения:

1 – постоянный магнит; 2 – магнитопровод; 3 – магниточувствительный элемент (магниторезистор); 4 – постоянный магнит на подвижной детали

Вариант конструкции замкнутой магнитной системы схематически показан на рис. 7.2. При перемещении подвижной детали с закрепленным на ней постоянным магнитом 4 вблизи воздушного зазора, в котором помещен ПМП, магнитный поток, пронизывающий плоскость МЧЭ, сначала уменьшается, а затем увеличивается. Если постоянный магнит 4 перемещать не сверху вниз, а, наоборот, снизу вверх, то магнитный поток, пронизывающий МЧЭ, будет сначала возрастать, а затем убывать. Это свойство

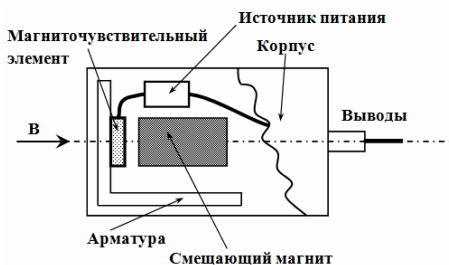
может быть использовано для определения направления перемещения подвижной детали. При проектировании датчиков линейного перемещения в качестве магниточувствительных элементов используется широкий круг дискретных ПМП (например, элементы Холла, магниторезисторы, магнитодиоды, магнитотранзисторы) или магниточувствительные микросхемы на их основе.

Простейший датчик перемещения (рис. 7.3) содержит только один из дискретных магниточувствительных элементов (например, элемент Холла, магниторезистор, магнитотранзистор, магнитотиристор, магнитодиод и т. п.), размещенных в специальном защитном корпусе, как правило, из немагнитного материала (алюминий, латунь, пластмасса, керамика и пр.). В случае необходимости в том же корпусе может размещаться миниатюрный постоянный магнит. При этом следует отметить, что все основные параметры таких датчиков полностью определяются параметрами МЧЭ.



**Рис. 7.3.** Устройство датчика перемещения с разомкнутой магнитной системой

«Сложный» датчик перемещения (рис. 7.4) кроме ПМП и магнита содержит еще электронную схему усиления и обработки сигнала, а также встроенный источник питания (например, стабилизатор напряжения).



**Рис. 7.4.** Устройство «сложного» датчика перемещения со смещающим магнитом и электронной схемой усиления и обработки сигнала

## 7.2. ДАТЧИКИ ЛИНЕЙНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Датчики линейного перемещения (ДЛП) предназначены для преобразования линейного перемещения объекта контроля в выходной электрический сигнал, пропорциональный этому перемещению. Основное требование к датчикам линейного перемещения – это **линейная** зависимость выходного сигнала от расстояния перемещения. Принцип работы датчиков линейного перемещения поясняется на рис. 7.5.

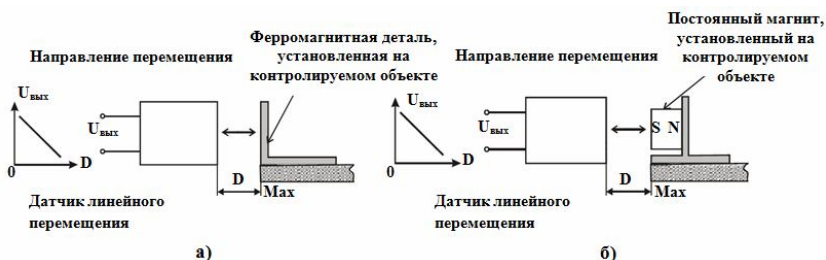


Рис. 7.5. Принцип работы датчиков линейного перемещения:  
 а – с замкнутой и б – с разомкнутой магнитной системой

На рис. 7.6 показаны замкнутая магнитная система датчика перемещения, спроектированного по схеме (рис. 7.6, а), и зависимость сопротивления магниторезистора ( $R_B$ ) от расстояния  $d$ . В этом датчике применен магниторезистор типа СМ4-1. Датчик предназначен для точного контроля малых перемещений. Выходная характеристика датчика отличается хорошей линейностью.

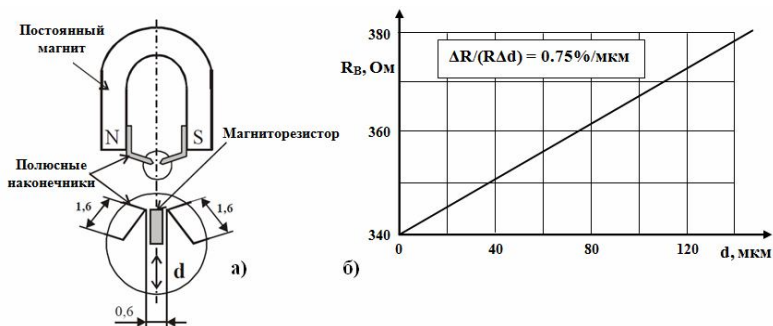


Рис. 7.6. Датчик перемещения с использованием магниторезистора типа СМ4-1:  
 а – магнитная система; б – выходная характеристика

### 7.3. МАГНИТНЫЕ ДАТЧИКИ ПРИБЛИЖЕНИЯ

Датчиками приближения принято называть устройства, назначение которых состоит в выдаче выходного сигнала («0» или «1») в том случае, если какая-либо перемещающаяся деталь контролируемого объекта достигнет определенного, наперед заданного положения ( $D_{сраб}$ ). Часто такие датчики называют датчиками конечного положения (ДКП), а также датчиками близости. В общем виде датчики приближения состоят из магнитной системы и преобразователя магнитного поля в комплекте со схемой усиления и обработки сигнала ПМП. Принцип действия таких устройств основан на возникновении электрического сигнала («0» или «1») на выходе датчика при воздействии на него магнитного поля определенной интенсивности. Так как напряженность магнитного поля определяется положением перемещающейся детали, то при приближении ферромагнитной детали контролируемого объекта ближе расстояния, равного  $D_{сраб}$ , происходит срабатывание датчика. При удалении детали на расстояние, равное  $D_{отп}$ , датчик возвращается в исходное состояние. Принцип работы датчиков поясняется на рис. 7.7.

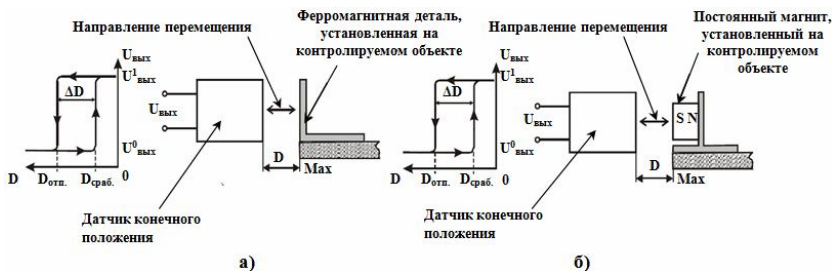


Рис. 7.7. Принцип работы датчиков приближения:

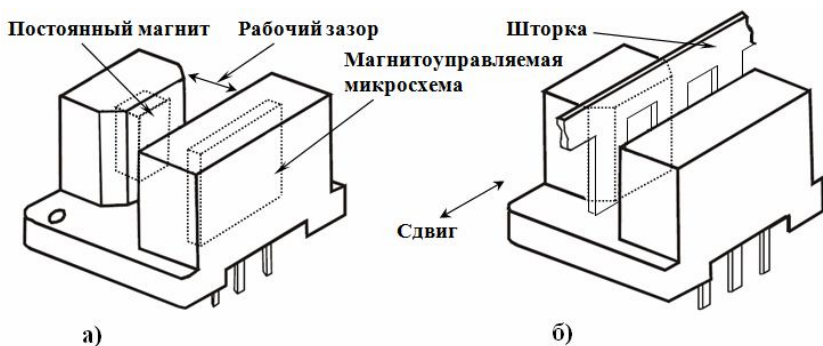
а – с замкнутой и б – с разомкнутой магнитной системой

### 7.4. ЩЕЛЕВЫЕ МАГНИТНЫЕ ДАТЧИКИ

Отдельный класс датчиков положения представляют так называемые **щелевые** магнитные датчики (ЩМД). В зарубежной литературе такие датчики называются **лопастные** или **лопаточные**. ЩМД представляет единую конструкцию, содержащую постоянный магнит и преобразователь магнитного поля, расположенные на определенном расстоянии напротив друг друга. В ка-

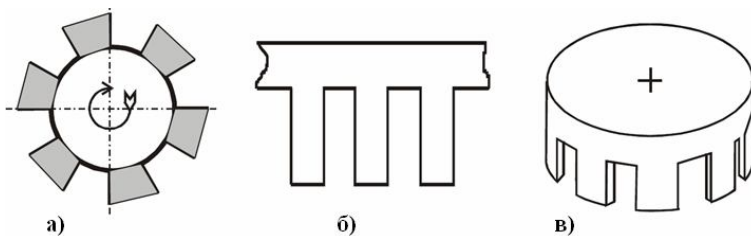


честве ПМП могут использоваться элементы Холла, магниторезисторы, магнитотранзисторы и другие приборы. Однако наибольшее распространение в качестве ПМП щелевых датчиков получили магнитоуправляемые интегральные схемы, использующие указанные преобразователи в качестве магниточувствительных элементов. На рис. 7.8 приведено устройство простейшего щелевого магнитного датчика. Основными элементами ЩМД служат магнитоуправляемая микросхема (МУМ) и постоянный магнит (ПМ). При этом ПМ и МУМ жестко закреплены в оригинальном корпусе, изготовленном из немагнитного материала. Управляющим элементом датчика является шторка-замыкатель магнитного потока, выполненная из ферромагнитного материала. Более сложные конструкции содержат специальные концентраторы магнитного поля, формирующие узкий рабочий зазор с равномерным распределением в нем магнитного потока.



**Рис. 7.8.** Конструкция щелевого магнитного датчика

Принцип действия щелевого магнитного датчика иллюстрируется на рис. 7.8. Он достаточно прост. Нормальное состояние для датчика (рис. 7.8) – «Включено». Если в рабочий зазор датчика ввести пластину из ферромагнитного материала (рис. 7.8, б), то линии поля прервутся и магнитоуправляемая микросхема перейдет в положение «Выключено». Форма и конструкция шторки-замыкателя может быть, в зависимости от назначения датчика, самой разнообразной (рис. 7.9).



**Рис. 7.9.** Конструкция шторок-замыкателей, используемых в щелевых магнитных датчиках: *а* – колесо-обтюратор; *б* – «гребенка»; *в* – цилиндр

На рис. 7.9, *а* показано плоское зубчатое колесо, используемое для модуляции оптического излучения. Существенное преимущество магнитного датчика перед оптронными – это отсутствие источника излучения (потребляющего сравнительно большой ток – 20–100 мА), а также нечувствительность к засветкам и запыленности. На рис. 7.9, *б* показана наиболее часто встречающаяся конструкция замыкателя, так называемая «гребенка». Окна и зубцы гребенки имеют здесь прямоугольную форму, а не сектора (см. рис. 7.9, *а*), что улучшает форму выходных импульсов, когда интервал времени «Включено» больше, чем интервал времени «Выключено». Наиболее компактным вариантом ЩМД является конструкция с цилиндрическим прерывателем (см. рис. 7.9, *в*). Конструкция прерывателя, как правило, определяется как параметрами самого датчика, так и условиями его применения.

Конструкция щелевых магнитных датчиков типа 1AV2A, 1AV10A, 2AV54 и др. оптимизирована для использования их в качестве бесконтактного прерывателя в электронных системах зажигания автомобильной техники. Электронная система зажигания в процессе эксплуатации практически не требует обслуживания и обладает следующими основными преимуществами:

- напряжение, подводимое к свечам зажигания, увеличивается по сравнению с напряжением в классической системе, что позволяет увеличить зазор в свечах зажигания на 20–30 % относительно стандартного, в связи с чем происходят полное сгорание топлива и связанные с ним повышение мощности и экономичности двигателя, уменьшение нагарообразования, снижение токсичности отработанных газов;
- облегчается пуск холодного двигателя при низких температурах;

- повышается срок службы прерывателя (определяется его механическим износом).

Щелевой магнитный датчик устанавливают в прерыватель-распределитель двигателя вместо контактной группы. ЩМД выполняет функцию бесконтактного прерывателя, определяющего моменты зажигания горючей смеси в цилиндрах. Шторку-замыкатель в этом случае изготавливают в виде стакана (см. рис. 7.9, в), по окружности которого прорезаны прямоугольные окна. Число окон равно числу цилиндров двигателя. Шторка укреплена так, что при вращении вала в зазоре датчика поочередно проходят окна и зубцы. При этом датчик формирует последовательность низковольтных прямоугольных импульсов искробразования, которую система зажигания преобразует в высоковольтные разряды в свечах цилиндров двигателя. Щелевые магнитные датчики типа 1AV2A, 1AV10A и 2AV54, как правило, используются в комплекте со специальными интегральными схемами электронного зажигания (драйверами). При использовании более совершенной системы зажигания современной автомобильной техники, кроме датчика прерывателя, ЩМД могут применяться в качестве: датчиков угла поворота, расхода воздуха, угла открытия дроссельной заслонки и т. д. Современные щелевые магнитные датчики обладают очевидными преимуществами перед разомкнутыми оптронными парами. В первую очередь, можно отметить отсутствие источника излучения, и, следовательно, высокую экономичность ЩМД. Щелевые магнитные датчики не боятся посторонних засветок, агрессивных сред, а также загрязнений, пыли и дымов.

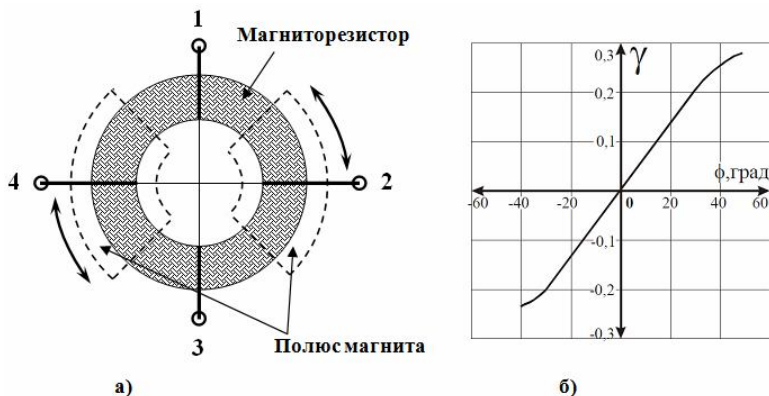
#### **7.5. МАГНИТНЫЕ ДАТЧИКИ УГЛА ПОВОРОТА**

Магнитные датчики типа угла поворота представляют достаточно большую группу изделий микромагнитоэлектроники. По виду выходного сигнала их можно условно разделить на две группы:

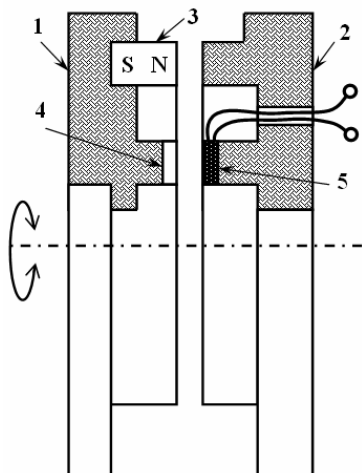
- аналоговые датчики угла, сигнал на выходе которых пропорционален углу поворота;
- цифровые, часто называемые преобразователями типа «угол – код». Сигнал на выходе таких датчиков выдается в виде цифрового кода.

При этом наибольшее распространение получили двоично-рефлексный или двоично-десятичный рефлексные коды, а также код Грэя (по ГОСТ 12814-74).

Простейшим датчиком угла поворота может служить магниторезистор с кольцевым расположением четырех магниточувствительных элементов, включенных в схему моста (рис. 7.10).



**Рис. 7.10.** «Кольцевой» магниторезистор:  
*a* – внешний вид; *б* – функциональная характеристика:  
 1, 3 – выводы входа; 2, 4 – выводы выхода



Датчик подобной конструкции работает в диапазоне углов до  $\pm 300^\circ$  при достаточно хорошей линейности выходной характеристики. На рис. 7.11 приведен вариант конструкции датчика угла поворота, в котором используется матрица магниторезисторов.

**Рис. 7.11.** Вариант конструкции датчика угла поворота, в котором используется матрица магниторезисторов:  
 1, 2 – кольцевые магнитопроводы; 3 – кольцевой постоянный магнит; 4 – зубцы; 5 – магниторезисторная матрица

Датчик угла поворота содержит два кольцевых магнитопровода 1 и 2, установленных соосно и разделенных зазором. Кольцевые магнитопроводы (1, 2) выполнены П-образными и установлены торцами друг к другу, на одном из торцов магнитопровода 1 установлен кольцевой постоянный магнит 3, а другой торец выполнен зубчатым. Зубцы 4 расположены равномерно по окружности с периодом повторения  $T$ . На торце второго магнитопровода, сопряженного с зубчатым торцом первого магнитопровода, устанавливается магниторезисторная матрица 5. Магнитное поле в датчике создается с помощью кольцевого магнита 3, при этом в рабочем воздушном зазоре, образованном зубцами магнитопровода 1 и магниточувствительными элементами матрицы, устанавливается определенная напряженность магнитного поля. Период изменения напряженности магнитного поля для каждой из групп магниторезисторов в матрице равен периоду  $T$  расположения зубцов магнитопровода 1. Ввиду расположения магниторезисторов в матрице с шагом, равным  $(5/4)T$ , и объединения их в четыре группы, причем объединение магниторезисторов производится через шаг, равный пяти периодам  $T$ , происходит изменение сопротивления каждой группы магниторезисторов по своему закону. В исходном (условно-нулевом) положении магниторезисторы первой группы расположены против соответствующих зубцов магнитопровода 1, а магниторезисторы третьей группы – против пазов между зубцами. Магниторезисторы второй и четвертой группы будут располагаться в данном случае на границе между зубцами и пазом. При повороте магнитопровода относительно оси вращения на четверть периода  $T$  расположение магниторезисторов первой, третьей и второй, четвертой групп изменится на противоположное. Выбором соотношения между размерами зубцов магнитопровода 1 и размерами магниторезисторов в матрице можно добиться получения изменения суммарного сопротивления магниторезисторов каждой группы при вращении магнитопровода 1 по следующим законам:

$$R_B(1 + k \cdot \cos \rho \cdot \varphi) \quad (7.1)$$

$$R_B(1 + k \cdot \sin \rho \cdot \varphi) \quad (7.2)$$

$$R_B(1 - k \cdot \cos \rho \cdot \varphi) \quad (7.3)$$

$$R_B(1 - k \cdot \sin \rho \cdot \varphi) \quad (7.4)$$

где  $R_B$  – сопротивление группы магниторезисторов при воздействии среднего магнитного поля;  $k$  – коэффициент модуляции магнитного поля;  $\rho$  – число зубцов магнитопровода;  $\varphi$  – угол поворота магнитопровода.

Объединив магниторезисторы первой, третьей и второй, четвертой групп, можно получить две дифференциальные пары, с которых можно получить два сигнала, изменяющихся по синусному и косинусному законам.

Таким образом, участие в формировании выходных сигналов датчика четырех групп большего количества магниточувствительных элементов позволяет значительно повысить точность измерения угла поворота, так как в этом случае происходит усреднение различного рода технологических отклонений при изготовлении и юстировке датчика. Наличие дифференциальных пар позволяет компенсировать температурную нестабильность, в результате чего получается магнитомодуляционный синусно-косинусный датчик угла, простой в изготовлении и обладающий повышенной точностью.

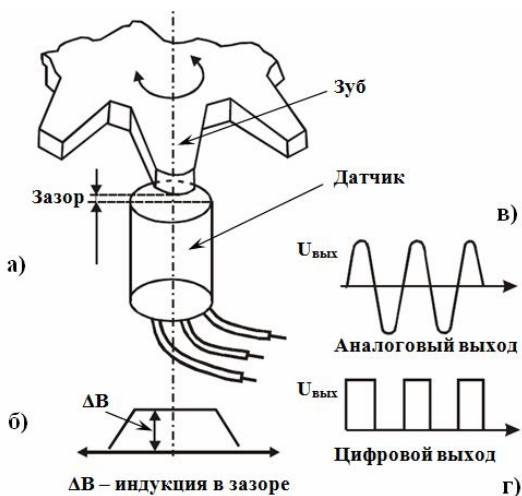
## **7.6. ДАТЧИКИ ВРАЩЕНИЯ**

### **7.6.1. Датчики скорости вращения, основанные на счете зубьев ферромагнитных шестерен**

В данном случае датчик скорости вращения представляет собой магнитоэлектронное устройство, состоящее из преобразователя магнитного поля и смещающего магнита, размещенных в одном корпусе. В качестве ПМП, в зависимости от назначения датчика, могут использоваться практически любые из известных МЧЭ: магниторезисторы, элементы Холла, магнитодиоды и магнитотранзисторы, магнитотиристоры, магнитоуправляемые и магниточувствительные микросхемы и др. Принцип работы таких датчиков иллюстрируется на рис. 7.12.

При перемещении зубчатого колеса из ферромагнитного материала в зоне действия датчика изменяется плотность магнитного потока (рис. 7.12, б). Если вблизи МЧЭ оказывается зуб из ферромагнитного материала, то плотность магнитного потока возрастает, и напряжение сигнала на выходе датчика будет представлять смену состояний типа «зуб – воздушный зазор». Вращающаяся шестерня вызывает появление модулированного сиг-

нала. Частота импульсов за один оборот совпадает с числом зубьев. В зависимости от используемой элементной базы, сигнал с выхода датчиков может сниматься как в аналоговой (рис. 7.12, в), так и цифровой форме (рис. 7.12, г). В случае необходимости аналоговый сигнал легко преобразуется в цифровую форму при помощи компаратора. Основные параметры датчиков скорости вращения определяются параметрами используемых в них преобразователей магнитного поля.



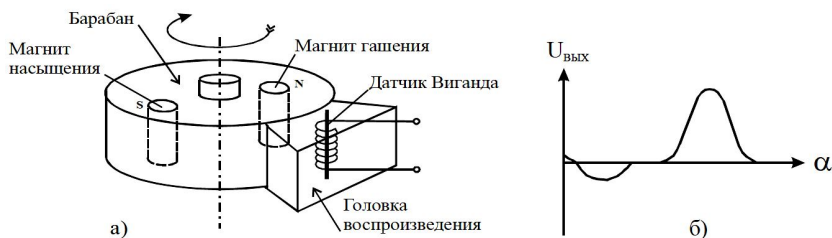
**Рис. 7.12.** Датчик скорости вращения: а – схематическое устройство; б – зависимость индукции в зазоре от положения зуба; в – вид сигнала в аналоговой форме; г – вид сигнала в цифровой форме

Достаточно широкое распространение получили датчики скорости вращения зубчатых колес, использующие в качестве ПМП дискретные элементы Холла и магнитоуправляемые интегральные схемы.

### 7.6.2. Датчики вращения на эффекте Виганда

Ниже приводятся некоторые примеры, которые дают представление о широкой области применения датчика. Рисунок 7.13, а поясняет принципиальную схему восприятия вращательного движения. Проволока с обмоткой вокруг нее фиксируется, тогда как магнит насыщения и магнит гашения располагаются на вращающемся барабане, изготовленном из алюминия. Для датчика длиной 40 мм, установленного в промежутке между проволокой и вращающимся барабаном от 1 до 2 мм, используются два стержневых магнита с индукцией 80 и 30 мТл соответственно,

для генерации сигнала с амплитудой около 2 В при достаточной временной стабильности. На рис. 7.13, б приведен вид выходного сигнала датчика.



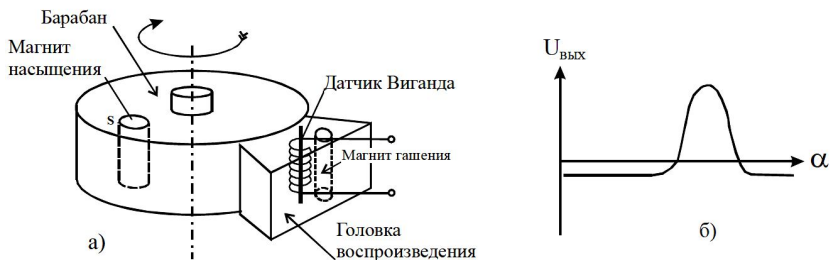
**Рис. 7.13.** Использование датчика Виганда с одной обмоткой:

*а* – в качестве датчика угла вращения; *б* – вид выходного сигнала

Для того чтобы исключить установку двух подвижных магнитов, магнит гашения (30 мТл) можно расположить очень близко к датчику (рис. 7.14, *а*). При фиксированном магните гашения в качестве подвижного магнита насыщения должен использоваться более «сильный» магнит, чтобы компенсировать поле магнита гашения. В этом заключается достоинство датчика, который всегда «видит» поле любого магнита, и, следовательно, менее восприимчив к внешним полям.

Если требуется получить более одного импульса за один оборот, можно воспользоваться другой конструкцией. Проволоки Виганда равномерно распределяют вокруг барабана из цветного металла и ориентируют параллельно его оси. Проволоки получают подвижными и отделенными от обмотки датчика, которая вместе с двумя магнитами располагается в головке воспроизведения. По сравнению с датчиком с вращающимися магнитами в этом случае изменяются параметры проволоки и магнита. Вследствие меньшего диаметра проволоки угловое разрешение этого датчика угла вращения может быть значительно увеличено. Стержневые магниты и обмотка датчика между ними ориентированы параллельно проволокам. Магниты имеют противоположную полярность, и их индукция соответственно равняется  $\pm 60$  мТл.





**Рис. 7.14.** Использование датчика Виганда с одной обмоткой и постоянным магнитом:

*a* – в качестве датчика угла вращения; *б* – вид выходного сигнала

Датчики вращательного движения можно легко модифицировать в датчики линейного движения. Рассматривая описанные варианты датчиков вращательного движения в интересующем нас аспекте получения датчика линейного движения, проще всего вставить проволоки между полосками пластиковой или алюминиевой фольги. Эти полоски крепятся к поверхностям с помощью клея, зажимных приспособлений или прессованием, соблюдая линии изгиба соответствующего радиуса. Подобные датчики используют совместно с одно- и двухнаправленными головками воспроизведения с разрешением 2 мм. Производство таких датчиков экономично.

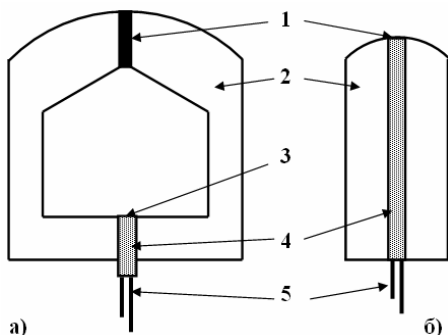
### 7.7. МАГНИТОЭЛЕКТРОННЫЕ ВОСПРОИЗВОДЯЩИЕ И СЧИТЫВАЮЩИЕ ГОЛОВКИ

В связи с заметными успехами в технологии изготовления современных высокочувствительных преобразователей магнитного поля все большее распространение получают магнитоэлектронные устройства, предназначенные для воспроизведения информации, записываемой на специальные носители. К таким носителям относятся: магнитные ленты и магнитные карты, штрихкоды, а также банкноты, помеченные магнитными индикаторами (магнитными красками, магнитными нитями и т. д.). Принцип действия указанных устройств аналогичен традиционным индукционным воспроизводящим головкам, используемым для воспроизведения магнитной записи звука и другой информации. Воспроизводящая головка преобразует изменение магнитного потока

движущегося носителя информации в электрический сигнал. Принцип действия индукционной воспроизводящей магнитной головки понятен из рис. 2.3 главы 2. Магнитопровод воспроизводящей индукционной магнитной головки (ВИМГ), как правило, образован двумя симметричными полукольцами с обмотками, между которыми расположены два зазора: рабочий и дополнительный. В процессе воспроизведения внешний магнитный поток носителя информации (например, магнитной ленты или магнитной карты) замыкается через сердечник воспроизводящей головки, имеющей малое магнитное сопротивление по сравнению с воздухом, и, пронизывая обмотку головки, индуцирует в ней ЭДС. Эта ЭДС изменяется пропорционально скорости изменения магнитного потока в носителе информации около рабочего зазора. Таким образом, при воспроизведении головка преобразует энергию движения магнитной фонограммы в электрическую энергию. Основные параметры ВИМГ определяются шириной рабочего зазора, т. е. промежутком между торцами магнитопровода, заполненного диамагнитным материалом. Для ВИМГ этот параметр является главным, поскольку он определяет вносимые рабочим зазором ( $SP$ ) частотные искажения, зависящие от длины волны. При уменьшении длины волны записи и равной ширине так называемого эффективного  $D_{эф}$  рабочего зазора, ЭДС снижается до нуля. В этом случае основная часть магнитного потока от носителя информации замыкается в рабочем зазоре, не попадая в сердечник головки ( $D_{эф}$  – эффективная ширина рабочего зазора, которая на 10–15 % превышает ширину рабочего зазора  $SP$ ). Другим основным параметром ВИМГ является отдача  $E$  – это ЭДС, индуцируемая в обмотке головки при воспроизведении записи с определенной намагниченностью и частотой воспроизводимого сигнала. Для индукционных головок величина рабочего зазора ( $SP$ ) лежит в пределах от 5 до 20 мкм. Отдача ( $E$ ) составляет от 0,4 до 6 мВ при воспроизведении измерительной ленты ЛИР I-38У.

Конструкции магнитоэлектронных воспроизводящих и считывающих головок имеют много общего с индукционными, но вместо обмотки в таких головках используются преобразователи магнитного поля. В качестве «измерителя» напряженности магнитного поля в рабочем зазоре магнитоэлектронных головок используют ПМП многих известных типов, например, магниторезисторы, элементы Холла, магнитодиоды и т. п.

**Магнитоэлектронные воспроизводящие головки.** Принцип действия магнитных головок, реализованных с применением элементов Холла, иллюстрируется на рис. 7.15.



**Рис. 7.15.** Конструкция звуковоспроизводящих головок, реализованных с применением элементов Холла:

*а* – с элементами Холла в дополнительном зазоре; *б* – с элементами Холла в рабочем зазоре; 1, 3 – рабочий зазор, 2 – магнитопровод, 4 – элемент Холла, 5 – вывод элемента Холла

Элемент Холла в звуковоспроизводящей головке может размещаться в дополнительном (рис. 7.15, *а*) или в рабочем зазоре (рис. 7.15, *б*). Конструктивно наиболее просто реализуется головка с элементами Холла в дополнительном зазоре. В этом случае через элементы Холла проходит только часть магнитного потока от носителя записи из-за рассеяния и ответвления через рабочий зазор. Поэтому по чувствительности такая головка уступает головке с элементами Холла, помещенной в рабочем зазоре. В то же время головка с элементами Холла в дополнительном зазоре может быть выполнена с более высокой разрешающей способностью, так как ее рабочий зазор определяется только толщиной немагнитной прокладки. Во второй конструкции рабочий зазор определяется толщиной элементов Холла, которые изготовить по традиционной технологии тонким довольно трудно. Однако современная технология уже позволяет создавать элементы Холла с толщиной порядка 30–50 мкм. Наилучшим материалом сердечника для головок с элементом Холла является феррит. При ферритовом сердечнике отпадает необходимость электрической изоляции контактов МЧЭ от сердечника (магнитопровода), поскольку феррит имеет весьма высокое удельное электрическое сопротивление. В головках с металлическим магнитопроводом элемент Холла и его контакты изолируются от сердечника тонкой прокладкой. К сожалению, ферритовые сердечники обладают неудовлетворительными механическими свойствами, затрудняющими изготовление головок с хорошим качеством рабочего зазора.

ра. Частотная характеристика головок с элементами Холла в области высоких частот зависит от тех же факторов, которые определяют характеристику индукционной воспроизводящей головки. Характеристика ЭДС самого элемента Холла практически равномерна до частот порядка нескольких МГц. Наибольший интерес представляет использование таких головок для воспроизведения низких частот, практически от 0 Гц. Отдача головок с элементами Холла на основе InSb составляет примерно 0,8 мВ, но их параметры существенно зависят от температуры. ( $\Delta E$  составляет примерно 2 % на 1 °С). Головки с элементами Холла на основе InAs имеют отдачу в 3–3,5 раза меньше, но она в меньшей степени зависит от температуры ( $\Delta E$  составляет порядка 0,1 % на 1 °С). Воспроизводящие головки на магнитодиодах намного чувствительнее головок на магниторезисторах.

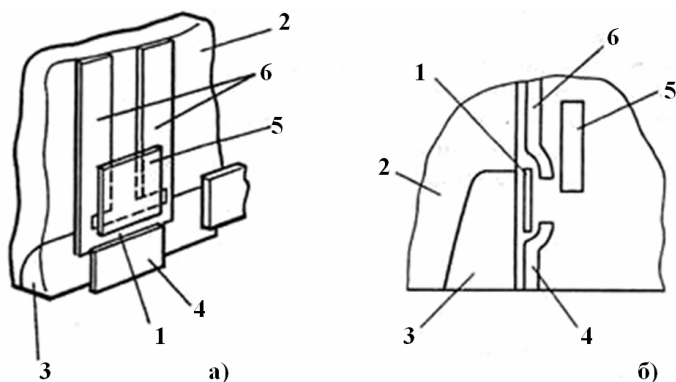
В последние годы все более широкое распространение получают так называемые **тонкопленочные** воспроизводящие и записывающие головки. Обмотки, магнитопроводы, смещающие магниты, магниточувствительные и другие элементы таких головок формируются методами тонкопленочной технологии, используемой для изготовления интегральных схем. Большинство таких головок универсальны и служат для записи и воспроизведения информации с магнитных носителей с высокой плотностью упаковки. Такая головка представляет собой сложное интегральное магнитоэлектронное устройство. Записывающая обмотка такой головки представляет собой печатную структуру из медной пленки. А в качестве воспроизводящей «обмотки» используется тонкопленочный магниторезистор.

#### **7.8. ТОНКОПЛЕНОЧНАЯ МАГНИТНАЯ ГОЛОВКА С МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ**

Эксперимент показал, что средства перпендикулярной записи, включающие тонкопленочную магнитную головку для записи информации и магниторезистивный элемент для воспроизведения, позволяют получить при относительно большой информационной емкости и достаточно высокой скорости передачи данных неплохие характеристики записи и воспроизведения. Структура тонкопленочной магнитной головки с магниторезистивным элементом проста (рис. 7.16). Магнитный поток записанного сигнала

замыкается через фронтальную часть магнитопровода 4, магниторезистивный элемент 1, верхнюю часть магнитопровода 5 и ферритовую вставку 3 подложки 2. Изменение электрического сопротивления магниторезистивного элемента регистрируется при наличии задающего электрического тока, протекающего по электропроводящим полосам 6 к магниторезистивному элементу 1.

Магнитная головка с магниторезистивным элементом в сочетании с тонкопленочной магнитной головкой для записи удобна при создании многодорожечного компактного блока головок, изготовление которого основано на тонкопленочной технологии. Результаты испытаний 12-дорожечного блока показали, что напряжение сигнала воспроизведения тонкопленочной магнитной головки с магниторезистивным элементом зависит от его размеров.



**Рис. 7.16.** Общий вид тонкопленочной магнитной головки с магниторезистивным элементом (а) и ее сечение (б):

1 – магниторезистивный элемент; 2 – подложка; 3 – ферритовая вставка; 4 – фронтальная часть магнитопровода; 5 – верхняя часть магнитопровода; 6 – электропроводящие полосы

Многослойную магнитную головку для перпендикулярной записи можно компоновать в выемке, выполненной в нижней части плавающего элемента. Дополнительные полюсы в форме кольца позволяют улучшить аэродинамические свойства магнитной головки.

Для улучшения амплитудно-частотной характеристики магнитной головки при записи с перпендикулярным намагничиванием используют магнитопровод с многослойной структурой, со-

стоящей из магнитных кобальт-цирконий-ниобиевых слоев, разделенных тонкопленочными прослойками из двуокиси кремния.

В одной из конструкций магнитной головки для записи с перпендикулярным намагничиванием имеется два основных полюса: один содержит толстый магнитный элемент и служит для записи информации, а другой – тонкий магнитный элемент – предназначен для воспроизведения. Оба элемента изготавливаются из магнитомягкого материала, причем толщина тонкого элемента 0,2 мкм, а толстого 1 мкм. Основные полюсы сопряжены с пьезоэлектрическими преобразователями, при подаче напряжения на которые улучшаются их контактные свойства.

При формировании рабочего элемента основного полюса из аморфного материала, чтобы предотвратить ухудшение его магнитных свойств при нагревании и прессовании, а также для получения константы магнитострикции в заданных пределах предлагается использовать легирующие элементы: титан, приводящий к положительной константе магнитострикции, а также ниобий, тантал и другие, приводящие к отрицательной. Сформированный таким образом основной полюс обладает высокими магнитными индукцией насыщения и проницаемостью.

#### **7.9. ТОНКОПЛЕНОЧНАЯ МАГНИТНАЯ ГОЛОВКА С МНОГОВИТКОВОЙ ОБМОТКОЙ**

Лучшие характеристики записи-воспроизведения получены с помощью тонкопленочной магнитной головки с многовитковой обмоткой. С помощью такой головки на магнитном носителе с двухслойным кобальт-хромовым покрытием достигнута линейная плотность записи около 4 000 пер./мм. Разновидности многовитковых тонкопленочных магнитных головок представлены на рис. 7.17. Данные головки изготавливаются на основе тонкопленочной технологии.

Многовитковая тонкопленочная магнитная головка состоит из основного полюса 1 и пермаллового элемента толщиной 6 мкм, расположенного на керамической подложке 2, спиральной обмотки 3 и тонкопленочного пермаллового ярма 4 толщиной 10 мкм, находящегося в контакте с основным полюсом в центре обмотки. Основной полюс со стороны рабочей поверхности имеет заостренную форму. В тонкопленочной головке, изображенной

на рис. 7.17, б, пермаллоевое ярмо охватывает обе части обмотки; его ближайший к носителю край находится на расстоянии  $h_1 = 20$  мкм от рабочей поверхности головки. Высота тонкого участка основного тонкопленочного наконечника  $h = 2$  мкм, ширина дорожки  $w = 30$  мкм, толщина  $p$  тонкопленочного полюсного наконечника колебалась в пределах 0,3–3,2 мкм.

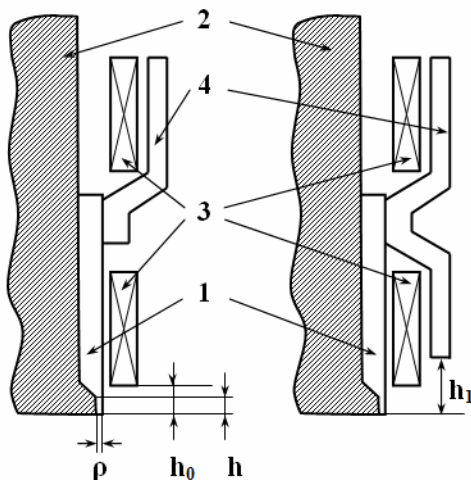
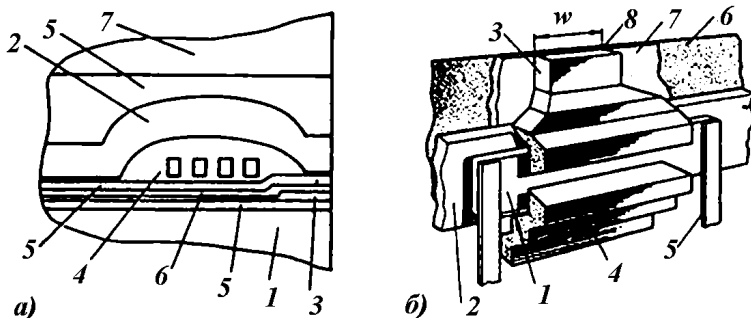


Рис. 7.17. Многовитковая тонкопленочная магнитная головка

### 7.10. КОМБИНИРОВАННЫЕ МАГНИТНЫЕ ГОЛОВКИ

В последнее время лучшие результаты записи и воспроизведения достигнуты с помощью комбинированных магнитных головок, содержащих элементы тонкопленочной магнитной и магниторезистивной головок. В таких головках сочетаются лучшие свойства записи с помощью тонкопленочной магнитной головки с многовитковой обмоткой и превосходные качества магниторезистивной головки, позволяющей получить высокий уровень сигнала воспроизведения. Одна из модификаций комбинированных головок изображена на рис. 7.18. Она представляет собой комбинацию многовитковой тонкопленочной магнитной головки и магниторезистивной головки.



**Рис. 7.18.** *а* – комбинированная магнитная головка записи и воспроизведения: 1 – ферритовая подложка; 2 – верхний тонкопленочный магнитопровод; 3 – магниторезистивный элемент; 4 – электропроводящая обмотка; 5 – диэлектрический слой; 6 – электропроводящий слой; 7 – керамическая пластина; *б* – магнитная головка с магниторезистивным элементом: 1 – магниторезистивный элемент; 2 – смещающая полоса; 3 – полюсный наконечник потоковедущего магнитопровода; 4 – замыкающая часть магнитопровода; 5 – электропроводящая полоса; 6 – ферритовая подложка; 7 – диэлектрический слой рабочего зазора; 8 – рабочий зазор

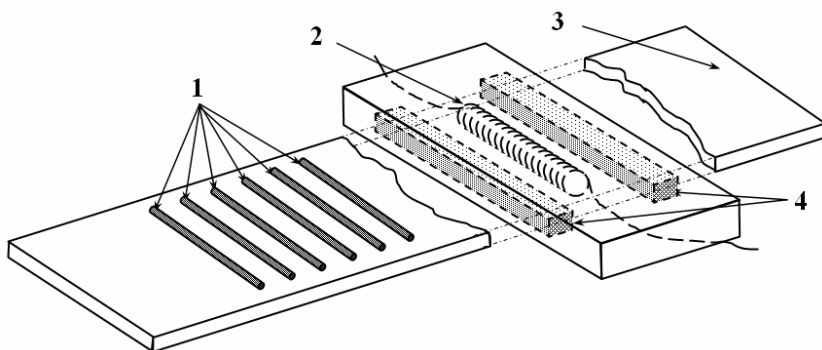
Магнитная воспроизводящая головка с магниторезистивным элементом представлена на рис. 7.18, *б*. Рабочий зазор в такой головке образуется между массивным ферритовым и тонкопленочным полюсными наконечниками. Ширина дорожки определяется шириной тонкопленочного полюсного наконечника. Магниторезистивный элемент находится в разрыве тонкопленочного магнитопровода. Параллельно магниторезистивному элементу расположена смещающая полоса. Преимущества этой магнитной головки – в простоте ее конструкции по сравнению с многвитковой воспроизводящей головкой.

### 7.11. СЧИТЫВАЮЩЕЕ КАРТОЧНОЕ УСТРОЙСТВО, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЕ ЭФФЕКТ ВИГАНДА

В последнее время широкое распространение получили системы записи, хранения и считывания информации, основанные на использовании эффекта Виганда. В общем виде носитель информации, использующий указанный эффект, представляет собой карточку стандартного размера, изготовленную из специальной пластмассы. В карточку впрессованы один или два ряда проволок



Виганда точно установленного размера. Эти проволоки, в зависимости от их «магнитного состояния», представляют 0 или 1. На такую карточку может быть занесена информация с максимальным объемом 56 бит. Считывающая головка в данном случае представляет собой устройство, содержащее обмотку и пару постоянных магнитов. Пример такого устройства приведен на рис. 7.19.



**Рис. 7.19.** Считывающее устройство, использующее эффект Виганда:  
 1 – проволоки Виганда, 2 – обмотка, 3 – основа носителя информации,  
 4 – магниты

Перед тем как носитель (карта) поступит на устройство считывания, все проволоки должны быть насыщены в одном и том же направлении магнитного насыщения. Следовательно, информация станет полностью независимой от воздействия внешних полей, которые могут изменять магнитное состояние проволок перед считыванием. Информация основана только на геометрической конфигурации проволок и поэтому не изменяется.

Вследствие остаточной намагниченности проволока Виганда остается в намагниченном состоянии до тех пор, пока поле возбуждения, достаточно сильное для того, чтобы преодолеть коэрцитивную силу проволоки, не переключит ее в противоположное состояние. Это свойство может быть использовано для хранения информации так, как это происходит в хорошо известной памяти на магнитных сердечниках.

Способность датчика к хранению информации остается стабильной до тех пор, пока она не будет уменьшена в результате воздействия сильных внешних полей. Так как хранение информации не требует какой-либо электрической энергии, ключи на

основе эффекта Виганда очень удобны для ввода данных с циклическим опросом. Вследствие запоминания данных скорость опроса может быть значительно снижена. В случае отключения питания подключенной схемы опроса ни одно действие ключа не будет потеряно.

Способность проволоки Виганда хранить данные очень успешно используется в считываемых идентификационных картах. Они состоят из двух рядов коротких кусков проволоки, представляющих «0» и «1» (максимальная емкость 56 бит), которые вставлены в пластиковые карты точно установленного размера. Перед тем, как карта поступит на устройство считывания, все проволоки должны быть насыщены в одном и том же направлении магнитного насыщения. Следовательно, информация станет полностью независимой от воздействия внешних полей, которые могут изменять магнитное состояние проволок перед считыванием. Информация основана только на геометрической конфигурации проволок и поэтому не изменяется.

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бараночников М. Л.* Микромагнитоэлектроника. Т. 1 / М. Л. Бараночников. – М. : ДМК Пресс, 2001. – 544 с.
2. *Гаврилюк А. А.* Магнитные свойства твердых тел / А. А. Гаврилюк, А. В. Гаврилюк, А. В. Семиров. – Иркутск : ИГПУ, 2000. – 135 с.
3. *Золотухин И. В.* Новые направления физического материаловедения / И. В. Золотухин, Ю. Е. Калинин, О. В. Стогней. – Воронеж : Изд-во ВГУ, 2000. – 360 с.
4. *Кекало И. Б.* Нанокристаллические магнитно-мягкие материалы / И. Б. Кекало. – М. : Изд-во МГИСиС, 2000. – 228 с.
5. Магнетизм и магнитные материалы : терминолог. справ. / под ред. Ф. В. Лисовского и Л. И. Антонова. – М. : Вагриус, 1997. – 240 с.
6. Магнетизм наносистем на основе редкоземельных и 3d-переходных металлов / Н. В. Баранов [и др.]. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2008. – 278 с.
7. *Малоземов А.* Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами / А. Малоземов, Дж. Слонзуски. – М. : Мир, 1982. – 382 с.
8. *Мишин Д. Д.* Магнитные материалы / Д. Д. Мишин. – М. : Высш. шк., 1991. – 384 с.
9. *Тикадзуми С.* Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения / С. Тикадзуми. – М. : Мир, 1987. – 420 с.
10. Физика, технологии и техника магнитных материалов : учеб. пособие / под общ. ред. В. О. Васьковского. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2010. – 248 с.
11. *Фролов Г. И.* Пленочные носители для устройств памяти со сверхплотной магнитной записью // ЖТФ. – 2001. – Т. 71, вып. 12. – С. 50–57.
12. Элементы и устройства на цилиндрических магнитных доменах / А. М. Балбашов [и др.]. – М. : Радио и связь, 1987. – 488 с.
13. Magnetoelastic resonance sensors: a critical review / C. A. Grimes, C. S. Mungle, K. Zeng, M. K. Jain, W. R. Dreschel, M. Paulose, K. G. Ong // Sensors. – 2002. – Vol. 2, N 7. – P. 294–313. [Пер.: Датчики и системы. 2003. № 3. С. 56–66].
14. *O'Handley R. C.* Modern Magnetic Materials. Principles and Applications / R. C. O'Handley. – N. Y. : John Wiley & Sons, 2000. – 347 p.

*Учебное издание*

## **МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ**

**Семенов** Андрей Леонидович,  
**Гаврилюк** Алексей Александрович,  
**Душутин** Николай Константинович,  
**Яськоевич** Юрий Владимирович

ISBN 978-5-9624-0624-4

Подготовила к печати *Г. А. Борисова*

Темплан 2012 г. Поз. 63

Подписано в печать 13.10.2012. Формат 60×90 1/16  
Уч.-изд. л. 6,0. Усл. печ. л. 9,2. Тираж 100 экз.  
Заказ 98

Издательство ИГУ  
664003, Иркутск, бульвар Гагарина, 36  
тел. (3952) 24-14-36