

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

538.22

РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В последние 10—15 лет были проведены исследования магнитных свойств редкоземельных (РЗ) металлов, сплавов, ферритов и других соединений. Были получены обширные данные по спонтанной намагниченности, магнитной анизотропии, магнитострикции, магнитно-оптическим явлениям, фазовым магнитным переходам и др. Показано, что РЗ магнитоупорядоченные вещества (ферро- и ферримагнетики) обладают магнитными свойствами, которые во многом отличны от свойств подобных веществ, синтезируемых на основе группы железа. Например, некоторые из РЗ металлов и их соединений имеют рекордно высокие величины магнитной анизотропии и магнитострикции¹, большие величины эффекта фарадеевского вращения², магнетокалорического эффекта³, своеобразные температурные зависимости намагниченности и фазовые магнитные переходы⁴. В этих веществах возможно генерировать очень маленькие цилиндрические или «пузырьковые» домены, которые обладают большой подвижностью⁴. РЗ ферро- и ферримагнетики имеют другие интересные особенности в магнитном поведении.

Продолжительное время магнетизм РЗ веществ был объектом чисто научного интереса, и только в самое последнее время, после получения РЗ элементов в достаточно больших количествах и значительного удешевления их, возник интерес к использованию уникальных магнитных свойств РЗ веществ в технике. В настоящее время уже имеются примеры практического применения РЗ материалов (или предложения по их применению) в радиоэлектронике, электротехнике, автоматике и вычислительной технике. В настоящей статье приводятся некоторые из этих примеров.

1. БОЛЬШИЕ НАМАГНИЧЕННОСТИ НАСЫЩЕНИЯ РЗ МЕТАЛЛОВ И ИХ СПЛАВОВ

Намагниченности насыщения металлов Tb, Dy, Ho, Er при 0° K существенно больше, чем у Fe и Ni. Например, для Dy при 0° K $I_0 \approx 3000$ гс, тогда как для Fe $I_0 = 1750$ гс. Большая величина I_0 РЗ металлов обусловлена тем, что в них в намагничивании участвуют не только спиновые, но и орбитальные магнитные моменты (в металлах группы железа орбитальные моменты как бы выключены из намагничивания вследствие эффекта «замораживания» их кристаллическим полем). Однако использование РЗ металлов как материалов с большим магнитным насыщением практически невозможно из-за наличия огромной магнитной анизотропии; требуются огромные магнитные поля для намагничивания поликристаллического диспрозия, тербия и др. до насыщения, что на практике неприемлемо. Есть два пути уменьшения поля насыщения.

Первый — это сплавление металла Er, имеющего отрицательную константу магнитной анизотропии, с металлами Tb, Dy, Ho, обладающими положительными константами анизотропии. При таком сплавлении константы анизотропии и соответственно поля насыщения уменьшаются при сохранении достаточно высоких намагниченностей насыщения. Удалось найти оптимальные составы этих сплавов, как двойных, так и тройных, позволяющие получать магнитные индукции насыщения до 35 кэс при полях намагничивания ~ 50 кэ⁵.

Второй путь уменьшения поля насыщения заключается в измельчении металлов Tb, Dy и др. в порошки и прессовании этих порошков в магнитном поле. При такой технологии мелкие кристаллиты поворачиваются осями легкого намагничивания вдоль приложенного поля, в результате чего возникает текстура легкого намагничивания и поле насыщения сильно снижается (создание текстуры с многодоменными

частицами). Поликристаллический образец без текстуры имеет поле насыщения более 300 кэ, после применения указанной технологии это поле снижается до 30—40 кэ.

PЗ металлы и сплавы с высоким магнитным насыщением уже используются в качестве сердечников сверхпроводящих электромагнитов^{6,13} и в других приборах, работающих при низких температурах.

2. СПЛАВЫ ТИПА SmCo_5 — ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ ВЫСОКОЙ МАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ

Интерметаллические соединения RCO_5 , где R — PЗ элемент цериевой подгруппы: Ce, Pr, Nd, Sm, имеют ферримагнитную структуру, т. е. в них указанные PЗ атомы образуют одну магнитную подрешетку, а атомы Co — другую, и между этими подрешетками существует антиферромагнитная связь. Для ферримагнетиков, вообще говоря, свойственна низкая и даже нулевая (в точке компенсации) намагниченность. Однако в сплавах RCO_5 имеет место другая ситуация, приводящая к повышенной намагниченности. Дело в том, что в атомах PЗ элементов цериевой подгруппы Ce, Pr, Nd, Sm, согласно правилу Хунда, в электронном 4f-слое спинные (S) и орбитальные (L) моменты ориентированы противоположно ($J = L - S$), при этом $L > S$.

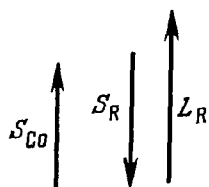


Рис. 1. Схема ориентации спинных и орбитальных моментов в сплавах RCO_5 .

В кристалле RCO_5 спинные моменты S_R и S_{Co} ориентируются антипараллельно, так как между ними имеется антиферромагнитная связь, но орбитальный момент PЗ иона занимает положение, параллельное спиновому моменту S_{Co} (рис. 1). Это приводит к повышенной величине намагниченности ферримагнитного сплава RCO_5 . Естественно, что сплавы RCO_5 будут обладать и повышенной остаточной намагниченностью.

Сплавы типа RCO_5 обладают очень большой магнитной анизотропией. Как показали исследования, она на 1—2 порядка больше магнитной анизотропии Fe и Co ($\sim 10^8$ эрг/см³); механизм возникновения такой огромной анизотропии еще не выяснен. Вследствие этого сплавы RCO_5 при соответствующей технологической обработке (прессовании порошков), которая обеспечивает получение однодоменных частиц, могут приобретать высокую коэрцитивную силу (H_c), достигающую огромных величин $\sim 10^4$ э⁷. Благодаря большой остаточной намагниченности и высокой H_c сплавы RCO_5 позволяют создавать постоянные магниты, по своим параметрам намного превосходящие магниты из ранее найденных материалов. Недавно было показано, что для сплава SmCo_5 магнитная энергия размагничивания достигает рекордной величины: $(BH)_{\max} \approx (20-23) \cdot 10^6$ эс·э⁷. Подобные материалы открывают большие возможности сделать «скачок» в создании миниатюрных источников постоянного магнитного поля. В ближайшем будущем сплавы типа RCO_5 займут ведущее место среди материалов, из которых будут изготавливаться весьма сильные и компактные магниты для использования в электротехнике, радиотехнике и автоматике (например, для создания миниатюрных электромоторов, магнитных элементов вакуумных приборов — ламп с бегущей волной, магнетронов, магнитофокусирующих систем и др.). В таблице можно проследить историю материалов для постоянных магнитов. Видно, что сплав SmCo_5 имеет явные преимущества перед остальными материалами.

Прогресс в получении материалов для постоянных магнитов

Год	Материал	H_c , э	B_r , эс	$(BH)_{\max}$ в оптималь- ной точке кривой раз- магничива- ния, 10^6 эс·э
1880	Углеродистая сталь	50	10000	0,26
1917	Со-сталь	240	9200	0,9
1933	Сплав Fe—Ni—Al	480	6100	1,05
1952	Бариевый тгексаферрит	1800	2000	0,9
1958	Сплав Pt—Co	4300	6450	9,5
1968	SmCo_5	9500	9000	20,0

Дальнейшее улучшение материалов для постоянных магнитов требует лучшего понимания физики намагничивания ферримагнитных систем RCO_5 , а также изучения магнитных свойств различных смешанных систем, например $(\text{Sm}_{1-x}\text{Pr}_x)\text{Co}$ ¹⁴. Подсчитано, что для этой системы сплавов теоретический предел величины $(BH)_{\max}$ составляет $30 \cdot 10^6$ эс·э.

3. РЗ ФЕРРИТЫ-ГРАНАТЫ И ОРТОФЕРРИТЫ — МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ

Для дальнейшего развития электронных вычислительных машин (ЭВМ) важно создать магнитные запоминающие устройства (и логики) большого быстродействия и емкости памяти. Проблема состоит в том, чтобы в малом объеме магнетика хранить и перерабатывать как можно больше информации. В последние годы предложены принципиально новые типы магнитных запоминающих устройств, основанных на использовании магнитных свойств РЗ ферритов-гранатов ($R_3Fe_5O_{12}$) и ортоферритов ($RFeO_3$). При этом здесь имеются два направления. Первое направление связано с использованием аномалий температурной зависимости магнитных характеристик РЗ ферритов-гранатов и ортоферритов. Второе направление связано с использованием свойств так называемых «цилиндрических» или «пузырьковых» доменов, которые могут возникать при определенных условиях в этих материалах. Рассмотрим первое направление.

а) РЗ ортоферриты и ферриты-гранаты обладают резкой температурной зависимостью магнитных свойств и обилием различных фазовых магнитных переходов¹. Возникновение таких свойств связано с физикой некомпенсированного антиферромагнетизма и существованием неколлинеарности магнитных моментов подрешеток, создаваемых конкуренцией подрешеточных обменных взаимодействий, энергии магнитной и магнитоупругой анизотропии и внешнего магнитного поля. Исследования

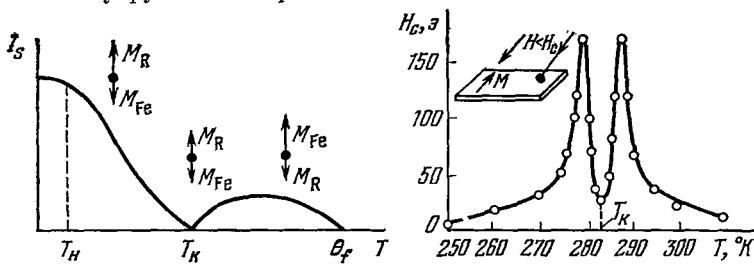


Рис. 2. Схема магнитной записи информации высокой плотности с использованием аномалии коэрцитивной силы вблизи точки компенсации феррита-граната гадолиния.

установили, что в РЗ ортоферритах имеется несколько магнитных фазовых переходов: температура магнитного упорядочения ионов железа (при $\sim 600^\circ \text{K}$), температура упорядочения редкоземельных ионов ($4-20^\circ \text{K}$), так называемый спин-переориентационный переход, при котором система упорядоченных спинов вращается относительно определенной кристаллической оси, и точка магнитной компенсации, при которой две подрешетки с различной зависимостью спонтанной намагниченности уравниваются (при наличии внешнего магнитного поля точка компенсации является магнитным фазовым переходом).

Для РЗ ферритов-гранатов также характерно наличие аналогичных переходов (кроме спин-переориентационного перехода).

В последнее время внимание практиков привлекает явление аномальной температурной зависимости коэрцитивной силы (H_c) в районе точки компенсации (T_K) для создания магнитно-оптических запоминающих элементов высокой емкости. Эти аномалии H_c в РЗ ферритах-гранатах (и ортоферритах) были впервые наблюдаемы в работах^{8,9}.

Магнитную запись здесь возможно осуществить следующим образом. Запись производится изменением магнитного состояния (перемагничивания) очень малых участков пластинки РЗ феррита-граната с помощью локализованного нагрева лазерным (или электронным) лучом при температурах вблизи T_K и в присутствии магнитного поля определенного направления. Величина поля выбирается несколько меньше H_c , и поэтому без разогрева перемагничивания участка пластинки не происходит. Путем локального воздействия лазерного луча (рис. 2) величина H_c резко снижается, и поле H оказывается достаточным для перемагничивания участка, т. е. для записи знака намагниченности. Световой луч лазера может быть сфокусирован в пятно, диаметр которого, ограниченный дифракцией, приблизительно равен длине волны лазерного луча, т. е. порядка микрона и десятых долей микрона. Фирме «I.B.M.» в США удалось¹⁰ осуществить запись на пленке феррита-граната гадолиния $Gd_3Fe_5O_{12}$ с плотностью $1,5 \cdot 10^6$ двоичных знаков на 1 см^2 . Скорость подобной термомагнитной записи определяется временем оптической накачки (время поглощения фотона) и временем перехода оптического возбуждения в тепло (оно много меньше тепловой релак-

сации — диффузионного процесса). Вблизи температуры T_k , вследствие резкого спада H_c , требуются малые изменения ΔT для переключения намагничивания. При такой записи необходимо применять ферриты в виде тонких пластинок и пленок, так как теплоемкость их мала.

Для осуществления магнитной записи, основанной на описанном принципе, могут быть использованы аномалии температурной зависимости и при других переходах, наблюдаемых в РЗ ферритах, например аномалии H_c вблизи температур упорядочения РЗ ионов в гранатах и ортоферритах. Можно также для этой цели использовать аномалии H_c и петли гистерезиса, наблюдаемые в РЗ ортоферритах вблизи температуры спиновой переориентации¹¹. Пластины и пленки РЗ ферритов-гранатов и ортоферритов являются прозрачными для видимого и инфракрасного света. Поэтому может быть осуществлено считывание информации без разрушения записи. Для считывания информации пластинка РЗ феррита освещается лазерным лучом

меньшей интенсивности. Поворот плоскости поляризации прошедшего через пластинку света фиксируется как наличие информации.

Второе направление связано с использованием свойств доменов в РЗ ферритах.

б) Функцию запоминания осуществляют «цилиндрические» или «пузырьковые» домены. Недавно было показано⁴, что условия возникновения «пузырьковой» доменной структуры особенно благоприятны в тонких пластинках кристаллов РЗ

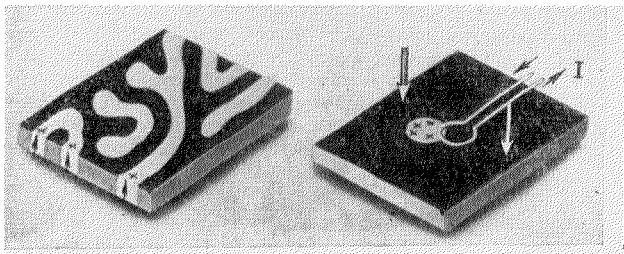


Рис. 3. Схема образования «пузырьковых» доменов в редкоземельных ортоферритах.

ортоферритов и «одноосных» ферритов-гранатов (иттриевые ферриты-гранаты с небольшими добавками РЗ элементов, искажающих кубическую структуру граната). Условием возникновения таких доменов является $H_a > 4\pi I_s$, т. е. поле магнитной анизотропии H_a в феррите должно быть больше намагниченности насыщения. В этом случае вектор намагниченности будет перпендикулярен пластинке. При приложении определенной величины внешнего магнитного поля полосовые домены как бы замыкаются сами на себя (рис. 3) и в конце концов превращаются в цилиндрики или пузырьки очень малого радиуса (порядка нескольких микрон) с намагниченностями, перпендикулярными пластинке. Эти домены при наложении локальных смещающих магнитных полей, создаваемых с помощью, например, очень маленьких обмоток, прикладываемых к пластинке (рис. 3), могут в этой пластинке перемагничиваться и двигаться. Для управления доменами могут быть использованы специальные печатные схемы, наносимые на поверхность пластинки. Таким образом могут создаваться очень компактные элементы памяти и логические элементы с магнитостатическим управлением. Кроме того, было показано, что величина цилиндрического домена является функцией смещающего локального поля и энергии доменной границы, что также может быть использовано для создания компактной магнитной записи информации. Элементы памяти и логики, использующие свойства маленьких и подвижных цилиндрических доменов, обладают большой емкостью памяти, помехоустойчивостью и быстродействием. Условия возникновения цилиндрических доменов существуют и в других магнитоупорядоченных веществах, например в гексагональных ферритах и Со-сплавах. Однако преимущество РЗ ортоферритов и ферритов-гранатов состоит в том, что тонкие пластинки их прозрачны для света, что может быть использовано для неразрушающего механизма считывания информации.

РЗ ортоферриты и ферриты-гранаты перспективны также для создания эффективных голографических устройств, в которых та или иная картина записывается с помощью подвижных цилиндрических доменов на тонкой пластинке кристалла этих материалов, а затем проецируется на экран лазерным пучком, проходящим сквозь пластинку. Об актуальности использования РЗ ферритов, обладающих цилиндрической доменной структурой, говорит то, что их обсуждению было посвящено не менее половины всех докладов на конференции «Интермаг-71» в Денвере (США, 1971 г.).

* *

Отметим, что благодаря прозрачности РЗ ортоферритов и ферритов-гранатов их можно с успехом использовать для создания модуляторов и оптических вентилях в лазерной технике. Феррит-гранат $Y_3Fe_5O_{12}$ с небольшими добавками РЗ ионов позволяет получать когерентное излучение большой мощности¹². Лазер на кристалле

иттриевого граната, сохраняя все достоинства лазеров на немагнитных кристаллах, обладает тем важным преимуществом, что магнитоупорядоченная природа этого материала дает возможность управлять частотой и поляризацией луча с помощью магнитного поля.

К. П. Белов

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. К. П. Белов, М. А. Белянчикова, Р. Э. Левитин, С. А. Никитин, Редкоземельные ферро- и антиферромагнетики, М., «Наука», 1965.
2. Г. С. Криничик, М. В. Четкин, УФН 98, 3 (1969); В. В. Еременко, А. И. Беляева, УФН 98, 27 (1969).
3. К. П. Белов, Е. В. Талалаева, Л. А. Черникова, В. И. Ивановский, Письма ЖЭТФ 7, 423 (1968).
4. А. Н. Вобеск, Bell. Syst. Techn. J. 46, 1901 (1967).
5. К. П. Белов, О. П. Елютин, С. А. Никитин, Г. В. Пшеченкова, В. И. Соколов, В. П. Таратынов, Авторское свидетельство № 276424 (4.V 1970 г.).
6. И. А. Баранов, Ю. Ф. Бычков, В. Р. Карасик, Г. В. Курганов, Электронная техника, сер. 1, вып. 10, 104 (1967).
7. Dilip K. Das, IEEE Trans. Magnet. MAG-5 (3), 214 (1969).
8. К. П. Белов, А. В. Педько, ЖЭТФ 39, 961 (1960).
9. К. П. Белов, А. М. Кадомцева, Т. Л. Овчинникова, В. А. Тимофеева, ФММ 19, 778 (1965).
10. J. T. Chang, J. F. Dillon, V. F. Gianola, J. Appl. Phys. 36, 1110 (1965).
11. Б. П. Горанский, А. К. Звездин, Авторское свидетельство № 267119 (13.I 1970 г.).
12. L. E. Johnson, J. F. Remelika, J. F. Dillon, Phys. Lett. 21, 27 (1966).
13. Б. Г. Лазарев, Л. С. Лазарева, В. Р. Толик, С. И. Горидов, Тезисы Всесоюзной конференции по магнетизму, Красноярск, ИФ СО АН СССР, 1971, стр. 18.
14. А. В. Дерягин, Я. С. Шур, Е. В. Щербакова, см.¹³, стр. 56.