*Сегодня: **

Лекция

Тема: МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

Содержание лекции:

1. Введение
2. Магнитная восприимчивость и относительная магнитная проницаемость вещества
3. Классификация магнетиков
4. Магнитный момент и момент количества движения электронов в атомах

продолжение на следующем слайде…

5. Ферромагнетизм
6. Эффект Холла

1. Введение

Все вещества в той или иной мере взаимодействуют с магнитным полем. У некоторых материалов магнитные свойства сохраняются и в отсутствие внешнего магнитного поля.

Намагничивание материалов происходит за счет токов, циркулирующих внутри атомов – вращения электронов и движения их в атоме. Поэтому намагничивание вещества следует описывать при помощи реальных атомных токов.

Ампер первый выдвинул гипотезу о том, что магнетизм вещества связан с циркуляцией атомных токов.

С точки зрения квантовой механики магнетизм вещества обусловлен собственными магнитными моментами электронов и ядер, связанными как бы с вращением заряженных частиц вокруг собственной оси собственными моментами количества движения электронов и ядер (спинами) и с орбитальным движением электронов вокруг ядер.

Легкие электроны двигаются намного быстрее тяжелых ядер, поэтому магнитные моменты электронов в тысячи раз больше ядерных.

В отсутствие внешнего магнитного поля магнитные моменты атомов вещества ориентированы обычно беспорядочно, так что создаваемые ими магнитные поля компенсируют друг друга.

При наложении внешнего магнитного поля атомы стремятся сориентироваться своими магнитными моментами $\mathbf{p}_m$ по направлению внешнего магнитного поля, и тогда компенсация магнитных моментов нарушается, тело приобретает магнитные свойства – намагничивается.

Большинство тел намагничивается очень слабо, и величина индукции магнитного поля в таких веществах B мало отличается от величины индукции магнитного поля в вакууме B_0.

Если магнитное поле слабо усиливается в веществе, то такое вещество называется

парамагнетиком $\frac{B}{B_0} > 1$ (Ce^{3+}, Ti^{3+}, Na, Li,),

если ослабевает, то это диамагнетик $\frac{B}{B_0} < 1$ (Bi, Cu, Ag, Au и др.).

Но есть вещества, обладающие сильными магнитными свойствами. Такие вещества называются ферромагнетиками (Fe, Co, Ni и пр.).

Эти вещества способны сохранять магнитные свойства и в отсутствие внешнего магнитного поля, представляя собой постоянные магниты.

Магнитные свойства вещества характеризуются средним магнитным моментом единицы объема – намагниченностью

$$\mathbf{M} = \frac{\sum\limits_{(V_m)} \mathbf{p}_m}{V}$$

здесь $\mathbf{p}_m$ – вектор магнитного момента атомов, заключенных в объеме V_m; V – величина всего объема, $V = \sum\limits_m V_m$.

Единицей измерения вектора **M** – намагниченности в СИ является ампер, деленный на метр:

$$[\mathbf{M}] = \frac{[p]}{[V]} = \frac{[\text{А} \cdot \text{м}^2]}{[\text{м}^3]} = \frac{[\text{А}]}{[\text{м}]}$$

2. Магнитная восприимчивость и относительная магнитная проницаемость вещества

Магнитная восприимчивость æ – безразмерная величина, характеризующая связь намагниченности вещества M с магнитным полем в веществе H. В статических магнитных полях магнитная восприимчивость равна отношению намагниченности вещества M к напряженности H намагничивающего поля:

- $$æ = \frac{M}{H}.$$
- Магнитная восприимчивость может быть как положительной, так и отрицательной.

Отрицательной магнитной восприимчивостью обладают диамагнетики, намагничивающиеся против поля.

Положительной – парамагнетики и ферромагнетики. Магнитная восприимчивость в диамагнетиках и парамагнетиках мала по абсолютной величине ($\sim 10^{-6} \div 10^{-4}$) и слабо зависит от H.

В ферромагнетиках æ может достигать величины $10^{3} \div 10^{5}$ и сильно, нелинейно изменяется с H.

Магнитная проницаемость вещества определяет реакцию среды на внешнее магнитное поле напряженностью *H*

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}$$

Поскольку **M** = æ **H**, то из определения следует

связь между магнитной восприимчивостью æ и относительной магнитной проницаемостью

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 B/(1+\text{æ})\mu_0} = 1 + \text{æ}$$

В свободном пространстве величина индукции магнитного поля связана с напряженностью магнитного поля соотношением

$$\mathbf{B}_0 = \mu_0 \mathbf{H}.$$

В веществе

$$\mathbf{B} = \mu\mu_0 \mathbf{H}.$$

3. Классификация магнетиков

Все известные вещества проявляют в магнитном поле магнитные свойства и являются магнетиками. Разнообразие типов магнетиков обусловлено различием магнитных свойств микрочастиц, образующих вещество, особенностями их взаимодействий, фазовыми состояниями вещества и другими факторами.

Магнетики можно разделить на три основные группы: диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.

Диамагнетизм (от греч. *dia* – расхождение и магнетизм) – свойство веществ намагничиваться навстречу приложенному магнитному полю.

В диамагнетиках индукция магнитного поля B становится слабее по сравнению с индукцией магнитного поля в свободном пространстве, но это ослабление очень незначительно. Диамагнетики намагничиваются против поля, и поэтому для них

$$\chi = \frac{B}{B_0} - 1 < 0$$

Для диамагнетиков æ очень мала, $|æ| \approx 10^{-5} \div 10^{-6}$. В расчете на один моль вещества имеем

Атомная (молярная) магнитная восприимчивость диамагнетиков

Вещество	$æ_{мол} \cdot 10^6$
He	−2,02
Cu	−5,41
Zn	−11,40
Ag	−21,50
Au	−29,59
Bi	−284,0
CO_2	−21

Парамагнетизм (от греч. *para* – возле, рядом и магнетизм) – свойство веществ во внешнем магнитном поле намагничиваться в направлении этого поля, поэтому внутри парамагнетика к действию внешнего поля прибавляется действие наведенного внутреннего поля.

Магнитная восприимчивость парамагнетиков в расчете на один моль (атом)

Вещество	$æ_{мол} \cdot 10^6$	Вещество	$æ_{мол} \cdot 10^6$
Mg	13,25	Sr	91,2
Na	15,1	Ti	161,0
Rb	18,2	U	414,0
Ba	20,4	Pu	627,0
K	21,25	FeS	1074,0
Li	24,6	$EuCl_3$	2650,0
Ca	44,0	$CoCl_3$	121660,0
W	55,0		

У парамагнетиков магнитная восприимчивость положительна – индукция магнитного поля в парамагнетиках B увеличивается по сравнению с индукцией поля в свободном пространстве. Величина магнитной восприимчивости в парамагнетиках также очень мала $æ > 0$, $æ \approx 10^{-5} \div 10^{-4}$.

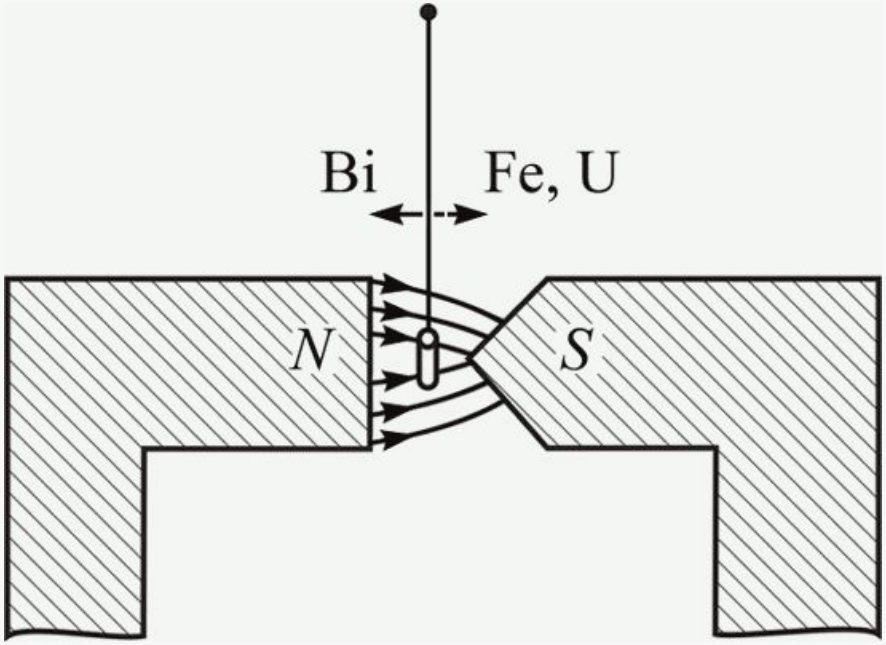


Рис. 13. Ферромагнетики (Fe, Co, Ni и др.) и парамагнетики (U, Pu, FeS) втягиваются в область более сильного поля (Bi и др.), диамагнетики – выталкиваются из области сильного поля

У ферромагнетиков магнитная восприимчивость положительна и очень велика æ = $10 \div 10^4$. В ферромагнетиках происходит резкое усиление внешних магнитных полей.

Причем для ферромагнетиков æ сложным образом зависит от величины магнитного поля.

Типичными ферромагнетиками являются Fe, Co, Ni, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, а также соединения ферромагнитных материалов с неферромагнитными: Fe_3Al, Ni_3Mn, $ZnCMn_3$ и др.

Поведение диамагнитных и ферромагнитных веществ в магнитном поле обусловлено особенностями строения атомов этих веществ.

Атомы диамагнетиков не имеют постоянных магнитных моментов – суммарный магнитный момент каждого атома равен нулю.

Спиновые и орбитальные магнитные моменты электронов скомпенсированы так, что у атома средний магнитный момент равен нулю.

Если атом с нулевым магнитным моментом поместить в магнитное поле, то в таком атоме с точки зрения классической физики каждая электронная орбита будет стремиться сориентироваться магнитным моментом по полю.

Однако, поскольку вращающийся по орбите электрон обладает собственным механическим моментом, то в силу гироскопического эффекта начнется прецессионное вращение орбиты электрона в сторону, противоположную первоначальному вращению электрона.

Прецессионное вращение электронных орбит порождает в атоме момент, направленный в сторону, противоположную силовым линиям поля.

Атомы парамагнитных веществ обладают собственным магнитным моментом. Такие атомы во внешнем магнитном поле стремятся выстроиться своим магнитным моментом по направлению магнитного поля.

Поскольку эффект от ориентации магнитных моментов по полю сильнее диамагнитного, то наведенное магнитное поле в парамагнетиках усиливает внешнее магнитное поле.

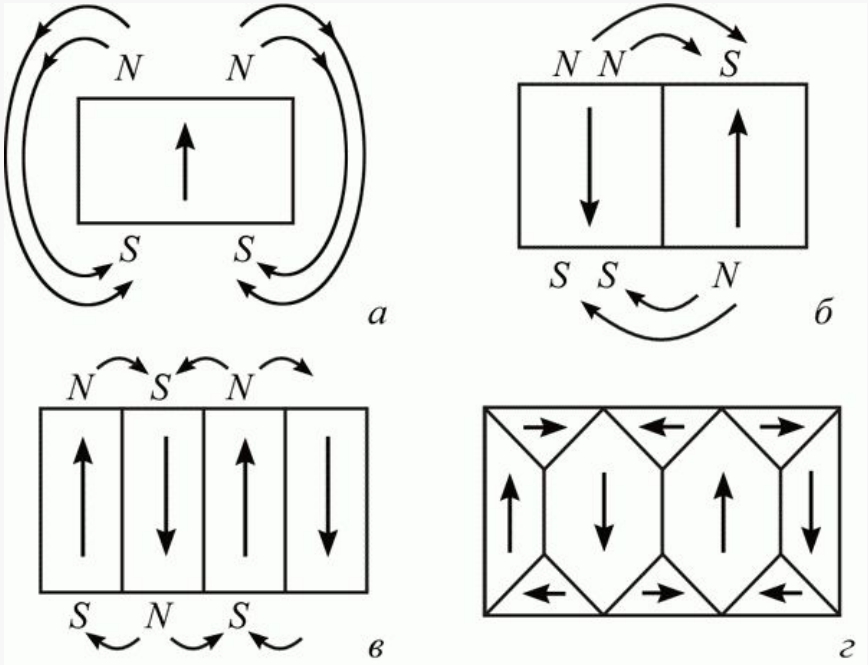
Ориентацию парамагнитных атомов по направлению магнитного поля стремится разрушить тепловое движение атомов. Поэтому парамагнетизм проявляется слабее с ростом температуры и усиливается при низких температурах.

В ферромагнитных материалах в отсутствие внешнего магнитного поля существуют области со спонтанной намагниченностью – домены (от французского *domaine* – владение, область, среда).

Обычно домены имеют размеры $10^{-3} \div 10^{-2}$ см, и их можно наблюдать в микроскоп при покрытии образцов ферромагнитным порошком. Векторы магнитного поля отдельных доменов ориентированы так, что суммарный магнитный момент равен нулю.

Во внешнем магнитном поле домены выстраиваются по направлению магнитного поля. Поле в веществе резко усиливается, это еще сильнее заставляет ориентироваться домены, и магнитное поле в ферромагнетиках резко возрастает.

В этом смысле поведение ферромагнетиков в магнитном поле подобно поведению сегнетоэлектриков во внешнем электрическом поле.



Доменная структура ферромагнетика:

а – полностью намагниченный кристалл с большим внешним магнитным полем;

б, *в* – двудоменная и трехдоменная структуры, уменьшающие внешнее магнитное поле;

г – система с косоугольными доменами без выхода магнитного поля из кристалла

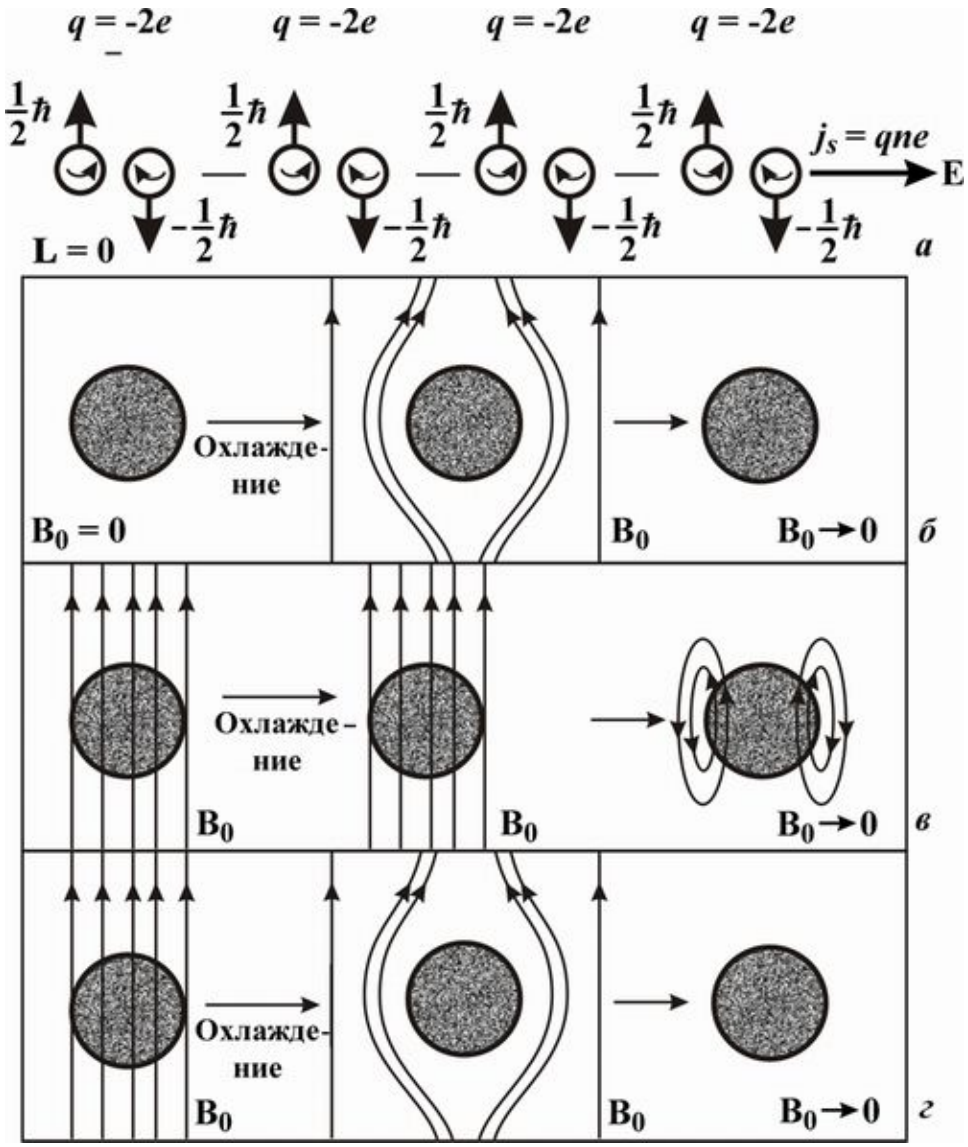
Необычными магнитными свойствами обладают **сверхпроводники** – вещества с бесконечно большой проводимостью или нулевым электрическим сопротивлением

Это связано с принципиально разными механизмами, лежащими в основе эффекта отсутствия сопротивления в идеальном проводнике и сверхпроводнике.

В идеальном проводнике нет рассеяния электронов проводимости на дефектах решетки, что соответствует бесконечно большой длине свободного пробега электронов.

В сверхпроводнике электроны объединяются в куперовские пары с нулевым спином , а затем эти пары электронов при низких температурах конденсируются в сверхтекучую электропроводящую жидкость.

В такой жидкости в отличие от идеального проводника, нельзя помешать одному электрону делать то, что делают остальные электроны, поскольку все пары электронов стремятся попасть в одинаковое состояние. В частности, нельзя внешним магнитным полем изменить импульс отдельного электрона или равномерное распределение электронов в объеме сверхпроводника. В результате магнитное поле оказывается всегда вытолкнутым из объема сверхпроводника.



Куперовские пары электронов в сверхпроводнике образуются и конденсируются в сверхпроводящую жидкость при низких температурах – электронный бозе-конденсат(*а*); в идеальный проводник после охлаждения магнитное поле не проникает (*б*); проводник, ставший идеальным проводником при охлаждении во внешнем магнитном поле, сохраняет в себе магнитное поле после выключения внешнего магнитного поля (*в*); сверхпроводник, охлаждаемый в магнитном поле, после перехода в сверхпроводящее состояние выталкивает из своего объема внешнее магнитное поле – эффект Мейснера – Оксенфельда (*г*)

Это важное свойство сверхпроводников было открыто в 1933 г. спустя 22 года после открытия сверхпроводимости немецкими физиками Мейснером и Оксенфельдом. Они первые установили, что независимо от условий эксперимента магнитное поле в объем сверхпроводника не проникает.

Кроме того, они обнаружили, что сверхпроводник, охлажденный до температуры ниже критической, в постоянном магнитном поле самопроизвольно выталкивает магнитное поле из своего объема и магнитная индукция в объеме сверхпроводника становится равной нулю, т.е. сверхпроводник является идеальным диамагнетиком с магнитной восприимчивостью æ = –1.

4. Магнитный момент и момент количества движения электронов в атомах

Пусть электрон движется по круговой орбите в атоме вокруг положительно заряженного ядра. Найдем соотношение между моментом импульса электрона на орбите

$$\mathbf{L} = [\mathbf{r}, m\boldsymbol{v}]$$

и магнитным моментом, обусловленным движением электрона по орбите,

$$\mathbf{p}_m = I \cdot S \cdot \mathbf{n}.$$

Здесь **n** – вектор положительной нормали; $S = \pi \cdot r2$ – площадь орбиты; I – ток, обусловленный движением электрона по орбите: $I = \dfrac{-e}{T}$

где $-e$ – заряд электрона; $T = 2\pi r/v$ – период обращения электрона по орбите.

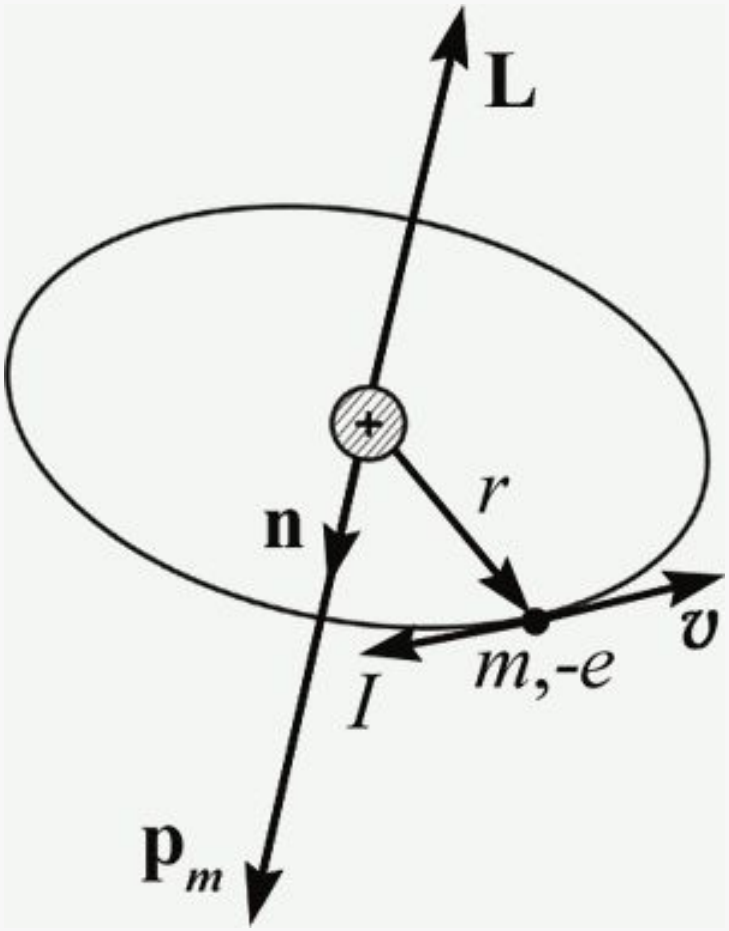


Рис. 14. Соотношение между орбитальными механическим **L** и магнитным **p***m* моментами электрона

$$\mathbf{p}_m = -\frac{e}{2m}\mathbf{L}$$

Подставляя полученные значения для I и T в выражение момента, получаем соотношение между орбитальными магнитным и механическим моментами электрона (рис. 14):

$$\mathbf{p}_m = \frac{e\mathsf{v}}{2\pi r}\pi r^2 \cdot \mathbf{n} = -\frac{e}{2m}\mathbf{L}$$

Знак «минус» означает, что векторы магнитного и механического моментов у электрона при орбитальном движении направлены перпендикулярно плоскости орбиты в противоположные стороны, поскольку заряд электрона отрицателен.

Полученное соотношение для орбитальных магнитного и механического моментов остается справедливым и при квантово-механическом рассмотрении орбитального движения электрона.

Помимо орбитального движения, электрон обладает собственным механическим моментом – спином. Электрон как бы вращается вокруг собственной оси, и в результате этого у него возникают момент количества движения и магнитный момент.

Согласно представлениям классической физики,

$$\mathbf{p}_{m\ \text{кл}} = -\frac{er^2}{5}\boldsymbol{\omega}\,,\ \mathbf{L}_{\text{кл}} = \frac{2}{5}mr^2\boldsymbol{\omega}\,,\ \mathbf{p}_{m\ \text{кл}} = -\frac{e}{2m}\mathbf{L}_{\text{кл}}$$

Но по чисто квантовым причинам соотношение между $\mathbf{p}_m$ и $\mathbf{L}$ в два раза больше

$$\mathbf{p}_{m\ \text{кв}} = \boldsymbol{\mu}_{\text{Б}} = -\frac{e}{m}\mathbf{L}$$

где $L = \frac{\hbar}{2}$ – спин электрона; $\boldsymbol{\mu}_{\text{Б}}$ – квантовый магнитный момент электрона – магнетон Бора.

Поэтому минимальное значение магнитного момента электрона равно

$$\mu_Б = \frac{e}{2m}\hbar = 9{,}3 \cdot 10^{-24}\ А \cdot м^2.$$

В общем случае в изолированном атоме направление магнитного момента всегда противоположно моменту импульса, отношение их можно записать в виде

$$\mathbf{p}_m = -g\left(\frac{e}{2m}\right)\mathbf{L}$$

$$\mathbf{p}_m = -g\left(\frac{e}{2m}\right)\mathbf{L}$$

Множитель g характеризует состояние атома. Для чисто орбитального движения $g = 1$, для чисто спиновых $g = 2$, а для сложных систем, подобных атому, $1 < g < 2$.

5. Ферромагнетизм

Ферромагнитные свойства материалов проявляются только у веществ в твердом состоянии, атомы которых обладают постоянным спиновым или орбитальным магнитным моментом. Типичными ферромагнетиками являются переходные металлы: железо, кобальт, никель и многие их сплавы.

Существенным отличием ферромагнетиков от диа- и парамагнетиков является наличие у ферромагнетиков самопроизвольной (спонтанной) намагниченности в отсутствие внешнего магнитного поля.

Параллельная ориентация магнитных моментов устанавливается при температурах ниже критической температуры – точки Кюри T_C, названной так по имени французского физика Кюри подробно изучившего поведение ферромагнетиков вблизи этой точки фазового перехода веществ. При $T > T_C$ ферромагнетик переходит в парамагнитное состояние.

Температура Кюри T_C ферромагнетиков

Материал	Fe	Co	Ni	Gd	Dy	Ho	Tm	Er	Sc_3In
Температура Кюри, К	1043	1403	631	289	87	20	25	19,6	5–6

Функция ***B=f(H)*** растет с H. Если после достижения насыщения намагниченности $H = H_m$ или линейного участка B_m в зависимости **B** от **H** начать уменьшать напряженность внешнего магнитного поля, то кривая намагничивания не пойдет по прежнему пути, а будет проходить выше кривой намагничивания $0B_m$ (рис. 15). В частности при $H = 0$ индукция поля в магнетике не обратится в ноль, а будет соответствовать остаточному намагничиванию.

Для полного размагничивания вещества необходимо приложить обратное магнитное поле $H = -H_c$, называемое коэрцитивной силой.

Далее при увеличении H до $-Hm$ образец вновь намагничивается до насыщения $M = -M_m$. При дальнейшем изменении H от $-H_m$ до $+H_m$ намагниченность будет изменяться вдоль кривой $-B_m$ $-B_c$ $+B_m$.

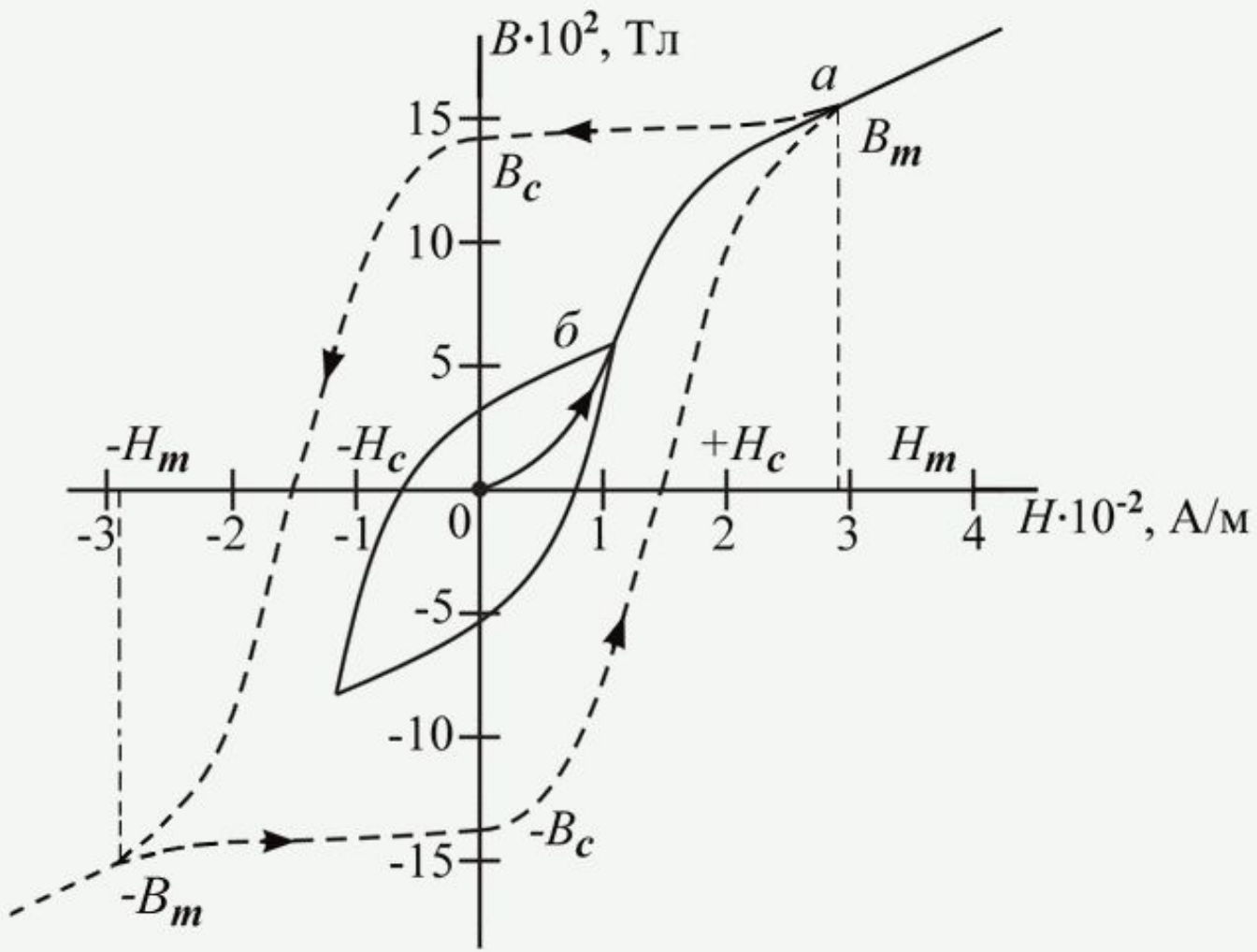


Рис. 15. Кривая безгистерезисного намагничивания (0 – B_m) и петля гистерезиса поликристаллического железа (B_mB_c – B_cB_m – B_mB_c – B_cB_m): *а* – предельная петля гистерезиса; *б* – петля гистерезиса частного цикла

В целом зависимость $B = B(H)$ при изменении H от $+H_m$ до $-H_m$ образует замкнутую петлю, называемую максимальной или предельной петлей гистерезиса. При циклическом намагничивании в полях $-H_1 \leq H \leq H_1$, где $H_1 < H_m$, зависимость $B = B(H)$ будет описываться замкнутой кривой, называемой частной кривой гистерезиса, лежащей целиком внутри предельной петли гистерезиса.

Для мягкого железа петля гистерезиса узкая – коэрцитивная сила мала, для стали и всех материалов, идущих на изготовление постоянных магнитов, – широкая, коэрцитивная сила велика.

Ферромагнитные материалы играют огромную роль в самых различных областях современной техники.

Они широко используются в электротехнике при изготовлении трансформаторов, электромоторов, генераторов, в слаботочной технике связи и радиотехнике; магнитожесткие материалы применяют при изготовлении постоянных магнитов.

Широкое распространение в радиотехнике, особенно в высокочастотной радиотехнике получили ферриты – ферромагнитные неметаллические материалы – соединения окиси железа (Fe_2O_3) с окислами других металлов. Ферриты сочетают ферромагнитные и полупроводниковые свойства, именно с этим связано их применение как магнитных материалов в радиоэлектронике и вычислительной технике. Ферриты обладают высоким значениями намагниченности и температурами Кюри.

6. Эффект Холла

Одним из проявлений магнитной составляющей силы Лоренца в веществе служит эффект, обнаруженный в 1879 г. американским физиком Холлом.

Эффект состоит в возникновении на боковых гранях проводника с током, помещенного в поперечное магнитное поле, разности потенциалов, пропорциональной величине тока I и индукции магнитного поля B (рис. 16):

$$V_H = RBI/d.$$

Величина R называется постоянной или коэффициентом Холла, d- толщина пластинки.

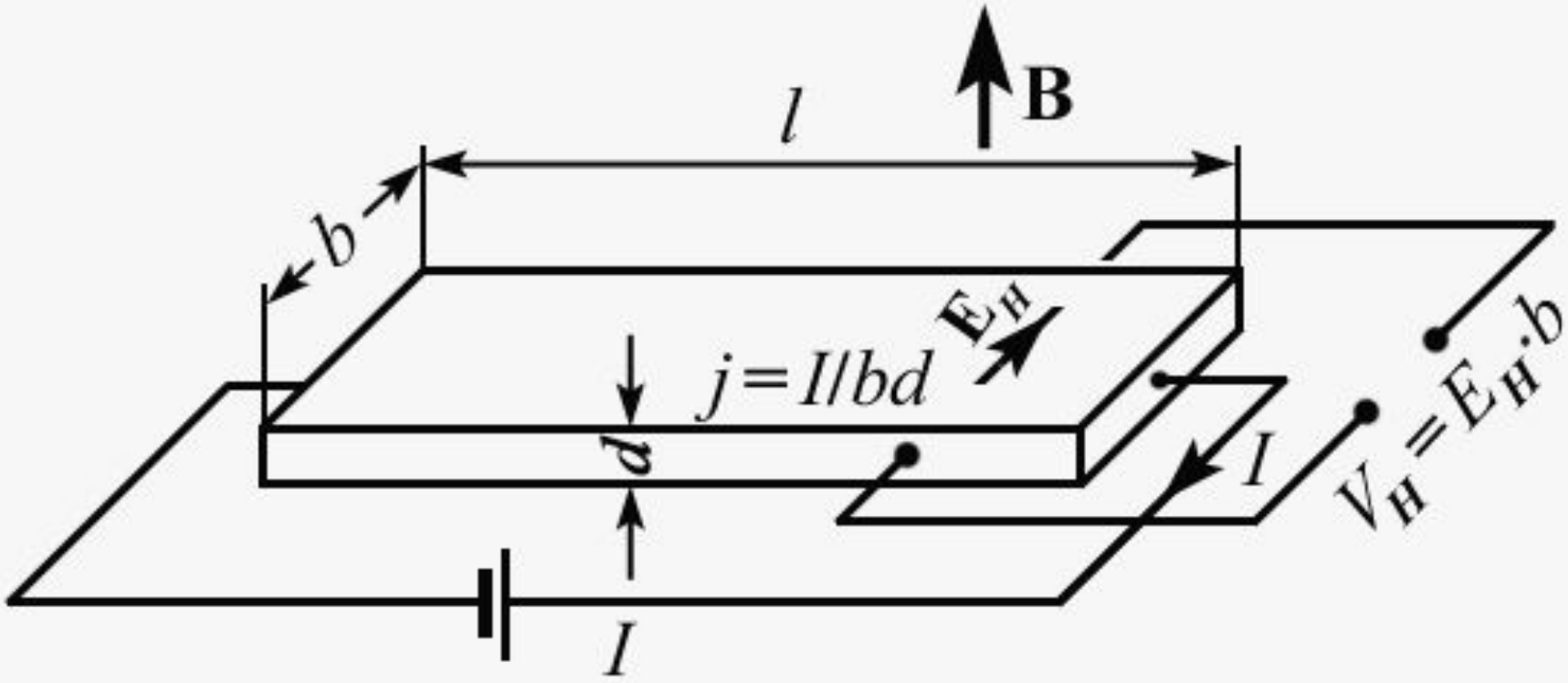


Рис. 16.

Эффект Холла обусловлен взаимодействием носителей заряда (электронов проводимости и дырок) с магнитным полем.

В магнитном поле на электроны действует сила

$$\mathbf{F} = e[\mathbf{B},\mathbf{v}],$$

(**v** = **j**/*ne* – средняя скорость направленного движения носителей в электрическом поле; *n* – концентрация носителей; *e* – их заряд).

Под влиянием **F** частицы отклоняются в направлении, перпендикулярном **j** и **B**. В результате на боковой грани пластины происходит накопление зарядов и возникает поле Холла E_H.

В свою очередь, поле Холла действует на заряды и уравновешивает силу Лоренца.

При равновесии

$$eE_H = eBv,$$

откуда):

$$R = 1/ne\ ,(I = jdb).$$

Знак R совпадает со знаком носителей заряда.

Для *металлов* $n \sim 10^{22}$ см$^{-3}$, $R \sim 10^{-3}$ см^3/Кл,

у *полупроводников* $R \sim 10 \div 10^5$ см^3/Кл.

В поле $B \sim 1$ Тл у металлов $V_H \sim 10^{-5} \div 10^{-6}$ В.

Коэффициент Холла может быть выражен через *подвижность носителей заряда* μ и удельную электропроводность σ.

Подвижность носителей заряда:

$$\mu = v_{др} / E$$

где $v_{др}$ дрейфовая скорость носителей

$$v_{др} = -eE\tau/m,$$

m – эффективная масса; τ – время между двумя последовательными соударениями с рассеивающими центрами.

Удельная электропроводность:

$$\sigma = j/E = en\mathrm{v}_{\text{др}}/E.$$

Тогда

$$R = \mu/\sigma.$$

В полупроводниках в электропроводимости участвуют одновременно электроны проводимости и дырки. При этом постоянная Холла выражается через парциальные проводимости электронов $\sigma_{\text{э}}$ и дырок $\sigma_{\text{д}}$ и их концентрации $n_{\text{э}}$ и $n_{\text{д}}$. В случае слабых полей

$$R = \frac{1}{e}\frac{\sigma_{\text{э}}^2/n_{\text{э}} - \sigma_{\text{д}}^2/n_{\text{д}}}{\left(\sigma_{\text{э}} + \sigma_{\text{д}}\right)^2}$$

Для сильных полей

$$R = \frac{1}{e} \frac{1}{n_э - n_д}$$

Эффект Холла – один из наиболее удобных методов изучения энергетического спектра носителей заряда в металлах и полупроводниках.

Зная R, можно определить знак носителей заряда и оценить их концентрацию, что позволяет сделать заключение о количестве примесей в полупроводниках.

Линейная зависимость R от H используется для измерения напряженности магнитного поля, для усиления постоянных токов, в измерительной технике.

Основные выводы

Все вещества являются магнетиками и подвержены действию внешнего магнитного поля. Магнитные свойства материалов определяются природой атомных носителей магнетизма и характером их взаимодействий.

В парамагнетиках (Ce^{3+}, Br^{3+}, Ti^{3+}, V^{3+} и др.) внешнее магнитное поле $\mathbf{B}_0$ слабо усиливается $(B/B_0) > 1$.

В диамагнетиках (Bi, Ag, Au, Cu и др.) внешнее магнитное поле незначительно уменьшается $(B/B_0) < 1$.

В ферромагнетиках (Fe, Co, Ni и др.) внешнее магнитное поле увеличивается очень сильно $(B/B_0) = 10^3 \div 10^5$.

Магнитные свойства вещества характеризует средний магнитный момент единицы объема – вектор намагничивания

$$\mathbf{M} = \frac{1}{V}\sum_{i=1}^{N}\mathbf{p}_{m\,i}$$

Здесь $\mathbf{p}_{mi}$ – магнитный момент i-й частицы; N – число частиц в объеме V. Вектор намагничивания измеряется в А/м (СИ).

Вектор напряженности магнитного поля

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M}$$

Единицей измерения **H** в СИ служит А/м, в гауссовой системе единиц – эрстед Э, 1 А/м соответствует $4\pi \cdot 10^{-3}$ Э.

Магнитная восприимчивость æ – безразмерная величина характеризирует связь намагниченности вещества **M** с магнитным полем в веществе – напряженность намагничивающего поля

$$\mathbf{M} = æ\,\mathbf{H}.$$

Для диамагнетиков (æ < 0) и парамагнетиков (æ > 0) абсолютная величина æ мала ($10^{-4} \div 10^{-6}$) и слабо зависит от *H*. У ферромагнетиков æ ~ $10^{3} \div 10^{5}$ и сильно, нелинейно изменяется с *H*.

Удельная магнитная восприимчивость

$$\chi_{\text{уд}} = \frac{\chi}{\rho}$$

где ρ – плотность вещества.

Молярная магнитная восприимчивость

$$\chi_{\text{мол}} = \frac{M}{\rho}\chi$$

Магнитная проницаемость вещества определяет реакцию среды на внешнее магнитное поле и показывает, как индукция магнитного поля в веществе B отличается от индукции магнитного поля в вакууме B_0:

$$\mu = \frac{B}{B_0} = 1 + \chi$$

Магнитный момент электрона в атоме $\mathbf{p}_m$ связан с орбитальным моментом L соотношением

$$\mathbf{p}_m = -g\frac{e}{2m}\mathbf{L}$$

Для чисто орбитального движения $g = 1$, для чисто спинового $g = 2$, для сложных систем $1 < g < 2$

Магнетон Бора $\mu_Б$ – элементарный магнитный момент,

$$\mu_Б = \frac{e\hbar}{2m_e}$$

e, m_e – заряд и масса электрона.

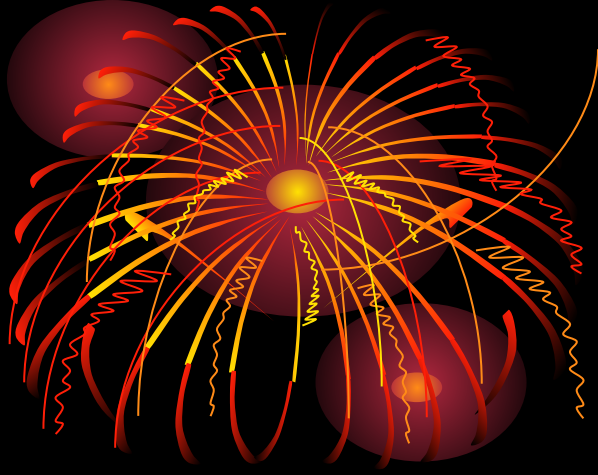
Ферромагнетики – вещества, способные к спонтанной намагниченности в отсутствие внешнего магнитного поля за счет существования в них особых областей доменов (размером $10^{-2} \div 10^{-3}$ см), где спины и магнитные моменты атомов ориентированы упорядоченным образом при $T < T_C$, где температура Кюри.

Магнитное поле не проникает в объем сверхпроводника, поскольку в тонком приповерхностном слое – глубина проникновения ~ 10^{-5} см – возбуждается экранирующий ток jS, создающееся суммарное поле в объеме равно нулю.

Проявлением магнитной составляющей силы Лоренца в веществе служит эффект Холла – возникновение на боковых гранях проводника с током в поперечном магнитном поле разности потенциалов, пропорциональной току I и индукции магнитного поля B:

$$V_H = RBI/d.$$

Величина $R = 1/ne$ – постоянная Холла; n – концентрация носителей; e – их заряд.



Лекция окончена

Нажмите клавишу <ESC> для выхода