

Предисловие

Разработка новых материалов, необходимых для использования в различных электротехнических, электромеханических и электроэнергетических устройствах, а также совершенствование уже известных материалов обусловлено общим развитием электротехники, электромеханики и электроэнергетики и расширением требований к качеству применяемых материалов.

В настоящее время новые электротехнические материалы редко могут появляться в результате удачного опыта. Необходимо предварительное глубокое изучение физических, механических и химических характеристик таких веществ, которые могли бы быть использованы в качестве электротехнических материалов.

Только сочетание научно-обоснованных требований с реальными возможностями производства позволяет создать те благоприятные условия, при которых могут быть созданы новые и успешно используемые существующие электротехнические материалы.

Глубокое знание свойств материалов позволяет специалистам в областях электротехники, электромеханики и электроэнергетики создавать новые и грамотно применять те или иные материалы при изготовлении и эксплуатации различных электротехнических и электроэнергетических устройств.

Курс электротехническое материаловедение ставит следующие задачи:

1. Изучение теоретических основ, из которых необходимо исходить при изучении электротехнических материалов.
2. Проведение классификации электротехнических материалов по их назначению, составу и свойствам.
3. Рассмотрение основных характеристик, служащих для оценки пригодности электротехнических материалов при их использовании в электротехнике, электромеханике и электроэнергетике.
4. Показ наиболее характерных, технически и экономически обоснованных случаев применения электротехнических материалов.

Авторы благодарны сотрудникам кафедры «Электроизоляционная и кабельная техника» Томского политехнического университета за помощь при создании данного пособия, а также Леонову А.П. и Марьину С.С. за помощь в его оформлении.

Авторы выражают глубокую благодарность Трояну П.Е. и Лебедеву С.М. за ценные замечания и советы, сделанные ими при рецензировании учебного пособия.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Материалы, используемые в различных областях электротехники, можно подразделить на конструкционные и электротехнические. Конструкционные материалы используются для изготовления вспомогательных деталей и элементов электротехнических изделий, воспринимающих, как правило, механические нагрузки.

Электротехнические материалы характеризуются определенными свойствами по отношению к электромагнитным полям и применяются в технике с учетом этих свойств.

При работе электротехнических изделий на электротехнические материалы могут воздействовать электрические и магнитные поля, как отдельно, так и совокупности.

По поведению в магнитном поле материалы подразделяются на сильномагнитные и слабомагнитные (немагнитные).

По поведению в электрическом поле материалы подразделяются на проводниковые, полупроводниковые и диэлектрические.

Основным свойством вещества по отношению к электрическому полю является его **электропроводность**.

Электропроводность – это способность вещества проводить электрический ток под воздействием постоянного (не изменяющегося во времени) электрического поля.

Если вещество поместить в электрическое поле напряженностью E , то имеющиеся в нем свободные заряженные частицы (носители заряда) под действием силы $F = q \cdot E$ (q – величина заряда свободной частицы) приобретают ускорение. При этом частицы, имеющие положительный заряд q , движутся в направлении вектора E , а имеющие отрицательный заряд q – в противоположном направлении. Возникающее таким образом упорядоченное в пространстве (в отличие от хаотического теплового) движение электрических зарядов и есть электрический ток в веществе. Здесь и далее векторные величины будем выделять жирным шрифтом.

Если вещество имеет свободные носители зарядов одного типа, то плотность тока j (суммарный электрический заряд, переносимый в единицу времени через единицу поверхности, перпендикулярной E)

$$j = q \cdot n \cdot v_s, \quad (0.1)$$

где n – количество находящихся в единице объема вещества свободных носителей заряда (концентрация свободных носителей заряда) [м^{-3}]; v_s – средняя скорость упорядоченного (дрейфового) движения носителей заряда под действием электрического поля напряженностью E :

$$v_s = \mu \cdot E, \quad (0.2)$$

где μ – подвижность носителя заряда [$\text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$].

С учетом (0.2) выражение (0.1) принимает следующий вид:

$$\mathbf{j} = q \cdot n \cdot \mu \cdot \mathbf{E} = \gamma \mathbf{E}. \quad (0.3)$$

Коэффициент пропорциональности $\gamma = q \cdot n \cdot \mu$ в выражении (0.3) называют *удельной электрической проводимостью* [См/м, $1\text{См} = \text{Ом}^{-1}$]. Если в веществе присутствует N типов свободных носителей заряда q_i с концентрациями n_i и подвижностями μ_i , то удельная электрическая проводимость

$$\sigma = \sum_{i=1}^N |q_i| n_i \mu_i. \quad (0.4)$$

Выражение (0.3) представляет собой дифференциальную форму закона Ома. Величину обратную удельной электрической проводимости $1/\gamma = \rho$ называют *удельным электрическим сопротивлением вещества* [$\text{Ом}\cdot\text{м}$].

Если к однородному изотропному веществу произвольной формы приложено не изменяющееся во времени электрическое поле напряженностью E , то

$$G = 1/R = \gamma \Delta = \Delta / \rho, \quad (0.5)$$

где G , R – соответственно проводимость и сопротивление однородного изотропного вещества произвольной формы [См, Ом]; Δ – геометрический параметр. Для образца вещества с постоянным по всей длине ℓ поперечным сечением S (например, токоведущая жила кабеля, диэлектрик плоского конденсатора) $\Delta = S/\ell$. Для цилиндра с внешним и внутренним диаметрами D и d и осевой длиной ℓ (диэлектрик цилиндрического конденсатора, изоляция коаксиального кабеля) $\Delta = 2\pi\ell/\ln(D/d)$.

Значения ρ и γ различных электротехнических материалов существенно отличаются друг от друга. У веществ в сверхпроводящем состоянии удельное электрическое сопротивление практически равно нулю, а у разряженных газов стремится к бесконечности. Если даже ограничиться рассмотрением лишь твердых веществ, находящихся в нормальных условиях, то значения ρ охватывают 25 порядков – от $\sim 10^{-8}$ Ом·м для лучших металлических проводников до $\sim 10^{17}$ Ом·м для лучших диэлектриков.

Обычно к проводникам относят вещества с удельным электрическим сопротивлением менее 10^{-5} Ом·м, а к диэлектрикам – с ρ более 10^7 Ом·м. Удельное электрическое сопротивление полупроводников составляет $10^{-6} \dots 10^9$ Ом·м. Однако при классификации веществ по электрическим свойствам кроме значения ρ необходимо учитывать и физическую природу электропроводности, и характер зависимости ρ от температуры, а также ряда других факторов.

Проводниковыми называют материалы, основным электрическим свойством которых является сильно выраженная по сравнению с другими материалами электропроводность. Их применение в технике обусловлено в

основном этим свойством, определяющим высокую удельную проводимость.

Полупроводниковыми называют материалы, которые являются по своей удельной проводимости промежуточными между проводниковыми и диэлектрическими материалами. Отличительной способностью полупроводников является исключительно сильная зависимость удельной проводимости от концентрации и вида примесей, а также от внешних энергетических воздействий (действий теплового, электрического, радиационного полей и других факторов).

Диэлектрическими называют материалы, основным электрическим свойством которых является способность к поляризации и в которых возможно существование электрического поля.

По агрегатному состоянию электротехнические материалы подразделяются на *твердые, жидкые и газообразные*.

В электротехнике используют и четвертое состояние вещества – *плазму*, возникающую, в частности, при воздействии на газ сильных электрических полей.

Твердые материалы по своей структуре могут быть *моноцисталлическими, аморфными и смешанными*.

Монокристаллы – это однородные анизотропные тела, которые характеризуются правильным порядком в расположении атомов во всем объеме. Они состоят из периодически повторяющихся одинаковых кристаллических ячеек.

Поликристаллические материалы состоят из большого числа сросшихся друг с другом мелких кристаллических зерен (кристаллитов), хаотически ориентированных в разных направлениях. Поликристаллические тела обычно изотропны. Однако, если в ориентации кристаллитов создать упорядоченность (например, механической обработкой), то материал становится анизотропным. Такие материалы с искусственно созданной анизотропией называют *текстуированными* материалами.

Аморфные материалы характеризуются отсутствием строго упорядоченного расположения атомов. Аморфные тела – это затвердевшие жидкости, которые образуются за счет понижения температуры при сравнительно быстром повышении вязкости. При этом затрудняется перемещение молекул, необходимое для формирования и роста кристаллов.

Смешанные (аморфно-кристаллические) материалы – это частично закристаллизованные аморфные вещества. Частично кристаллическую структуру имеют многие полимеры. Стекла определенных составов при выдержке при повышенных температурах начинают кристаллизоваться. Вследствие образования мелких кристалликов стекло теряет прозрачность, превращаясь в аморфно-кристаллический материал – *ситалл*.

Основными элементарными частицами, из которых состоят все известные вещества, являются *протоны, нейтроны и электроны*. Из прото-

нов и нейтронов состоят *ядра* атомов. Электроны заполняют оболочки атомов, компенсируя положительный заряд ядра.

Газы, жидкости и твердые тела могут состоять из *атомов, ионов и молекул*. Размеры атомов порядка ангстрема. Размеры положительных ионов, то есть атомов, потерявших часть электронов, меньше чем размеры атомов. Размеры отрицательных ионов, образовавшихся за счет присоединения к атому дополнительных электронов, больше размеров соответствующих атомов. Ионами также могут быть молекулы и группы атомов, потерявшее или присоединившие электроны.

В зависимости от строения внешних электронных оболочек, вещества могут образовываться с помощью различных связей.

Ионная связь обусловлена кулоновским притяжением противоположно заряженных ионов. Этот вид связи наиболее характерен для неорганических диэлектриков, имеющих в своем составе ионы противоположных знаков, например $\text{Na}^+ \text{-} \text{Cl}^-$, $\text{Li}^+ \text{-} \text{F}^-$.

Ковалентная (атомная) связь обусловлена образованием обобществленных (общих пар) валентных электронов по одному от каждого атома. Такая пара электронов устойчива в результате обменного взаимодействия при противоположной ориентации спиновых и соответствующих орбитальных магнитных моментов электронов. В отличие от ионной, ковалентная связь имеет направленный характер, она образуется в том направлении, в котором расположена наибольшая плотность объединенных электронов.

Металлическая связь обусловлена взаимодействием между положительно заряженными ионами металла, образовавшихся за счет потери (отрыва) электронов и этими коллективизированными электронами («электронным газом»). «Электронный газ» оказывает цементирующее действие на кристаллическую структуру металлов и обуславливает их высокую электропроводность, теплопроводность и пластичность.

Молекулярная связь (или силы Ван-дер-Ваальса) обусловлена электростатическим диполь-дипольным взаимодействием между молекулами, которое возникает в результате неоднородного распределения заряда электронов вокруг ядер.

Водородная связь осуществляется через ион водорода (протон), расположенный между двумя ионами (O^- , F^- , Cl^-) соседних молекул. Водородная связь реализуется в воде H_2O , некоторых органических соединениях и в кристаллах типа дигидрофосфата калия KH_2PO_4 .

Энергия химических связей, к которым можно отнести ковалентную, ионную и металлическую связи, составляет $\sim 10^2$ кДж/моль. Энергия межмолекулярных взаимодействий существенно меньше. Энергия водородной связи $\sim 10 \dots 50$ кДж/моль, а энергия вандерваальсового межмолекулярного взаимодействия всего $\sim 0,1 \dots 1$ кДж/моль. Кроме того, в отличие от

ионного или металлического типа связей, ковалентные связи имеют ярко выраженную направленность в сторону наибольшей плотности объединенных электронов. Поэтому материалы, полученные из веществ с различным типом связей, сильно отличаются по своим электрическим и другим свойствам.

Физические явления, происходящие в веществах, наиболее наглядно можно объяснить с помощью энергетических диаграмм зонной теории твердых тел.

Известно, что спектры излучения различных веществ в газообразном состоянии, когда отдельные атомы удалены друг от друга на весьма большие расстояния – *линейчатые*. Это дает основание заключить, что в отдельных, не взаимодействующих друг с другом атомах имеются вполне определенные энергетические состояния (энергетические уровни) электронов. Чем дальше находится электрон от атомного ядра, тем выше его энергетический уровень.

В нормальном невозбужденном состоянии атома часть уровней заполнена электронами, находящимися в устойчивом состоянии. При возбуждении атома внешними энергетическими воздействиями часть электронов переходит на более высокие (*возбужденные*) энергетические уровни. Эти уровни не являются устойчивыми. Возвращаясь в устойчивые состояния, электрон отдает свою энергию в виде кванта излучения, равного

$$\Delta W = W_1 - W_2 = h\nu, \quad (0.6)$$

где W_1 – энергия возбужденного состояния электрона; W_2 – энергия невозбужденного состояния электрона; h – постоянная Планка $6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с; ν – частота излучения.

Если же вещество находится в конденсированном (то есть в жидком или твердом) агрегатном состоянии, то имеет место взаимодействие атомов. В результате взаимодействия, линейные уровни валентных электронов сливаются в непрерывный спектр энергий – *валентную зону*. А незаня-

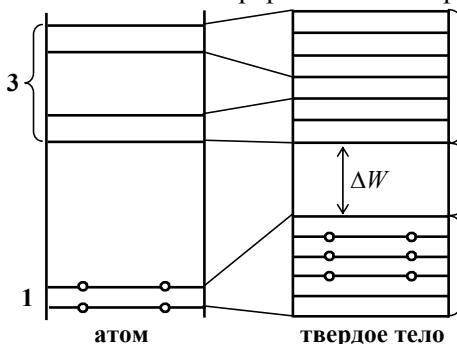


Рис. 0.1. Схема расположения энергетических уровней отдельного атома (слева) и неметаллического твердого тела (справа): 1 – основные энергетические уровни атома; 2 – заполненная электронами зона (валентная зона); 3 – уровни возбужденного состояния атома; 4 – запрещенная зона; 5 – зона свободных энергетических уровней, зона проводимости

тые разрешённые уровни возбуждённых состояний объединяются в зону проводимости. У неметаллических материалов эти зоны разделены запре-

щённой зоной, то есть интервалом энергий, запрещённых для электронов. В металлах запрещённая зона отсутствует (рис. 0.1).

Внешние (валентные) электроны атомов неметаллического вещества, находящиеся на уровнях заполненной (валентной) зоны 2, участвуют в образовании химической связи и не могут переносить заряд и создавать электрический ток в веществе. Они могут стать свободными и принять участие в электропроводности, перейдя через запрещенную зону 4 и попав в зону проводимости 5, только получив извне порцию энергии ΔW , равную ширине запрещённой зоны. Энергия ΔW , необходимая для возникновения в материале свободных носителей заряда, называется *энергией активации проводимости*. Вещества, у которых энергия активации проводимости высока ($\Delta W > 3$ эВ), в нормальных условиях обладают слабой проводимостью. Такие вещества получили названия диэлектриков. У полупроводников $\Delta W < 3$ эВ, поэтому даже небольшие внешние энергетические воздействия (нагрев, облучение, электрическое поле и т. д.) способны перебрасывать часть электронов из заполненной валентной зоны в зону проводимости и полупроводник становится способным проводить ток.

Металлическая связь проводников приводит к тому, что в металлах и сплавах валентная зона перекрывается с зоной проводимости. Это означает, что валентные электроны проводника не локализованы вблизи ионов решётки, а могут свободно перемещаться по всему объёму. Поэтому энергия активации металлов $\Delta W = 0$, а проводимость металлов и сплавов очень велика.

Зонная структура материала зависит от строения образующих его атомов и от типа связи между ними. Кристаллическая структура также оказывает влияние. Например, углерод в структуре алмаза – очень хороший диэлектрик ($\Delta W = 5,2$ эВ), а в структуре графита обладает металлическими свойствами.

Таким образом, между металлами и веществами с неметаллическим типом связи (неметаллами) существует качественное различие. Это различие выражается в наличии или отсутствии запрещённой зоны на зонных диаграммах. На практике это приводит к тому, что металлы всегда обладают проводимостью, а для активации проводимости неметаллических материалов требуется приложить энергию извне. Различие между диэлектриками и полупроводниками носит лишь количественный, довольно условный характер, выражющийся в разной величине энергии активации ΔW .

Часть 1. Магнитные материалы

Глава 1. Классификация веществ по магнитным свойствам

1.1. Общие понятия

Магнитными называются материалы, которые применяются в технике с учетом их магнитных свойств и характеризуются способностью накапливать, хранить и трансформировать магнитную энергию.

Открытие в начале прошлого века магнитного поля электрического тока позволило Амперу выдвинуть предположение, что причина магнетизма веществ – наличие в них электрических молекулярных токов. Эта идея была теоретически и экспериментально развита во второй четверти XX в., когда были созданы квантовая механика и современная теория атома.

Магнитные свойства вещества определяются его атомной структурой и зависят, прежде всего, от того, обладают ли атомы вещества постоянным магнитным моментом. Полюсы магнита не существуют раздельно, в отличие от раздельно существующих отрицательных и положительных электрических зарядов. Элементарные носители магнетизма – это элементарные магнитики, характеризуемые некоторым магнитным моментом.

Экспериментальные и теоретические исследования показали, что магнетизм атома порождается тремя причинами:

- 1) наличием у электрона спинового магнитного момента, который связан с соответствующим механическим моментом электрона;
- 2) орбитальным движением электронов в атоме, создающим орбитальный магнитный момент, или, в соответствии с современным представлением о строении атома, наличием магнитного момента пространственно-го движения электронного облака вокруг ядра;
- 3) магнитным моментом атомного ядра, который создается спиновыми моментами протонов и нейтронов.

Спиновый магнитный момент ядра менее 10^{-3} спинового магнитного момента электрона. Масса ядра значительно больше массы электрона, поэтому можно считать, что элементарными носителями магнитных моментов в веществах являются электроны.

В атоме, содержащем несколько электронов, результирующий спиновый магнитный момент определяется исходя из спиновых магнитных моментов отдельных электронов. Согласно принципу Паули в каждом квантовом состоянии могут находиться два электрона с противоположными спинами. Результирующий спиновый момент таких спаренных электронов равен нулю. Если атом или ион содержит нечетное число электронов, то один из них окажется неспаренным, и атом в целом будет обладать постоянным магнитным моментом.

Полностью заполненные оболочки не дают результирующего спинового момента, так как в этом случае каждому спину одного направления в атомной оболочке соответствует спин, направленный антипараллельно, и суммарный магнитный момент, создаваемый такой парой электронов, равен нулю.

Так, в металлах магнитные моменты заполненных оболочек равны нулю, а внешние валентные электроны обобществлены. Поэтому магнитные моменты спинов электронов существенны лишь в атомах, имеющих не полностью заполненные (недостроенные) внутренние электронные оболочки, то есть в атомах переходных элементов.

Согласно классической физике, орбитальный магнитный момент возникает за счет протекания элементарного кругового тока, обусловленного вращением электронов по орбитам.

Из квантовой теории следует, что результирующий орбитальный магнитный момент, отличный от нуля, может наблюдаться лишь на некруговых орбитах.

Орбитальные и спиновые магнитные моменты отдельных электронов складываются в результирующие орбитальные спиновые моменты атомов. Единица измерения атомных магнитных моментов – магнетон Бора μ_b :

$$\mu_b = \frac{e\hbar}{2m} = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл}, \quad \hbar = h/2p, \quad (1.1)$$

где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона; $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона.

Определение полного магнитного момента атома существенно облегчается в связи с тем, что у заполненных оболочек как орбитальные, так и спиновые магнитные моменты скомпенсированы, поэтому можно учитывать только не полностью заполненные электронные оболочки.

1.2. Ферро- и ферримагнетизм

В ферромагнетиках группы железа основную роль в создании магнитного момента атома играет спиновый магнитный момент. В первом приближении магнитный момент атома определяется алгебраической суммой спиновых магнитных моментов электронов незаполненной оболочки. Так, в незаполненном $3d$ -слое железа вместо десяти имеется только шесть электронов, спины пяти из них направлены параллельно друг другу, а одного – антипараллельно. Следовательно, результирующий магнитный момент атома железа должен быть равен $4\mu_b$. В действительности магнитный момент атома железа равен $2,218\mu_b$. Расхождение в значениях момента обусловлено нарушением ориентации спинов при переходе в твердое состояние, связанным с межатомными взаимодействиями и перекрытием элек-

тронных уровней атомов. Если поместить вещество во внешнее магнитное поле, то, взаимодействуя с полем, вещество будет намагничиваться.

Основные магнитные величины

Намагченность вещества M [А/м]: $M = \chi H$, где χ – магнитная восприимчивость; H – напряженность магнитного поля [А/м].

Если магнитное поле создается соленоидом длиной ℓ [м], с числом витков N , через который течет ток I [А], то напряжённость однородного магнитного поля $H = NI/\ell$ [А/м]. Магнитная индукция B [Тл], характеризующая суммарное магнитное поле внутри материала:

$$B = \mu_0 (H + M) = \mu_0 (1 + \chi) H = \mu_0 \mu H = \mu_a H, \quad (1.2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная, характеризующая магнитную проницаемость вакуума; μ – относительная магнитная проницаемость вещества, которая показывает во сколько раз магнитная проницаемость данной среды больше магнитной проницаемости вакуума (величина безразмерная); $\mu_a = \mu_0 \cdot \mu$ – абсолютная магнитная проницаемость вещества [Гн/м].

Все вещества по магнитным свойствам делятся на диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики и различаются по величине и знаку магнитной восприимчивости χ , а также по характеру ее зависимости от температуры и напряженности внешнего магнитного поля.

Диамагнетиками называют вещества, в которых имеет место полная взаимная компенсация как орбитальных, так и спиновых магнитных моментов. Магнитная восприимчивость диамагнетиков отрицательна и имеет значение $\chi \approx -10^{-5}$, а магнитная проницаемость $\mu \approx 0,99999$ и не зависит от напряженности внешнего магнитного поля.

Физическая природа диамагнетизма заключается в возникновении во всем объеме тела индуцированных внешним полем незатухающих электрических микроскопических вихревых токов.

Из классической теории известно, что если на электрон, врачающийся по своей орбите, действует внешнее магнитное поле H , то оно стремится развернуть орбиту электрона перпендикулярно H . Это вызывает прецессию орбиты вокруг направления поля (подобно прецессии волчка, которая имеет место, если ось быстро врачающегося волчка не совпадает с вертикалью, и волчок, помимо вращения вокруг своей оси, совершает также вращение вместе с осью вокруг вертикали, называемое прецессией). Прецессия электронной орбиты эквивалентна дополнительному движению электрона, и приводит к возникновению тока, индуцирующего магнитный момент, направленный противоположно направлению внешнего поля. Появление такого индуцированного момента и обусловливает диамагнетизм.

Так как прецессия электронных орбит свойственна всем атомам, то диамагнетизм присущ всем веществам, но проявляется только в том случае, если не перекрывается более сильным пара- и ферромагнетизмом.

Диамагнетики отличаются тем, что они выталкиваются из неоднородного магнитного поля. К диамагнитным веществам относятся водород, инертные газы, азот, хлор, вода, большинство органических соединений, ряд металлов: Cu, Ag, Au, Be, Zn, Cd, Hg, Pb, B, Ga, Sb, а также графит, стекло и др.

Вещества, атомы которых имеют постоянные магнитные моменты, могут быть парамагнитными, ферро-, антиферро- или феримагнитными в зависимости от характера взаимодействия между магнитными моментами атомов.

Парамагнетиками называются вещества, в которых взаимодействие между постоянными магнитными моментами атомов – элементарными магнитными диполями – мало, в результате чего при обычных температурах под действием теплового движения молекул магнитные моменты атомов располагаются статистически равновероятно относительно любого направления (рис. 1.1, a) и суммарный магнитный момент равен нулю.

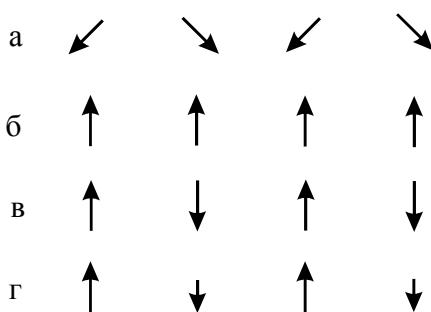


Рис. 1.1. Схематическое изображение расположения спинов в парамагнитных (а), ферромагнитных (б), антиферромагнитных (в) и феримагнитных (г) веществах

Под действием внешнего магнитного поля создается преимущественное направление расположения элементарных магнитных моментов, то есть тело оказывается намагниченным. Однако при обычных напряженностях поля H и температурах, намагниченность парамагнетиков очень мала. Магнитная восприимчивость их положительна и имеет значение $\sim 10^{-5} \dots 10^{-2}$. У парамагнетиков $\mu \approx 1,001$ и практически не зависит от напряженности внешнего магнитного поля. С повышением температуры при неизмененной напряженности поля возрастает дезориентирующая роль теплового движения молекул и поэтому намагниченность убывает.

Для парамагнитных газов и редкоземельных элементов температурная зависимость магнитной восприимчивости характеризуется законом Кюри, установленным экспериментально в 1895 г.:

$$\chi = C/T \quad (1.3)$$

где C – постоянная Кюри; T – температура, К.

Для переходных парамагнитных металлов, у которых взаимодействием между элементарными носителями магнетизма (молекулярным полем) пренебречь нельзя, справедлив более общий закон Кюри–Вейсса:

$$\chi = C/(T - \Delta), \quad (1.4)$$

где Δ – постоянная Вейсса, различная для разных веществ (может быть и больше, и меньше нуля).

На рис. 1.2, *a* показана зависимость намагниченности $M(H)$ для ди- и парамагнетиков при не слишком сильных полях и при обычных и высоких температурах. В обоих случаях значение M пропорционально H , что свидетельствует о независимости χ от H . Для намагничивания парамагнетиков до насыщения (рис. 1.2, *б*), то есть до состояния, когда все элементарные магнитные моменты параллельны внешнему полю, требуется (при комнатной температуре) поле напряженностью примерно 10^{11} А/м, а при $T = 1$ К – $3 \cdot 10^5$ А/м. Однако в последние годы выяснилось, что в парамагнетиках

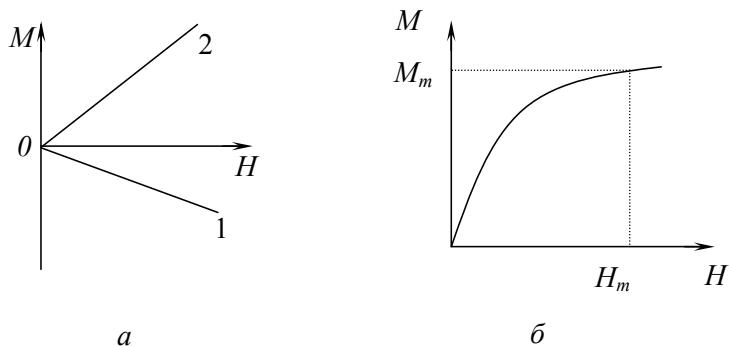


Рис. 1.2. Зависимость намагниченности M от напряженности поля H :
а – для диамагнетиков (1) и для парамагнетиков (2);
б – для парамагнетиков при низких температурах
или в очень сильных полях

можно создать высокую намагниченность, не прибегая к сильным магнитным полям, а используя поток квантов света (оптическую накачку).

Парамагнетики отличаются тем, что они втягиваются в неоднородное магнитное поле. К парамагнетикам относятся кислород, окись азота, соли железа, кобальта и никеля, щелочные металлы, а также Mg, Ca, Al, Cr, Mo, Mn, Pt, Pd и др.

Ферромагнетиками называют вещества, в которых магнитные моменты атомов взаимодействуют так, что они выстраиваются параллельно друг другу (рис. 1.1, *б*). Ферромагнетики в большинстве случаев имеют кристаллическую структуру и характеризуются большими положительными значениями χ (до сотен тысяч и миллионов) и сложной нелинейной зависимостью χ от температуры и внешнего магнитного поля. Характерная

особенность ферромагнетиков – способность при обычных температурах сильно намагничиваться в даже слабых полях. При температурах выше точки Кюри T_K , определенной для каждого материала, ферромагнитное состояние переходит в парамагнитное (рис. 1.3). Точка Кюри для чистого железа составляет 1043 К, для никеля – 631 К, кобальта – 1404 К.

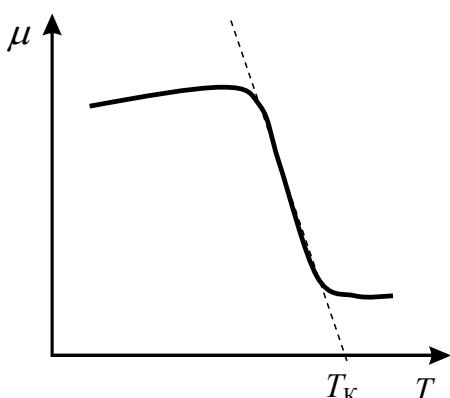


Рис. 1.3. Типичная зависимость магнитной проницаемости μ ферромагнитных материалов от температуры T

Для ферромагнетиков характерно также наличие гистерезиса, сущность которого состоит в том, что значение индукции B неоднозначно определяется величиной магнитного поля H , а зависит также от предшествующей истории образца, то есть от величины и направления магнитного поля, действовавшего на него раньше. Например, индукция в данном поле будет больше в том случае, если материал предварительно намагничивался до насыщения полем того же направления; в случае же, когда ранее действовавшее поле насыщения имело противоположное направление, индукция будет меньше. Гистерезис обусловлен необратимостью процессов намагничивания, что приводит к рассеянию энергии и снижению качества тех намагничающих устройств, где ферромагнитные материалы используются как сердечники (магнитопроводы). Однако такая необратимость и полезна, так как именно благодаря ей материал остается намагниченным после снятия намагничающего поля, то есть ферромагнитный материал становится постоянным магнитом. Параллельное расположение спинов соседних атомов называют атомным ферромагнитным порядком, который характеризуется тем, что в отсутствие внешнего поля ферромагнетик находится в состоянии спонтанного (самоизвестного) намагничивания, которому соответствует намагниченность технического насыщения. Эта намагниченность зависит от температуры, возрастаая по мере ее уменьшения и достигая наибольшей (истинной) намагниченности насыщения при $T = 0\text{K}$.

Для объяснения ферромагнитных свойств твердых тел русский физик Розинг и французский физик Вейсс высказали предположение, что спонтанная намагниченность обусловлена внутренним молекулярным полем, а внешне такая намагниченность не проявляется потому, что тело разбивается на отдельные макроскопические области – домены. В каждом домене магнитные моменты атомов располагаются параллельно друг другу, то есть каждый домен находится в состоянии технического насыщения. На-

Для ферромагнетиков характерно также наличие гистерезиса, сущность которого состоит в том, что значение индукции B неоднозначно определяется величиной магнитного поля H , а зависит также от предшествующей истории образца, то есть от величины и направления магнитного поля, действовавшего на него раньше. Например, индукция в данном поле будет больше в том случае, если материал предварительно намагничивался до насыщения полем того же направления; в случае же, когда ранее действовавшее поле насыщения имело противоположное направление, индукция будет меньше. Гистерезис обусловлен необратимостью процессов намагничивания, что приводит к рассеянию энергии и снижению качества тех намагничающих устройств, где ферромагнитные материалы используются как сердечники (магнитопроводы). Однако такая необратимость и полезна, так как именно благодаря ей материал остается намагниченным после снятия намагничающего поля, то есть ферромагнитный материал становится постоянным магнитом. Параллельное расположение спинов соседних атомов называют атомным ферромагнитным порядком, который характеризуется тем, что в отсутствие внешнего поля ферромагнетик находится в состоянии спонтанного (самоизвестного) намагничивания, которому соответствует намагниченность технического насыщения. Эта намагниченность зависит от температуры, возрастаая по мере ее уменьшения и достигая наибольшей (истинной) намагниченности насыщения при $T = 0\text{K}$.

правления магнитных моментов всех доменов равновероятны (домены расположены друг относительно друга хаотично), внутри образца образуются замкнутые магнитные цепочки, и результирующий магнитный момент ферромагнетика в целом оказывается равным нулю.

В 1931 г. советский ученый Н.С. Акулов (и независимо от него Биттер) разработал метод, позволяющий наблюдать границы доменов. Метод состоит в том, что отполированную электролитическим способом (для снятия с поверхности наклева, искажающего картину доменной структуры) поверхность размагниченного образца покрывают коллоидным раствором тонкого ферромагнитного порошка. Под микроскопом наблюдают образующиеся при этом фигуры (фигура Акулова–Биттера), являющиеся границами доменов.

Экспериментальные исследования показали, что линейные размеры доменов составляют микрометры, иногда десятки микрометров, а магнитный момент домена – около 10^{15} магнитных моментов отдельного атома. Необходимым условием для возникновения ферромагнетизма является наличие внутренних незаполненных оболочек в атоме. Но этого условия недостаточно. Например, незаполненные оболочки имеют атомы всех переходных элементов, тогда как ферромагнитными свойствами обладают лишь три из восьми элементов группы железа (Fe, Co, Ni) и шесть из 14 лантаноидов (Gd, Tb, Dy, Ho, Er и Tm). Чтобы объяснить, почему не все элементы, имеющие внутренние незаполненные оболочки, обладают ферромагнетизмом, следовало выяснить, под действием каких сил магнитные моменты электронов внутри домена выстраиваются параллельно друг другу, намагничивая домен до насыщения, и установить условия, при которых энергия упорядочения, необходимая для возникновения атомного ферромагнитного порядка, противодействует тепловой энергии разупорядочения.

На основе квантовомеханических представлений Я.И. Френкель и независимо от него В. Гейзенберг установили, что атомный ферромагнитный порядок возникает благодаря электростатической энергии взаимодействия между микрочастицами (протонами, электронами), не имеющей аналога в классической физике.

Энергия электростатического взаимодействия между электронами зависит от взаимной ориентации спинов. Разница энергий двух электронов в системах с параллельными и антипараллельными спинами называется обменной энергией. Эта энергия является квантовой добавкой к обычному кулоновскому взаимодействию, ее существование вытекает из принципа тождественности микрочастиц в квантовой механике. Обменная энергия была выявлена в процессе решения задачи об энергетическом состоянии ферромагнетика путем использования математической операции обмена электронами между соседними атомами. Она может отличаться от нуля в том случае, когда электроны достаточно часто находятся в непосредствен-

Конец ознакомительного фрагмента.
Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru