

Министерство образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ»

Факультет электроники

Кафедра микроэлектроники

Материалы и элементы электронной техники

доц. Лазарева Н.П.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

тема: **15** Общие сведения о магнетизме



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Общие сведения о магнетизме

Вещество, помещенное в магнитное поле, приобретает некоторый магнитный момент M (в общем случае $M=IS$).

В веществе магнитный момент есть векторная сумма магнитных моментов элементарных токов, протекающих внутри образца.

Магнитный момент единицы объема вещества называют намагниченностью J_M :

$$J_M = M / V.$$

При неравномерном намагничивании тела

$$J_M = dM / dV.$$

Намагниченность является векторной величиной; в изотропных телах она направлена либо параллельно, либо антипараллельно напряженности магнитного поля H . В системе СИ намагниченность выражается в единицах напряженности магнитного поля (А/м).

Намагниченность связана с напряженностью магнитного поля соотношением

$$J_M = k_M H,$$

где k_M – безразмерная величина, характеризующая способность данного вещества намагничиваться в магнитном поле называемая *магнитной восприимчивостью*. Она численно равна намагниченности при единичной напряженности поля.



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Общие сведения о магнетизме

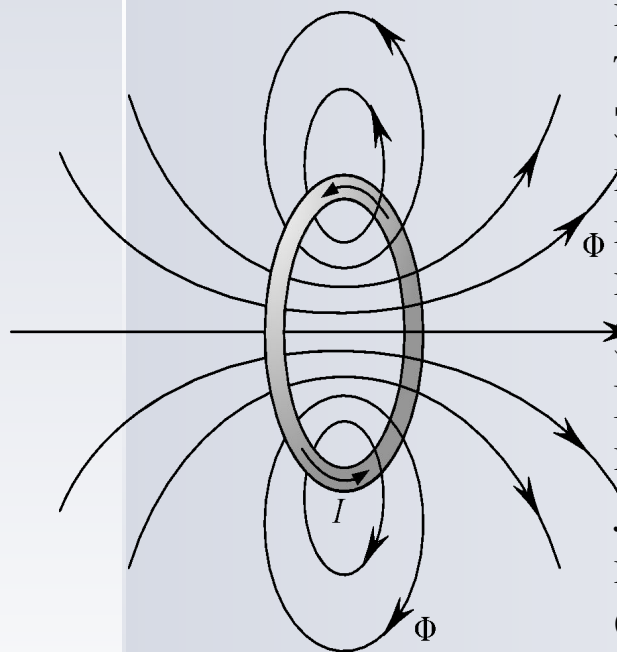
Силовой характеристикой магнитного поля является магнитная индукция B , характеризующая силовое воздействие магнитного поля на замкнутый контур с током.

За единицу магнитной индукции в системе СИ принимают такое значение B , при котором на виток площадью 1 м^2 при силе тока 1 А действует максимальный вращающий момент $1 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Эта единица измерения получила название *тесла* (Тл).

Магнитная индукция характеризует плотность магнитного потока.

Линии магнитного потока всегда замкнуты и никогда не пересекаются между собой. Этот факт отражает фундаментальное свойство магнитного поля – отсутствие магнитных зарядов, из которых могли исходить линии магнитного потока. Магнитные поля возникают лишь под действием электрических токов.



Магнитное поле
замкнутого тока



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Общие сведения о магнетизме

Магнитная индукция зависит от свойств среды, в которой распространяется магнитный поток.

Намагниченное тело, находящееся во внешнем поле, создает собственное магнитное поле, которое в изотропных материалах направлено параллельно или антипараллельно внешнему полю.

Суммарная магнитная индукция в веществе определяется алгебраической суммой индукций внешнего и собственного полей:

$$B_i = \mu_0 H + \mu_0 J_M,$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн / м – магнитная постоянная в системе СИ.

$$B_i = \mu_0 H (1 + k_M) = \mu_0 \mu H,$$

где $\mu = 1 + k_M$ – *относительная магнитная проницаемость*, которая показывает, во сколько раз магнитная индукция B поля в данной среде превышает магнитную индукцию в вакууме.

Магнитная проницаемость зависит от природы материала и его состояния.



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Общие сведения о магнетизме

Первопричиной магнитных свойств вещества являются внутренние формы движения электрических зарядов, представляющие собой элементарные круговые токи, обладающие магнитными моментами. К таким формам движения относятся электронные спины и орбитальное вращение электронов.

Спин является такой же фундаментальной характеристикой любой микрочастицы, как ее масса или заряд.

Со спином электрона связан его собственный магнитный момент, который может принимать лишь две ориентации в магнитном поле, а численные значения проекции спинового магнитного момента на направление поля в точности равны магнетону Бора ($\pm\mu_B$).

$$(\mu_B = eh/(4\pi m_e) = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ А} \cdot \text{м}^2).$$



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Общие сведения о магнетизме

Магнитный момент атома представляет собой достаточно сложную совокупность магнитных моментов отдельных частиц, входящих в его структуру.

В большинстве случаев магнитным моментом ядра можно пренебречь.

Магнетизм атома в основном определяется строением его электронной оболочки.

В зависимости от величины магнитного момента атомы подразделяют на магнито-активные и магнито-нейтральные.

У магнито-нейтральных атомов суммарный магнитный момент близок к нулю. Тем не менее, в природе отсутствуют атомы, на которые совсем не действует магнитное поле.

Магнитные свойства вещества складываются из совокупного действия магнетизма его элементарных носителей.



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Общие сведения о магнетизме

Магнито-активными свойствами обладают атомы, содержащие незастроенные внутренние d - и f -электронные оболочки.

К их числу относятся атомы переходных металлов и редкоземельных элементов.

Переходные металлы являются основными компонентами большинства магнитных материалов.

Магнитный момент атомов этих элементов практически полностью определяется количеством нескомпенсированных спинов в d -оболочке.

Например, магнитный момент атома никеля составляет $2\mu_B$, атома железа – $3\mu_B$, а у ионов Fe^{3+} он составляет даже $5\mu_B$.

При конденсации атомов в твердое тело происходит частичная коллективизация электронов в s - и d - состояниях, что сопровождается некоторой потерей магнетизма.

Так, средний элементарный магнитный момент в расчете на один атом у кристалла железа составляет 2,21, а у никеля всего лишь 0,6 (в ед. μ_B).



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Общие сведения о магнетизме

Атомы элементов, у которых нет достраиваемых внутренних электронных оболочек, называют нормальными.

Магнито-активные свойства таких атомов (если они ими обладают) могут быть обусловлены особенностями распределения валентных электронов.

Суммарный магнитный момент (как орбитальный, так и спиновый) полностью заполненных внутренних оболочек равен нулю, поскольку для заполнения состояний необходимы электроны с противоположными направлениями элементарных магнитных моментов. В результате происходит их полная компенсация.

Ионы нормальных металлов магнито-нейтральны.

Наличие или отсутствие магнитного момента у атомов и ионов обуславливает главные особенности поведения различных веществ в магнитном поле.



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Классификация веществ по магнитным свойствам

По реакции на внешне магнитное поле и характеру внутреннего магнитного упорядочения все вещества в природе можно подразделить на пять групп:

диамагнетики,
парамагнетики,
ферромагнетики,
антиферромагнетики,
ферримагнетики.

Перечисленным видам магнетиков соответствует пять различных типов магнитного состояния вещества –

диамагнетизм,
парамагнетизм,
ферромагнетизм,
антиферромагнетизм,
ферримагнетизм.



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Классификация веществ по магнитным свойствам

К диамагнетикам относят вещества, у которых магнитная восприимчивость k_M отрицательна и не зависит от напряженности внешнего магнитного поля.

Диамагнетизм обусловлен небольшим изменением угловой скорости орбитального вращения электронов при внесении атома в магнитное поле.

Диамагнитный эффект является проявлением закона электромагнитной индукции на атомном уровне.

Электронную орбиту можно рассматривать как замкнутый контур, не обладающий магнитным сопротивлением.

Под действием внешнего поля в контуре изменяется сила тока и возникает дополнительный магнитный момент.

Согласно закону Ленца, этот момент направлен навстречу внешнему полю.



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Классификация веществ по магнитным свойствам

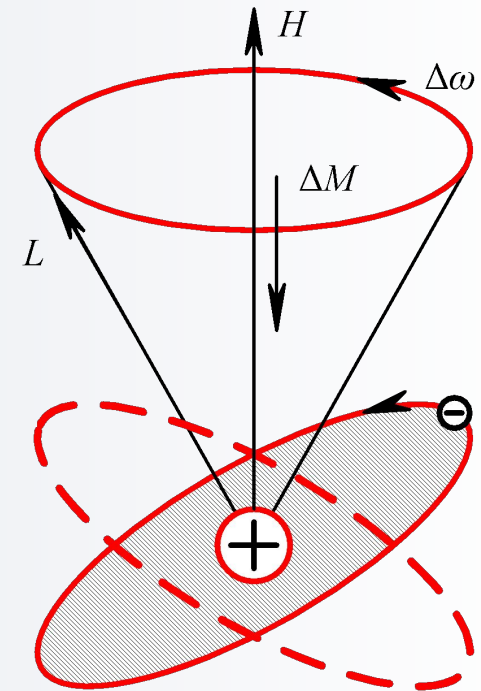
Если плоскость электронной орбиты расположена не перпендикулярно вектору \mathbf{H} , то внешнее магнитное поле вызывает прецессионное движение орбиты вокруг направления \mathbf{H} . При этом вектор орбитального магнитного момента ($\mathbf{M}_{\text{орб}}$) описывает конус. Угловая скорость прецессии определяет значение отрицательного магнитного момента $\Delta\mathbf{M}$.

L - момент количества движения (момента импульса). Проекция L на направление магнитного поля или любую другую ось Z всегда кратна постоянной Планка \hbar .

Орбитальный магнитный момент электрона $M_{\text{орб}}$ связан линейной зависимостью с моментом импульса:

$$M_{\text{орб}} = \gamma L,$$

где $\gamma = e/(2m_e)$ - гиромагнитное соотношение.



Прецессия электронной орбиты под действием магнитного поля



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Классификация веществ по магнитным свойствам

Диамагнитный эффект является универсальным эффектом, присущим всем веществам, находящимся в любом агрегатном состоянии. Однако в большинстве случаев он маскируется более сильными магнитными эффектами. Диамагнетизм электронных оболочек выступает на первый план, когда собственный магнитный момент атомов равен нулю (т.е. спиновые магнитные моменты . попарно скомпенсированы).

К диамагнетикам относятся инертные газы, водород, азот, многие жидкости (вода, нефть и ее производные, глицерин), ряд металлов (медь, серебро, золото, цинк, ртуть, галлий, висмут и др.), большинство полупроводников (кремний, германий, соединения $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$) и органических соединений, щелочно-галогенидные кристаллы, неорганические стекла, графит и др. Диамагнетиками являются все вещества с ковалентной химической связью и вещества в сверхпроводящем состоянии.



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Классификация веществ по магнитным свойствам

Численные значения магнитной восприимчивости диамагнетиков составляют – ($10^{-7} \div 10^{-6}$). Диамагнетики намагничиваются против направления поля, для них выполняется неравенство $\mu < 1$. Относительная магнитная проницаемость незначительно отличается от единицы (за исключением сверхпроводников).

Магнитная восприимчивость диамагнетиков очень слабо изменяется с температурой. Это объясняется тем, что диамагнитный эффект обусловлен внутриатомными процессами, на которые тепловое движение частиц не оказывает влияния.

Внешним проявлением диамагнетизма является выталкивание диамагнетиков из неоднородного магнитного поля. Этот эффект особенно выражен у сверхпроводников (эффект Мейсснера).



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Классификация веществ по магнитным свойствам

К парамагнетикам относят вещества с *положительной* магнитной восприимчивостью, не зависящей от напряженности внешнего магнитного поля.

В парамагнетиках атомы обладают элементарным магнитным моментом даже в отсутствие внешнего поля, однако из-за теплового движения эти магнитные моменты распределены хаотично так, что намагниченность вещества в целом равна нулю.

Внешнее магнитное поле вызывает преимущественную ориентацию магнитных моментов атомов в одном направлении.

Тепловая энергия противодействует созданию магнитной упорядоченности. Поэтому парамагнитная восприимчивость сильно зависит от температуры.

Для многих твердых парамагнетиков температурное изменение магнитной восприимчивости подчиняются закону Кюри – Вейсса:

$$k_M = C / (T - \Theta_p),$$

где C и Θ_p – постоянные величины для данного вещества. Константа Θ_p получила название парамагнитной точки Кюри.



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Классификация веществ по магнитным свойствам

При комнатной температуре магнитная восприимчивость парамагнетиков равна $10^{-3} - 10^{-6}$. Поэтому магнитная проницаемость незначительно отличается от единицы.

Благодаря положительной намагниченности парамагнетики, помещенные в неоднородное магнитное поле, втягиваются в него.

Парамагнитные свойства проявляют кислород, оксид азота, щелочные и щелочно-земельные металлы, алюминий, некоторые металлы переходной группы (например, титан, молибден, палладий, платина и др.), соли железа, кобальта, никеля, а также большинство редкоземельных элементов и соли на их основе.

Парамагнитный эффект находит практическое применение в физике для получения сверхнизких температур (ниже 0,001 К).

При адиабатическом размагничивании парамагнетиков происходит разупорядочение его магнитной структуры, что сопровождается соответствующим повышением энтропии системы. Это повышение требует подвода теплоты, источником которой может быть только внутренняя энергия охлаждаемого образца (тепловые колебания атомов), теплоизолированного от окружающей среды.



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Классификация веществ по магнитным свойствам

К **ферромагнетикам** относят вещества с большой положительной магнитной восприимчивостью (до 10^6), которая сильно зависит от напряженности магнитного поля и температуры.

Ферромагнетикам присуща внутренняя спонтанная магнитная упорядоченность, выражающаяся в существовании макроскопических областей с параллельно ориентированными магнитными моментами атомов.

Важнейшая особенность ферромагнетиков заключается в их способности намагничиваться до насыщения в относительно слабых магнитных полях, а также существование магнитного гистерезиса при перемагничивании вещества в переменных полях.

Вследствие гистерезиса намагниченность и магнитная индукция ферромагнетика не являются однозначной функцией напряженности внешнего магнитного поля.

Их значение зависит от предыстории образца.



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Классификация веществ по магнитным свойствам

Антиферромагнетиками являются вещества, в которых ниже некоторой температуры спонтанно возникает антипараллельная ориентация элементарных магнитных моментов одинаковых атомов или ионов кристаллической решетки.

Для антиферромагнетиков характерна небольшая положительная магнитная восприимчивость ($k_M = 10^{-5} \div 10^{-3}$), которая сильно зависит от температуры.

При нагревании антиферромагнетик испытывает фазовый переход в парамагнитное состояние. Температура T_N такого перехода, при которой исчезает магнитная упорядоченность, получила название *точки Нееля* (или антиферромагнитная точка Кюри).

Антиферромагнетизм обнаружен у хрома ($T_N = 310$ К), марганца (α -Mn, $T_N = 100$ К), ряда редкоземельных элементов (Ce, Nd, Sm, Pr, Eu).

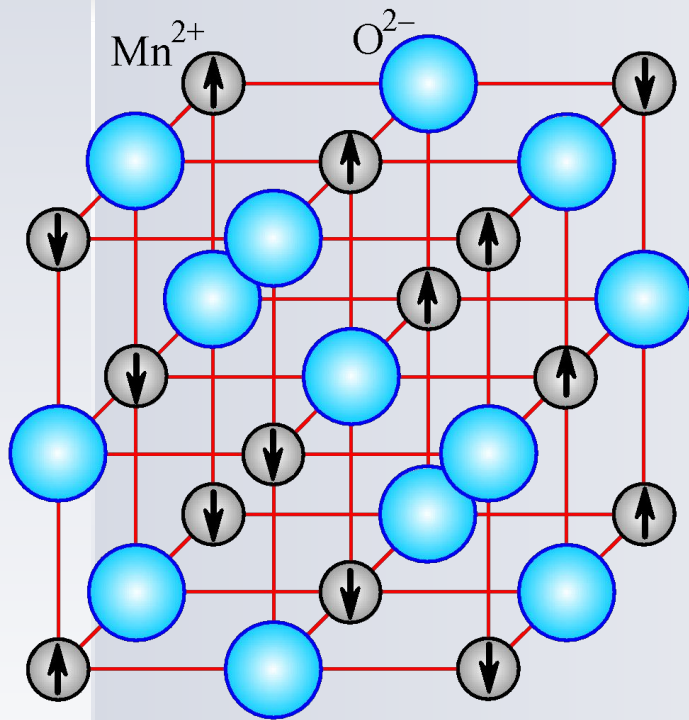
Типичными антиферромагнетиками являются простейшие химические соединения на основе металлов переходной группы – оксиды (NiO, MnO, FeO, CoO), фториды (NiF₂, MnF₂), хлориды (CoCl₂, FeCl₂), сульфиды (MnS₂, FeS), сульфаты (NiSO₄, MnSO₄), карбонаты (CoCO₃, FeCO₃) и др.

Всего известно около тысячи соединений со свойствами антиферромагнетиков.



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Классификация веществ по магнитным свойствам



На рисунке в качестве примера показана магнитная структура оксида марганца, кристаллизующегося в решетке типа NaCl.

Магнитоактивные ионы марганца с противоположными направлениями магнитных моментов образуют две, вставленные друг в друга кубические подрешетки.

Несмотря на магнитную упорядоченность, суммарная намагниченность кристалла при отсутствии внешнего поля равна нулю.

Магнитная упорядоченность в структуре MnO



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Классификация веществ по магнитным свойствам

К **ферримагнетикам** относят вещества, магнитные свойства которых обусловлены нескомпенсированным антиферромагнетизмом.

Подобно ферромагнетикам они обладают высокой магнитной восприимчивостью, которая существенно зависит от напряженности магнитного поля и температуры.

Свойствами ферримагнетиков обладают некоторые упорядоченные металлические сплавы, но, главным образом, – различные оксидные соединения, среди которых наибольший практический интерес представляют ферриты.

Диа-, пара- и антиферромагнетики можно объединить в группу *слабomagнитных веществ*, тогда как ферро- и ферримагнетики представляют собой *сильномагнитные материалы*.



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Природа ферромагнитного состояния

Экспериментально доказано, что особые свойства ферромагнетиков обусловлены их доменным строением.

Домены представляют собой макроскопические области, намагниченные практически до насыщения даже в отсутствие внешнего магнитного поля.

Согласно современной теории ферромагнетизма, спонтанная намагниченность доменов обусловлена параллельной ориентацией магнитных моментов отдельных атомов.

Как правило, отличным от нуля магнитным моментом обладают те атомы и ионы, которые в своих электронных оболочках имеют нескомпенсированные спины.

Фактически объяснение причин спонтанной намагниченности ферромагнетиков сводится к рассмотрению природы сил, вызывающих спиновую магнитную упорядоченность.



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Природа ферромагнитного состояния

В физике известно два вида сил, играющих существенную роль в атомных явлениях – магнитные и электрические.

Магнитные силы являются слишком слабыми, чтобы противодействовать тепловому движению при температурах выше нескольких кельвинов. Следовательно, ферромагнитное состояние возникает за счет электрических сил.

Энергия электростатического взаимодействия валентных электронов может составлять несколько электрон-вольт, так что даже небольшой доли этой энергии достаточно для достижения необходимого ориентирующего эффекта.

В соответствии с теорией ферромагнетизма решающую роль в создании спонтанной намагниченности играют силы обменного взаимодействия.

Для двух близко расположенных атомов (например, в молекуле водорода) энергия обменного взаимодействия определяется выражением:

$$\mathcal{E}_A = - A \cdot (\mathbf{s}_1 \mathbf{s}_2),$$

где A – так называемый обменный интеграл, имеющий размерность энергии, \mathbf{s}_1 и \mathbf{s}_2 – единичные векторы, характеризующие направления спиновых моментов взаимодействующих электронов.

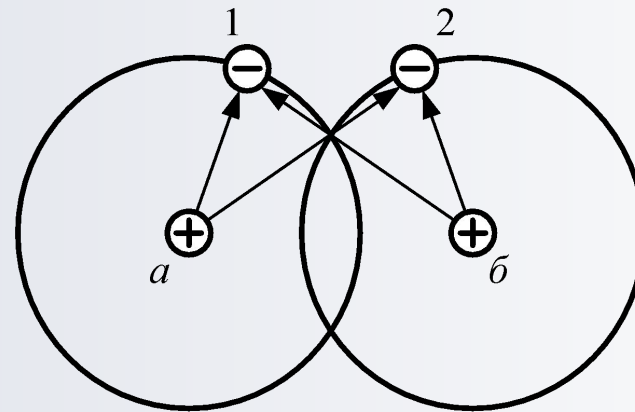


ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Природа ферромагнитного состояния

На рисунке схематично показано расположение электронов и ядер в двухатомной молекуле водорода.

Электрон 1 находится в кулоновском поле ядра a и одновременно притягивается ядром b . В свою очередь, электрон 2 испытывает кулоновское притяжение со стороны ядра b и частично – ядра a .



Из-за перекрытия электронных оболочек электроны 1 и 2 могут поменяться местами.

Вследствие неразличимости (тождественности) электронов энергетическое состояние молекулы не изменится.

В результате происходит обобществление электронов, т.е. каждый из них будет одинаково притягиваться атомами a и b .

Благодаря обмену электронами и электростатическому взаимодействию электронов с ядрами, между атомами возникают силы притяжения (ковалентная связь).



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Природа ферромагнитного состояния

Электростатическая энергия молекулы минимальна при определенной ориентации спинов электронов.

При положительном знаке обменного интеграла минимуму электростатической энергии отвечает *параллельная ориентация спинов*, при которой $(\mathbf{s}_1 \mathbf{s}_2) = 1$.

Если же обменный интеграл отрицателен, то энергетически выгодно *антипараллельное* расположение *спинов*, когда $(\mathbf{s}_1 \mathbf{s}_2) = -1$.

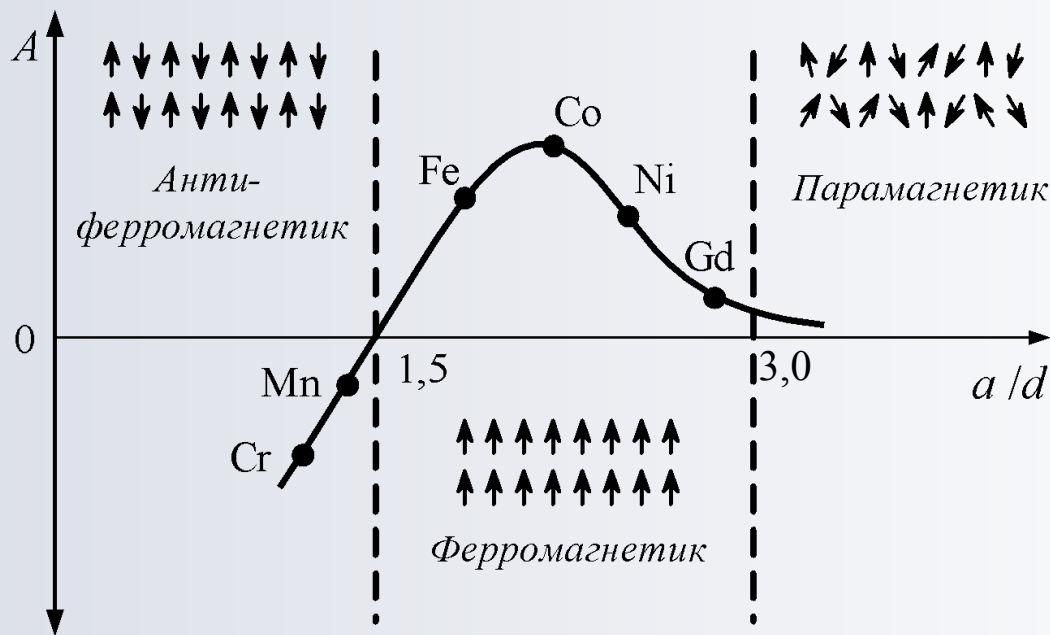
Обменный интеграл характеризует влияние магнитной упорядоченности на энергию системы. Его численное значение и знак определяются степенью перекрытия электронных оболочек, т.е. зависят от расстояния между атомами.

Обменные силы изотропны по своей природе и резко убывают при увеличении расстояния между атомами (как правило, по экспоненциальному закону). Поэтому в твердом теле, состоящем из многих атомов, основной вклад в обменную связь вносят обменные силы между ближайшими соседними электронами.



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Природа ферромагнитного состояния



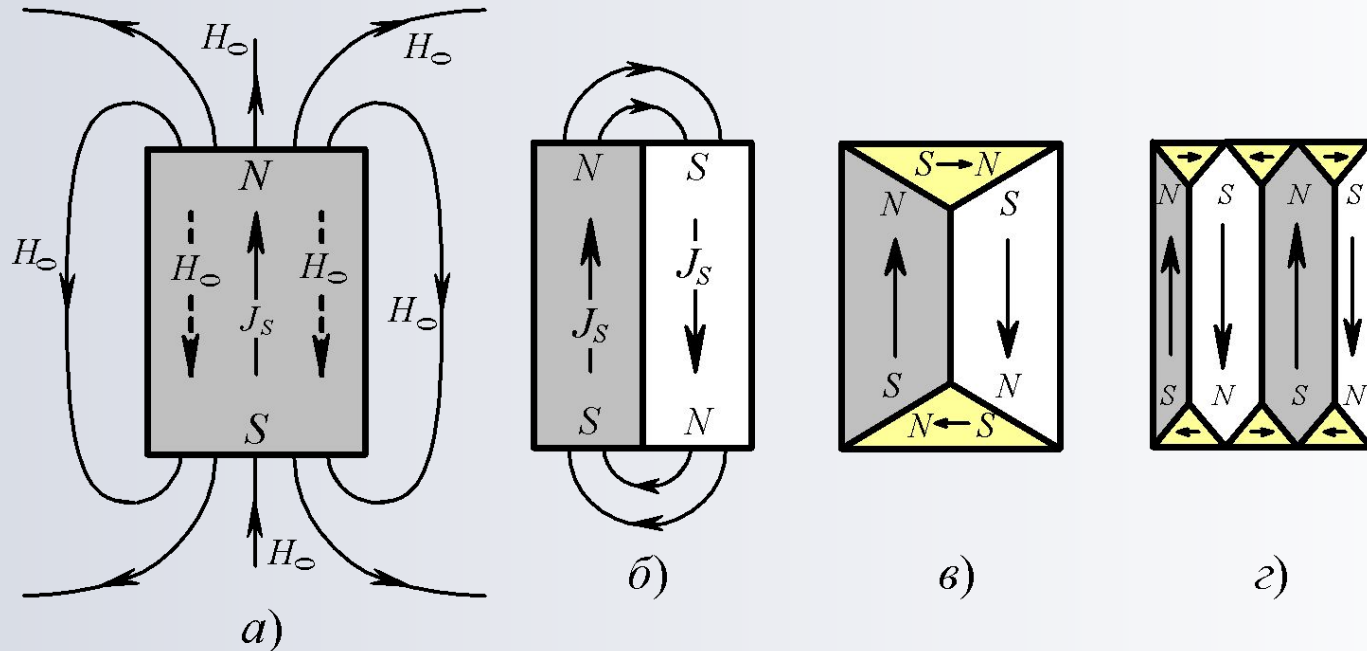
На рисунке показана зависимость обменного интеграла (т.е. энергии обменного взаимодействия) от степени перекрытия электронных оболочек соседних атомов, характеризуемой отношением расстояния между атомами a к диаметру d незаполненной электронной оболочки, содержащей нескомпенсированные спины.

Энергия обменного взаимодействия оказывается слишком незначительной, если расстояние между атомами в 3–4 раза превышает диаметр электронной



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Природа ферромагнитного состояния



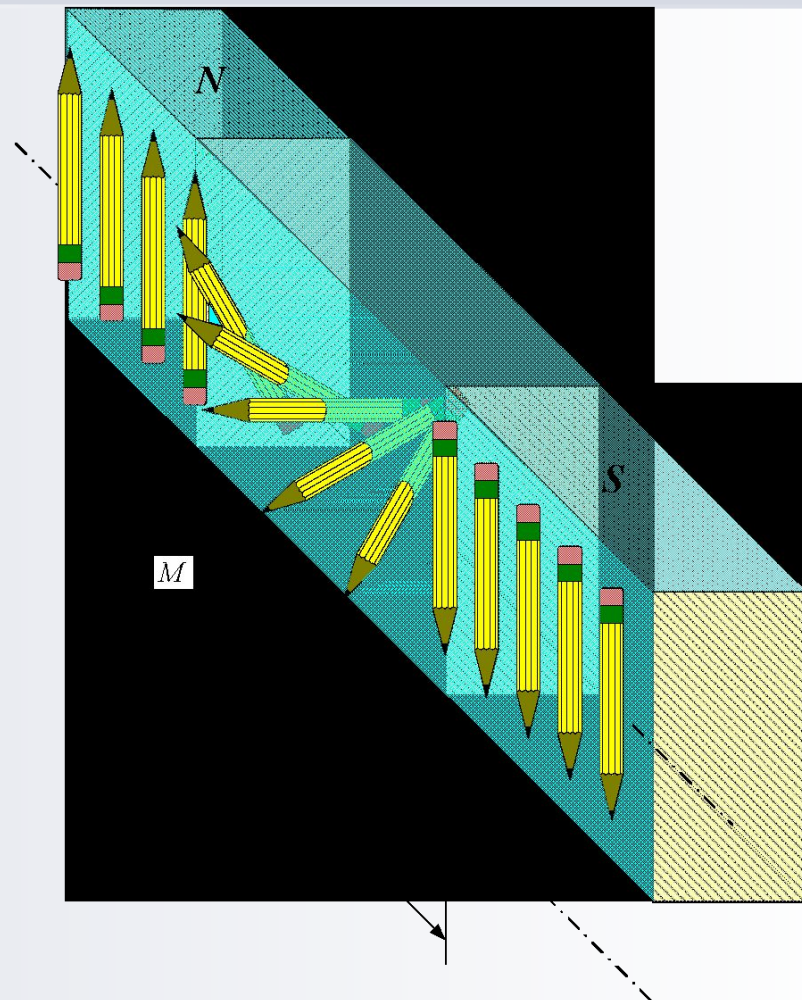
Возможные варианты доменных структур:

J_s – намагниченность насыщения; H_0 – напряженность внутреннего размагничивающего поля



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Общие сведения о магнетизме

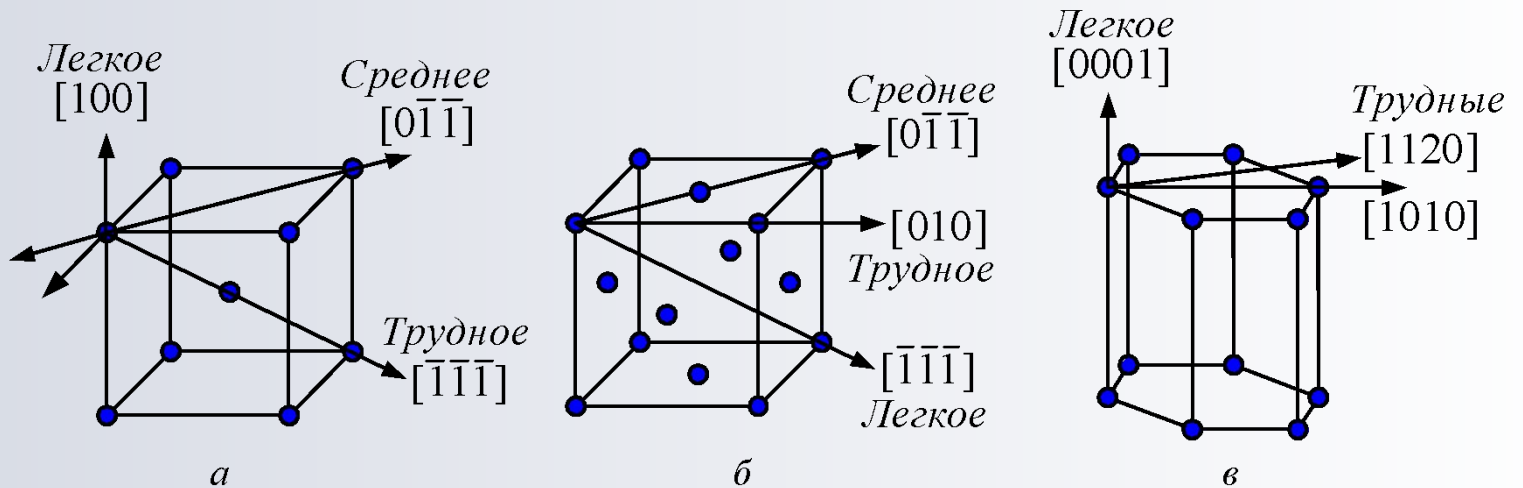


Структура переходного слоя между антипараллельными доменами (стенка Блоха)



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Общие сведения о магнетизме



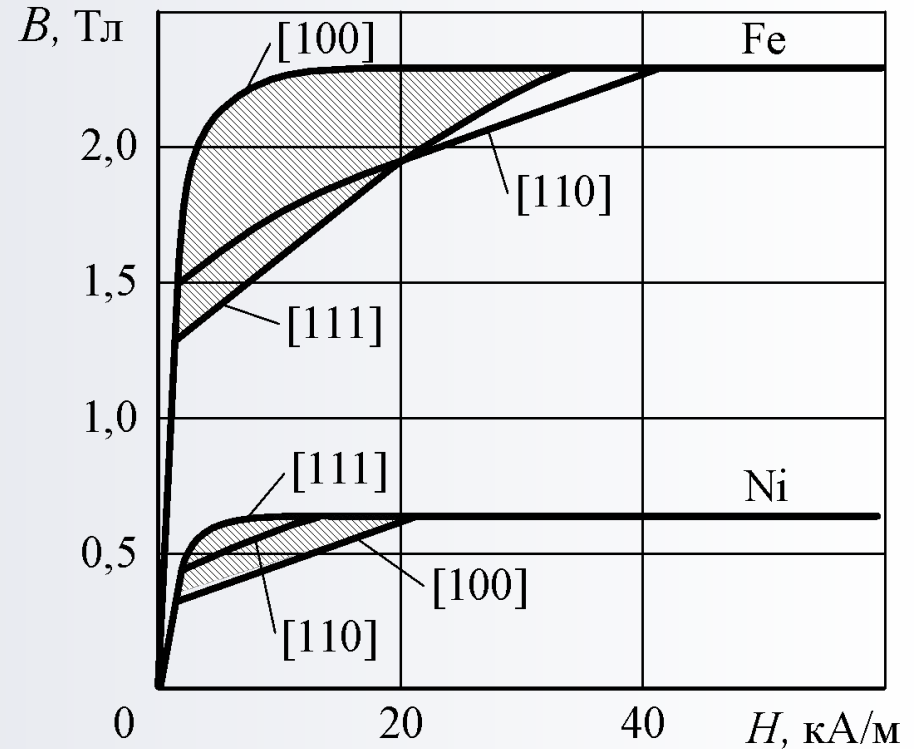
Направления легкого, среднего и трудного намагничивания в
монокристаллах ферромагнитных кристаллов:

a — железа; *б* — никеля; *в* — кобальта



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Общие сведения о магнетизме

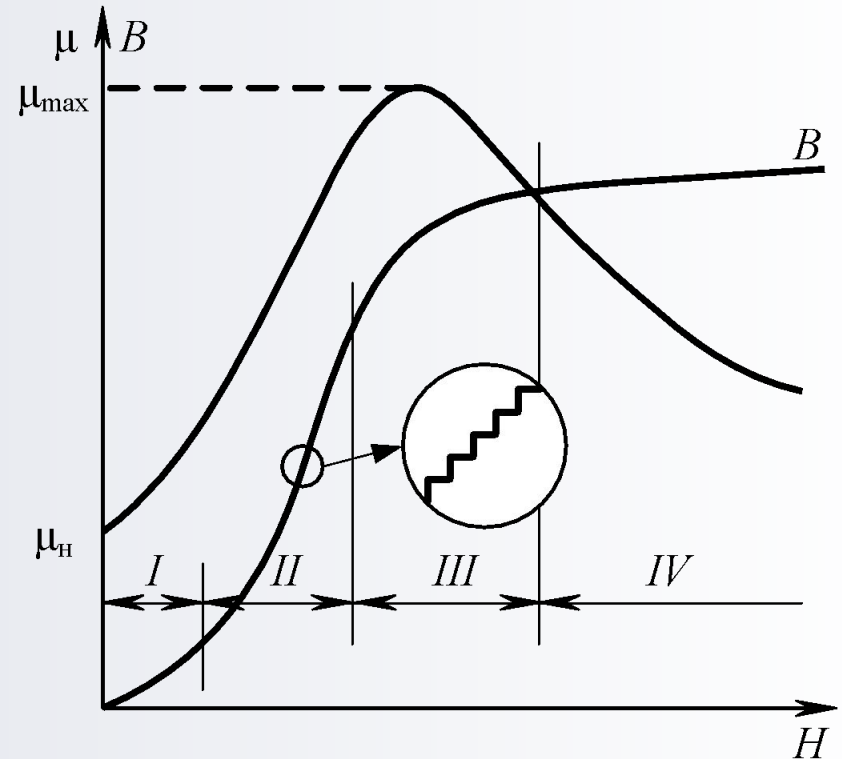


Кривые намагничивания кристаллов железа и никеля вдоль различных кристаллографических направлений



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Общие сведения о магнетизме



Характерные зависимости магнитной индукции B и магнитной проницаемости μ поликристаллического ферромагнетика от напряженности внешнего магнитного поля



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Общие сведения о магнетизме

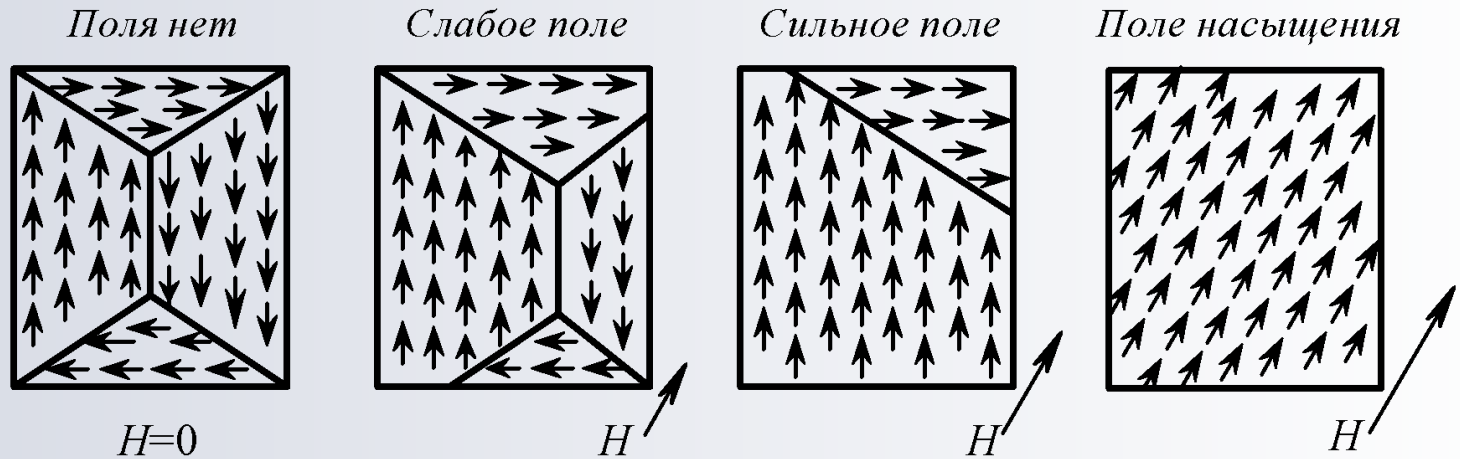
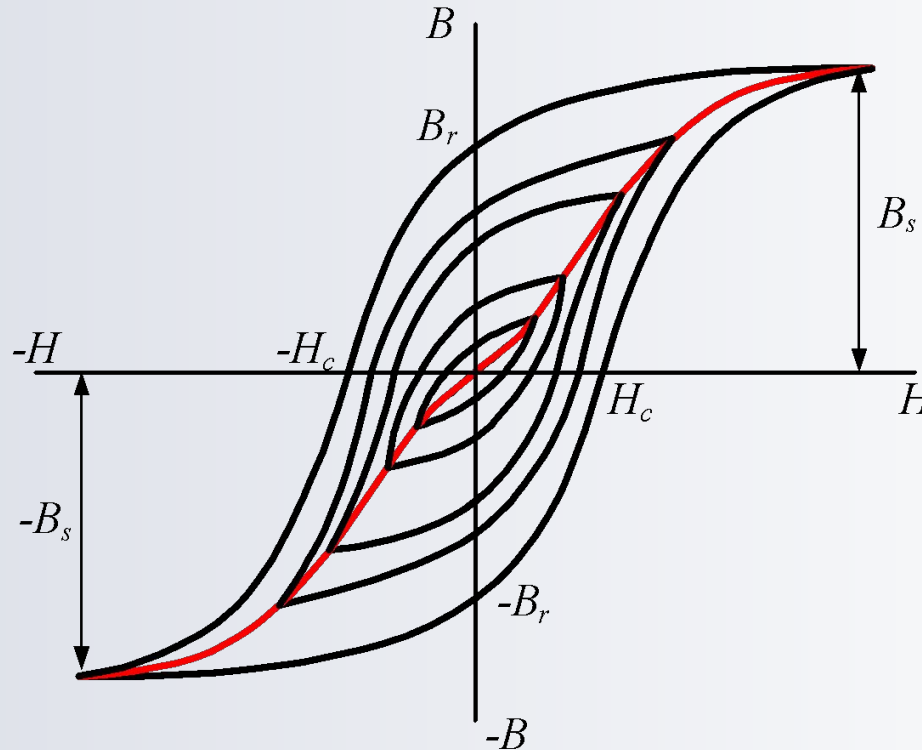


Схема изменения ориентации спиновых магнитных моментов в доменах на различных стадиях намагничивания ферромагнетика



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Общие сведения о магнетизме

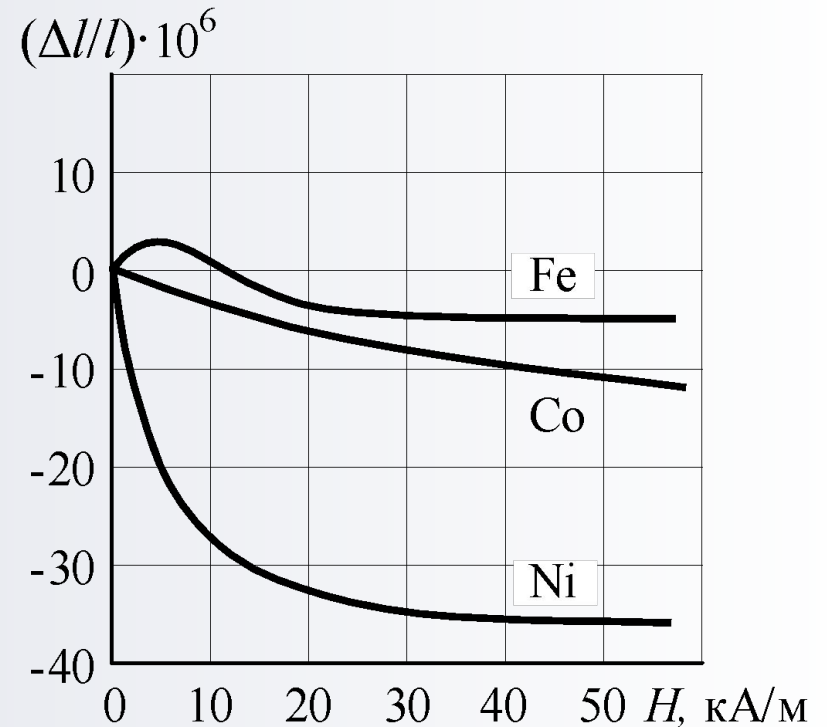


Петли гистерезиса при различных значениях амплитуды переменного магнитного поля и основная кривая намагничивания ферромагнетика



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Общие сведения о магнетизме

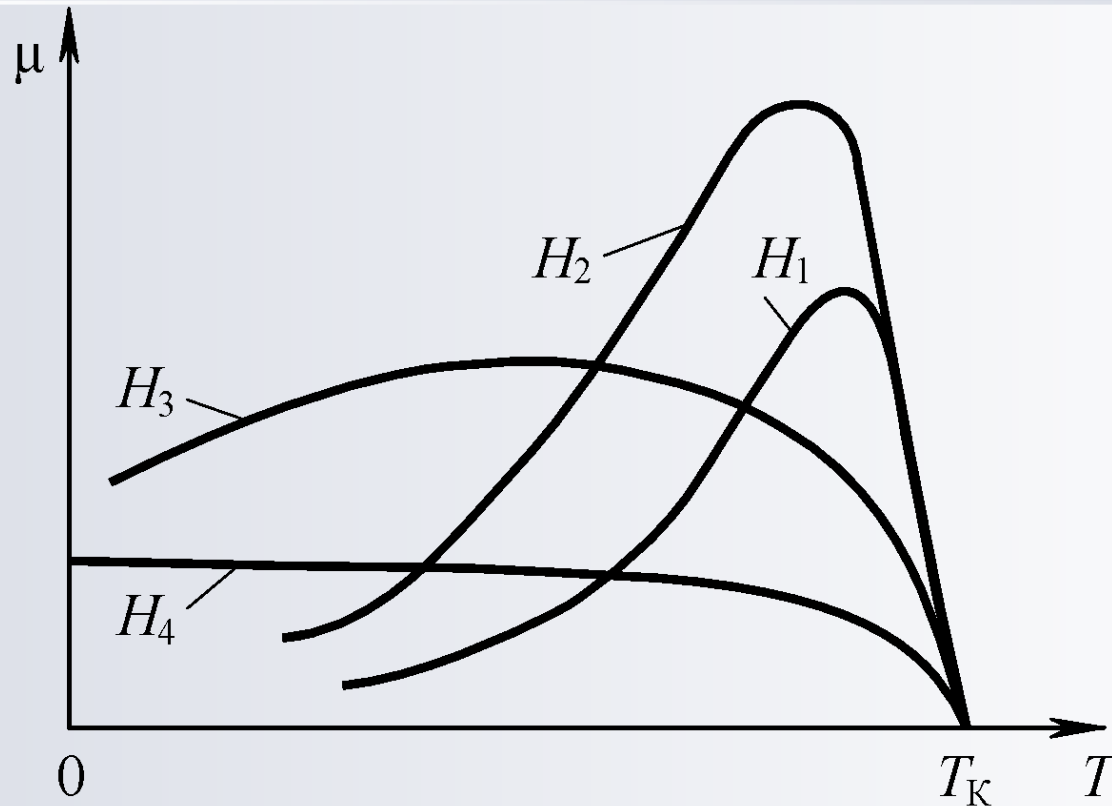


Зависимость магнитострикционной деформации поликристаллов железа, кобальта и никеля от напряженности внешнего поля



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Общие сведения о магнетизме



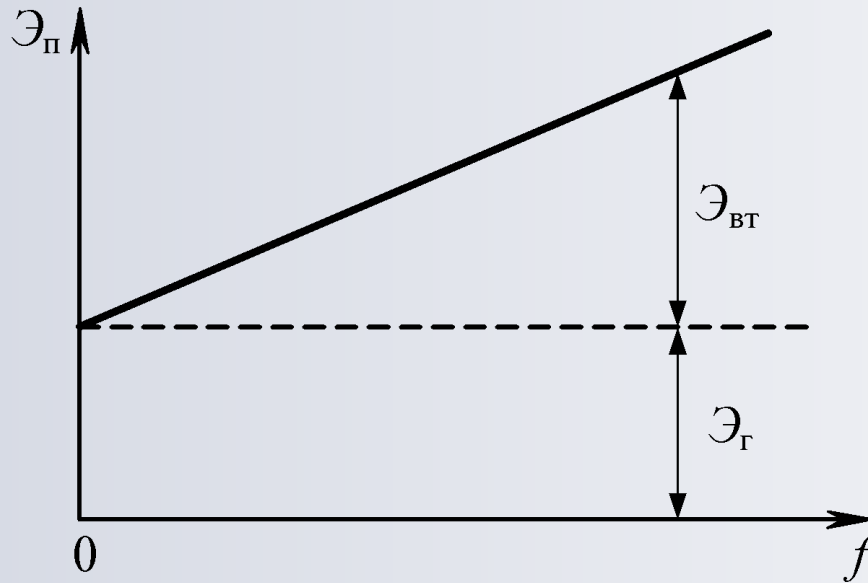
Температурные зависимости магнитных проницаемостей ферромагнетика, измеренных при различных напряженностях внешнего поля:

$H_4 > H_3 > H_2 > H_1$; напряженность h_1 соответствует μ_n , H_4 — области технического насыщения



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Общие сведения о магнетизме



Потери на перемагничивание за один период в зависимости от частоты изменения поля



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Общие сведения о магнетизме

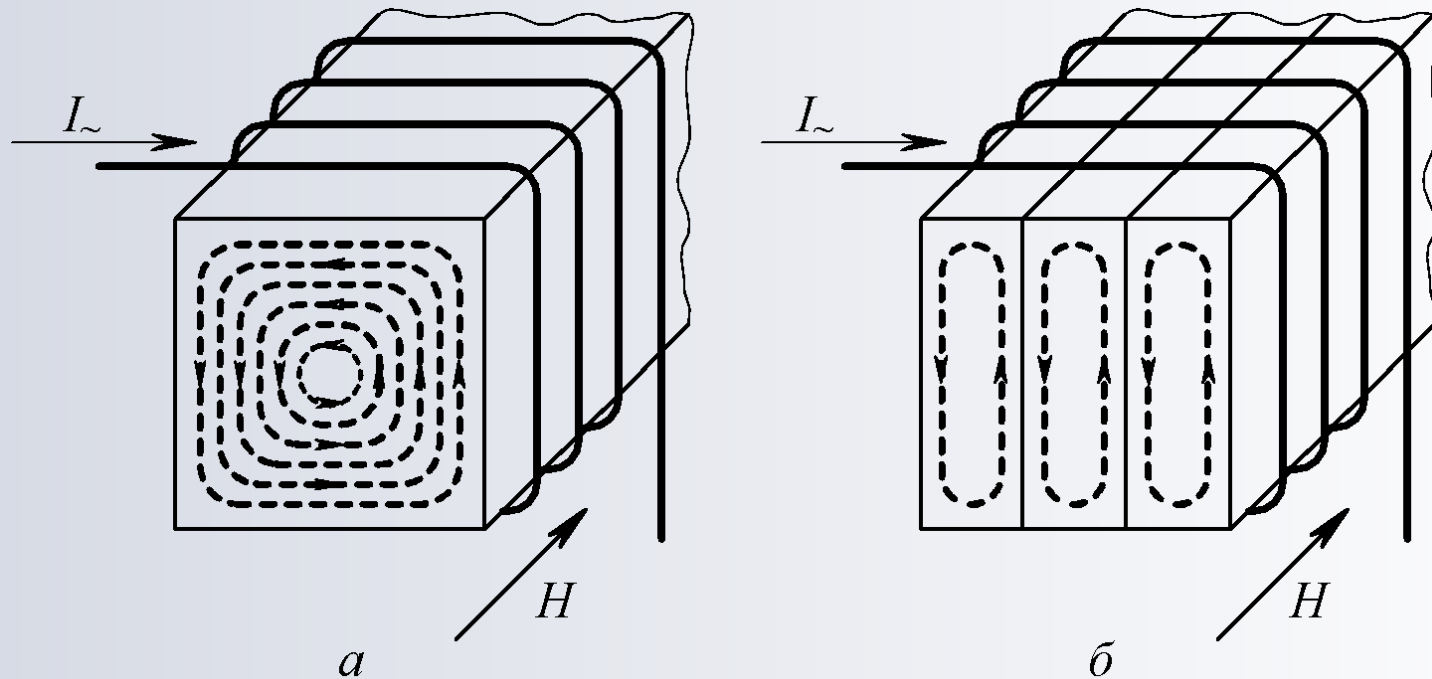


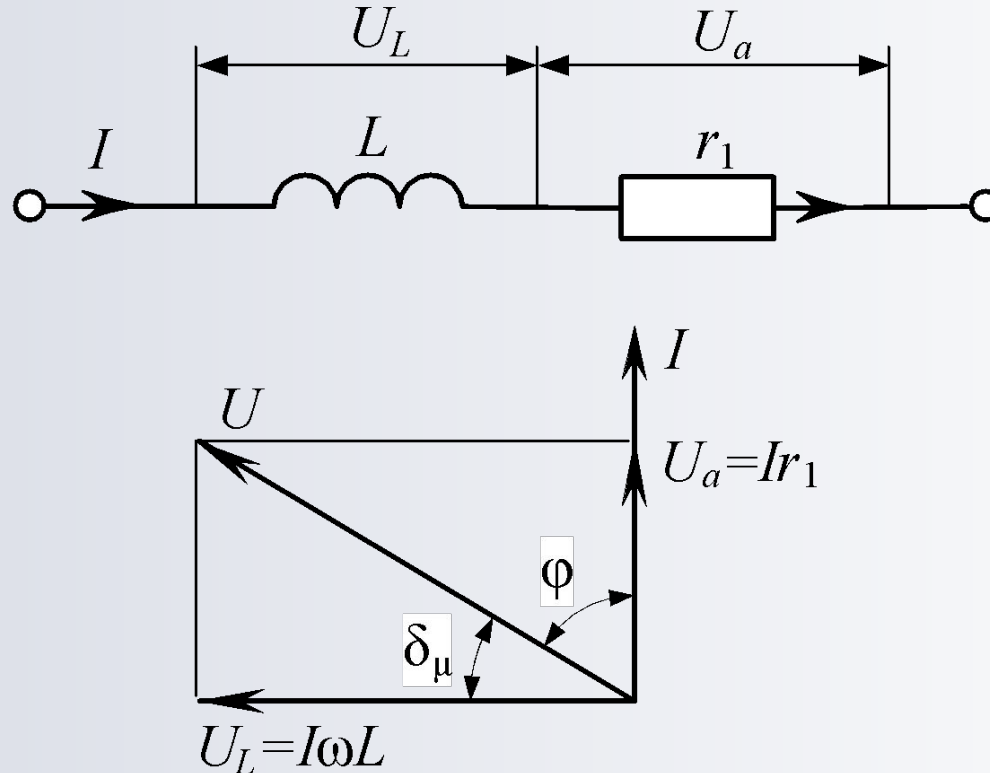
Схема распределения вихревых токов в поперечном сечении ферромагнитного сердечника:

а — сплошной сердечник; *б* — сборный сердечник



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Общие сведения о магнетизме

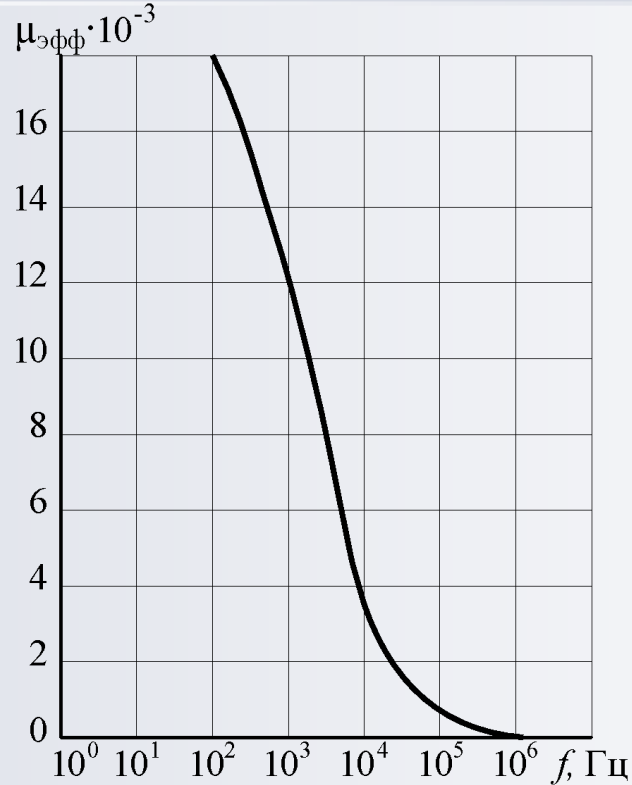


Эквивалентная схема и векторная диаграмма катушки индуктивности с магнитным сердечником



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Общие сведения о магнетизме

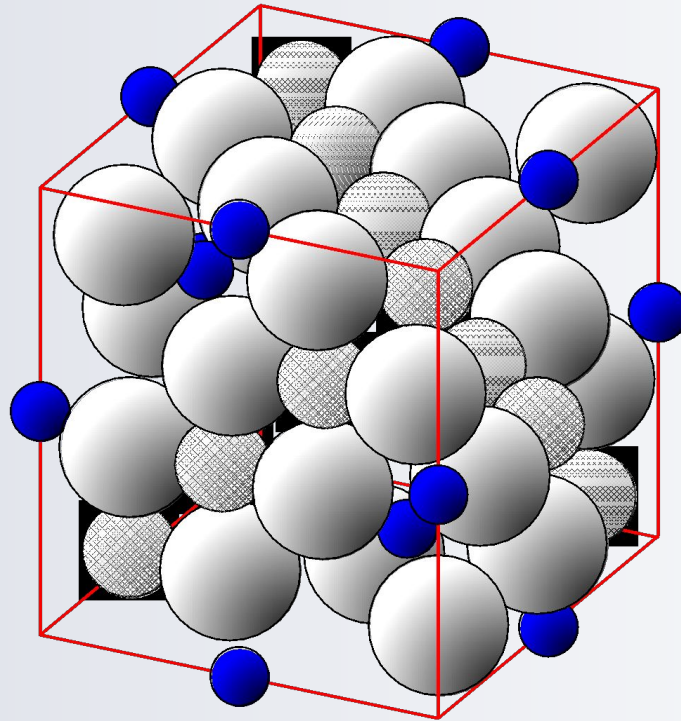


Зависимость эффективной магнитной проницаемости пермаллоя от частоты в слабом поле ($H = 0,8$ А/м)



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Общие сведения о магнетизме



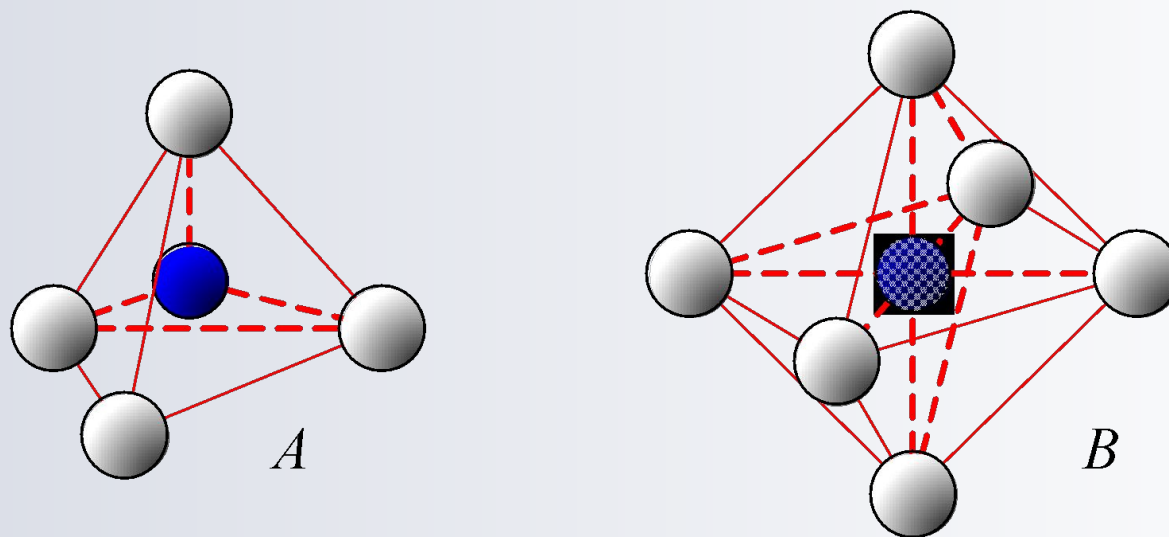
Элементарная ячейка шпинели:

белые шарики — ионы кислорода; черные — катионы в тетраэдрических позициях; заштрихованные — катионы : в октаэдрических позициях



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Общие сведения о магнетизме

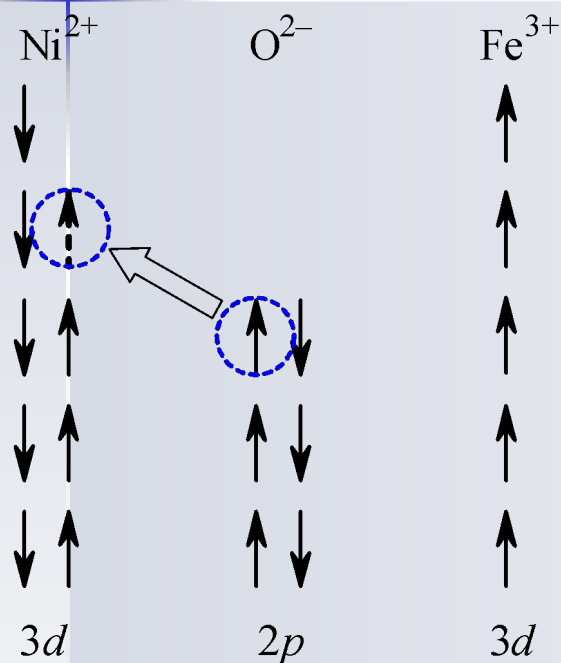


Схематическое изображение кислородных междуузлий тетраэдрического (*A*) и октаэдрического (*B*) типов (в центре — металлический катион)



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Общие сведения о магнетизме



a)

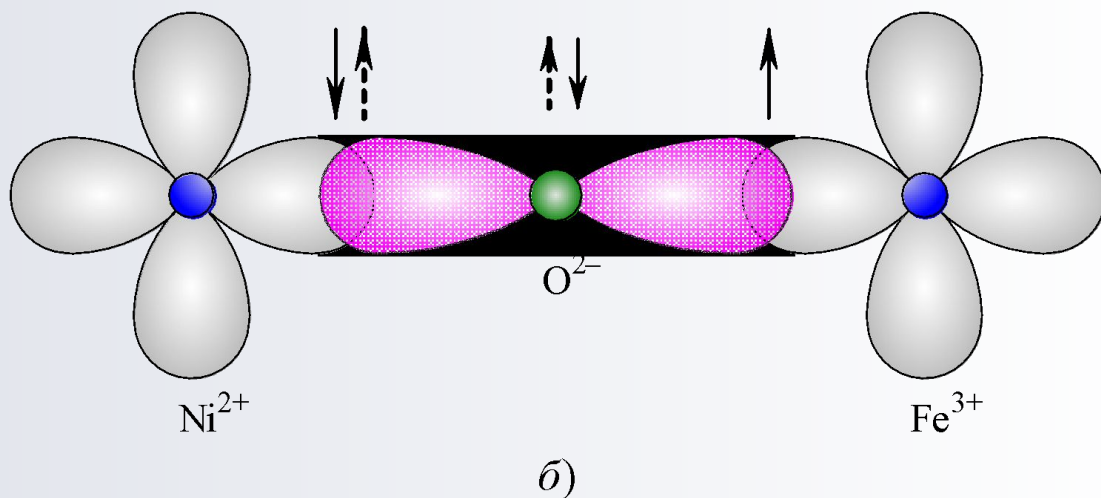


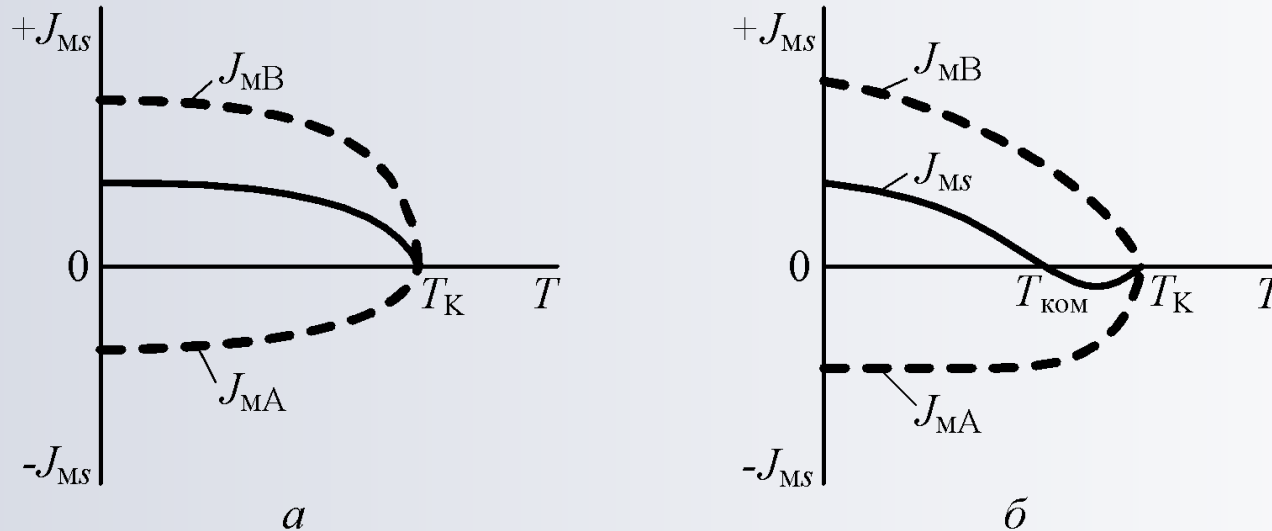
Схема косвенного обменного взаимодействия в феррите никеля:

- a* – распределение спинов в наружных оболочках взаимодействующих ионов;
- б* – перекрытие электронных оболочек ионов, участвующих в создании магнитного упорядочения



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Общие сведения о магнетизме



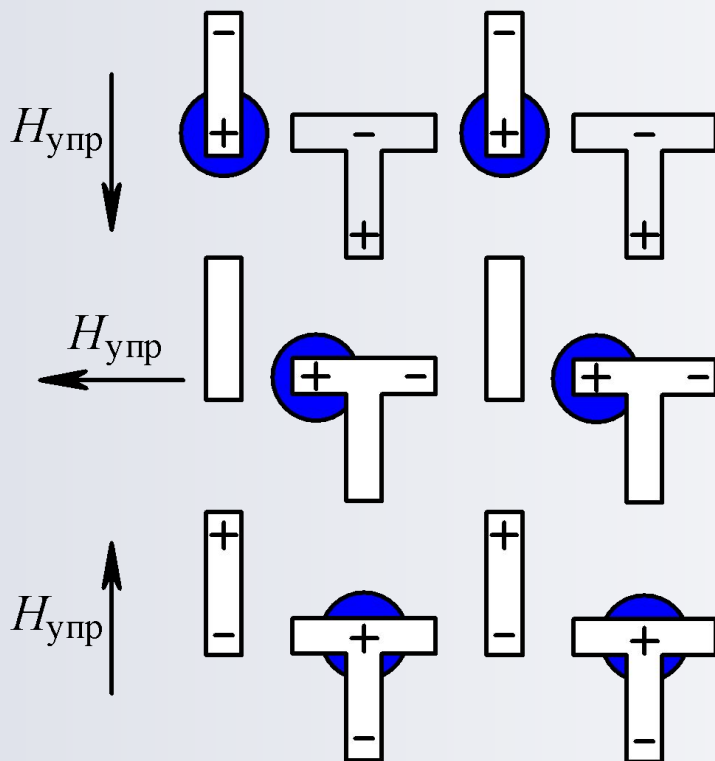
Возможные варианты зависимостей намагниченности насыщения J_{MS} ферритов-шпинелей от температуры:

a — феррит не имеет точки компенсации; *б* — феррит обладает точкой компенсации намагниченности



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Общие сведения о магнетизме

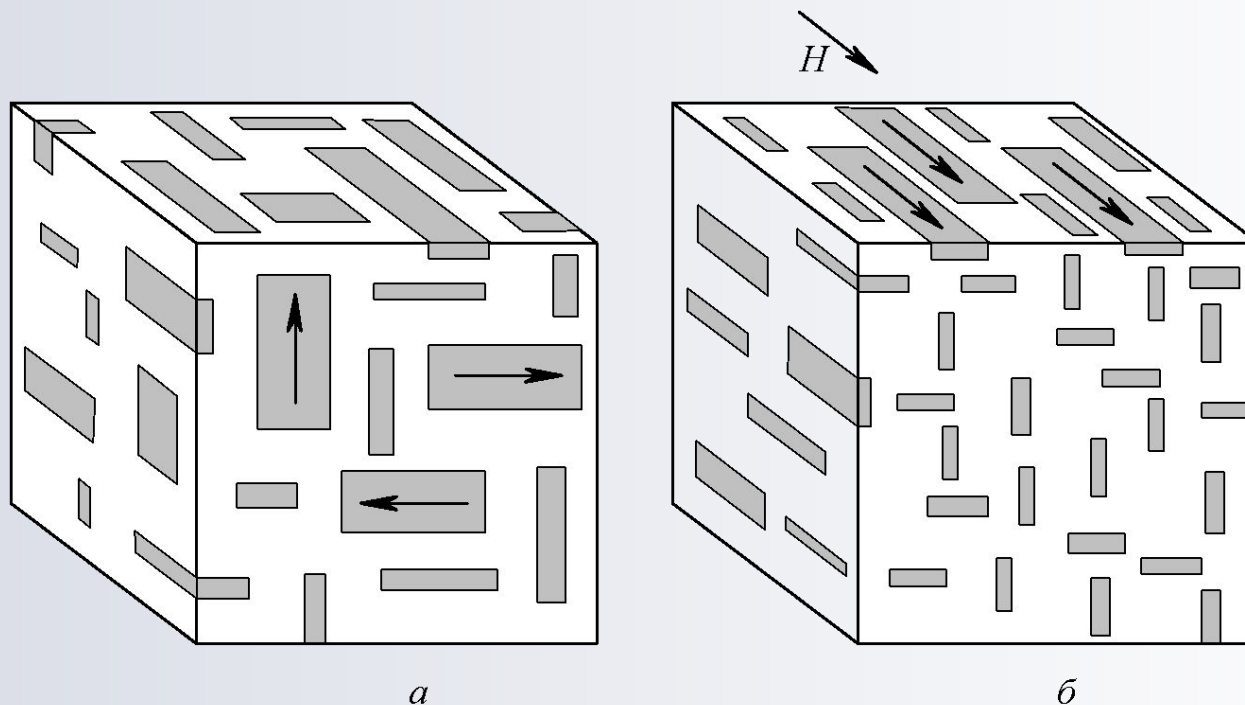


Управление перемещением ЦМД с помощью пермаллоевых аппликаций



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Общие сведения о магнетизме



Ориентация вторичных фаз в сплавах Fe - Ni - Al:
охлаждение при закалке без поля (*а*) и в магнитном поле (*б*)



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Контрольные вопросы

1. Что называют намагниченностью вещества и в каких единицах ее измеряют? Какие вещества характеризуются отрицательной намагниченностью?
2. Что характеризует магнитная индукция B ? Дайте определение единицы измерения B .
3. Как связаны между собой магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость вещества?
4. Почему изолированные ионы металлов не обладают магнитной активностью? Чем определяется магнитный момент атомов и ионов переходных металлов и редкоземельных элементов?
5. Как классифицируют вещества по магнитным свойствам?
6. Какой универсальный физический закон лежит в основе диамагнетизма? Приведите примеры жидких, твердых и газообразных диамагнетиков.
7. Почему парамагнитный эффект не является универсальным? Как влияет температура на магнитную восприимчивость парамагнетиков?
8. Какая магнитная упорядоченность наблюдается у антиферромагнетиков? Какими магнитными свойствами обладают эти вещества? Приведите примеры антиферромагнитных металлов и химических соединений.



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Контрольные вопросы

9. Что является результатом спинового обменного взаимодействия? От каких факторов зависит энергия обменного взаимодействия?
10. Чем отличается обменное взаимодействие у ферро- и антиферромагнетиков?
11. Могут ли обладать ферромагнитными свойствами сплавы, состоящие из неферромагнитных элементов?
12. Что является причиной образования доменной структуры? Каковы линейные размеры доменов? Какие методы позволяют наблюдать доменную структуру?
13. Что называют «стенкой Блоха» и какова ее структура?
14. Какие процессы происходят в ферромагнетике при его перемагничивании внешним полем? Что называют начальной кривой намагничивания ферромагнитного материала?
15. Как изменяется статическая магнитная проницаемость ферромагнетика от напряженности внешнего поля?
16. В чем заключается явление магнитострикции? Какое влияние оно оказывает на процесс намагничивания ферромагнетика?
17. Как изменяется индукция насыщения ферромагнетика при повышении температуры?



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Контрольные вопросы

18. Объясните различный характер температурных зависимостей магнитных проницаемостей, измеренных в слабых и сильных магнитных полях?
19. Каковы причины появления магнитных потерь при циклическом перемагничивании ферромагнетиков? Какие способы уменьшения магнитных потерь Вам известны?
20. Какие материалы называют ферритами? Каково распределение катионов по узлам кристаллической решетки в ферритах со структурой нормальной и обращенной шпинели?
21. Какова природа магнитного упорядочения в ферритах? Опишите механизм косвенного обменного взаимодействия между катионами решетки.
22. В каких материалах и в каких условиях можно наблюдать цилиндрические магнитные домены (ЦМД)?
23. Как изменяется диаметр ЦМД в интервале напряженностей между полем эллиптической неустойчивости и полем коллапса?
24. На чем основано применение ЦМД в запоминающих и логических устройствах? Каким образом осуществляют дискретное перемещение ЦМД в магнитных интегральных схемах?