

16) Магнитные свойства вещества. Качественные представления о механизме намагничивания пара- и диамагнетиков. Качественные представления о ферромагнетиках. Ферромагнитный гистерезис для пара- и диамагнитных веществ  $I \propto H$ :

$\vec{I} = \chi \vec{H}$ , где  $\chi$  - магнитная восприимчивость среды.

$\chi > 0$  парамагнетизм       $\chi < 0$  диамагнетизм

$\vec{B} = 4\pi \vec{I} + \vec{H}$   
 $\Rightarrow \mu = 1 + 4\pi\chi \Rightarrow \vec{B} = \mu \vec{H}$

магнитная проницаемость парамагнетизм  $\chi > 0$   $\mu > 1$   $\chi \in [10^{-6}, 10^{-3}]$   
 частицы вещества измагнитно обладают собственным магнитным моментом. В отсутствие внешнего магнитного поля

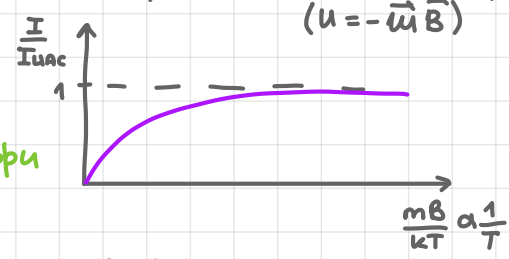
в парамагнетиках энергия взаимодействия между соседними магнитными моментами мала по сравнению с тепловой энергией, поэтому в отсутствие внешнего магнитного поля микроскопические магнитные моменты полностью разупорядочены и  $\vec{I} = 0$

при помещении во внешнее поле магнитных моментов энергетически выгодно ориентироваться по полю, что и приводит к намагниченности

$I_{нас} = n\mu_B$  - намагниченность насыщения (по направлению поля ориентированы все частицы)

$\chi_{пар} \sim \mu_0 \frac{n^2 \mu^2}{3kT} \propto \frac{1}{T}$   
 закон Кюри

$\chi_{пар} = \frac{C}{T}$ , C - постоянная Кюри



у некоторых металлов  $\chi$  не зависит от T (несвязанная часть свободных электронов ( $\propto kT$ ) может участвовать в переориентировании своих магнитных моментов)

диамагнетизм  $\chi < 0$   $\mu < 1$

диамагнетизм возникает из-за э.м. индукции магнитных токов в электронных оболочках атомов и присущ в той или иной степени всем веществам без исключения

$L$  - начальный момент импульса электрона в атоме  
 $L = 0$

$\omega_L = 0$   
 включим  $\vec{B} \Rightarrow$  вихревое эл. поле  $\vec{E} = -\frac{1}{2} r \frac{d\vec{B}}{dt} \Rightarrow m e r^2 \frac{d\omega}{dt} = -e r E = \frac{1}{2} e r^2 \frac{dB}{dt}$   
 (из закона э.м. индукции)

$\Rightarrow$  при включении поля  $\vec{B}$  электрон приобретает  $\vec{\omega}_L = \frac{e}{2me} \vec{B}$  - ларморовская частота

$\Downarrow$   
 $I_L = e \frac{\omega_L}{2\pi} \Rightarrow \mu_L = I_L S = -\frac{e^2 S}{4\pi m_e} B$

$L \neq 0$ :  
 $\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M} = \vec{\mu}_L \times \vec{B} \Rightarrow$  прецессия электрономной орбиты с ларморовской угловой частотой

$\vec{\omega}_L = \frac{\mu_L}{L} \vec{B} = \frac{e}{2me} \vec{B}$ . Эта прецессия даёт аналогичный вклад в диамагнитную восприимчивость, что и в случае  $L = 0$

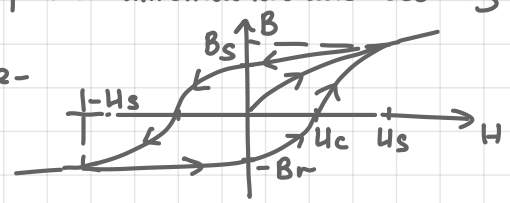
у некоторых веществ диамагнитный эффект перебивается парамагнетизмом.  
 ферромагнетизм - вещества, которые могут обладать отличной от нуля намагниченностью в отсутствие внешнего поля

если образец из ферромагнетика поместить во внешнее магнитное поле и плавно периодически менять направление этого поля, то периодически будет меняться и намагниченность образца, а таинное поле в образце. как видно, кривая намагничивания неоднозначна, это явление называется гистерезисом.

$B_r$  - остаточная намагниченность - сохраняющаяся при уменьшении до 0 внешнего поля  $H$

$H_s, B_s$  - поле насыщения (в одном и том же направлении ориентируется максимально возможное число магнитных моментов атомов)

когда  $|H| > H_s$ ,  $B(H)$  однозначна и представляет линейна



$H_c$  — **коэрцитивная сила** — внешнее магнитное поле, которое требуется, чтобы магнитное поле в образце обратилось в 0.

величина

↓ магниточётность ( $H_c$  велика),

магнитомягкие

( $H_c, H_s$  малы)

при перемагничивании образца соверш. работа  $A = \frac{1}{4\pi} \oint \vec{H} d\vec{B}$

↑ по площади цикла перемагничивания

явление ферромагнетизма наблюдается при  $T < T_k$ , где  $T_k$  — **точка Кюри**

если  $T > T_k$ , образец ведёт себя как парамагнетик:  $I = \chi H$ ,  $B = \mu H$

### Доменная структура ферромагнетиков

**Домены** — область, имеющая только одно направление намагниченности

если весь образец намагнитен в одну сторону, то возникает сильное магнитное поле но это состояние неустойчиво, и образец разбивается на домены. при этом намагниченности доменов направлены так, чтобы снизить полную магнитную энергию образца:

магнитное диполь-дипольное взаимодействие препятствует выстраиванию всех магн. моментов сразу в одном направлении (энергия такого взаимодействия будет минимальна при антипараллельном, положении соседних моментов)

в свою очередь, объединение в домены выгодно, т.к. если магнитные моменты электронов соседних атомов сонаправлены, их электростатическое отталкивание становится меньше (а магнитное вз-е между атомами не может привести к упорядочиванию)



перемагничивание  
ферромагнетика



↑  $\vec{B}$  смещение доменных стенок  $\Rightarrow$  поглощение доменов с „неправильной“ намагниченностью  
(изменение напр-ия магнитных моментов атомов)



при не слишком высоких полях

перемагничивание  $\leftarrow$  смещение

доменной стенки. Эта стадия обратима для идеальных материалов.

в реальных веществах движение стенок может происходить неравномерно,

и самообразно (стенки при движении „застревают“ на дефектах структуры.)

в рез-те самообразных движений возникают индуцированные токи (токи Фуко) и соответствующие потери энергии.  $\Rightarrow$  процесс намагничивания необратим и при перемагничивании наблюдается гистерезисное явление.

Другой механизм появления необратимости:

в кристаллах есть линия намагничивания, вдоль которой преимущественно ориентируется намагниченность. эта ось может не совпадать с направлением внешнего магнитного поля. тогда в случае сильных внешних полей возникает „заворот“ магнитного момента всего домена к направлению внешнего поля. эта стадия сопровождается затратами энергии.