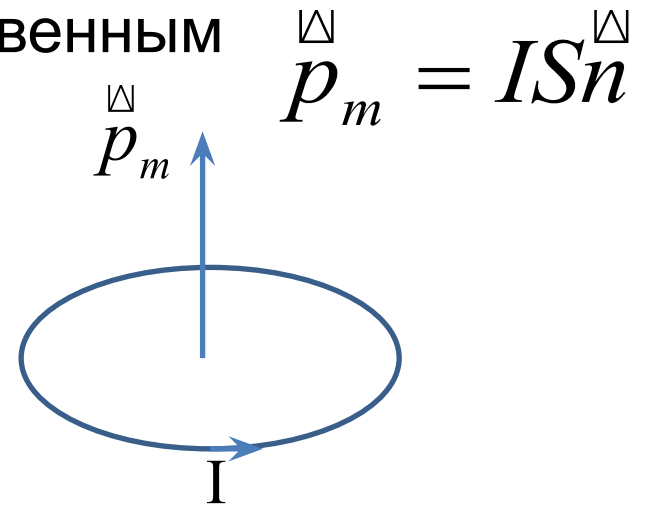


**Магнитное поле в
веществе.
Уравнения Максвелла**

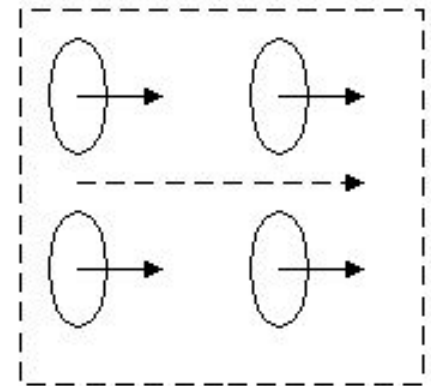
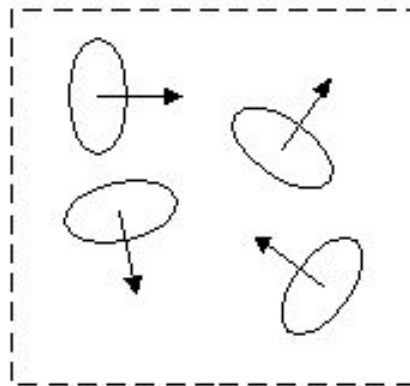
Магнетики

- Если проводник с током помещен в некоторую среду, то создаваемое им магнитное поле изменяется.
- Все вещества в большей или меньшей степени обладают магнитными свойствами, т.е. являются **магнетиками**.
- Ампер предположил, что в молекулах циркулируют круговые токи, обладающие собственным **магнитным моментом**.
- Магнитные свойства веществ в основном определяются движением электронов, входящих в состав атомов.



Магнетики

- В отсутствии магнитного поля молекулярные токи ориентированы хаотически.
- Под действием магнитного поля магнитные моменты молекул приобретают преимущественную ориентацию – **вещество намагничивается.**



Намагниченность

- Магнитный момент единицы объема $\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i \in \Delta V} \vec{p}_{m_i}$ называется **намагниченностью**.
- **Намагниченность** связана с напряженностью магнитного поля $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J}$

$$\vec{J} = \chi \vec{H}, \quad \chi - \text{магнитная восприимчивость}$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \chi \vec{H}; \quad (1 + \chi) \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0}$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0(1 + \chi)} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu}$$

$$\mu = (1 + \chi) - \text{относительная магнитная проницаемость}$$

Магнетики

- Магнитная проницаемость показывает во сколько раз индукция магнитного поля в однородной среде отличается по модулю от индукции магнитного поля в вакууме $\mu = \frac{B}{B_0}$
- Напряженность магнитного поля внутри магнетика совпадает с напряженностью внешнего магнитного поля

$$\vec{H}_0 = \frac{\vec{B}_0}{\mu_0} = \frac{\vec{B} - \mu_0 \vec{J}}{\mu_0} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J} = \vec{H}$$

- Различные вещества в той или иной степени способны к **намагничиванию**.
- Слабромагнитные вещества – **пара- и диамагнетики**, сильномагнитные – **ферромагнетики**.

Магнетики

- У парамагнетиков $\mu > 1$, у диамагнетиков $\mu < 1$. Отличие μ от единицы у пара- и диамагнетиков чрезвычайно мало. Например, у алюминия, который относится к парамагнетикам, $\mu - 1 \approx 2,1 \cdot 10^{-5}$, у хлористого железа (FeCl_3) $\mu - 1 \approx 2,5 \cdot 10^{-3}$.
- К **парамагнетикам** относятся также платина, воздух и многие другие вещества.
- К **диамагнетикам** относятся медь ($\mu - 1 \approx -3 \cdot 10^{-6}$), вода ($\mu - 1 \approx -9 \cdot 10^{-6}$)

Диамagnetизм и парамагнетизм

- Магнитный момент обусловлен движением электрона по орбите.
- Движущийся электрон обладает также моментом импульса.

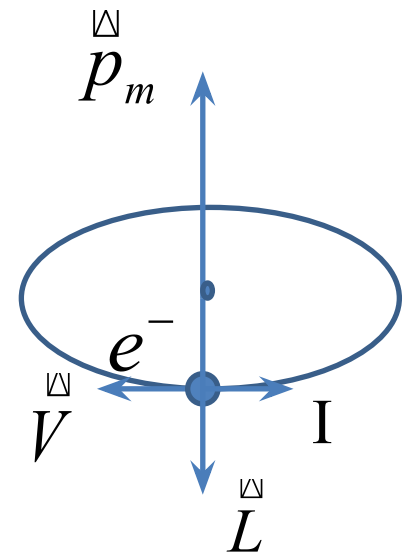
$I = ev$, ν – частота вращения

$$p_m = IS = ev\pi r^2 = \frac{eVr}{2}$$

$$L = mVr$$

Магнитомеханическое соотношение

$$\frac{p_m}{L} = -\frac{e}{2m}$$



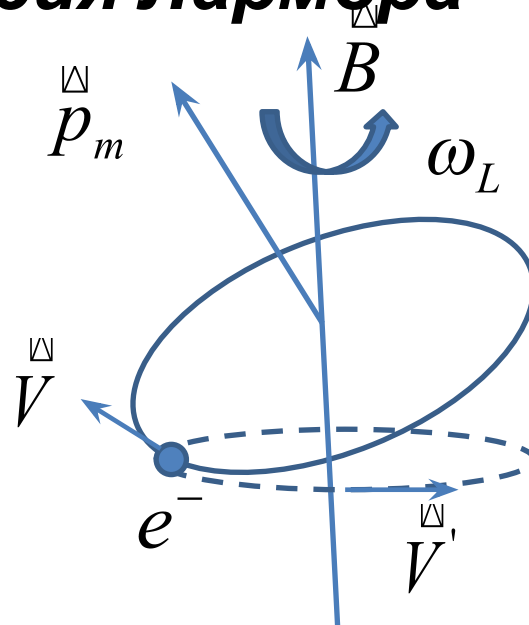
Диамagnetизм и парамагнетизм

- Во внешнем поле на круговой ток действует вращательный момент, стремящийся установить магнитный момент по полю.
- Плоскость вращения электрона поворачивается – **прецессия Лармора**

$$\vec{M} = [\vec{p}_m \vec{B}]$$

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M};$$

$$\omega_L = \frac{p_m B}{L}$$



Диамagnetизм и парамагнетизм

- Под действие внешнего магнитного поля происходит *прецессия* электронных орбит.
- Обусловленное прецессией дополнительное вращение приводит к возникновению *индуцированного магнитного момента, направленного против поля.*
- Если атом обладает собственным магнитным моментом (много больше, чем индуцированный) – *парамагнетик.*
- Если результирующий собственный магнитный момент атома равен нулю – *диамagnetик.*

Слабромагнитные вещества

Диамагнетики

$$\chi < 0 \text{ и мала } (\chi = 10^{-5} - 10^{-6}) \quad \mu < 1 \quad \vec{B}' \uparrow \downarrow \vec{B}_0$$

органические соединения, инертные газы,
Cu, Bi, Sb, Ag, Au, Pb, I, C, Si, Zn, S, H₂O, CO₂

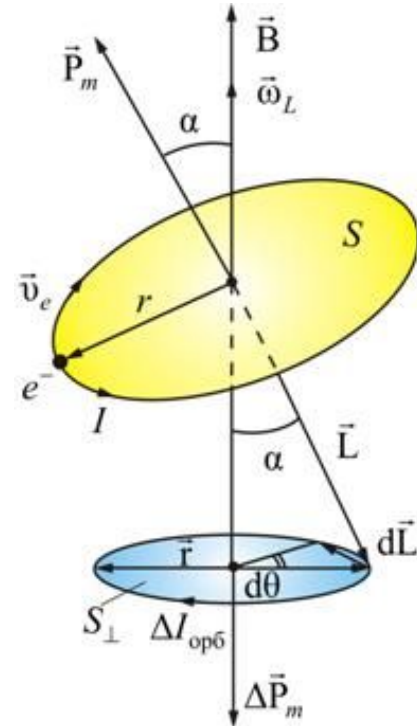
орбита e⁻ ориентирована относительно вектора B произвольным образом, составляя с ним угол α ,



орбита e⁻ приходит в такое движение вокруг B , при котором p_m , сохраняя постоянным угол α , вращается вокруг B с некоторой угловой скоростью



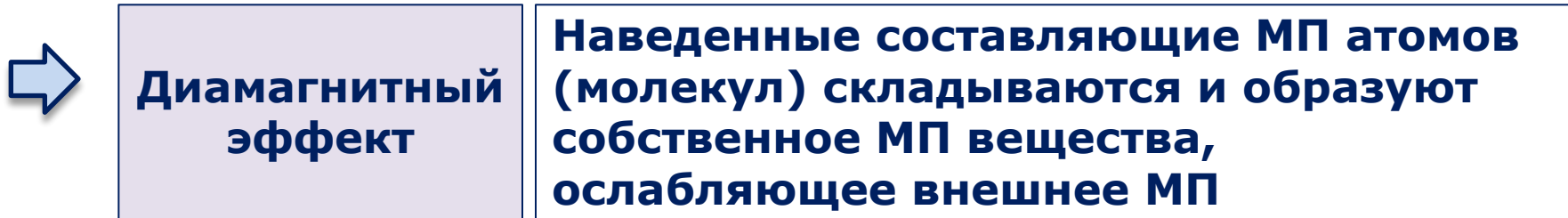
Электронные орбиты атома под действием внешнего МП совершают прецессионное движение, эквивалентное круговому току



прецессия
электрона

Явление диамагнетизма
открыто М. Фарадеем
в 1845 г.

Диамагнитный эффект

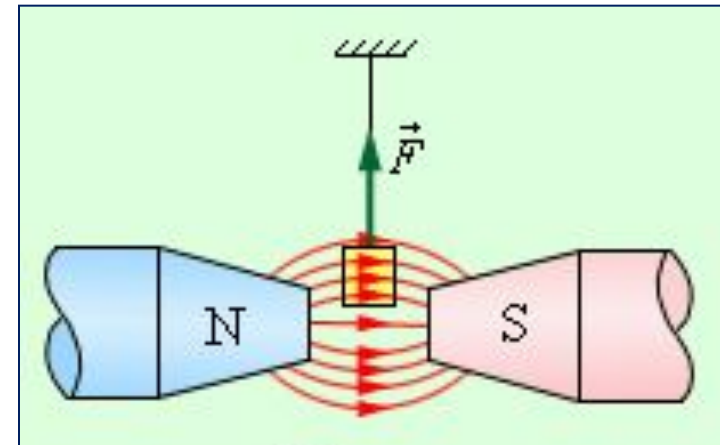


Диамагнитный эффект обусловлен действием внешнего МП на электроны атомов вещества

→ **диамагнетизм свойствен ВСЕМ веществам**

При $B_0 = 0$ $\sum p_a = \sum p_m = 0$

→ магнитные свойства НЕ проявляются



В неоднородном МП образец выталкивается из области сильного МП

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

Сильномагнитные вещества

Парамагнетики

вещества, намагничивающиеся во внешнем МП по полю

$$\vec{B}' \uparrow \uparrow \vec{B}_0$$

$\chi > 0$ и мала ($\chi = 10^{-3} - 10^{-5}$) $\mu > 1$ $\chi = \frac{C}{T}$ **C – постоянная Кюри, зависит от вещества**

редкоземельные элементы, щелочные металлы, воздух, O₂, Cr, Mn, Sn, Pt и др.

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H}$$

При $B_0 = 0$ $\vec{p}_{mi} \neq 0$ но

тепловое движение

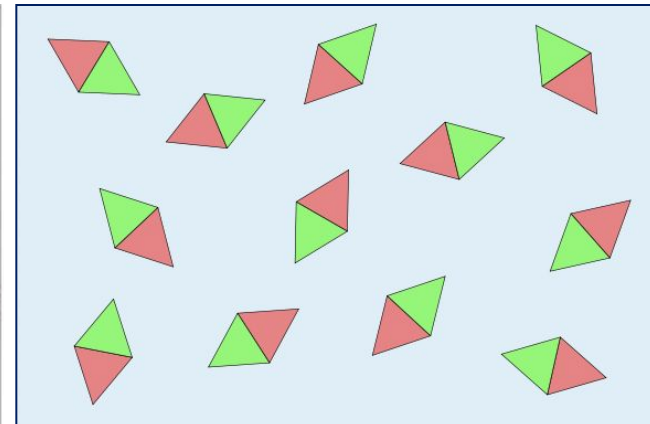
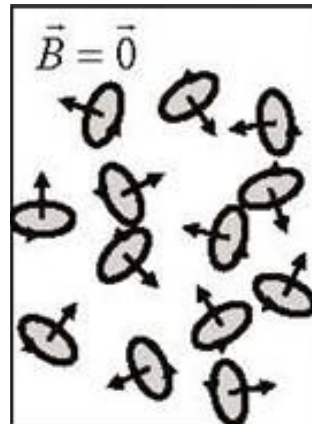


магнитные моменты есть, НО ориентированы беспорядочно

$$\vec{p}_a = \sum_{i=1}^n \vec{p}_{mi} = 0$$



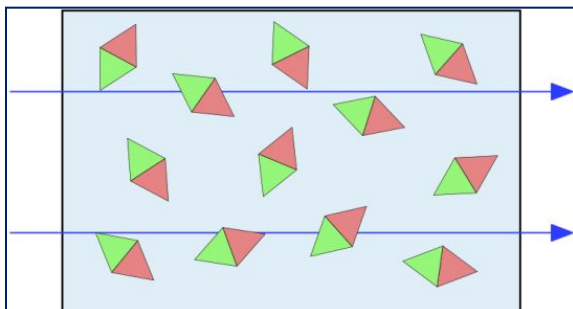
парамагнетик НЕ намагничен



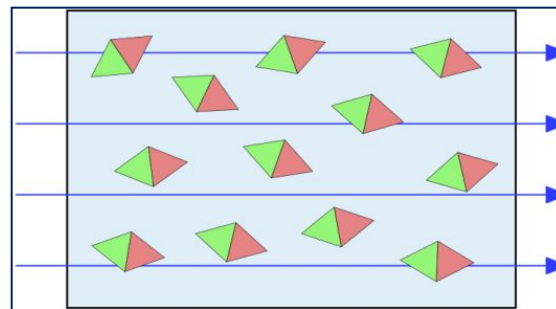
Парамагнитный эффект

При $B_0 \neq 0$

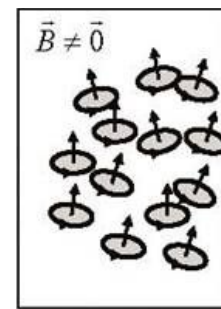
Преимущественная ориентация p_m по полю



$B_0 \neq 0$, поле слабое

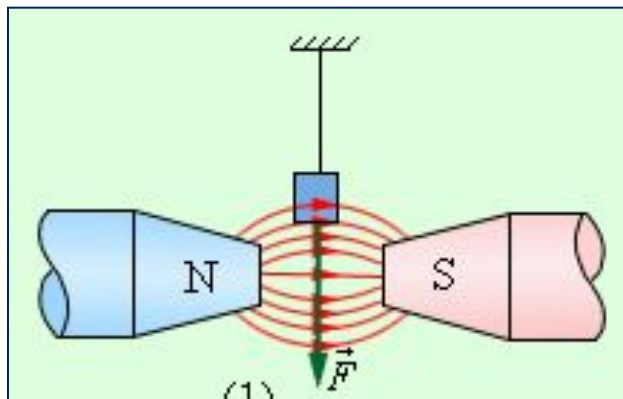


$B_0 \neq 0$, поле сильное



Парамагнитный эффект

парамагнетик намагничивается, создавая собственное МП, совпадающее по направлению с внешним полем и усиливающее его



В неоднородном МП образец втягивается в область сильного МП

Аналогично ориентационной (дипольной) поляризации диэлектриков с полярными молекулами





Сильномагнитные вещества

Ферромагнетики

$$\chi \gg 0 \quad \mu \gg 1$$

Fe, Ni, Co, Gd
(гадолиний)
и их сплавы

$\mu \sim 10^2 - 10^5$:
у стали $\mu \approx 8\,000$,
у сплава Fe с Ni
 $\mu \approx 250\,000$

сильномагнитные вещества
обладают спонтанной
намагниченностью, т.е.
при отсутствии внешнего МП

Намагниченность
ферромагнетиков J –
превосходит J диа- и
парамагнетиков до 10^{10} раз

$$\chi = \frac{C}{T - T_c}$$

T_c –
точка
Кюри

Fe: $T_c = 770^\circ\text{C}$
Co: $T_c = 1130^\circ\text{C}$
Ni: $T_c = 360^\circ\text{C}$

$$\overset{\nabla}{B'} \uparrow \uparrow \overset{\nabla}{B_0}$$

При $T > T_c$

ферромагнетик



обычный
парамагнетик

независимо от наличия внешнего МП !

При $T < T_c$

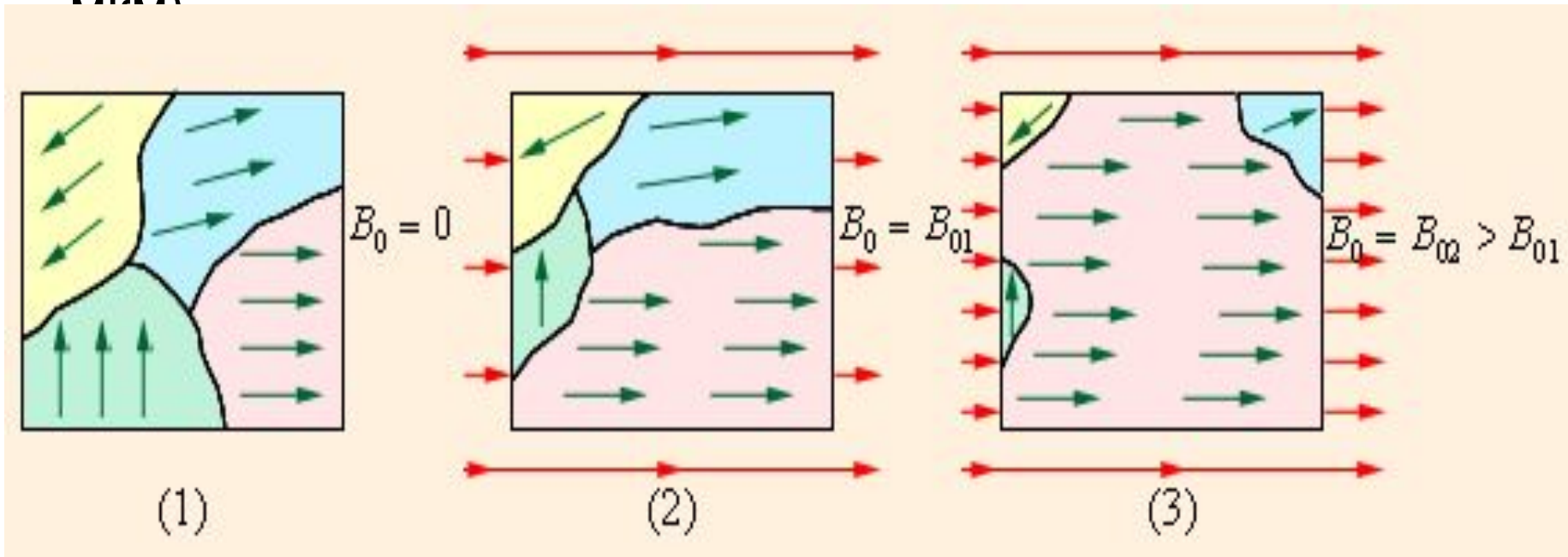
спонтанное
намагничивание

фазовый переход II рода
– НЕ сопровождается
поглощением или
выделением теплоты



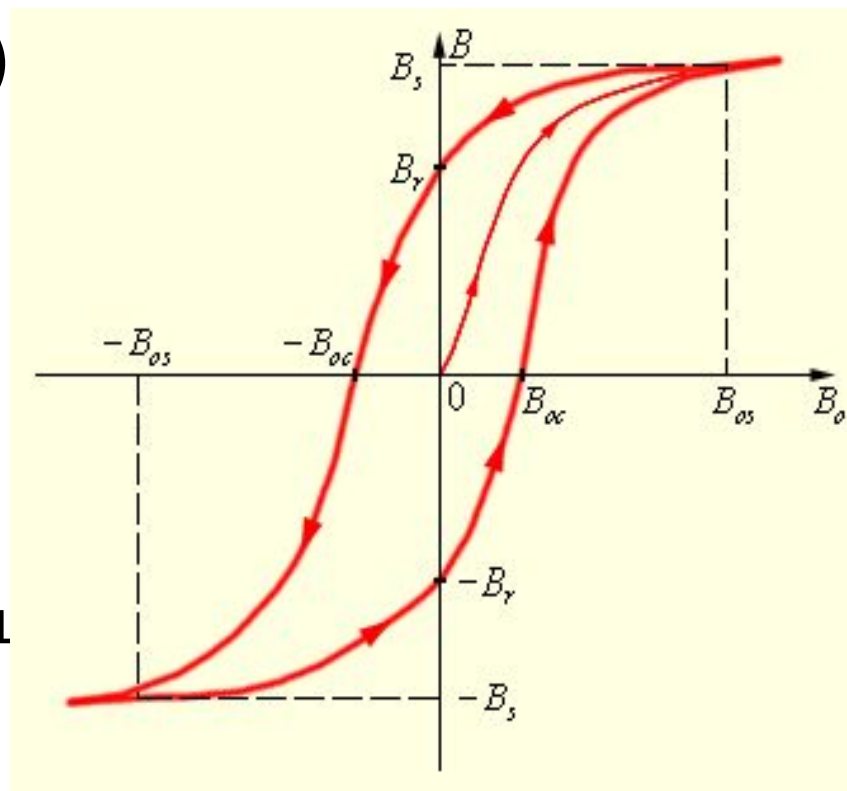
Ферромагнетики

- **Ферромагнетики** – это вещества, обладающие самопроизвольной намагниченностью, которая сильно изменяется под влиянием внешних воздействий – магнитного поля, деформации, температуры.
- Области **спонтанного намагничивания** – домены (1-10 мкм)

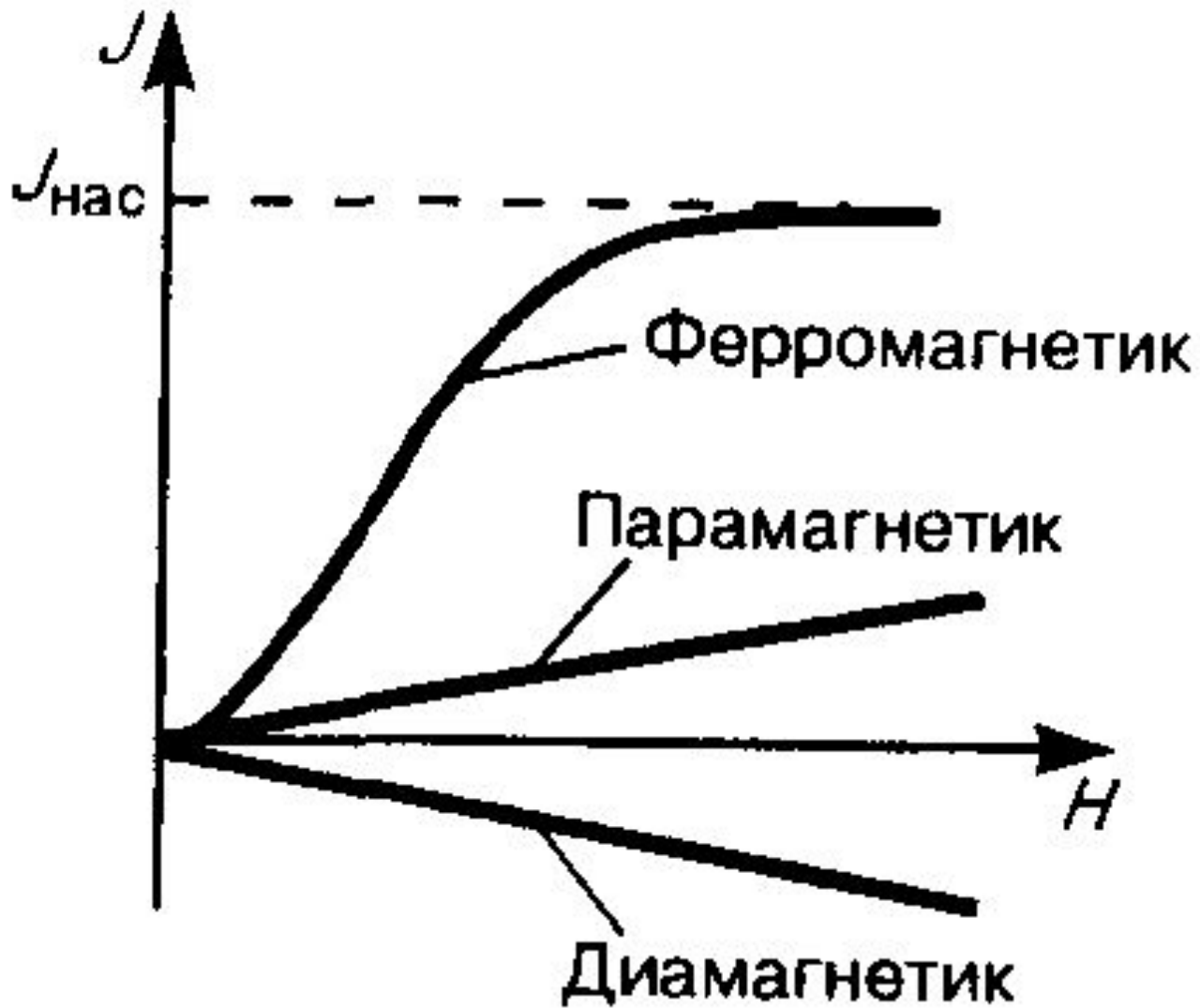


Ферромагнетики

- Намагниченность зависит от внешнего магнитного поля сложным образом.
- Явление **гистерезиса**: при исчезновении внешнего магнитного поля сохраняется остаточная намагниченность (B_r)
- Индукция B обращается в нуль под действием внешнего поля, имеющего противоположное направление - **коэрцитивная сила**.
- Изготовление постоянных магнитов – тем лучше, чем больше коэрцитивная сила материала.



Кривая намагничивания



Уравнения Максвелла

Электростатическое поле (потенциальное):

- Теорема Гаусса

$$\oint_S \vec{E} dS = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

- Теорема о циркуляции $\Gamma_E = \oint \vec{E} dl = 0$

Вихревое электрическое поле

- Явление электромагнитной индукции

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = \oint \vec{E}_{\text{вихр}} dl = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} dS$$

$$\oint_L \vec{E}_{\text{вихр}} dl = -\int_S \frac{d\vec{B}}{dt} dS$$

Токи смещения

- Изменение магнитного поля порождает вихревое электрическое поле.
- Что происходит, если электрическое поле изменяется во времени?
- **Токи смещения**

$$\oint \vec{j}_{\text{смещ}} dS = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt} \epsilon_0 \oint_S \vec{E} dS = \oint_S \frac{d}{dt} (\epsilon_0 \vec{E}) dS$$

$$\vec{j}_{\text{смещ}} = \frac{d}{dt} (\epsilon_0 \vec{E})$$

Уравнения Максвелла

Магнитное поле

- Теорема Гаусса $\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$
- Теорема о циркуляции

$$\begin{aligned} \oint_L \vec{B} d\vec{l} &= \mu_0 (I_{\text{провод}} + I_{\text{смест}}) = \\ &= \mu_0 \int_S (\vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}) d\vec{S} \end{aligned}$$

Уравнения Максвелла в среде

$$\vec{D} = \epsilon\epsilon_0 \vec{E}; \quad \vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H}; \quad \vec{j} = \sigma \vec{E}$$

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = Q$$

Теорема
Гаусса

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \vec{j} d\vec{S} + \frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{D} d\vec{S}$$

Токи
проводимости и
токи смещения

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$$

Отсутствие
магнитных зарядов

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} d\vec{S}$$

ЭДС электромагнитной
индукции

Электромагнитное поле

- Энергия электрического поля

$$W = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon V E^2; \quad w = \frac{W}{V} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon E^2$$

- Энергия магнитного поля (*размыкание цепи*)

$$dA = IUdt = -I \frac{d\Phi}{dt} dt = -Id(LI) = -LI dI$$

$$W = -\int_I^0 LI dI = \frac{LI^2}{2}$$

Электромагнитное поле

- Энергия магнитного поля для бесконечно длинного соленоида с магнитным

сердечником

$$W = \frac{\mu\mu_0 n^2 V I^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} V$$

$$w = \frac{W}{V} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}$$

- Плотность энергии электромагнитного поля

$$w = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} + \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}$$

Сопоставление ЭП и МП

Объемная плотность энергии
(энергия единицы объема)

$$w = \frac{W}{V}$$

Электрическое поле

$$w = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} = \frac{ED}{2}$$

$$D = \varepsilon\varepsilon_0 E$$

Магнитное поле

$$w = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} = \frac{BH}{2}$$

$$B = \mu\mu_0 H$$

Справедливо для
неоднородных МП !

Электромагнитный колебательный контур

