



Физико-технические основы электроэнергетики

Лекция 10

Профессор Е.Ю.Клименко



Магнетики

Электродинамика магнетиков

Гипотеза Ампера о молекулярных токах: $\mathbf{j}_{\text{микр}} = \mathbf{j}_{\text{пр}} + \mathbf{j}_{\text{мол}}$

Это не абсолютная истина, Существенна роль магнитного момента электронов, кроме того электроны проводимости вносят вклад в диамагнетизм (диамагнетизм Ландау 1930). Но классическая электродинамика опирается на эту гипотезу, хотя основные свойства магнетиков описываются квантовой теорией.

Распределение замкнутых молекулярных токов описывается их магнитным моментом. Мерой намагниченности служит вектор *намагничения* \mathbf{I} .

$$\mathbf{I} = \int [\mathbf{R} \times \mathbf{j}_{\text{мол}}] dV$$

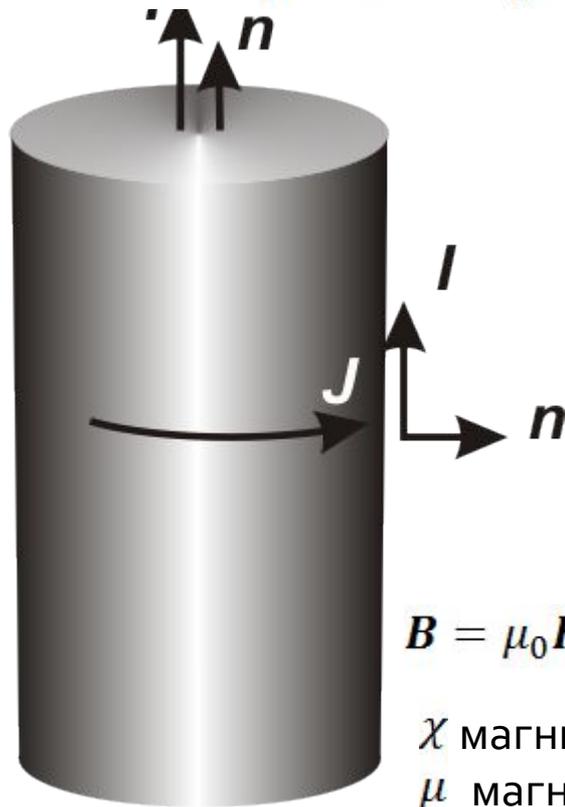
Векторный потенциал при наличии магнетиков: $\mathbf{A} = \mathbf{A}_0 + \mathbf{A}'$

$$\mathbf{A}_0 = \int \frac{\mathbf{j}_{\text{пр}} dV}{R} \quad \mathbf{A}' = \int \frac{\mathbf{j}_{\text{мол}} dV}{R}$$

$$\mathbf{A}' = \int \frac{\mathbf{j}_{\text{мол}} dV}{R} = \int \frac{\mathbf{I} \times \mathbf{R}}{R^3} dV = \int \frac{\text{rot} \mathbf{I}}{R} dV + \int \frac{[\mathbf{n} \times (\mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_1)]}{R} dS$$

Первый интеграл по объему намагниченного тела, а второй по поверхности раздела двух сред с разными намагниченностями.

$$A' = \int \frac{j_{\text{мол}} dV}{R} = \int \frac{\mathbf{I} \times \mathbf{R}}{R^3} dV = \int \frac{\text{rot} \mathbf{I}}{R} dV + \int \frac{[\mathbf{n} \times (\mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_1)]}{R} dS$$



Сопоставляя правую и левую части этого выражения видим, что объемная плотность молекулярных токов равна $j_{\text{мол}} = \text{rot} \mathbf{I}$, но имеется еще поверхностный ток

$$J_{\text{мол}} = [\mathbf{n} \times (\mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_1)]$$

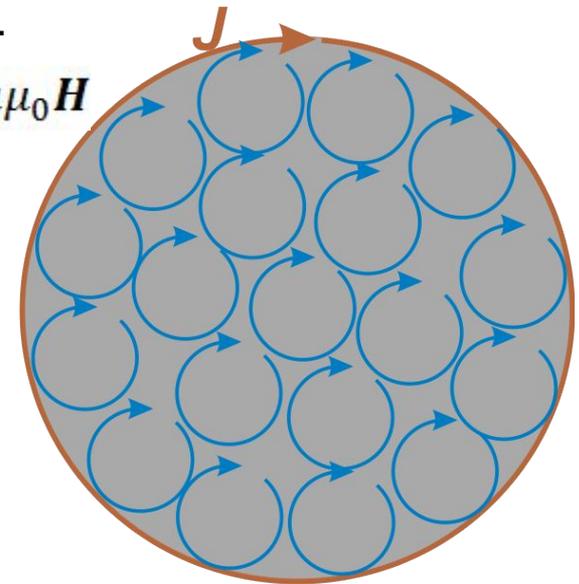
В случае однородно намагниченного цилиндра $\text{rot} \mathbf{I} = 0$, на торце тока нет, т.к. $\mathbf{I} \parallel \mathbf{n}$. По цилиндрической поверхности течет ток $J_{\text{мол}} = -[\mathbf{n} \times \mathbf{I}_1]$, т.к. $\mathbf{I}_2 = 0$, т.е. численно $J_{\text{мол}} = I$.

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{I} = \mu_0 (\mathbf{H} + \chi \mathbf{H}) = \mu \mu_0 \mathbf{H}$$

χ магнитная восприимчивость

μ магнитная проницаемость

$$\mu = 1 + \chi$$



Дифференциальное уравнение для \mathbf{A} :

$$\Delta \mathbf{A} = -\mu_0 (\mathbf{j} + \text{rot} \mathbf{I})$$

Магнетики – обширный и расширяющийся класс материалов

Диамагнетики

Парамагнетики

Ферромагнетики

*Неколлинеарные
ферромагнетики*

Антиферромагнетики

Ферримагнетики

Аромагнетики

Гелимагнетики

Асперомагнетики

Миктомагнетики

Сперимагнетики

Спиновые стекла

Спиновая жидкость

.....

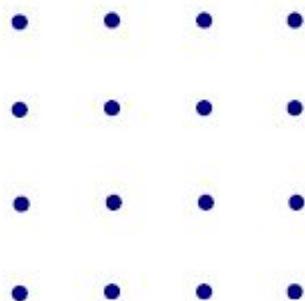
Магнетизм – квантовое явление. Лишь в некоторых случаях удастся подобрать качественное объяснение в рамках классической физики.

Мы уделим основное внимание свойствам магнетиков и их применению

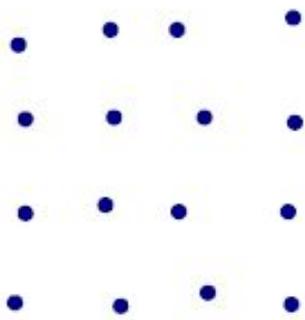
Диамagnetизм

Диамagnetный эффект является проявлением электромагнитной индукции на атомном уровне. Электронную орбиту можно рассматривать как замкнутый контур. Изменение внешнего магнитного поля, пересекающего электрический контур, индуцирует в нем ток такого направления, магнитное поле которого согласно правилу Ленца будет противодействовать внешнему изменению.

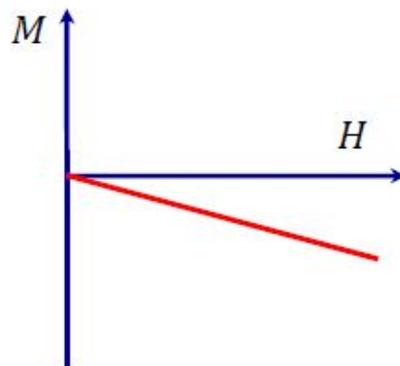
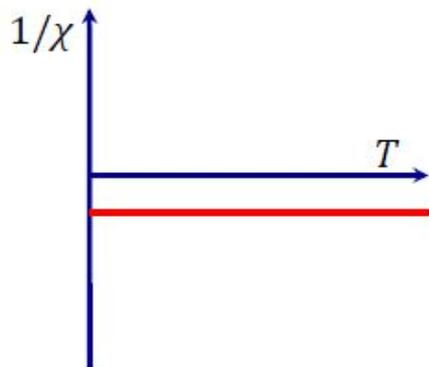
Диамагнитные материалы



Кристаллический
(Cu, NaCl)



Аморфный
(SiO₂)



Вещество	$\chi \cdot 10^6$
Азот, N ₂	-12,0
Водород, H ₂	-7,7
Германий, Ge	-4,0
Кремний, Si	-3,1
Соль, NaCl	-30,3
Вода(жидкая), H ₂ O	-13,0



Левитация пиролитического
карбона над редкоземельным
постоянным магнитом

Парамагнетизм

Парамагнетизм (от греч. *para* – возле) – свойство веществ во внешнем магнитном поле намагничиваться в направлении этого поля.

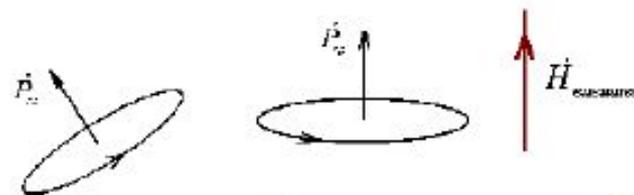
Внутри парамагнетика к действию внешнего поля прибавляется действие наведенного внутреннего поля.

Парамагнетиками - вещества, атомы которых имеют в отсутствии внешнего магнитного поля, отличный от нуля магнитный момент \vec{P}_m .

Эти вещества намагничиваются в направлении вектора $\vec{B}_{внеш}$.

Наличие магнитного момента, отличного от нуля свидетельствует о том, что в парамагнетике изначально текут круговые токи. Под действием внешнего магнитного поля они ориентируются так, что их плоскости перпендикулярны направлению поля.

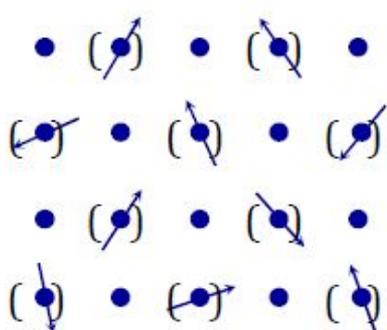
В отсутствие внешнего магнитного поля **намагниченность парамагнетика $J = 0$** , так как векторы \vec{P}_m разных атомов ориентированы беспорядочно из-за теплового движения.



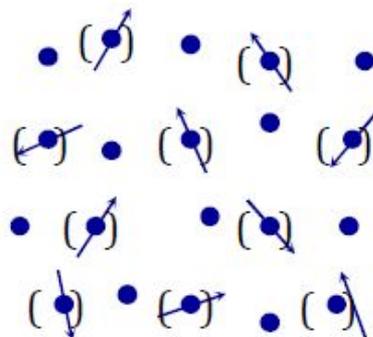
$$\chi > 0$$

$$\mu = \frac{B}{H} \geq 1$$

Парамагнитные материалы



Кристаллический
(CuMn, AuFe)



Аморфный
(Gd₅₄Ag₄₆, Ni₆₅Au₃₅)

Полевая и температурная зависимости

$$I = C \frac{B}{T}$$

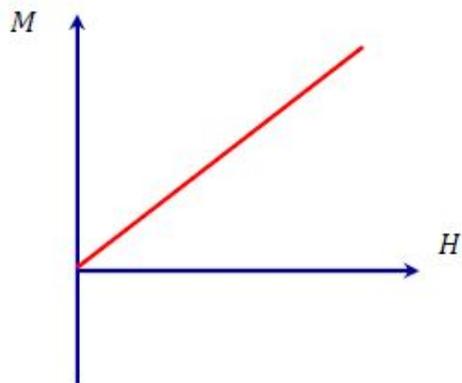
Кюри

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

Кюри-Вейс

$$C = \mu_0 n \frac{\mu^2}{3k_B}$$

Постоянная Кюри



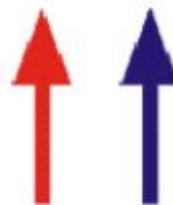
Вещество	$\chi \cdot 10^6$
Na	16,1
Al	16,7
K	21,35
Li	24,6
Ti	161,0
V	296,0
U	414,0
Pu	627,0
NO	1461
MnO	4850
CuCl ₂	1080
FeCl ₂	14750
NiSO ₄	4005
Dy ₂ (SO ₄) ₃ ·8H ₂ O	92760
Ho ₂ (SO ₄) ₃ ·8H ₂ O	91600
O ₂	3396



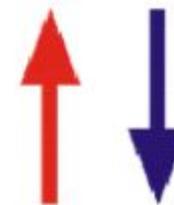
Спасибо за внимание

Основные типы магнитного упорядочения

- a) ферромагнетик,
- b) антиферромагнетик,
- c) скошенный антиферромагнетик
- d) ферримагнетик



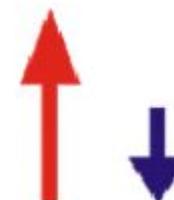
a)



b)



c)



d)