



**Сумський  
державний  
університет**



# МАТЕРІАЛИ І КОМПОНЕНТИ МІКРОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ

## МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ

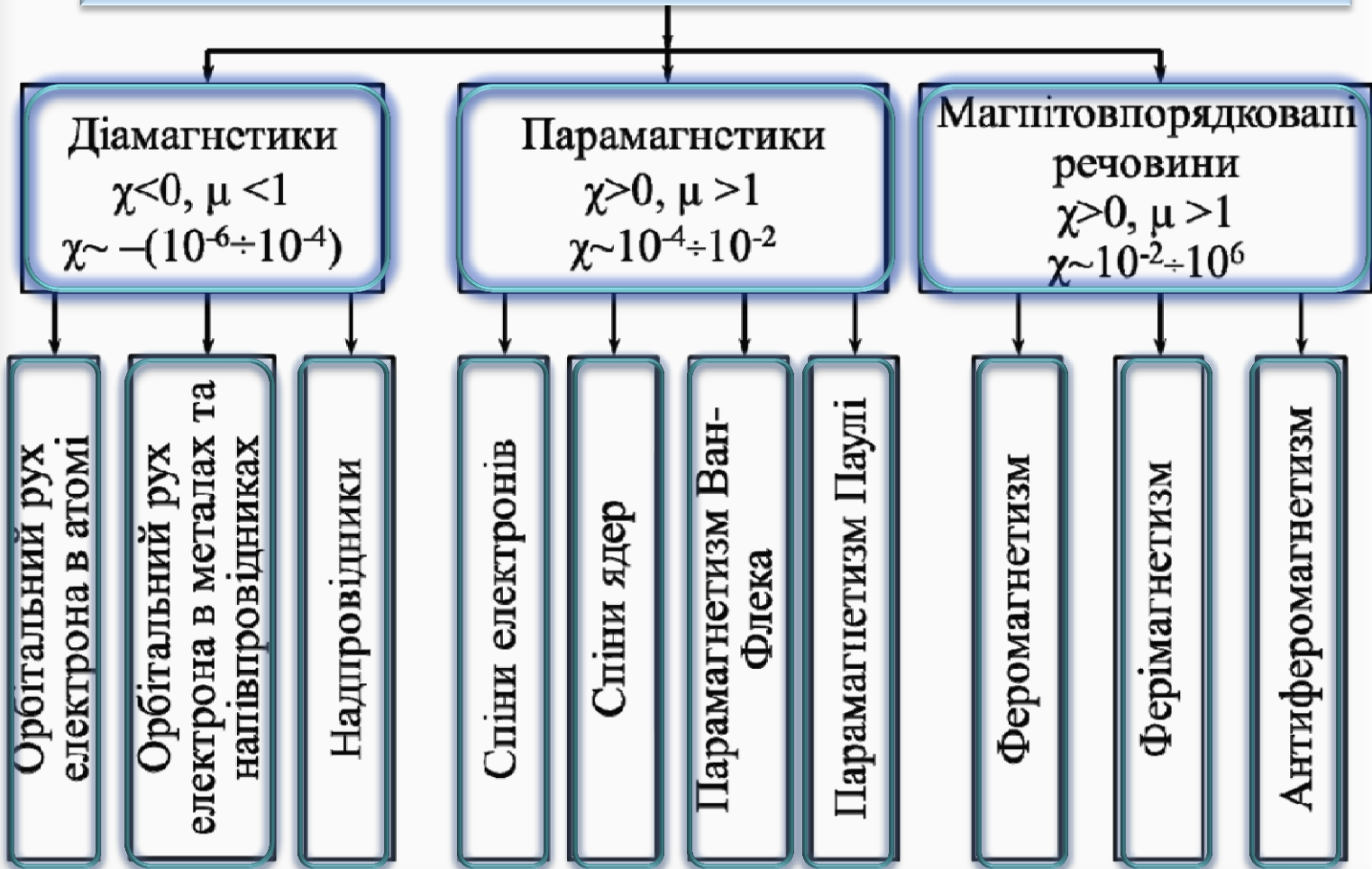
**Викладач: к.ф.-м.н., доцент Пазуха І.М.**

**Суми-2022**

## ОСНОВНІ ВИДИ МАГНЕТИЗМУ МАТЕРІАЛІВ

- ❖ *Намагніченість речовини  $M$*  - магнітний момент одиниці об'єму.
- ❖ *Магнітна сприйнятливість  $\chi$*  - відношення намагніченості до напруженості магнітного поля  $H$ :  $\chi = M/H$ .
- ❖ Часто  $\chi$  відносять до одного моля речовини:  $\chi_\mu$ .
- ❖ Для характеристики магнітного поля в речовині використовують поняття *магнітної індукції  $B$* :  $B = \mu_0(H + M)$ , де  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м)
- ❖ Коефіцієнт пропорційності між  $B$  і  $H$  називається *магнітною проникністю речовини  $\mu$*   $\mu = B/H = 1 + 4\pi\chi$ .
- ❖ У системі СІ розрізняють поняття *абсолютної магнітної проникності  $\mu_{abs}$*   $\mu_{abs} = B/H = \mu_0 \cdot (1 + \chi)$  і *відносної магнітної проникності  $\mu$*   $\mu = \mu_{abs}/\mu_0 = 1 + \chi$ .

## Класифікація видів магнітного впорядкування



*Виникнення магнітного моменту у вільного атома має три основні причини:*

**наявність електронних оболонок з некомпенсованими спінами**

**наявність в електронів орбітального моменту руху (кутового моменту), пов'язаного з їхнім навколо ядра**

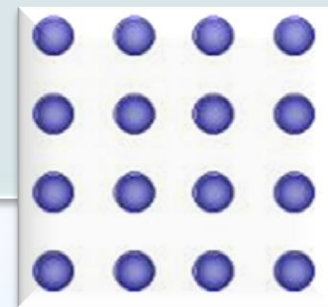
**зміна орбітального моменту електронів у зовнішньому магнітному полі**

**Діамагнетизм** – ефект, який полягає в тому, що під дією сили Лоренца виникає індукований магнітний момент, який завжди спрямований проти зовнішнього магнітного поля. У неоднорідному магнітному полі діамагнетик буде виштовхуватися із поля.

**До діамагнетиків відносяться** речовини, у яких магнітна сприйнятливість негативна й не залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля.

**До діамагнетиків належать:**

- інертні гази, водень, азот, багато рідин (вода, нафта і її похідні),
- ряд металів (мідь, срібло, золото, цинк, ртуть, галій і ін.),
- більшість напівпровідників (кремній, германій, сполуки  $A^{III}B^V$ ,  $A^{II}B^{VI}$ ) і органічних сполук,
- лужно-галоїдні кристали,
- неорганічні стекла й ін.



**Парамагнетизм** – ефект, який реалізується тоді, коли атоми, що мають власні магнітні моменти, які орієнтуються вздовж силових ліній магнітного поля. Величина магнітного моменту не залежить від зовнішнього поля. У неоднорідному магнітному полі парамагнетик буде втягуватися в область найбільшої напруженості.

**До парамагнетиків відносяться** речовини з позитивною магнітною сприйнятливістю, що не залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля. У парамагнетиках атоми мають елементарний магнітний момент навіть при відсутності зовнішнього поля, однак через тепловий рух ці магнітні моменти розподілені хаотично, тому намагніченість речовини в цілому дорівнює нулю.

**До парамагнетиків належать:**

- кисень, окис азоту,
- лужні й луго-земельні метали,
- деякі перехідні метали,
- солі заліза, кобальту, нікелю рідкоземельних елементів.



**Феромагнетизм** - ефект, який реалізується тоді, коли всі атомні магнітні моменти розміщуються паралельно.

**Феромагнетиками** є речовини з великою позитивною магнітною сприйнятливістю (до  $10^6$ ), що сильно залежить від напруженості магнітного поля й температури. Феромагнетикам властива внутрішня магнітна впорядкованість, що виражається в існуванні макроскопічних областей з паралельно орієнтованими магнітними моментами атомів – **магнітних доменів**.

**Найважливіша особливість феромагнетиків** - їхня здатність намагнічуватися до насичення у відносно слабких магнітних полях.

**Феромагнетиками є**



- залізо, кобальт, нікель,
- шість рідкоземельних елементів: гадоліній, диспрозій, гольмій, ербій, тербій і тулій (при знижених температурах)
- сплави на основі магнітних елементів, а також сплави магнітних елементів з немагнітними,
- деякі сплави, що складаються цілком з немагнітних елементів – сплави Гейслера (наприклад,  $\text{Cu}_2\text{MnAl}$ ).

**Антиферромагнетизм** – ефект, який спостерігається в кристалах, в яких пари рівних атомних моментів розміщуються антипаралельно.

**Антиферромагнетиками є речовини**, у яких нижче деякої температури спонтанно виникає антипаралельна орієнтація елементарних магнітних моментів однакових атомів або іонів кристалічної решітки.

**При нагріванні** в антиферромагнетику **відбувається фазовий перехід** у парамагнітний стан. **Температура такого переходу**, при якій зникає магнітна впорядкованість, **називається точкою Нееля** (або антиферромагнітною точкою Кюрі).



**Антиферромагнетизм виявлений у**

- хрому, марганцю й ряду рідкоземельних елементів (Ce, Nd, Sm і ін.),
- типовими антиферромагнетиками є найпростіші хімічні сполуки на основі металів перехідної групи типу окислів, галогенідів, сульфідів, карбонатів і т.п.



**Феримагнетизм** – ефект, який реалізується тоді, коли значення магнітних моментів, які є антипаралельними, не рівні між собою, внаслідок чого немає повної компенсації антипаралельних магнітних моментів сусідніх атомів.



**Феримагнетиками є речовини**, магнітні властивості яких обумовлені некомпенсованим антиферромагнетизмом.

**Феримагнетики дістали свою назву** від феритів, під якими розуміють хімічні сполуки окису заліза  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  з окислами інших металів.

**Властивості феримагнетиків мають** деякі впорядковані металеві сплави, але, головним чином, - різні оксидні сполуки, серед яких найбільший практичний інтерес представляють ферити.

# Magnetic properties of elements

1 H																	2 He	
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
55 Cs	56 Ba			72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra			104 Rf	105 Ha	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr		

- ferromagnetic
- ferromagnetic (low T)
- antiferromagnetic
- paramagnetic
- diamagnetic
- superconducting (low T)
- superconducting (more conditions)
- no data

# Процеси при намагнічуванні феро- і феримагнітиків

## Магнітна анізотропія

- У монокристалах феро- і феримагнітиків існують напрямки легкого й важкого намагнічування.
- Число таких напрямків визначається симетрією кристалічної решітки.
- При відсутності зовнішнього поля магнітні моменти доменів спонтанно орієнтуються вздовж однієї з осей легкого намагнічування.

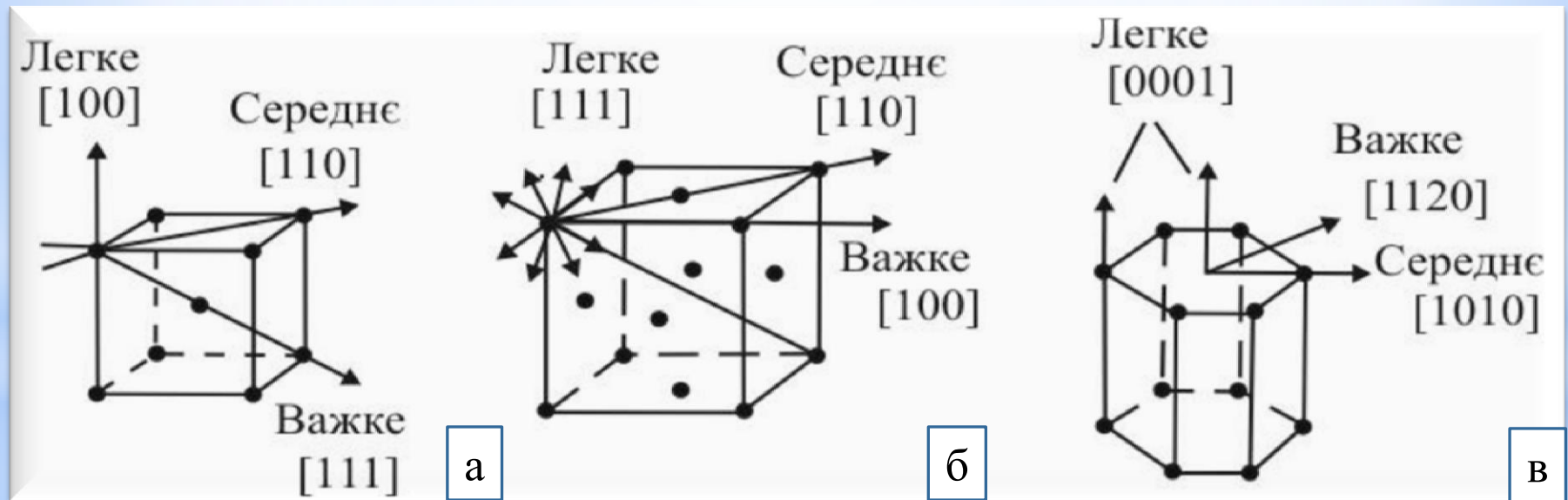


Рисунок 1 – Напрями легкого, середнього та важкого намагнічування в монокристалах феромагнітиків: залізо (а), нікель (б), кобальт (в)

## Крива намагнічування

➤ Залежність магнітної індукції макрооб'єму феромагнетика від напруженості зовнішнього магнітного поля називають **кривою намагнічування**.

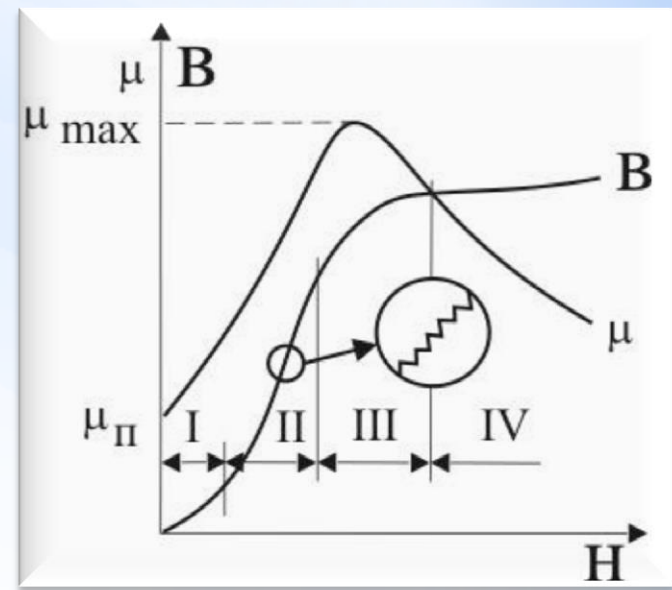


Рисунок 2 – Залежність магнітної індукції  $B$  і магнітної проникності  $\mu$  феромагнетика від напруженості зовнішнього магнітного поля  $H$

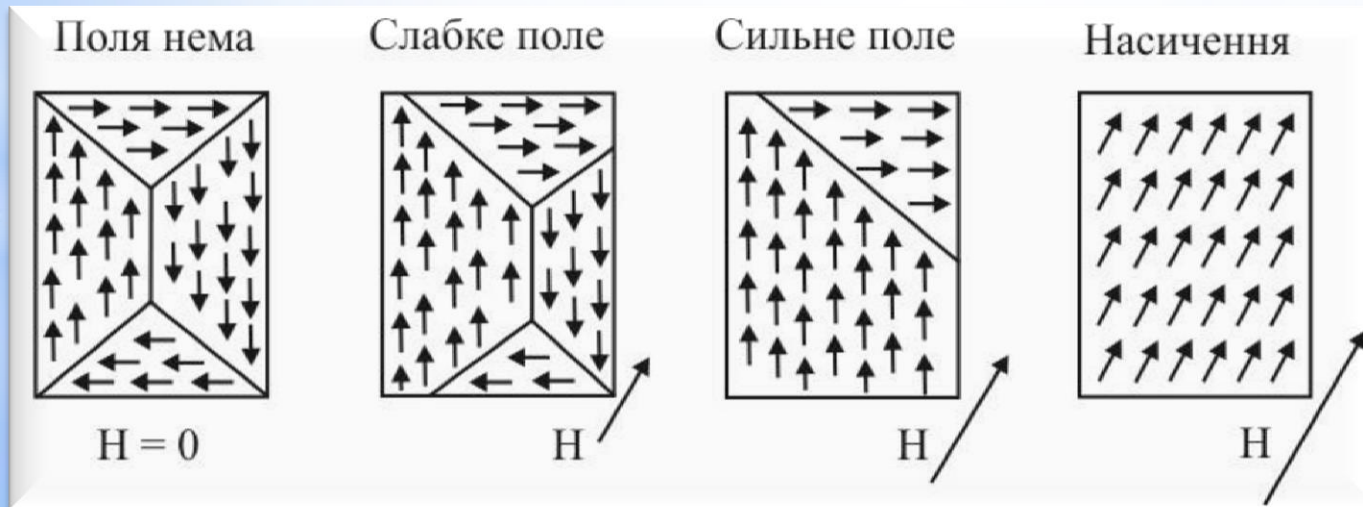


Рисунок 3 – Схема орієнтації спинів у доменах феромагнетика

## Магнітний гістерезис

➤ Якщо феромагнетик намагнітити до насичення  $B_s$ , а потім відключити зовнішнє поле, то індукція в нуль не повернеться, а буде мати деяке значення  $B_r$ , називане **залишковою індукцією**.

➤ Розмагнічуючого поля  $-H_c$ , при якій індукція у феромагнетика, попередньо намагніченому до насичення, повертається в нуль, називають **коерцитивною силою**.

➤ Зміна магнітного стану феромагнетика при його циклічному перемагнічуванні характеризується явищем **гістерезису**, тобто відставання індукції від напруженості поля.

➤ Сукупність вершин петель гістерезису утворює **основну криву намагнічування** феромагнетика.

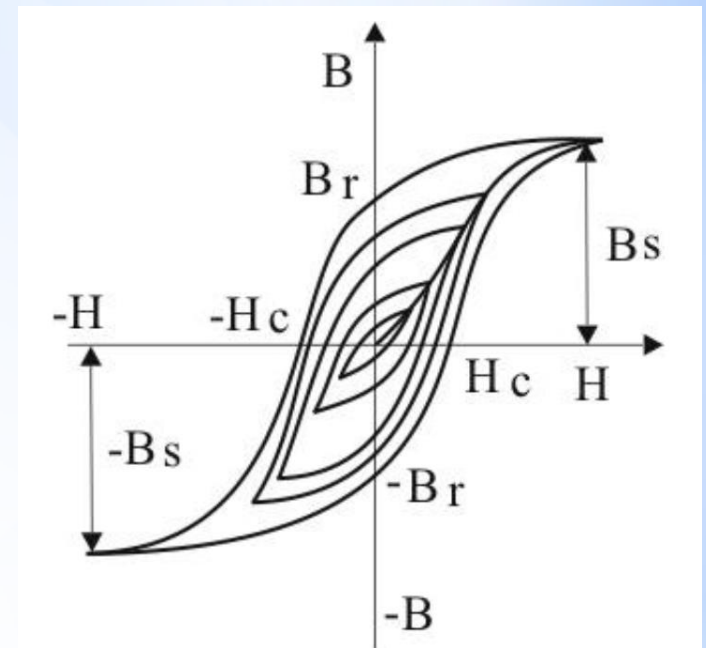


Рисунок 4 – Петлі гістерезису при різних значеннях амплітуди змінного магнітного поля й основна крива намагнічування феромагнетика

## Магнітна проникність

➤ Магнітну проникність, визначену за формулою  $\mu = B/(\mu_0 H)$ , називають **статичною магнітною проникністю**.

➤ Граничне значення магнітної проникності  $\mu_p$  при напруженості магнітного поля, близькій до нуля, називають **початковою магнітною проникністю**.

➤ Крутість окремих ділянок кривої намагнічування характеризують **диференційною магнітною проникністю**:

$$\mu_{\text{диф}} = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH}.$$

➤ У тому самому зразку максимальне значення диференціальної проникності  $(\mu_{\text{диф}})_{\text{max}}$  завжди перевищує максимальне значення статичної проникності  $\mu_{\text{max}}$ .

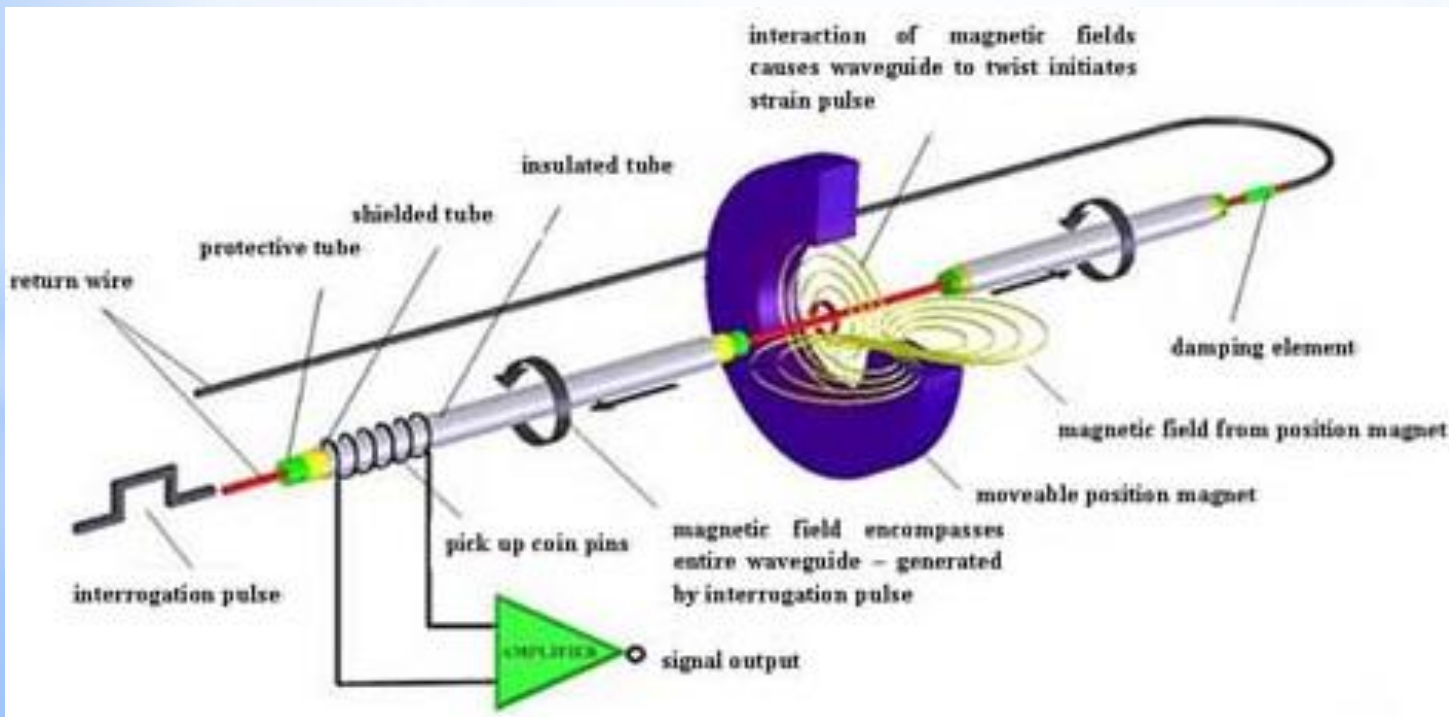
**Магнітострикція** - зміна магнітного стану феромагнітного зразка супроводжується зміною його лінійних розмірів і форми.

**СПОНТАННА**

❖ виникає при переході речовини з парамагнітного у феромагнітний стан в процесі охолодження до температури нижче точки Кюрі

**лінійна (індукована)**

❖ пов'язана з деформаціями кристалічної решітки під дією зовнішнього поля.  
❖ коефіцієнт магнітострикції  $\lambda = \Delta l/l$



- ❖ Відносну магнітострикційну деформацію, що виникає при магнітному насиченні зразка, називають **константою магнітострикції**  $\lambda_s$ .

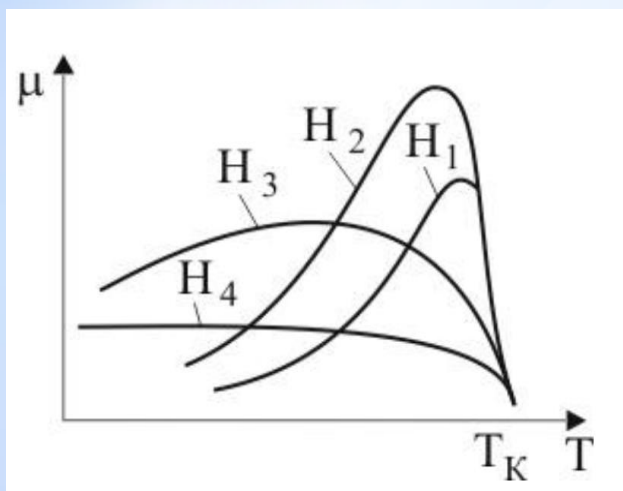


Рисунок 5 - Температурна залежність магнітної проникності феромагнетика при різних напруженостях зовнішнього магнітного поля:  $H_4 > H_3 > H_2 > H_1$ ;  $H_1$  - відповідає  $\mu_{II}$ ,  $H_4$  - відповідає області технічного насичення

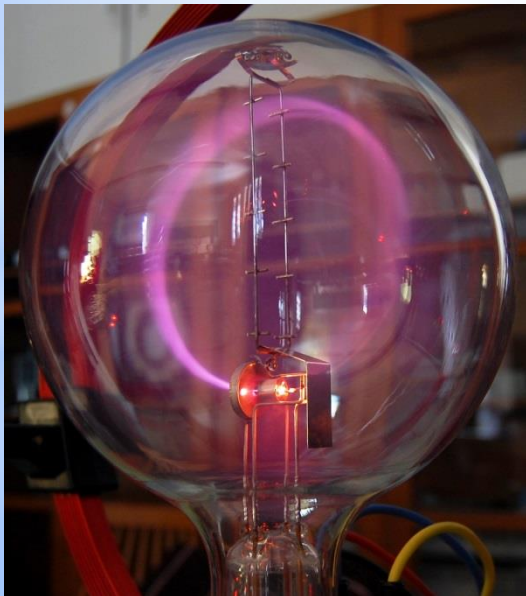
- ❖ Вище деякої температури доменна структура розпадається, тобто спонтанна намагніченість зникає й феромагнетик переходить у парамагнітний стан. Температуру такого фазового переходу називають **магнітною точкою Кюрі**.
- ❖ У більшості феритів, намагніченість насичення монотонно зменшується при нагріванні й дорівнює нулю при температурі переходу в парамагнітний стан, коли повністю зникає магнітна впорядкованість. Температуру такого переходу називають **точкою Нееля**, або антиферомагнітною точкою Кюрі.



# Класифікація магнітних матеріалів за призначенням

## магнітом'які

- ❖ низькочастотні;
- ❖ високочастотні



## спеціального призначення

- ❖ ППГ;
- ❖ НВЧ-ферити;
- ❖ магнітострикційні;
- ❖ термомагнітні;
- ❖ з постійною  $\mu$  у слабких полях

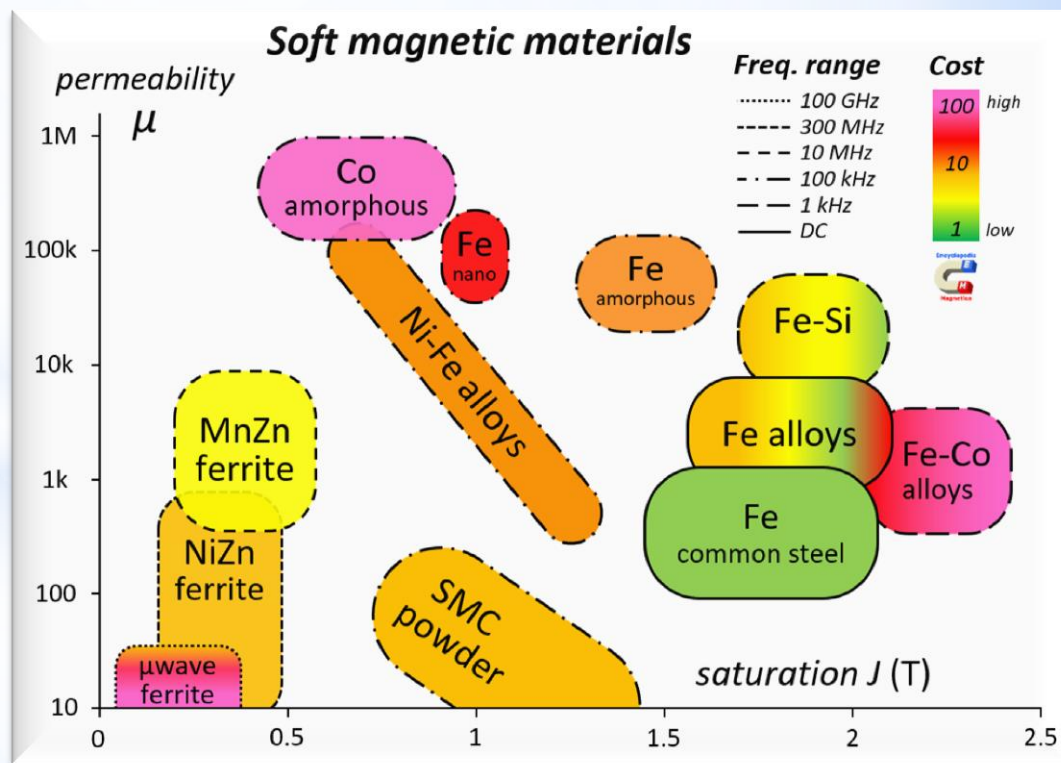
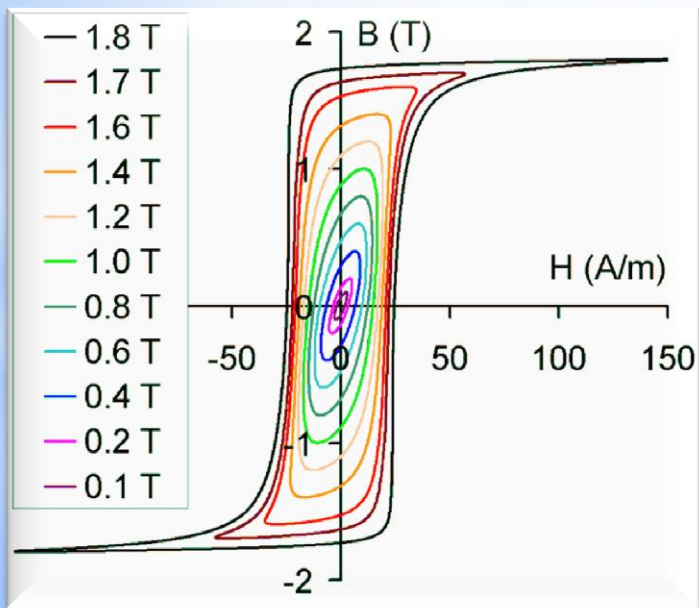
## магнітотверді

- ❖ для постійних магнітів;
- ❖ для магнітного запису



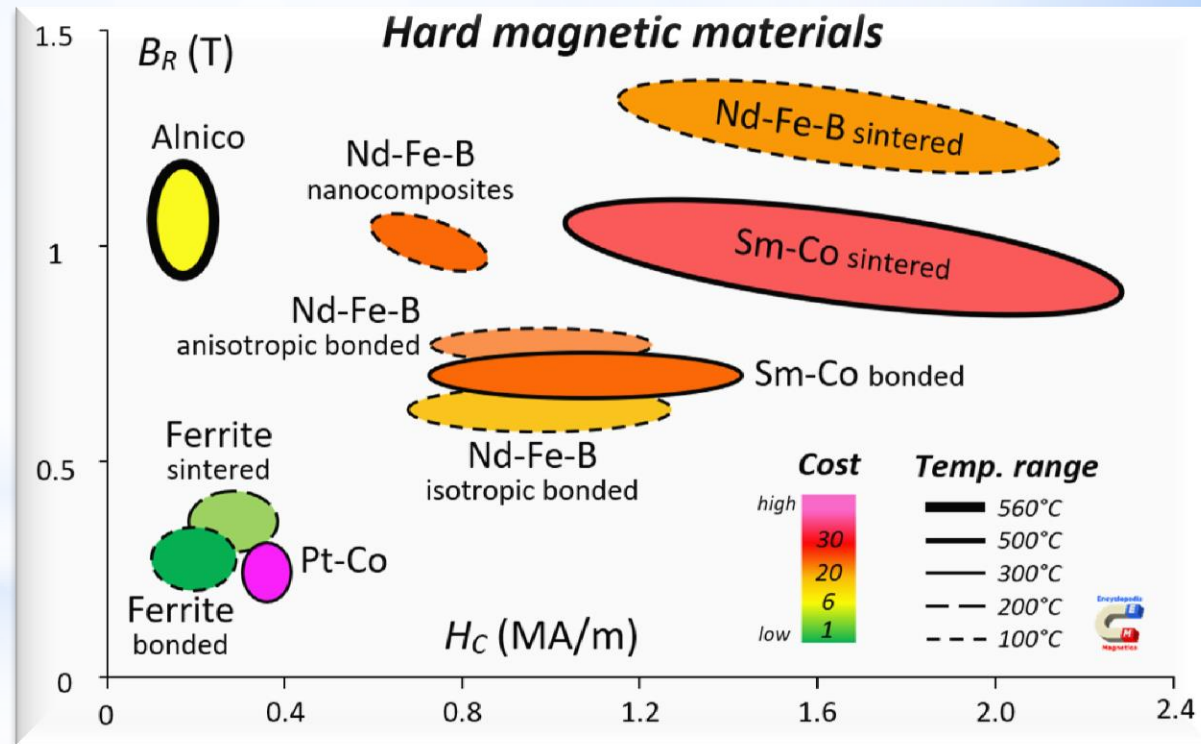
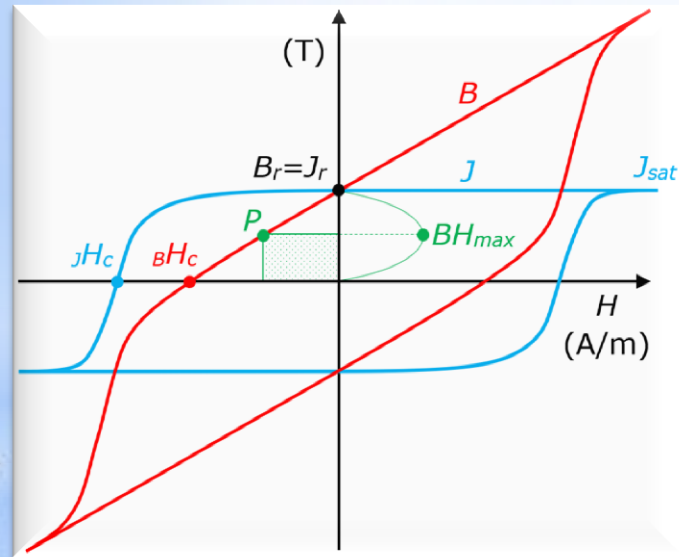
# Магнітом'які магнітні матеріали

- До магнітом'яких відносять магнітні матеріали з малою коерцитивною силою й високою магнітною проникністю.
- Умовно магнітом'якими вважають матеріали, у яких  $H_c < 800$  А/м.
- Вони мають здатність намагнічуватися до насичення в слабких магнітних полях.
- Характеризуються вузькою петлею гістерезису й малими втратами на перемагнічування.

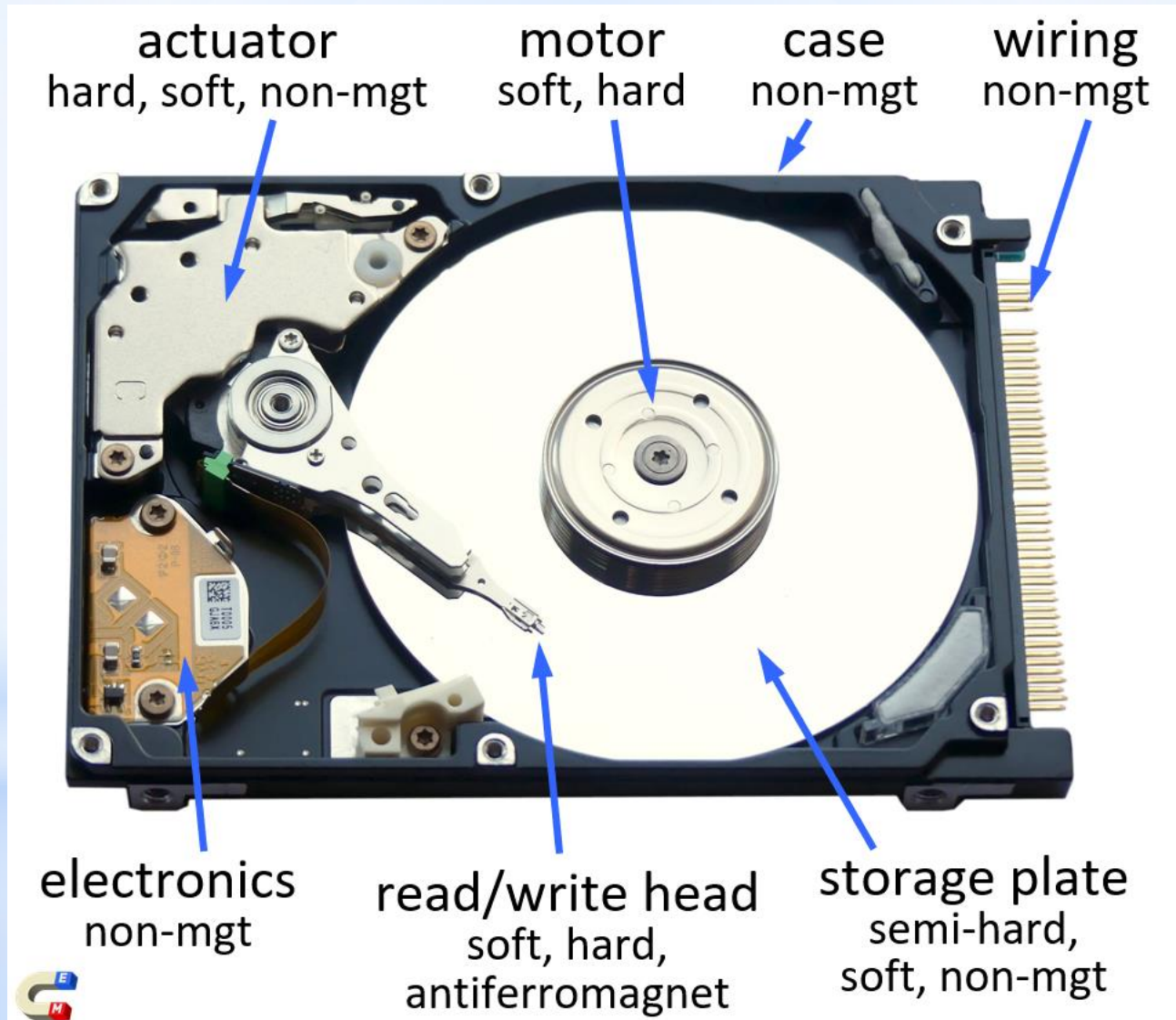


# Магнітотверді магнітні матеріали

- До магнітотвердих відносять матеріали з великою коерцитивною силою  $H_c$ .
- Вони перемагнічуються лише в дуже сильних магнітних полях.
- Умовно магнітотвердими вважають матеріали із  $H_c > 4$  кА/м.
- В кращих магнітотвердих матеріалах значення  $H_c$  перевищує 500 кА/м.



**Магнітні жорсткі диски ґрунтуються на багатьох  
типах магнітних і немагнітних матеріалів**



Дякую за увагу!