



ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Ενότητα 12: ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

ΛΙΤΣΑΡΔΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ
ΤΗΜΜΥ



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.





ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Περιεχόμενα ενότητας (1)

1. Μαγνητικά υλικά
 - i. Εισαγωγή
 - ii. Μαγνητικά μεγέθη και μονάδες
 - iii. Ατομική μαγνητική ροπή
 - iv. Επαγόμενη μαγνήτιση
 - v. Νόμος Curie
 - vi. Αυθόρμητη μαγνήτιση
 - vii. Μαγνητικές περιοχές



Περιεχόμενα ενότητας (2)

- viii. Βρόχος υστέρησης
- ix. Κατηγορίες μαγνητικών υλικών
- x. Μαλακά μαγνητικά υλικά
- xi. Απωλεις μαγνητικών υλικών

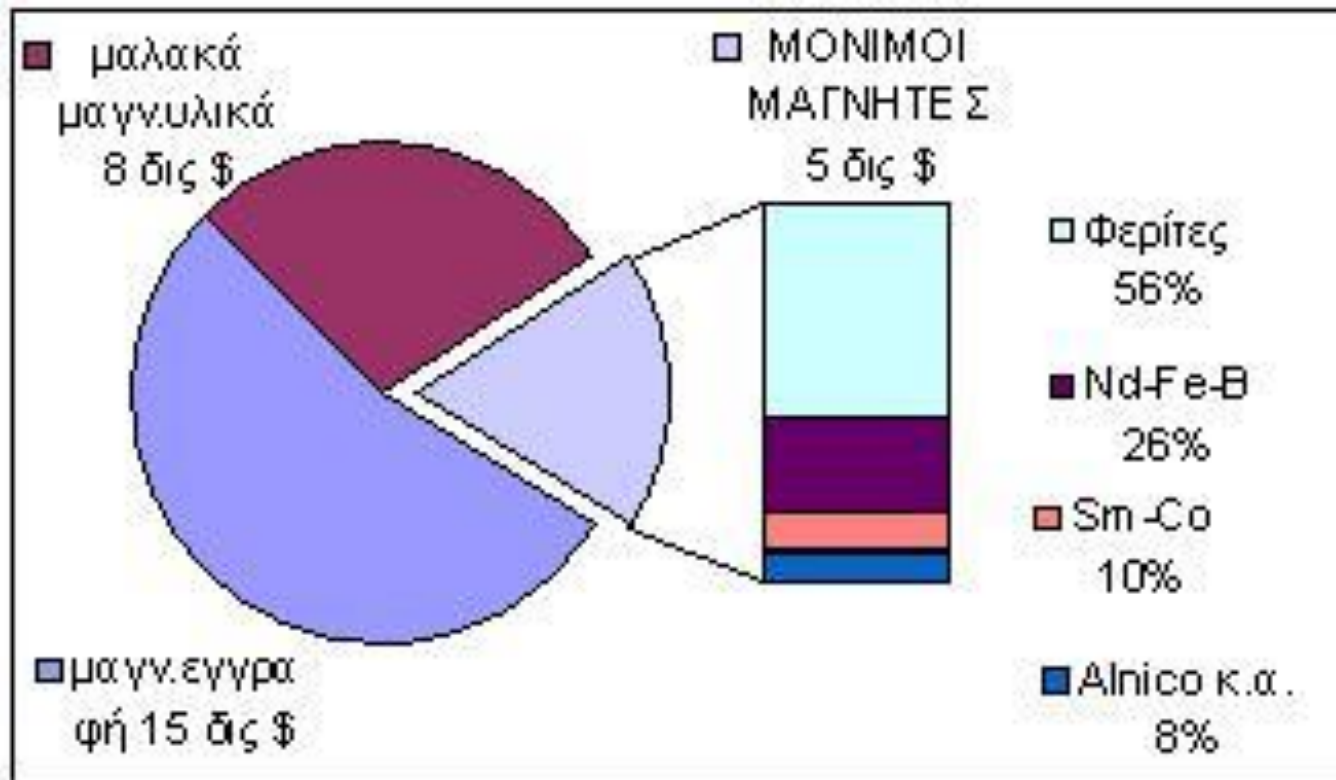


Σκοποί ενότητας

- Να εξοικειωθούν οι φοιτητές με τα βασικά μαγνητικά μεγέθη και τις μονάδες τους.
- Να μπορούν οι φοιτητές να διατυπώσουν το νόμο του Curie.
- Να μπορούν οι φοιτητές να διακρίνουν τα είδη μαγνητικής συμπεριφοράς και να αναφέρουν παραδείγματα.
- Να μπορούν οι φοιτητές να κατανομάσουν τους βασικούς μηχανισμούς μαγνητικών απωλειών.



ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ



1987

1,75 δις \$
250.000 t

61 %

9%

18 %

12 %

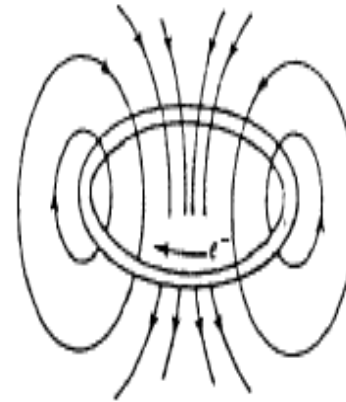
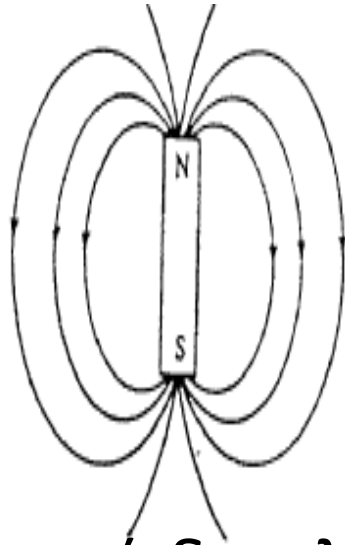
[Strnat 1990]

- Παγκόσμια παραγωγή μαγνητικών υλικών (1997)
- 500.000 τόννοι (=100 g /έτος /κάτοικο !)

[M.Coev, The Industrial Physicist, Sept.1998, www.aip.org/tip]

Ηλεκτρολογικά Υλικά

ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ (1)



- Μαγνητική διπολική ροπή: $\mathbf{m} = \mu_0 \cdot \mathbf{l} \cdot \mathbf{A}$
- Μαγνήτιση \mathbf{M} : $\mathbf{M} = \mathbf{m} / V$
- Μαγνητική πόλωση \mathbf{J} : $\mathbf{J} = \mu_0 \cdot \mathbf{M}$
- Μαγνητική διαπερατότητα του κενού: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)



ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ (2)

Απόκριση στο πεδίο:

- *Μαγνητική επιδεκτικότητα:* $\mathbf{M} = \chi \cdot \mathbf{H}$, $\mathbf{J} = \mu_0 \cdot \chi \cdot \mathbf{H}$
- *Μαγνητική επαγωγή:* $\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} = \mu_0 \cdot (\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{J}$

(προσέγγιση) $B = \mu H = \mu_0 (1 + \chi) H = \mu_0 \mu_r H$

- *Σχετική διαπερατότητα*

$$\mu_r = \mu / \mu_0 = 1 + \chi$$



ΠΟΛΩΣΗ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ (1)

- Στοιχειώδης διπολική ροπή

$$\underline{p} = q \cdot \underline{\Delta x} = a \cdot \underline{\mathcal{E}}$$

a : πολωσιμότητα

- Πόλωση: αριθμός ηλεκτρικών διπολικών ροπών στη μονάδα του όγκου

$$\bar{P} = \frac{\sum \bar{p}}{V} = N \cdot a \cdot \bar{\mathcal{E}} \quad \text{Cb/m}^2$$

- Απόκριση του υλικού σε πεδίο E :

$$\bar{P} = N \cdot a \cdot \bar{\mathcal{E}}$$



ΠΟΛΩΣΗ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ (2)

- Ηλεκτρική επιδεκτικότητα χ :

$$\bar{P} = \varepsilon_0 \chi \bar{\mathcal{E}}$$

- Διηλεκτρική σταθερά (σχετική) ε_r

$$\varepsilon_r = 1 + \chi$$

- Γραμμικά διηλεκτρικά:

$$\bar{P} = \varepsilon_0 \chi \bar{\mathcal{E}} = \varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) \bar{\mathcal{E}}$$

- Ηλεκτρική μετατόπιση D (περιλαμβάνει το πεδίο και την απόκριση του υλικού):

$$\bar{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \bar{\mathcal{E}} = \varepsilon_0 (1 + \chi) \bar{\mathcal{E}} = \varepsilon_0 \bar{\mathcal{E}} + \bar{P}$$



ΜΟΝΑΔΕΣ

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} = \mu_0 \cdot (\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0 \cdot \mathbf{H} + \mathbf{J}$$

- B, J : *Tesla* (Weber/m²) = Volt·sec/m²
- M : A/m

$$\mathbf{(CGS) B = H + 4\pi \cdot M}$$

- H : *Oersted* (1Oe = $10^3/4\pi$ A/m = 79,6 A/m)
- B : *Gauss* (1G = 10^{-4} T)
- M : *Gauss* ($4\pi G = 10^{-4}$ T)



ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΡΟΠΗ ΚΑΙ ΣΤΡΟΦΟΡΜΗ

- Τροχιακή μαγνητική ροπή του ηλεκτρονίου:

$$m_\ell = I \cdot A = e \frac{\omega}{2\pi} \cdot \pi r^2 = \frac{e}{2} \omega r^2 \quad (I = q/t = e \frac{\omega}{2\pi})$$

- Τροχιακή στροφορμή: $p_\ell = m\omega r^2$

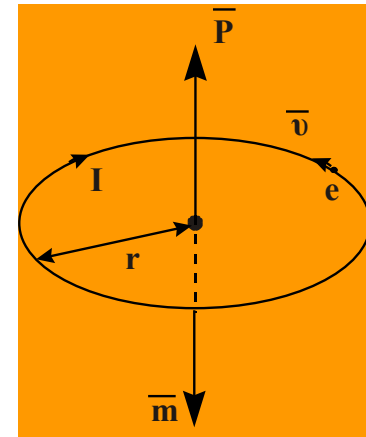
$$\vec{m}_\ell = -\frac{e}{2m_e} \cdot \vec{p}_\ell$$

- Γυρομαγνητικός λόγος: $\gamma_e = \frac{|e|}{2m_e}$

- Ιδιοστροφορμή (σπιν):

$$\vec{m}_s = -\frac{e}{m_e} \cdot \vec{p}_s$$

$$\gamma_s = \frac{|e|}{m_e} = 2\gamma_e$$



ΑΤΟΜΙΚΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΡΟΠΗ

Ένα άτομο με στροφορμή: $J \cdot \hbar$

➤ έχει μαγνητική ροπή $m_J = g_J \cdot J \cdot \mu_B$

(διπολική μαγνητική ροπή $p_{m_J} = \mu_0 g_J J \mu_B$)

– g_J ο παράγοντας Lande,

– μ_B η μαγνητόνη Bohr, μονάδα μέτρησης της ατομικής μαγνητικής ροπής.

$$\mu_B = \frac{e}{2m_e} \cdot \hbar = 9.274 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2$$

$$\mu_0 \mu_B = 1.165 \times 10^{-29} \text{ Wb}^3 \text{m}$$

$$\text{(CGS: } \mu_B = 9.274 \times 10^{-21} \text{ erg/G)}$$



ΕΠΑΓΟΜΕΝΗ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ

- Διαμαγνητικά ($\chi < 0$, $\mu_r \cong 1$)

- Cu -0.8×10^{-6}

- Ag -2.0×10^{-6}

- Zn -1.1×10^{-6}

- H₂O -0.7×10^{-6}

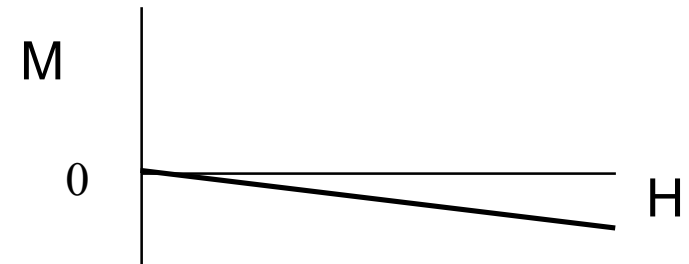
- Παραμαγνητικά ($\chi > 0$, $\mu_r \cong 1$)

- Al 1.65×10^{-6}

- Mn 6.6×10^{-6}

- Na 5×10^{-7}

- Αέρας 2.8×10^{-8}



NOMOS CURIE (1)

- Δυναμική ενέργεια μαγνητικής ροπής:

$$E = -\mu_0 \cdot M \cdot H \cdot \cos\theta$$

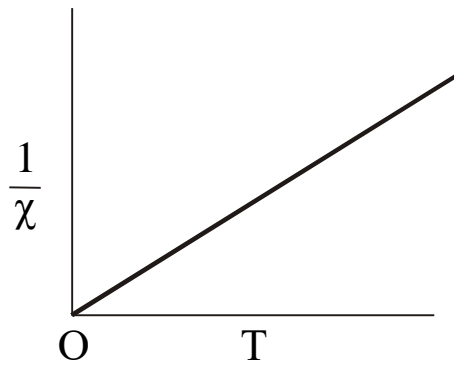
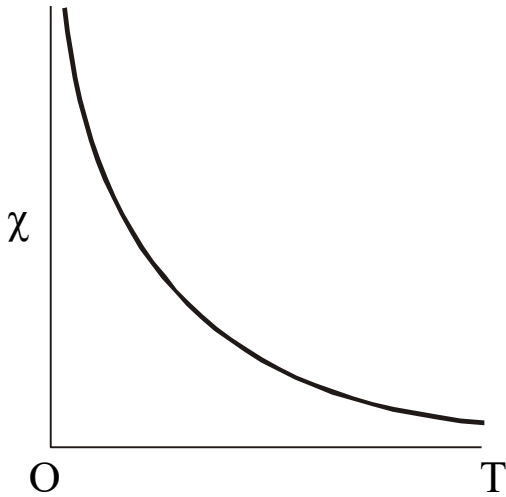
για $m=1 \mu_B$ και $H=10^3 \text{ kA/m}$ (12 kOe):

$$E = 1.17 \times 10^{-23} \text{ Joule} \ll kT_{(300)} = 4.1 \times 10^{-21} \text{ Joule}$$

- Σχεδόν τυχαίος προσανατολισμός ροπών.
- Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία, δυσκολότερος ο παραλληλισμός των μαγνητικών ροπών με το πεδίο.

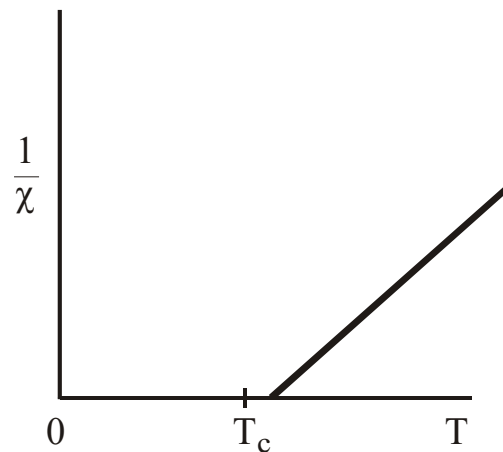
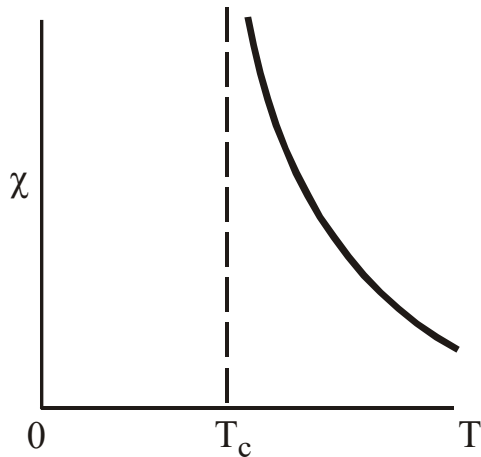


NOMOS CURIE (2)



- Νόμος Curie:

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



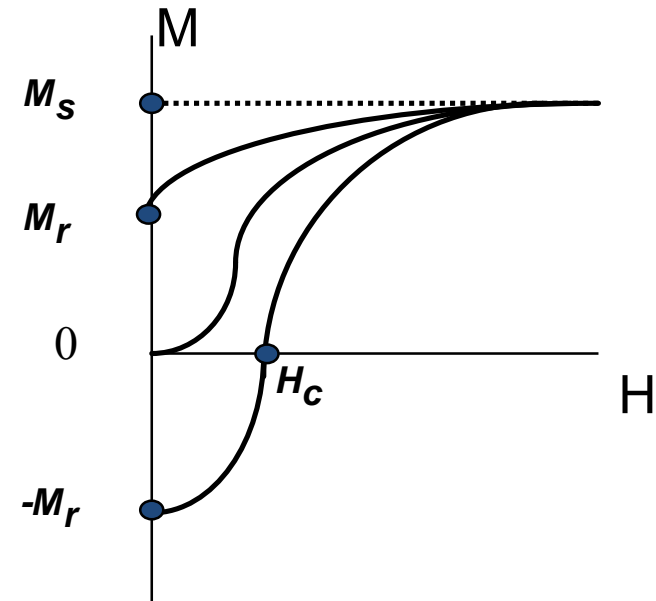
- Νόμος Curie-Weiss:

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

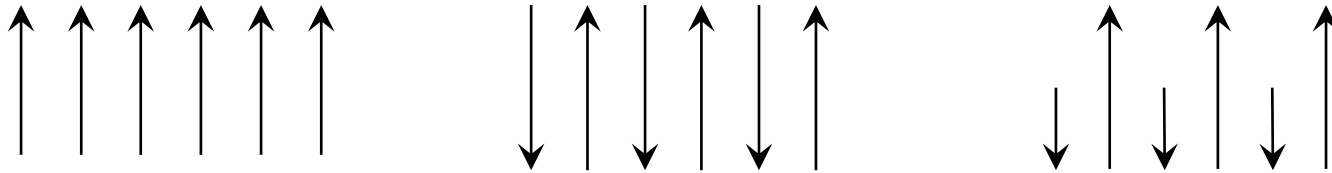


ΑΥΘΟΡΜΗΤΗ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ

- (Σιδηρο)μαγνητικά ($\mu_r \gg 1$)
 - Fe 10^3
 - Co 10^3
 - φερίτες 100-5000
 - supermalloy 8×10^5



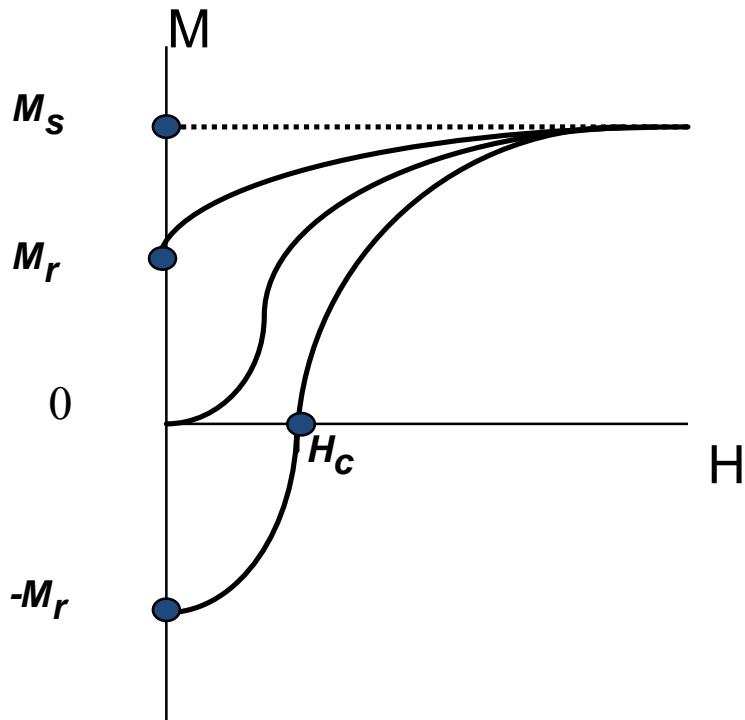
ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΤΑΞΗ



- Σημαίνει ευθυγράμμιση μαγνητικών ροπών.
- Φαινομενολογική ερμηνεία: «Μοριακό πεδίο».
- Πραγματικό αίτιο: Κβαντική «αλληλεπίδραση ανταλλαγής».



ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ

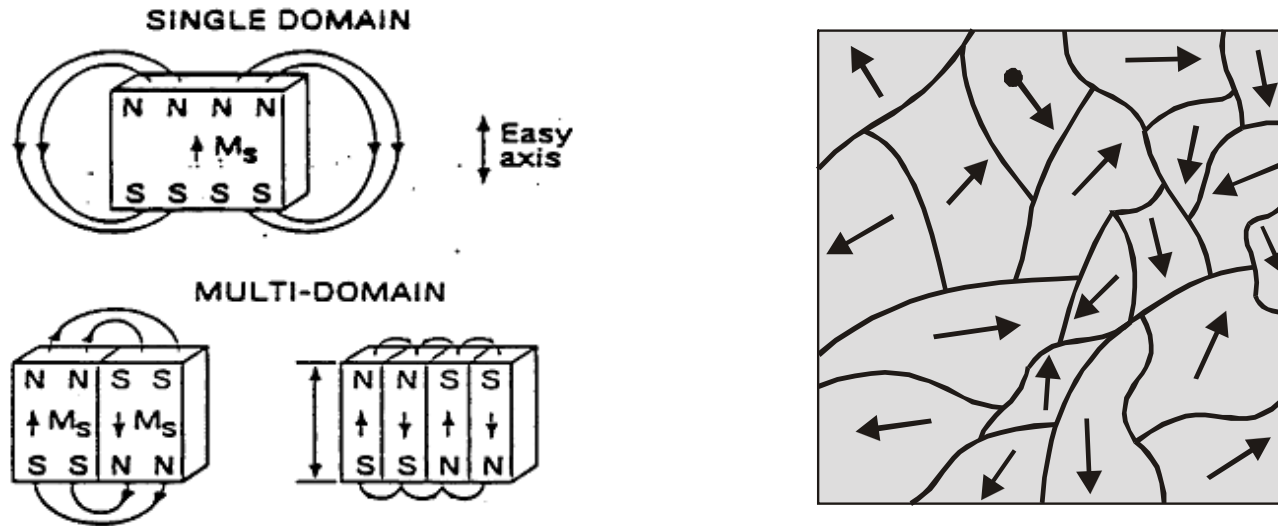


- Υψηλή διαπερατότητα.
- Υψηλή μαγνήτιση.
- Παραμένουσα μαγνήτιση.
- Κύκλος υστέρησης.
- Κρίσιμη θερμοκρασία.

? Αφού οι ροπές είναι παράλληλες, γιατί δεν είναι πάντα $M=M_s$.



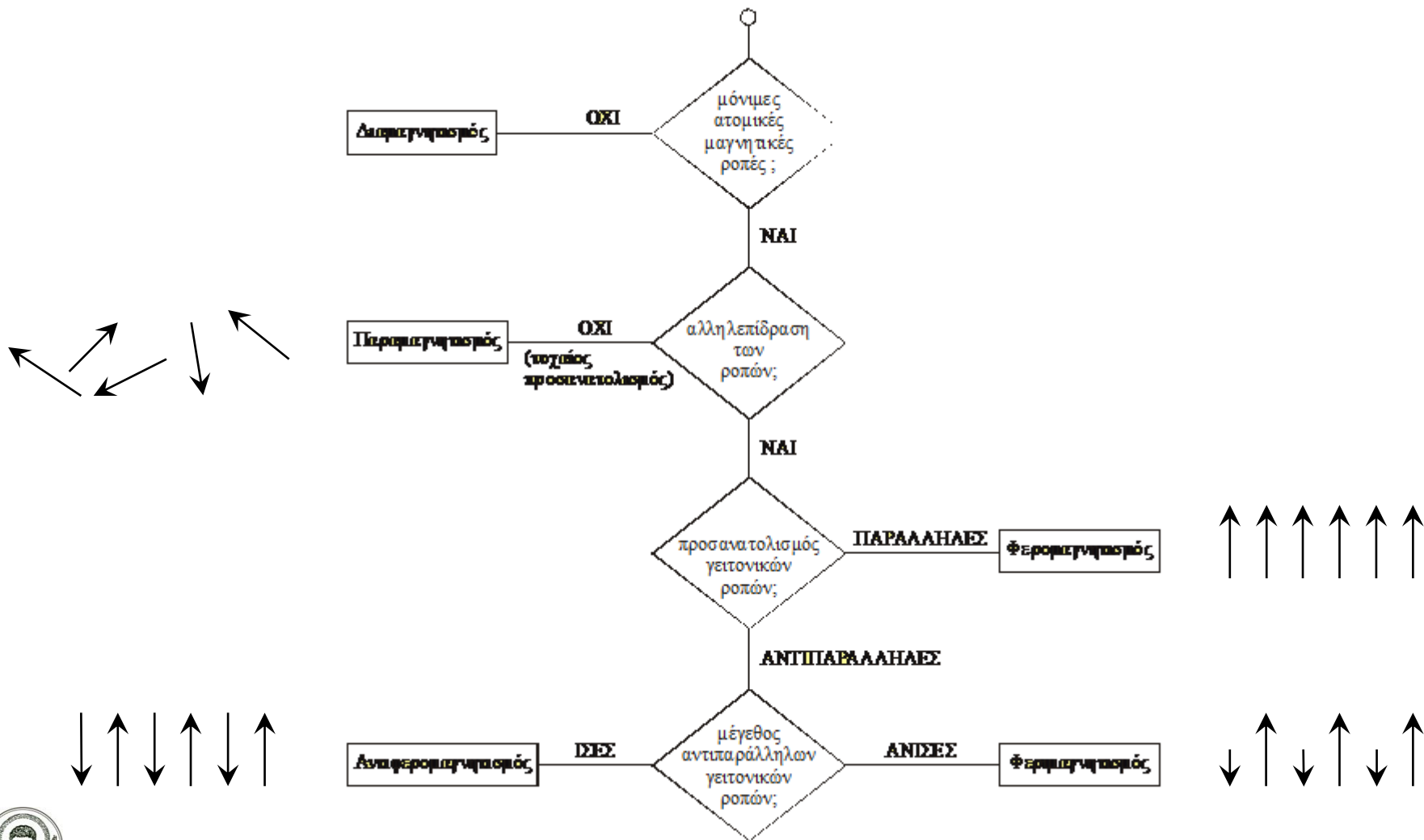
ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ



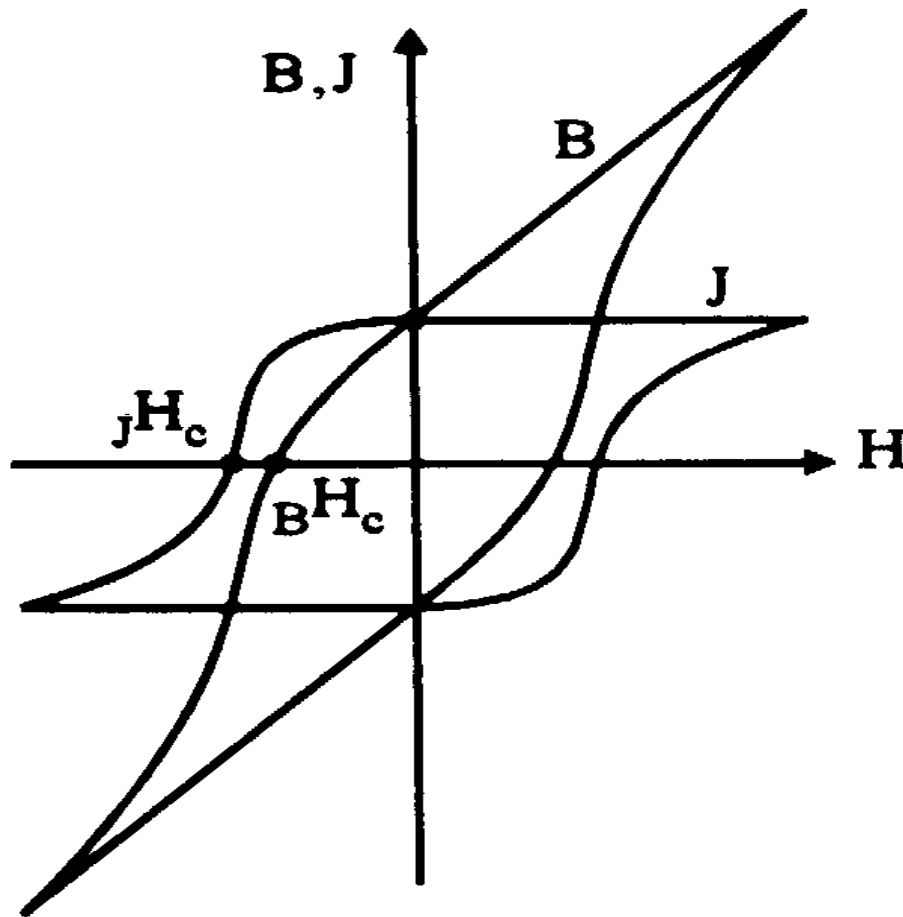
- 10^{12} - 10^{15} άτομα με ροπές παράλληλες.
- Μαγνήτιση ίση με τη μαγνήτιση κόρου.
- Καμπύλη μαγνήτισης: μεταβάλλονται η διεύθυνση της μαγνήτισης και ο όγκος των περιοχών.



ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΡΟΠΕΣ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ



ΒΡΟΧΟΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ



$$B = \mu_0 \cdot H + J \quad (J = \mu_0 \cdot M)$$

- ${}_J H_c$: συνεκτικό πεδίο "ενδογενές" ($J=0$).
- ${}_B H_c$: "κανονικό" συνεκτικό πεδίο ($B=0$).
- ${}_J H_c > {}_B H_c$ σε σκληρά υλικά
- $B_r = J_r$: παραμένουσα μαγνήτιση (για $H=0$).



ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ (1)

Μαλακά: $H_c < 100 \text{ Oe}$ (8 kA/m)

- μαλακός σίδηρος
- πυριτικοί χάλυβες (Fe-Si)
- κυβικοί φερίτες
- άμορφα κράματα (Fe-Ni)

Ενδιάμεσα: $100 \text{ Oe} < H_c < 1000 \text{ Oe}$

- οξειδία σιδήρου
- οξειδία χρωμίου
- οξειδία κοβαλτίου
- κράματα Co-Cr



ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ (2)

Σκληρά: $H_c > 1000$ Oe (80 kA/m)

- Εξαφερίτες
- κράματα Al-Ni-Co
- ενώσεις Sm-Co
- Nd-Fe-B ($Nd_2Fe_{14}B$)



ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΜΑΛΑΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

- **Fe και κράματα**
 - Δυναμοελάσματα Fe –Si
 - Πυρήνες σκόνης (powder cores)
 - Fe, permalloy (MPP), “high flux” (NiFe 50-50), sendust,
 - Άμορφα κράματα (metglass)
 - Νανοκρυσταλλικά (finemet)
- **Φερίτες** (κυβικοί Mn-Zn & Ni-Zn, εξαγωγικοί για μικροκυματικές συχνότητες)

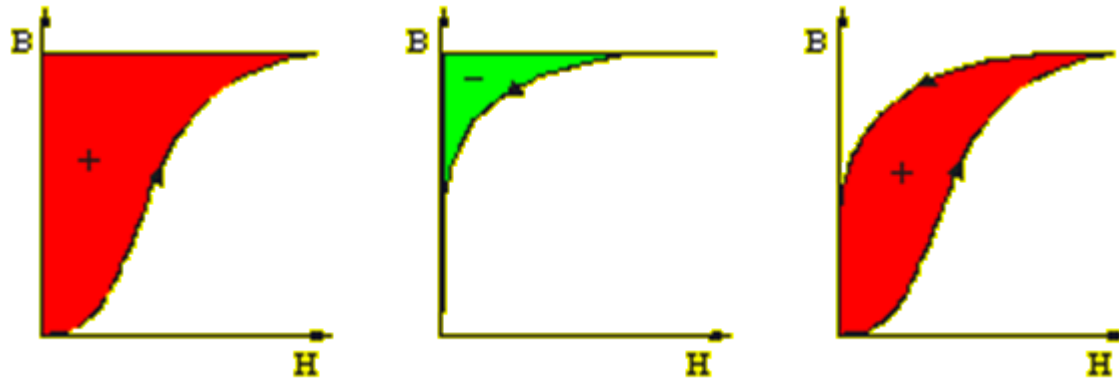


ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

- Απώλειες «χαλκού» (τυλίγματος) - απώλειες «σιδήρου» (πυρήνα).
- Μαγνητικές απώλειες (πυρήνα).
 - Υστέρησης (Κάθε μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής γενικά συνεπάγεται μεταβολή της μαγνητικής ενέργειας).
 - Δινορευμάτων.
 - Παραμένουσες («ανώμαλες).
 - (απώλειες συντονισμού).
- Εφαπτομένη απωλειών $\tan\delta = \mu''/\mu'$ ($\mu = \mu' + j\mu''$).
- Συντελεστής απωλειών $\tan\delta/\mu$.



ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΒΡΟΧΟΥ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ



$$\Delta W = \int_{B_1}^{B_2} H \cdot dB$$

- Πυκνότητα ενέργειας που καταναλώνεται:

$$W_h = \oint J \cdot dH = \oint B \cdot dH \quad (\text{J/m}^3)$$

- Απώλειες υστέρησης (πυκνότητα ισχύος):

$$P_h = W_h \cdot f \quad (\text{W/m}^3)$$

- Ειδικές απώλειες: $P_s = \frac{W_h \cdot f}{d} \quad (\text{W/kg})$



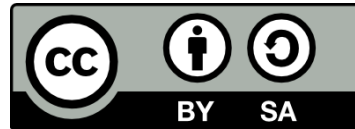
Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Λιτσαρδάκης Γεώργιος.
«Ηλεκτρολογικά Υλικά. Μαγνητικά Υλικά». Έκδοση: 1.0. Θεσσαλονίκη 2014.
Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:
<https://opencourses.auth.gr/courses/OCRS492/>.



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά - Παρόμοια Διανομή [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

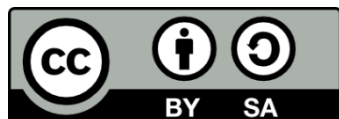
[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>





Τέλος ενότητας

Επεξεργασία: Τονοζλής Γεώργιος
Θεσσαλονίκη, 03/06/2015



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ
2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Σημειώματα

Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

