Φυσική και Τεχνολογία Υλικών και Διατάξεων Στερεάς Κατάστασης

Ανδρέας Καϊδατζής

Αναπληρωτής Καθηγητής

Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών

Π.Μ.Σ. Προχωρημένες Σπουδές στη Φυσική

Ειδίκευση: «Φυσική και Τεχνολογία Υλικών – Φωτονική»

Φυσική και Τεχνολογία Υλικών και Διατάξεων Στερεάς Κατάστασης

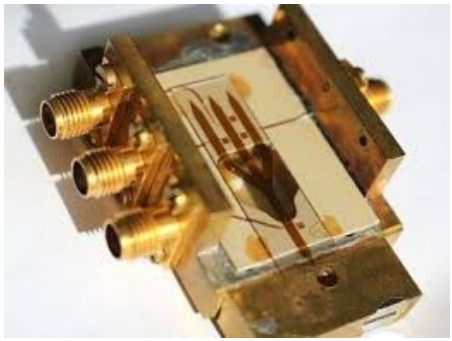
Μάιος – Ιούνιος 2026

Μαγνητικές και υπεραγώγιμες διατάξεις

MRAMs

Magnetic field sensors

Spintronic and magnonic microwave devices



Μαγνητικά Υλικά

Πρόκειται κυρίως για υλικά που εμφανίζουν:

- Σιδηρομαγνητισμό
- Αντισιδηρομαγνητισμό
- Σιδηριμαγνητισμό

Σε κάθε περίπτωση, υπάρχει κάποιο είδος τάξης των μαγνητικών διπολικών ροπών → **Αλληλεπίδραση ανταλλαγής**!

Σημαντικές παράμετροι:

- Θερμοκρασία Curie (T_C)
- Μαγνήτιση κόρου (M_S)
- Παραμένουσα μαγνήτιση (M_r)
- Συνεκτικό πεδίο (H_C)

Μαγνητικά Υλικά

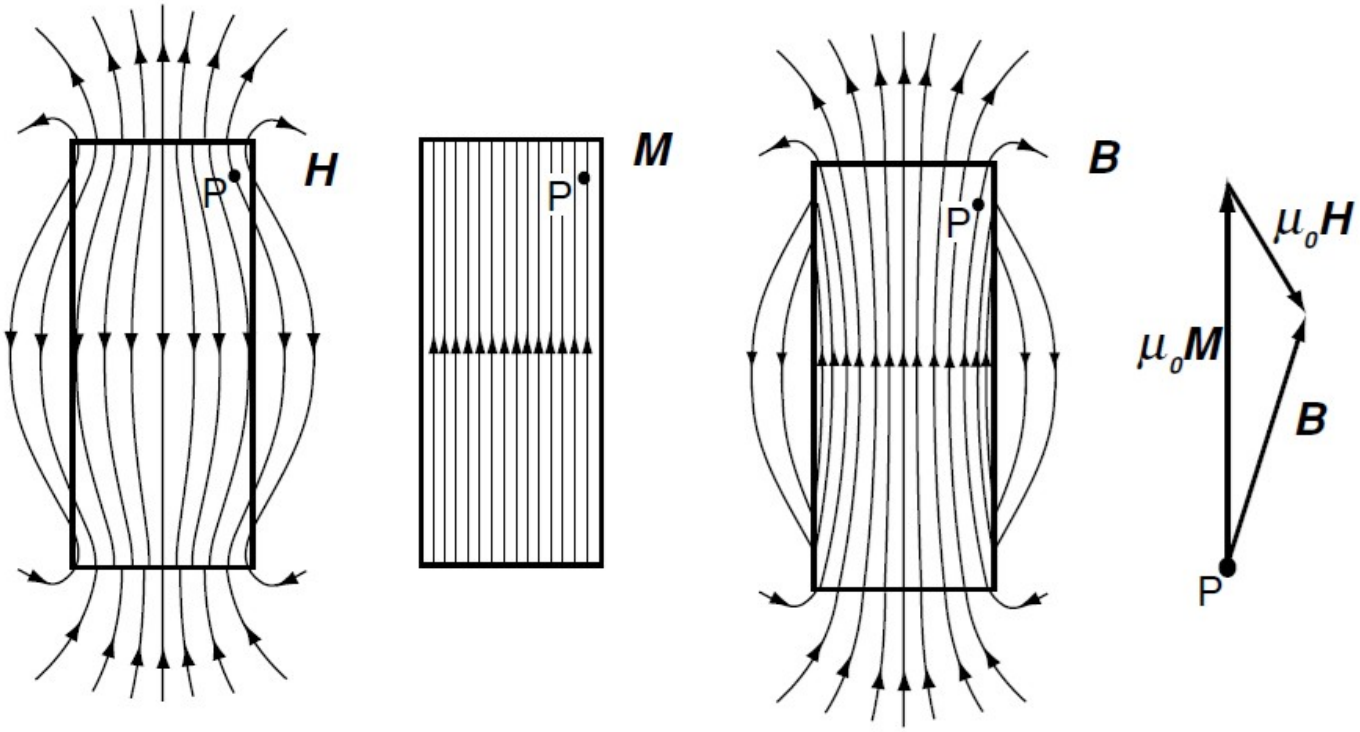
Τρεις χαρακτηριστικές διανυσματικές ποσότητες

$$\vec{B} = \mu_0 \left(\vec{H} + \vec{M} \right) \qquad \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \left[T \cdot m \cdot A^{-1} \equiv J \cdot m^{-1} \cdot A^{-2} \right]$$

$\vec{B}[T]$

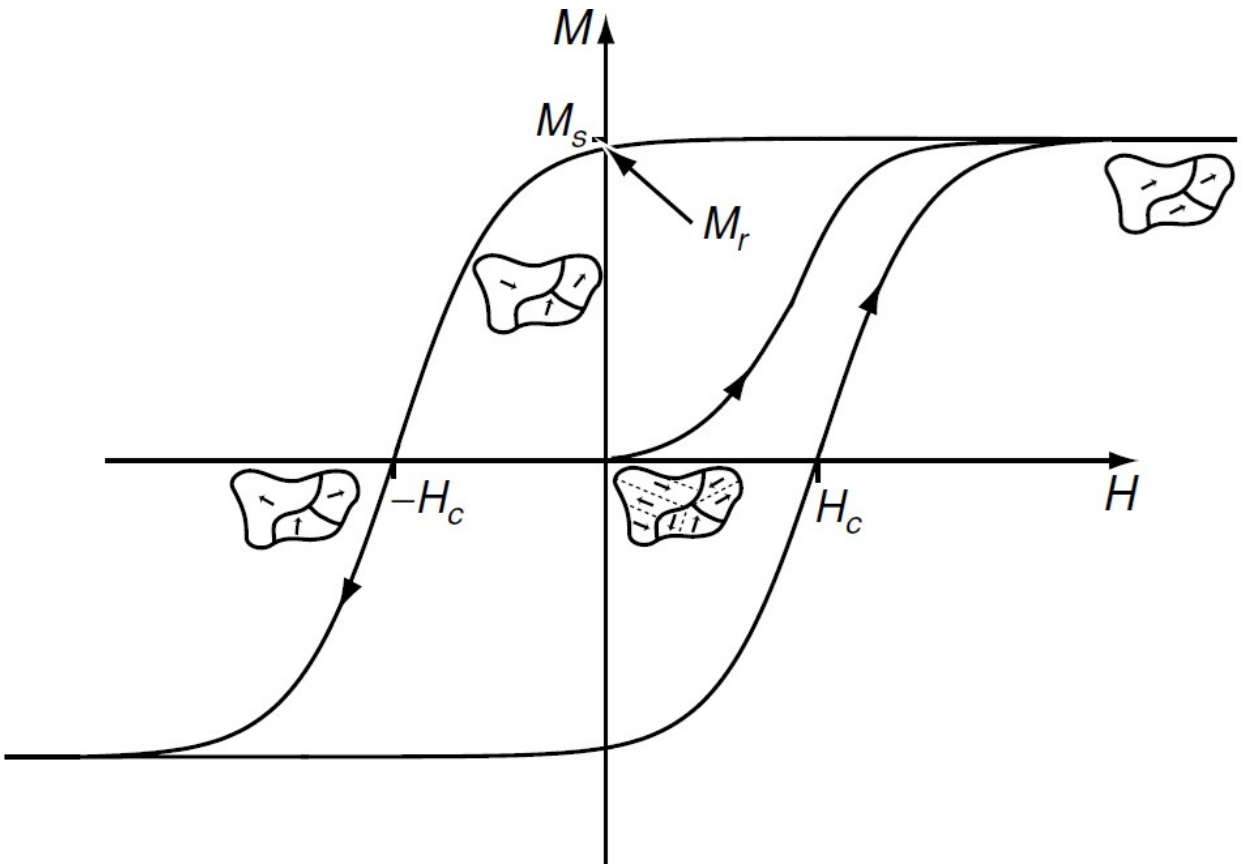
$\vec{H}[A \cdot m^{-1}]$

$\vec{M}[A \cdot m^{-1}]$



Μαγνητικά Υλικά

Βρόχος υστέρησης (hysteresis loop)



M_S : μαγνητιση κόρου

M_r : παραμένουσα μαγνήτιση

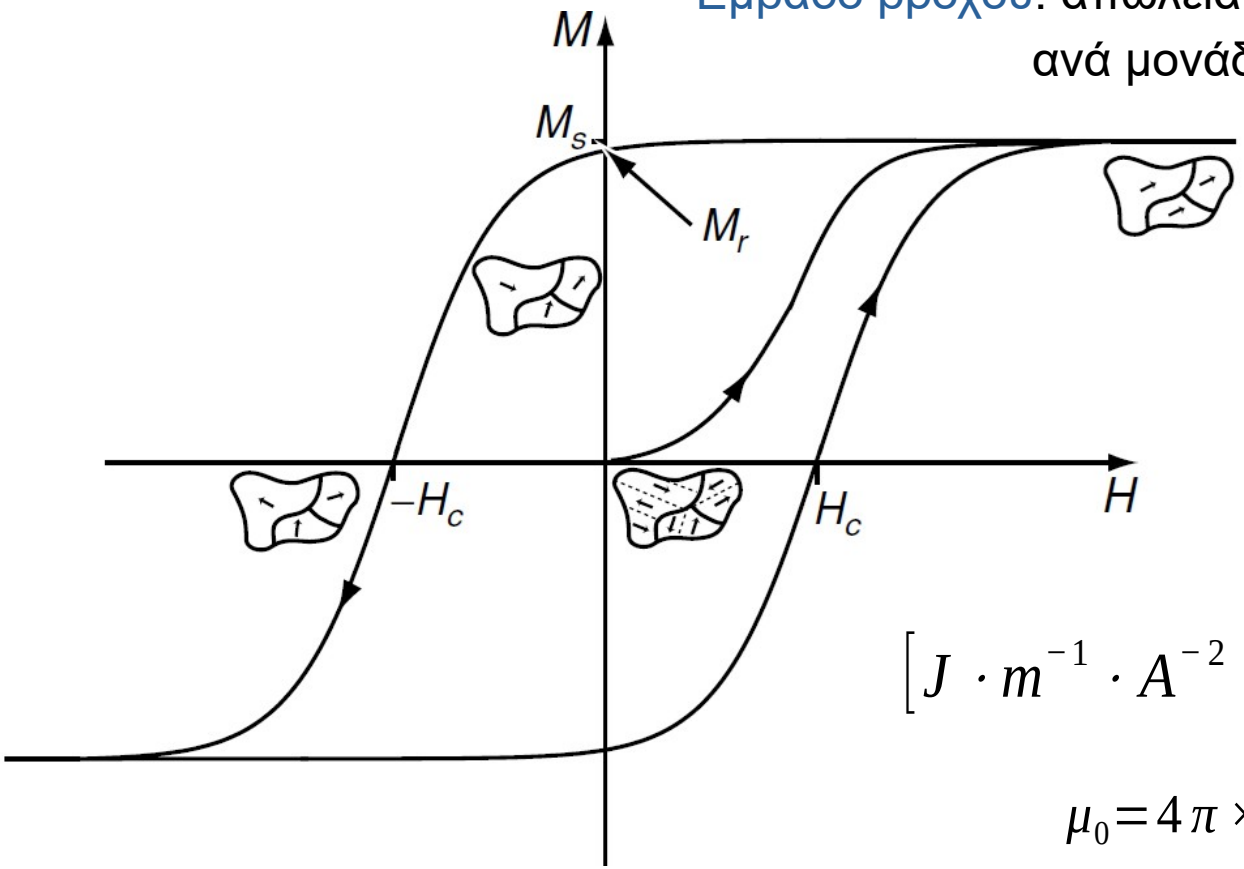
H_C : συνεκτικό πεδίο

Μαγνητικά Υλικά

Γιατί υστέρηση..;

→ Κυρίως εξωγενή χαρακτηριστικά του υλικού καθορίζουν την υστέρηση

Εμβαδό βρόχου: απώλεια ενέργειας ανά κύκλο και ανά μονάδα όγκου



Πυκνότητα ενέργειας

$$E = \oint \mu_0 \vec{H} \cdot d\vec{M}$$

$$\left[J \cdot m^{-1} \cdot A^{-2} \cdot A^{-2} \cdot m^{-2} \equiv J \cdot m^{-3} \right]$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} T \cdot m \cdot A^{-1}$$

Μαγνητικά Υλικά

Μαγνήτιση κόρου

Μαγνήτιση κόρου (M_S): η μέγιστη μαγνήτιση που μπορεί να αποκτήσει ένα υλικό και εμφανίζεται όταν όλες οι ατομικές μαγνητικές διπολικές ροπές του ευθυγραμμίζονται πλήρως με την κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου.

→ Η Μαγνήτιση κορεσμού είναι <u>ενδογενής</u> ιδιότητα του υλικού!

Ενδεικτικές τιμές (σε θερμοκρασία 296 K):

Fe	1720 kA·m^{-1}
Co	1370 kA·m^{-1}
Ni	485 kA·m^{-1}
$Fe_{65}Co_{35}$	1950 kA·m^{-1} (Η μέγιστη τιμή..!)
Fe_3O_4	480 kA·m^{-1}

$$\vec{M} = \frac{\vec{\mu}_{o\lambda}}{V}$$

<u>Παράδειγμα</u>: Μεταλλικό σφαιρίδιο διαμέτρου d = 2 mm, έχει ολική μαγνητική διπολική ροπή $\mu_{o\lambda} = 2\cdot10^{-3}$ A·m^2. Από ποιο υλικό είναι κατασκευασμένο το σφαιρίδιο..;

Μαγνητικά Υλικά

Παραμένουσα μαγνήτιση

Παραμένουσα μαγνήτιση (M_r): είναι η μαγνήτιση του υλικού αφότου μηδενιστεί το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο.

→ Η παραμένουσα μαγνήτιση είναι εξωγενής ιδιότητα του υλικού!

Εξαρτάται σημαντικά από την μαγνητική ανισοτροπία (κρυσταλλική δομή, σχήμα) και από την πυκνότητα των ατελειών του κρυστάλλου.

Εξαιρετικά σημαντική παράμετρος για εφαρμογές είναι ο λόγος: $\frac{M_r}{M_S}$

Μαγνητικά Υλικά

Συνεκτικό πεδίο

Το συνεκτικό πεδίο (H_C) είναι το μέτρο του εξωτερικού αντίθετου μαγνητικού πεδίου που πρέπει να εφαρμοστεί σε ένα μαγνητισμένο υλικό ώστε να μηδενιστεί η μαγνήτισή του, αφού έχει προηγουμένως κορεστεί.

→ Το συνεκτικό πεδίο είναι εξωγενής ιδιότητα του υλικού!

Εξαρτάται σημαντικά από την μαγνητική ανισοτροπία (κρυσταλλική δομή, σχήμα) και από την πυκνότητα των ατελειών του κρυστάλλου.

Υψηλό συνεκτικό πεδίο ($1 \cdot 10^6$ A·m^{-1} ≈ 1.2 T)
→ "σκληρό" μαγνητικό υλικό (π.χ. NdFeB)

Χαμηλό συνεκτικό πεδίο (50 A·m^{-1} ≈ 60 μT)
→ "μαλακό" μαγνητικό υλικό (π.χ. κράματα Fe-Si)

$$\vec{B} = \mu_0 \left(\vec{H} + \vec{M} \right)$$

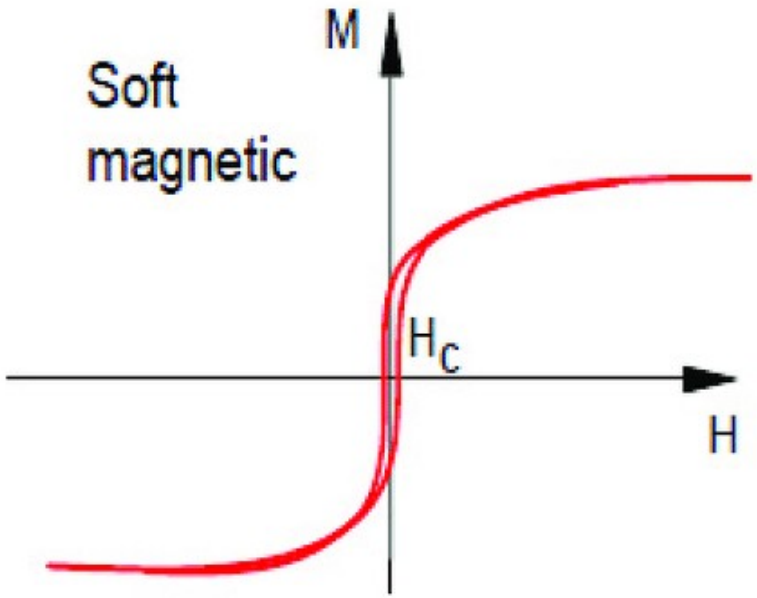
$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \left[T \cdot m \cdot A^{-1} \right]$$

Το μαγνητικό πεδίο της Γης είναι 20 – 60 μT

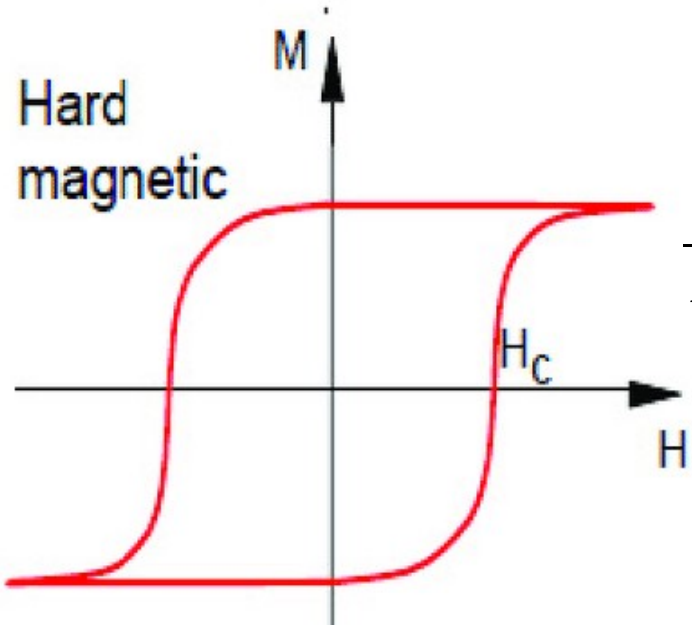
“Μαλακά” και “Σκληρά” Μαγνητικά Υλικά

Ενδογενείς και εξωγενείς ιδιότητες

Μικρή απώλεια ενέργειας
(μικρό εμβαδό)



Μεγάλη απώλεια ενέργειας
(μεγάλο εμβαδό)



$$\frac{M_r}{M_S} = 1$$

“Μαλακά” υλικά: μετασχηματιστές, επαγωγικά πηνία, υψηλές συχνότητες
“Σκληρά” υλικά: μόνιμοι μαγνήτες, αποθήκευση δεδομένων

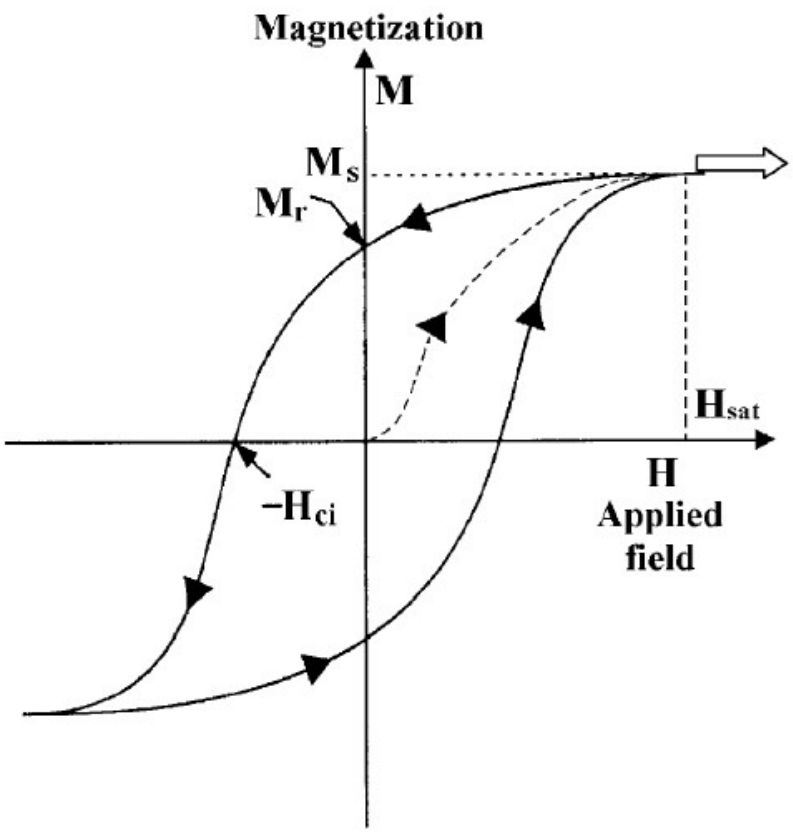
Μαγνητικά υλικά και ηλεκτρονική δομή

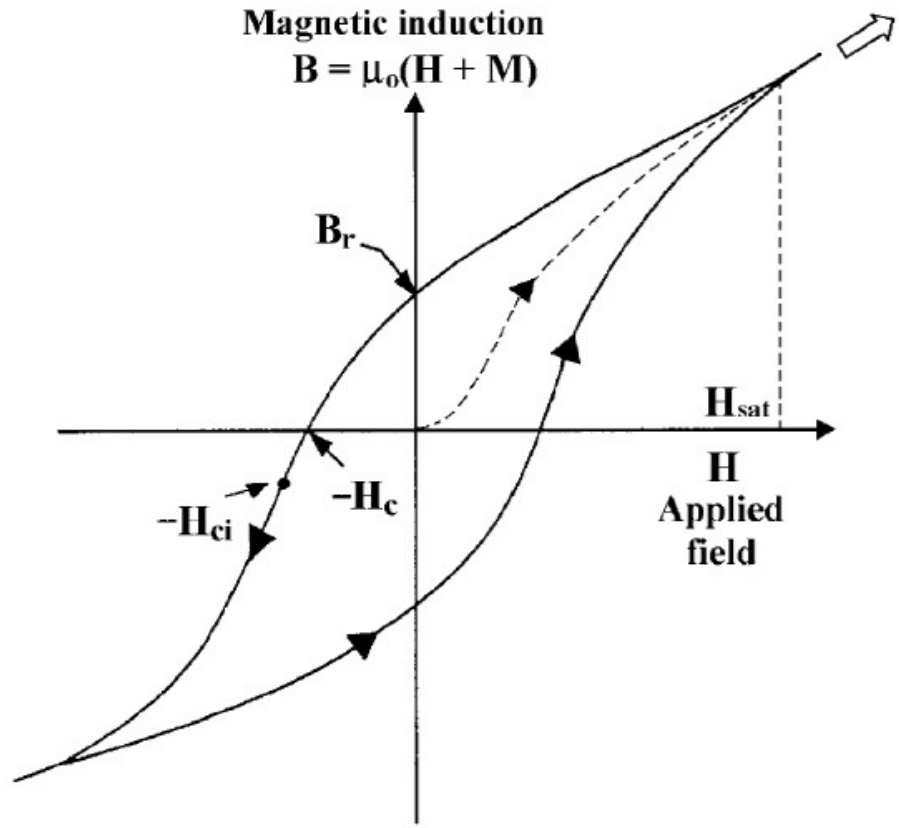
Σχεδόν όλα τα μαγνητικά υλικά περιέχουν ***3d*** ή ***4f*** στοιχεία!

“Σπάνιες Γαίες” (“Rare Earths)

M-H vs *B-H*

$$\vec{B} = \mu_0 \left(\vec{H} + \vec{M} \right) \Rightarrow \vec{M} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{H}$$





M-H vs *B-H*

$$\vec{B} = \mu_0 \left(\vec{H} + \vec{M} \right) \Rightarrow \vec{M} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{H}$$

<u>Βρόχος *M-H*</u>

Μέτρηση της μαγνήτισης: VSM, SQUID, AGFM

Π.χ. στα “σκληρά” μαγνητικά υλικά (π.χ., NdFeB), χρησιμοποιείται για χαρακτηρισμό συνεκτικού πεδίου και μαγνήτισης κόρου

<u>*Βρόχος B-H*</u>

Μέτρηση της μαγνητικής επαγωγής: Hall probe, fluxmeter

Π.χ. στα “μαλακά” μαγνητικά υλικά (π.χ. α-Fe), χρησιμοποιείται για σχεδιασμό μετασχηματιστών

Πως μπορεί να εξαχθεί ο πειραματικός βρόχος *M–H* από βρόχο *B–H*;

<u>Παράδειγμα</u>: Δείγμα έχει μαγνητική επαγωγή κόρου B_S ίση με 1.5 T, υπό πεδίο H_S ίσο με $0.5 \cdot 10^6$ $A \cdot m^{-1}$. Ποια είναι η τιμή της μαγνήτισης κόρου M_S..;

“Σκληρά” μαγνητικά υλικά

“Μόνιμοι” μαγνήτες

Ένας “μόνιμος” μαγνήτης δημιουργεί σταθερό μαγνητικό πεδίο στον κενό χώρο γύρω του, απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

Ροπή: $\vec{\Gamma} = \vec{m} \times \vec{B}$

Δύναμη: $\vec{F} = q\,\vec{\upsilon} \times \vec{B}$

Στις παραπάνω αλληλεπιδράσεις βασίζουν τη λειτουργία τους ηλεκτρικοί κινητήρες, ηλεκτρικές γεννήτριες και ενεργοποιητές!

“Σκληρά” μαγνητικά υλικά

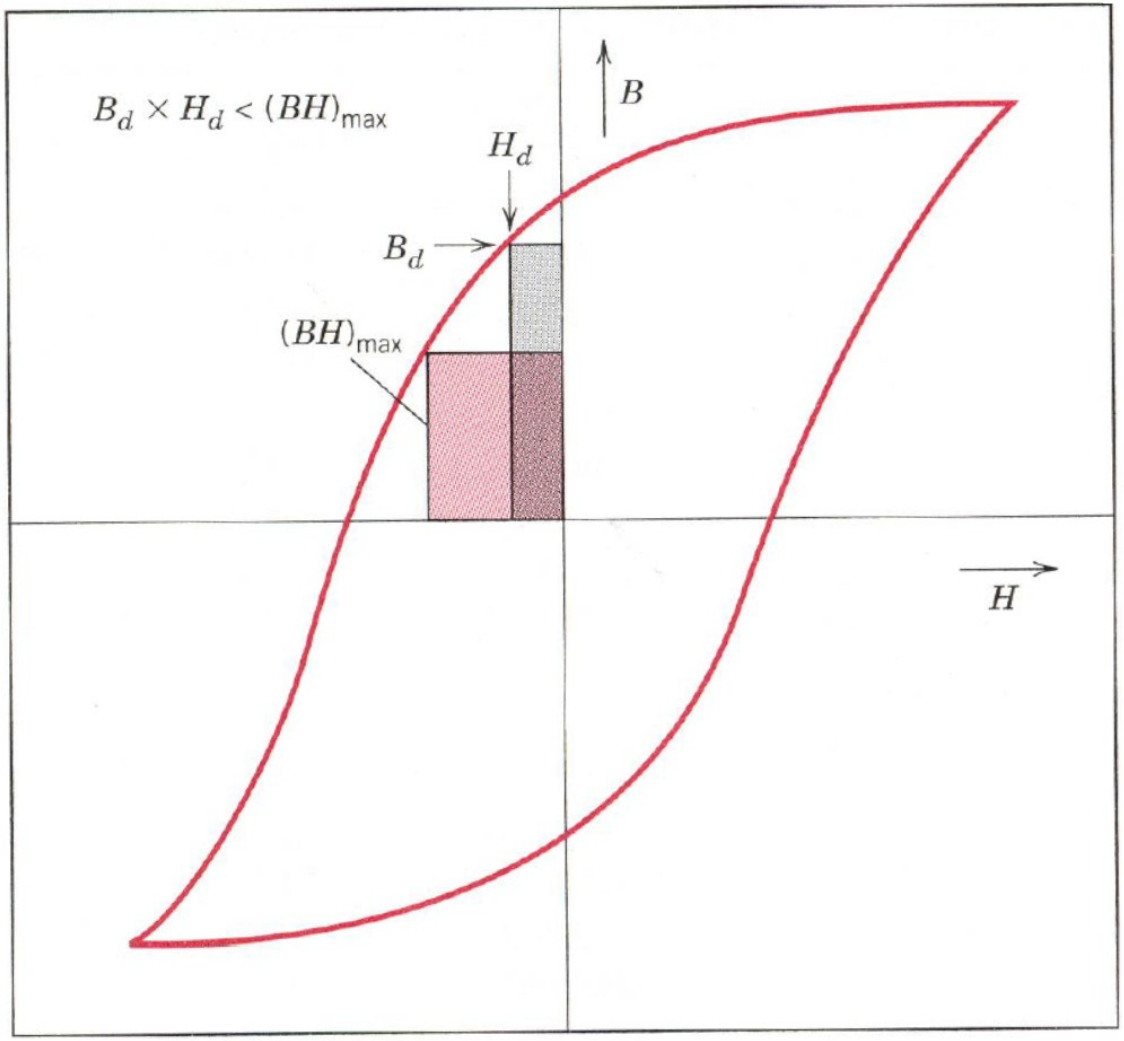
“Μόνιμοι” μαγνήτες

Κύρια χαρακτηριστικά:

- Υψηλή μαγνήτιση κόρου (>1000 $kA \cdot m^{-1}$)
- Υψηλή παραμένουσα μαγνήτιση (M_r/M_S=1)
- Υψηλή μαγνητική ανισοτροπία → Υψηλό συνεκτικό πεδίο (>10^5 $A \cdot m^{-1}$)
- Φερρίτες, AlNiCos, μαγνήτες σπανίων γαιών (π.χ. $Nd_2Fe_{14}B$, $SmCo_5$)

- Βασικός δείκτης “απόδοσης”: $(BH)_{max}$ [$J \cdot m^{-3}$]

“Μόνιμοι” μαγνήτες – $(BH)_{max}$



$$B \cdot H = \mu_0 \cdot H \cdot H$$

$$\left[J \cdot m^{-1} \cdot A^{-2} \cdot A^{-2} \cdot m^{-2} \equiv J \cdot m^{-3} \right]$$

Προσδιορίζεται στο 2ο τεταρτημόριο (τεταρτημόριο “απομαγνήτισης”)

“Μόνιμοι” μαγνήτες – $(BH)_{max}$

B_r

	$\mu_0 M_r$ (T)	${}_iH_c$ (kA m^{-1})	${}_BH_c$ (kA m^{-1})	$(BH)_{max}$ (kJ m^{-3})
$SrFe_{12}O_{19}$	0.42	275	265	34
Alnico 5	1.25	54	52	43
$SmCo_5$	0.88	1700	700	150
Sm_2Co_{17} [a]	1.08	1100	800	220
$Nd_2Fe_{14}B$	1.28	1000	900	350

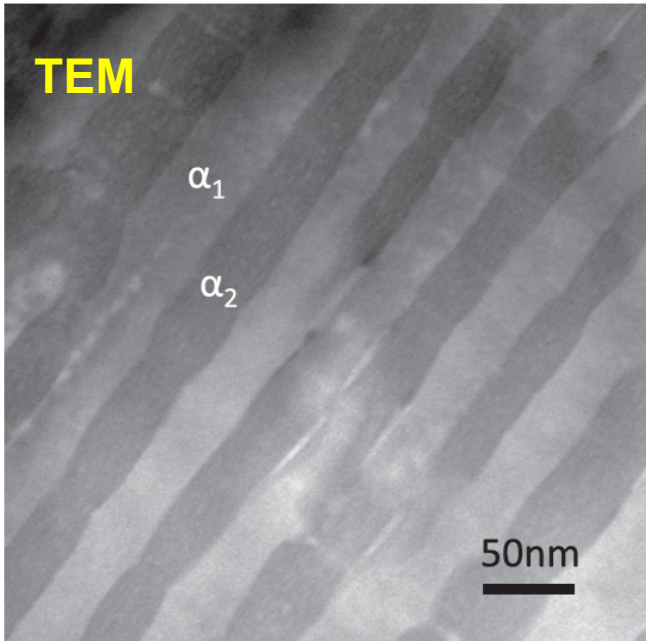
Εμπειρικός κανόνας: $$\left(B \cdot H\right)_{max} \approx \frac{B_r}{2} \cdot \frac{H_C}{2}$$

<u>Παράδειγμα</u>: Να υπολογίσετε το $(BH)_{max}$ για κάποιο από τα υλικά του παραπάνω πίνακα.

“Μόνιμοι” μαγνήτες

“AlNiCos”

Σύνθετα υλικά τα οποία αποτελούνται από νανομετρικής κλίμακας ραβδία (rods) FeCo, εγκιβωτισμένες σε μη-μαγνητική μήτρα AlNi.



Appl. Phys. Lett. 111, 022403 (2017)

- Από τα πρώτα τεχνολογικά σκληρά μαγνητικά υλικά (δεκαετία 1930)
- Οι “νανοβελόνες” ευθυγραμμίζονται με ανόπτηση υπό μαγνητικό πεδίο

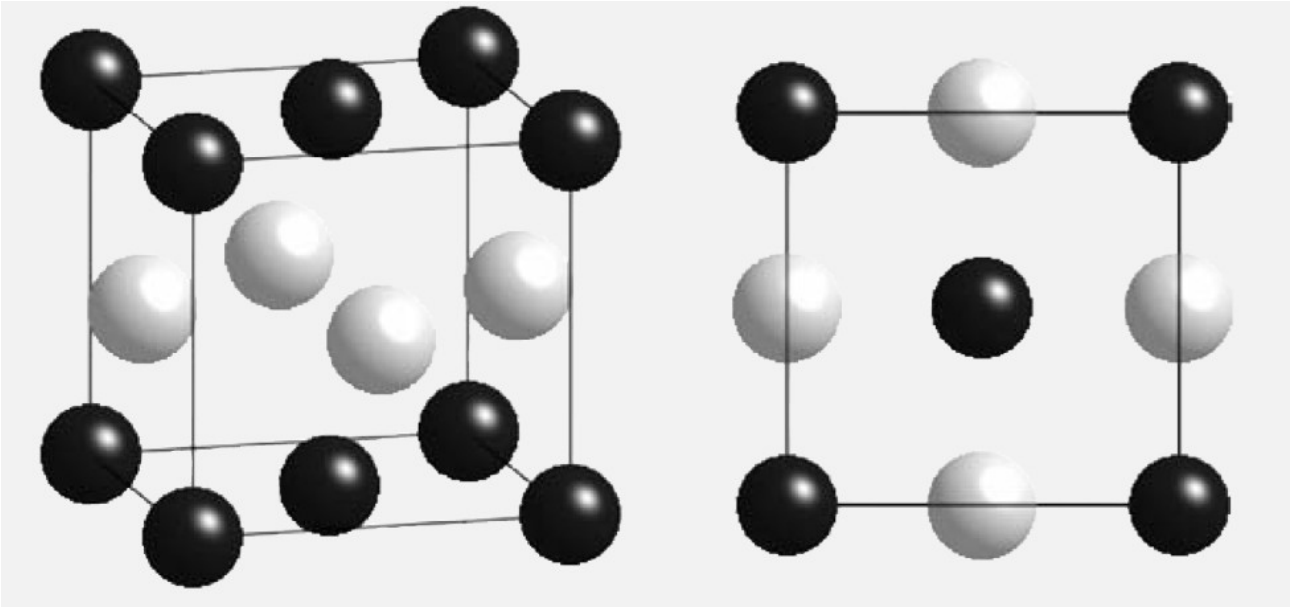
$$(BH)_{max}=40\ \mathrm{kJ\cdot m^{-3}}$$

- Φάση α_1: FeCo
- Φάση α_2: AlNi
  - → Ανισοτροπία σχήματος!

“Μόνιμοι” μαγνήτες

$L1_0$ CoPt

Στοιχειομετρικά διατεταγμένη τετραγωνική δόμη



a = 0.377 nm
c = 0.370 nm

$(BH)_{max}$=100 kJ·m^{-3}

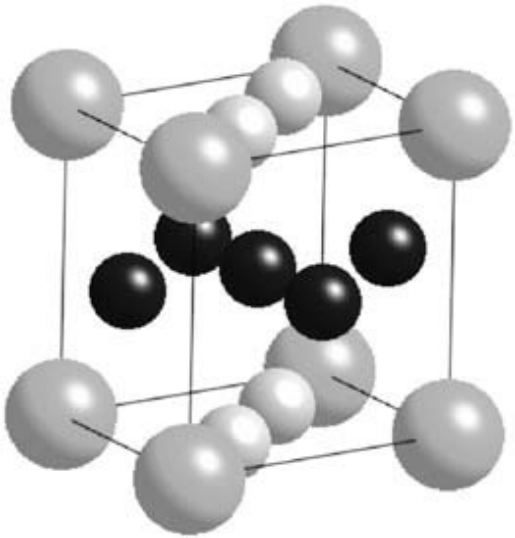
Άλλα $L1_0$ υλικά:
FePt, FePd, MnAl...

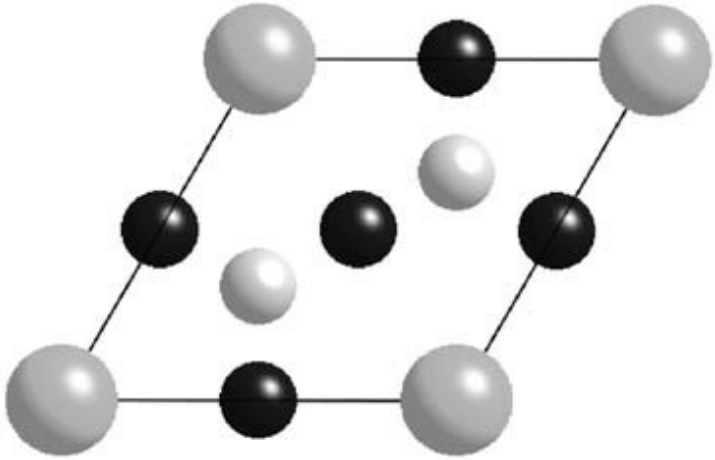
→ Εξαιρετικά επίκαιρα για εφαρμογές σε μαγνητικές διατάξεις!

“Μόνιμοι” μαγνήτες

$SmCo_5$

Στοιχειομετρικά διατεταγμένη εξαγωνική δομή





a = 0.499 nm

c = 0.398 nm

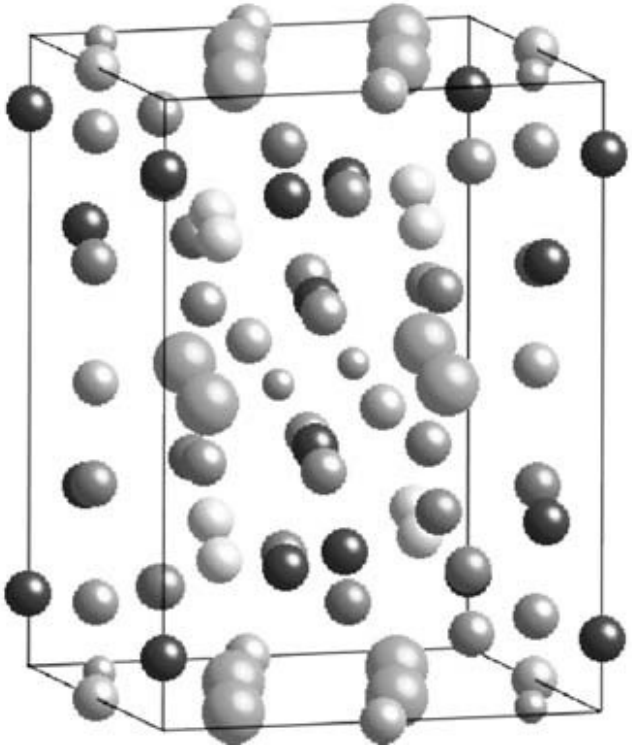
$(BH)_{max}$=150 kJ·m^{-3}

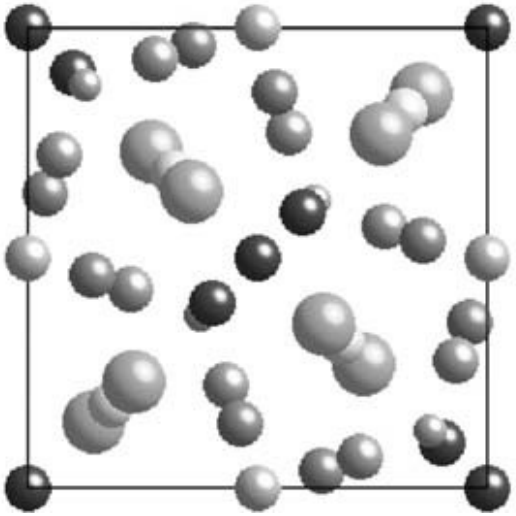
Πολύ υψηλή θερμοκρασία Curie: T_C=1020 K

“Μόνιμοι” μαγνήτες

$Nd_2Fe_{14}B$

Τετραγωνική δομή





a = 0.879 nm

c = 1.212 nm

$(BH)_{max}$> 450 kJ·m^{-3}

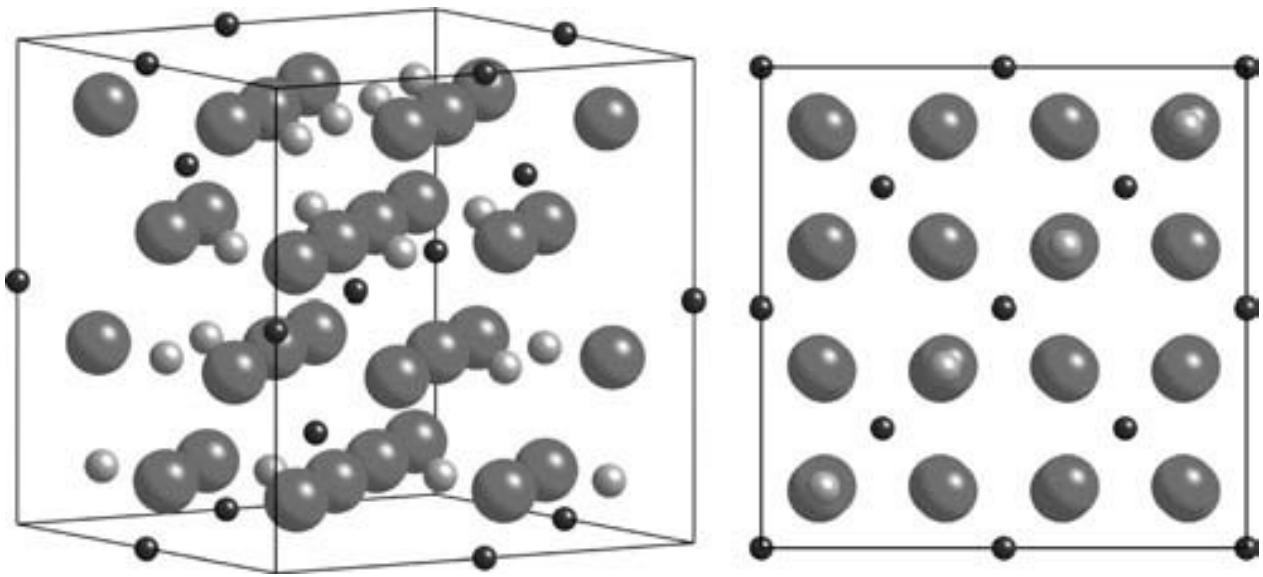
Θερμοκρασία Curie:

T_C=588 K

“Μόνιμοι” μαγνήτες

Fe_3O_4 (μαγνήτιτης)

Κυβική δομή (σπινέλιος)



a = 0.840 nm

$(BH)_{max}$> 1–2 kJ·m^{-3}

H_C =100–300 A·m^{-1}

(οριακά “σκληρό”)

Θερμοκρασία Curie:

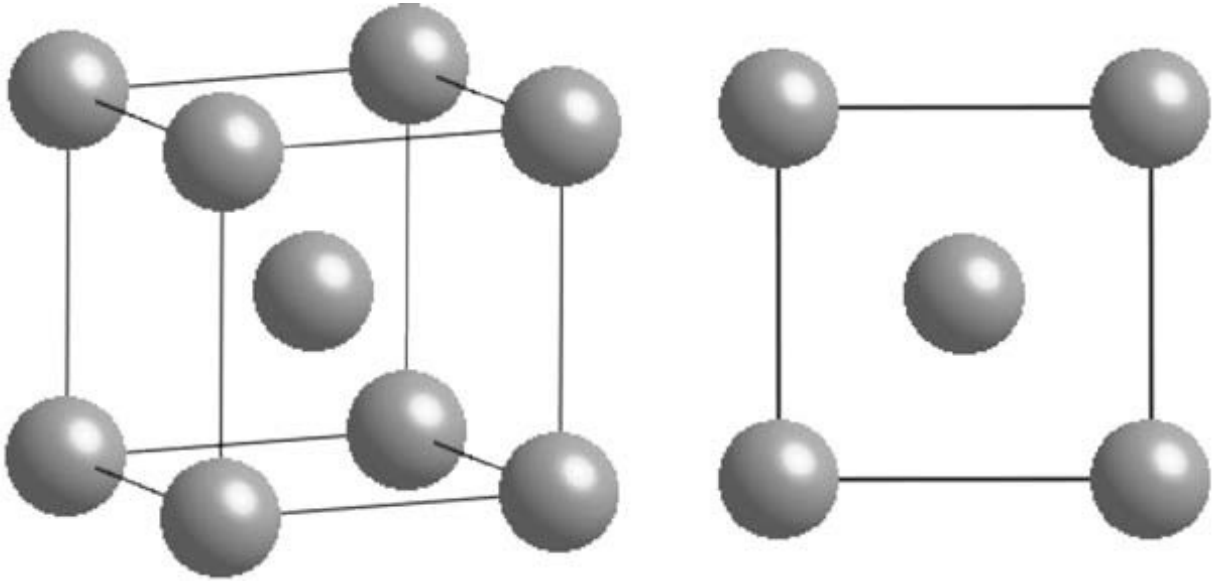
T_C= 860 K

→ Σιδηρομαγνήτης!

“Μαλακά” μαγνητικά υλικά

α-Fe

Κυβική δομή (bcc)



a = 0.287 nm

M_S = 1720 kA·m^{-1}

H_C = 10–100 A·m^{-1}

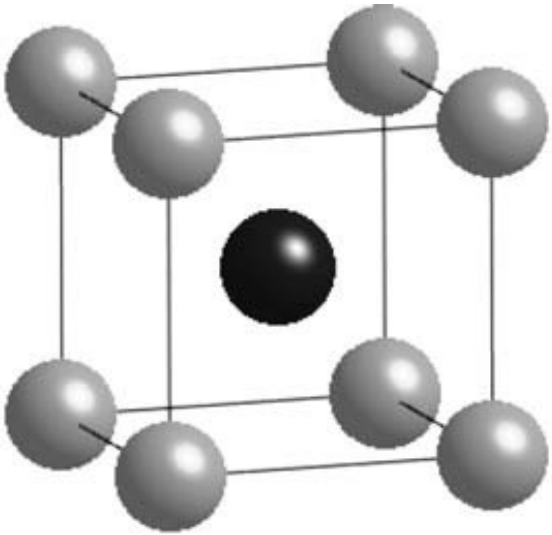
Θερμοκρασία Curie:

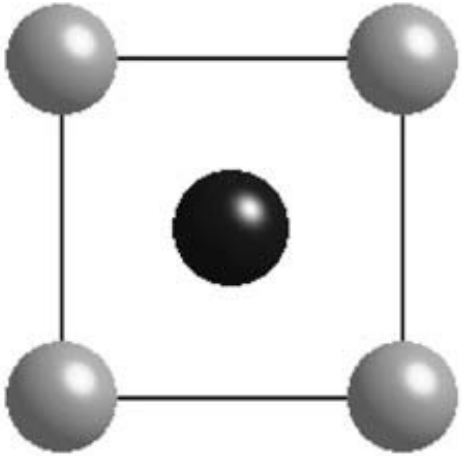
T_C= 1044 K

“Μαλακά” μαγνητικά υλικά

$Co_{65}Fe_{35}$ (permendur)

Κυβική δομή (bcc)





a = 0.286 nm

M_S = 1950 kA·m^{-1}

H_C = 10–100 A·m^{-1}

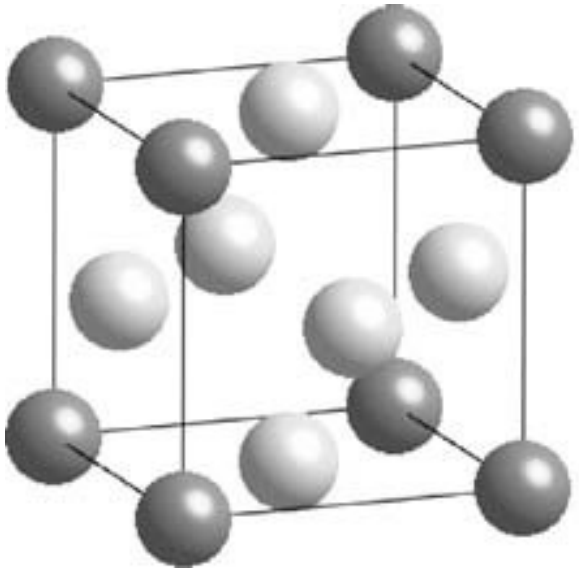
Θερμοκρασία Curie:

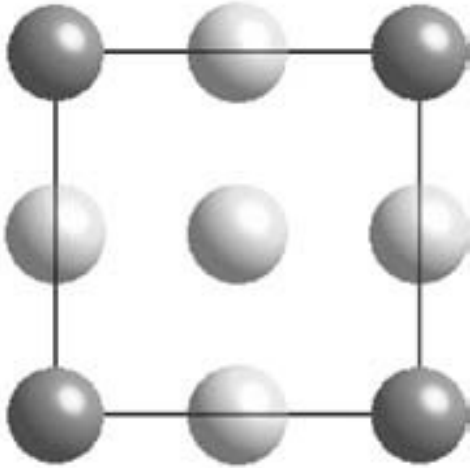
T_C= 1210 K

“Μαλακά” μαγνητικά υλικά

$Ni_{80}Fe_{20}$ (permalloy)

Κυβική δομή (fcc)





a = 0.352 nm

M_S = 830 kA·m^{-1}

H_C = 0.1–10 A·m^{-1}

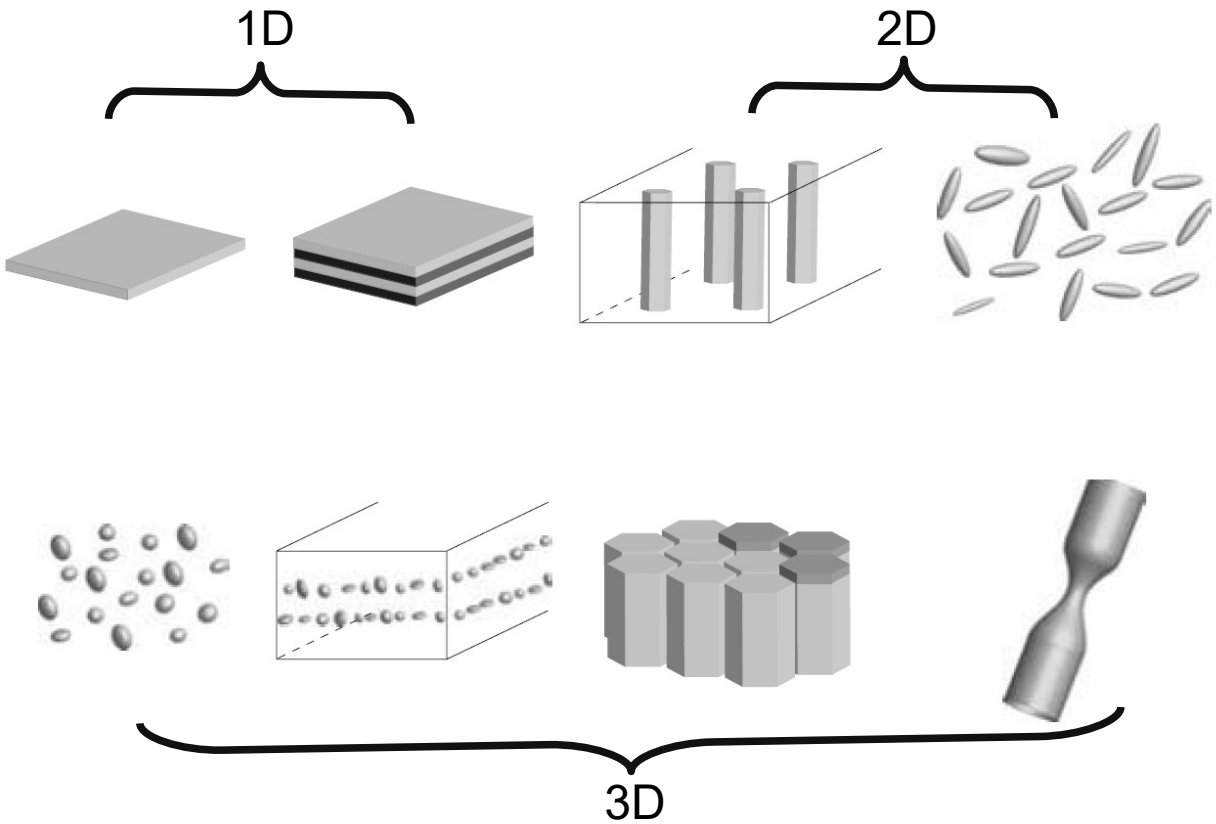
Θερμοκρασία Curie:

T_C= 1210 K

→ Χρησιμοποιείται σε μαγνητικές διατάξεις (αισθητήρες, RF/μικροκύματα)

Μαγνητικά υλικά στη νανοκλίμακα

Τουλάχιστον μία διάσταση του υλικού είναι μεταξύ 1 nm και 100 nm



Λόγος επιφανειακών ατόμων:

Υμένιο: $\frac{2\alpha}{t}$

Ραβδίο: $\frac{2\pi r\alpha}{\pi r^2} = \frac{2\alpha}{r}$

Σωματίδιο: $\frac{4\pi R^2\alpha}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{3\alpha}{R}$

Για α=0.25 nm και t=2r=2R=10 nm, τότε το 5% (υμένιο), 10% (ραβδίο), 15% (σωματίδιο) των ατόμων είναι επιφανειακά

Μαγνητικά υλικά στη νανοκλίμακα

Μήκος ανταλλαγής: $$l_{ex}=\sqrt{\frac{A}{\mu_0 M_S^2}}, \text{όπου}: A=\frac{k_B T_C}{2\alpha_0}$$

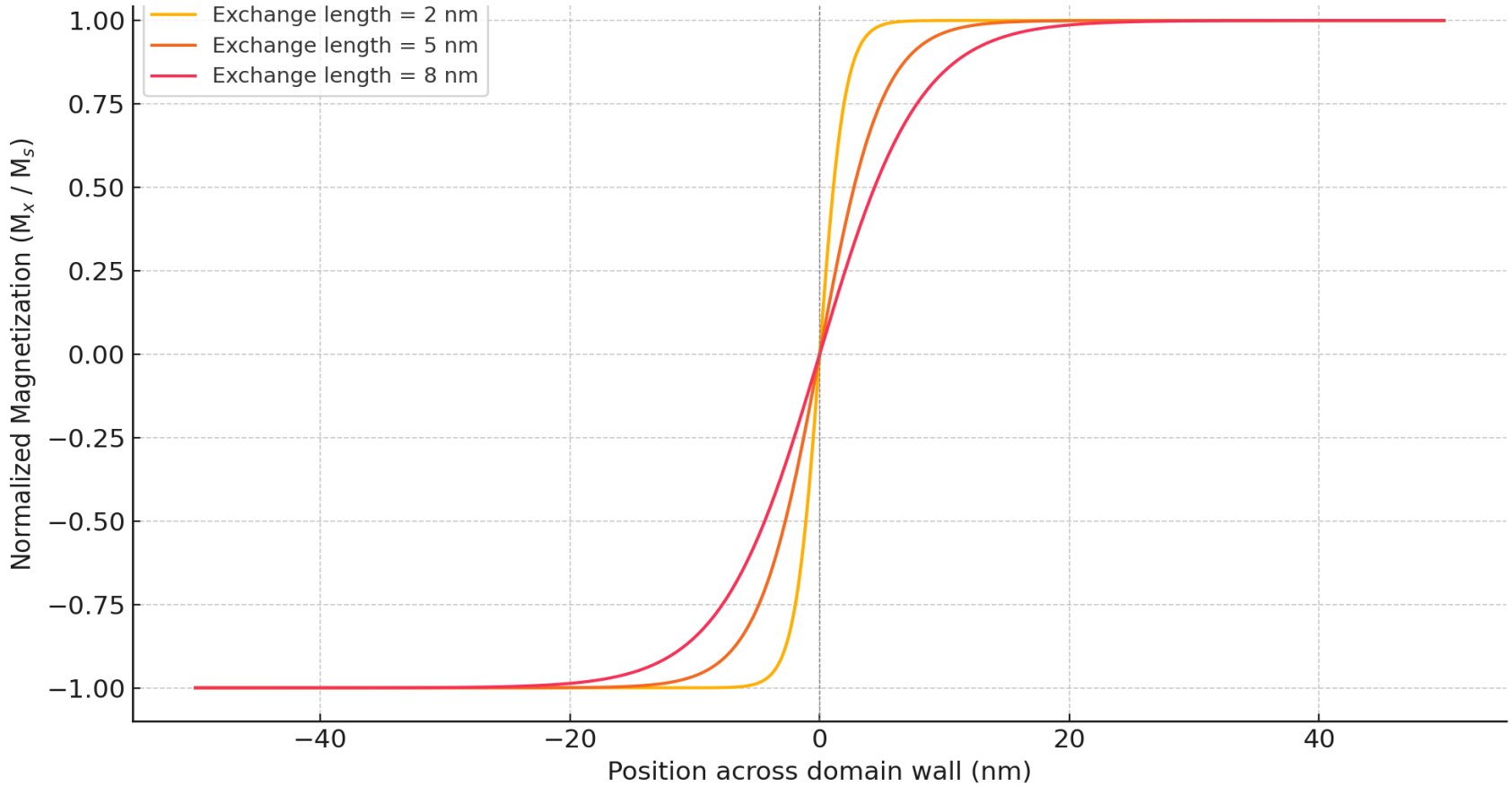
→Το μήκος ανταλλαγής προκύπτει ως το αποτέλεσμα του ανταγωνισμού ανάμεσα στην ενέργεια της αλληλεπίδρασης ανταλλαγής και την μαγνητική διπολική ενέργεια

	M_s (MA m^{-1})	A (pJ m^{-1})	l_{ex} (nm)
$Ni_{80}Fe_{20}$	0.84	10	3.4
Fe	1.71	21	2.4
Co	1.44	31	3.4
CoPt	0.81	10	3.5
$Nd_2Fe_{14}B$	1.28	8	1.9
$SmCo_5$	0.86	12	3.6
CrO_2	0.39	4	4.4
Fe_3O_4	0.48	7	4.9
$BaFe_{12}O_{19}$	0.38	6	5.8

Μαγνητικά υλικά στη νανοκλίμακα

→ Το μήκος ανταλλαγής καθορίζει το μέγεθος των μαγνητικών δομών

Παράδειγμα: μήκος περιοχής μετάβασης (domain wall) μαγνητικών περιοχών



Μαγνητικά υλικά στη νανοκλίμακα

Χαρακτηριστικά μεγέθη ηλεκτρονικής μεταφοράς

→ Μέση ελεύθερη διαδρομή (mean free path): λ

→ Μήκος ανελαστικής σκέδασης (inelastic scattering length): λ_{el}

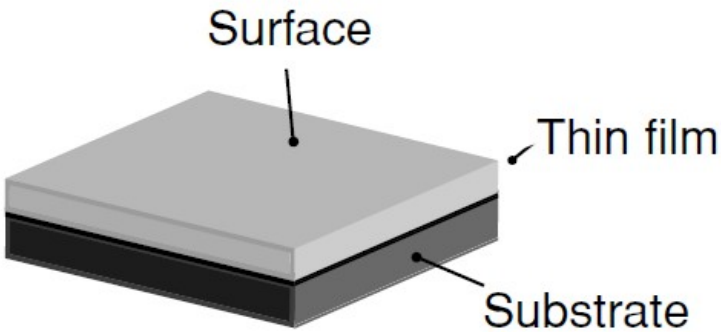
→ Μήκος διάχυσης σπιν (spin-diffusion length): l_S

Εκφράζουν τη μέση απόσταση που διανύει ένα ηλεκτρόνιο πριν αλλάξει ορμή (λ), ενέργεια (λ_{el}), ή σπιν (l_S).

Και οι τρεις παράμετροι είναι μεταξύ 1 nm και 100 nm, ενώ στα μαγνητικά υλικά λαμβάνεται υπόψη και το σπιν!

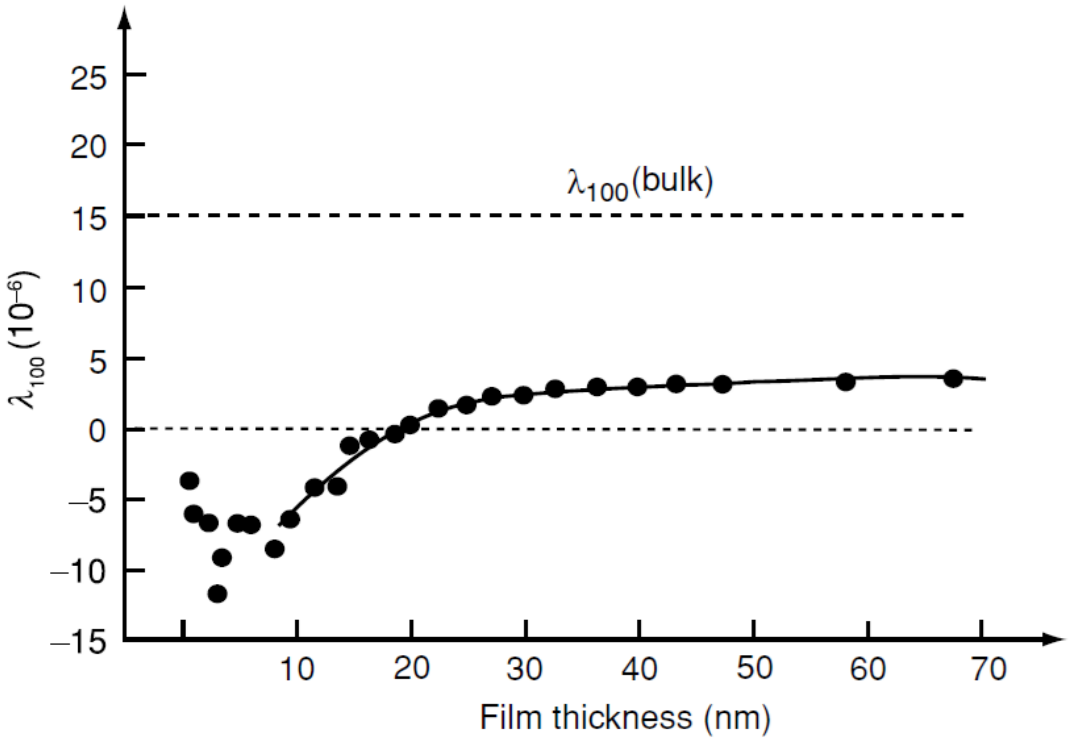
Μαγνητικά λεπτά υμένια (thin films)

Λεπτά υμένια



- Επιφανειακά και διεπιφανειακά άτομα
- Μηχανική τάση από το υπόστρωμα

Επίδραση του πάχους στη μαγνητοσυστολή Fe

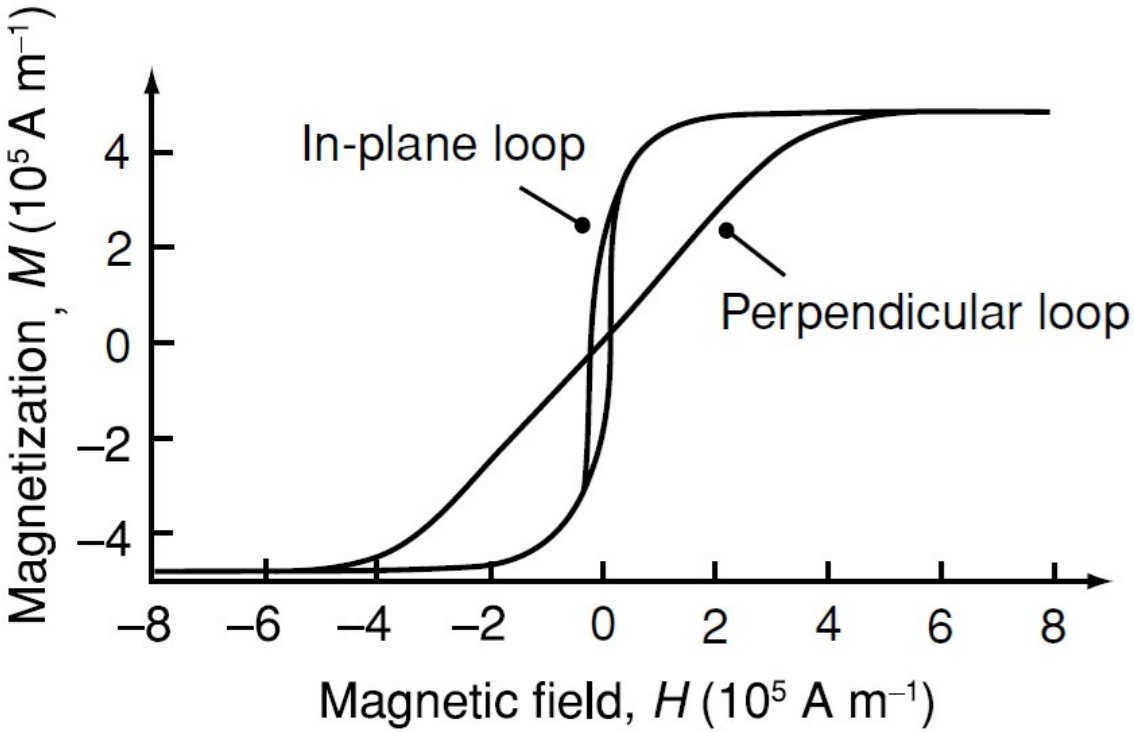


Μαγνητικά λεπτά υμένια (thin films)

Ανισοτροπία σχήματος (shape anisotropy)

→ Οφείλεται στο απομαγνητίζον πεδίο εξ αιτίας του σχήματος του μαγνητικού υλικού.

$$K_{sh} = -\frac{1}{2}\mu_0 M_S^2 \left[J \cdot m^{-3} \right]$$



Μαγνητικά πολυστρωματικά υμένια (multilayers)

Εναλλασσόμενα υμένια διαφορετικών μαγνητικών υλικών

→ Άμεση σύζευξη μέσω αλληλεπιδράσεων ανταλλαγής

→ Σιδηρομαγνητικά/αντισιδηρομαγνητικά υμένια

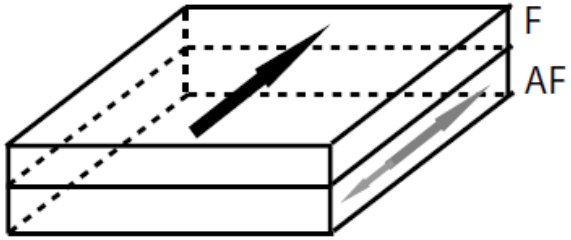
Εναλλασσόμενα μαγνητικά/μη-μαγνητικά λεπτά υμένια

→ Έμμεση σύζευξη μέσω πολωμένων ηλεκτρονίων αγωγιμότητας (διατήρηση του σπιν στο μη μαγνητικό υμένιο)

→ Σύζευξη μέσω διπολικών αλληλεπιδράσεων λόγω διεπιφανειακής τραχύτητας

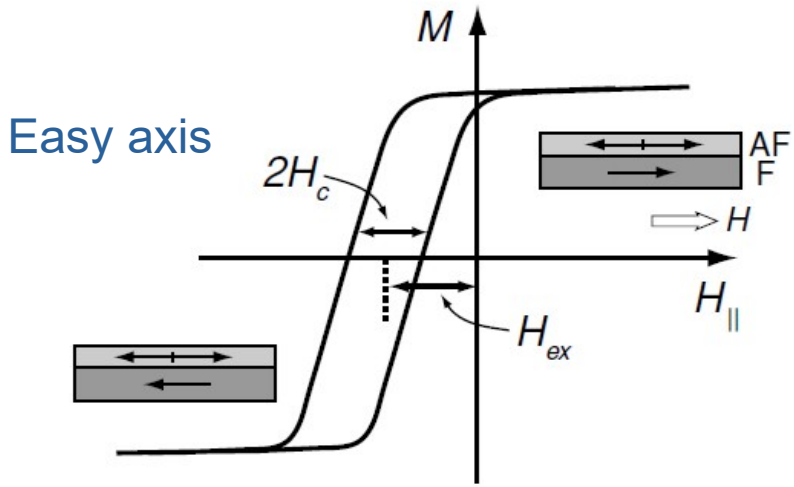
Μαγνητικά πολυστρωματικά υμένια

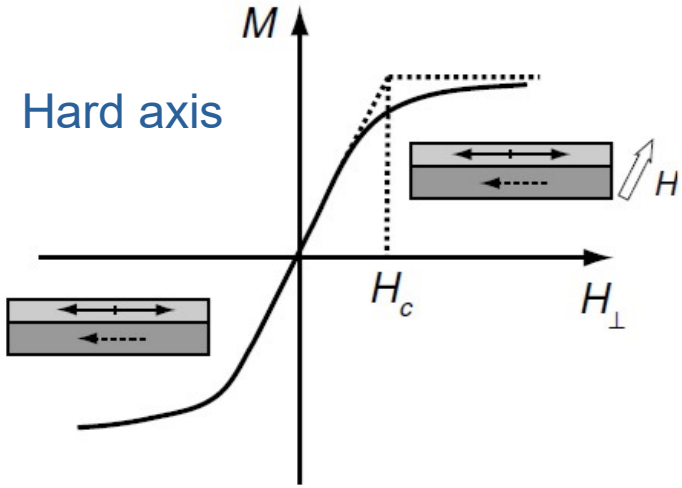
Σιδηρομαγνητικά/αντισιδηρομαγνητικά υμένια



Εμφάνιση μαγνητικής ανισοτροπίας λόγω αλληλεπίδρασης ανταλλαγής!

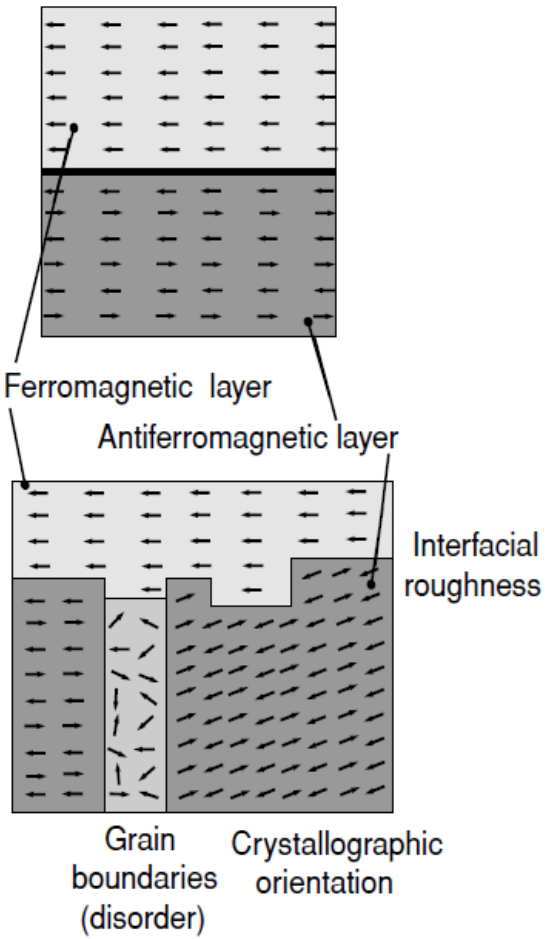
→ Πόλωση ανταλλαγής (exchange bias)





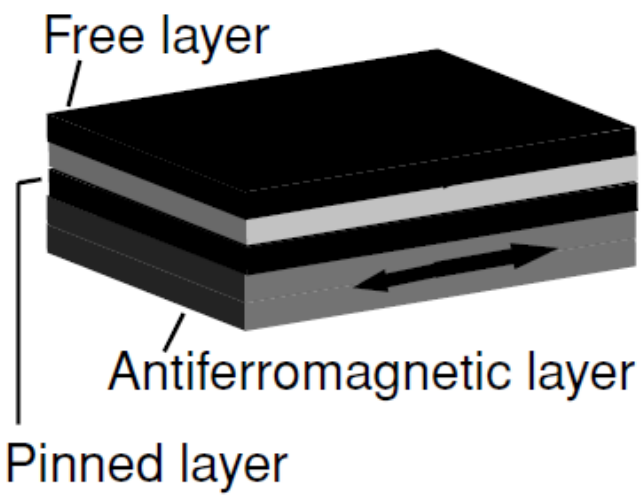
Μαγνητικά πολυστρωματικά υμένια

Σιδηρομαγνητικά/αντισιδηρομαγνητικά υμένια



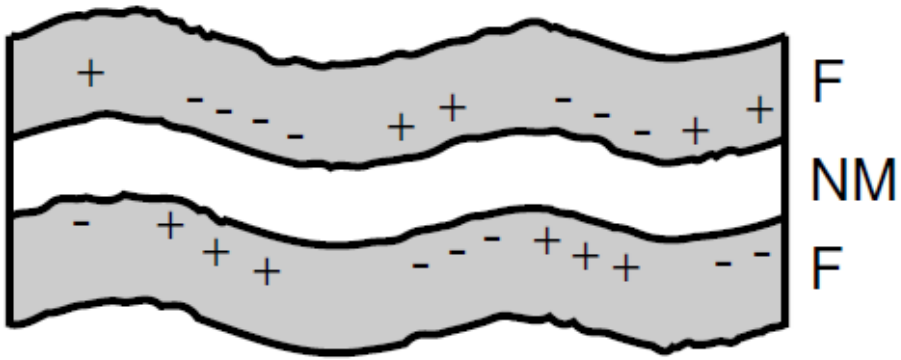
Γιατί εμφανίζεται η πόλωση ανταλλαγής (exchange bias)..;

Εφαρμογές: βαλβίδες σπιν (spin valves) μαγνητικό/μη-μαγνητικό/μαγνητικό



Μαγνητικά πολυστρωματικά υμένια

Σιδηρομαγνητικά/μή-μαγνητικά υμένια: διπολική σύζευξη



Η διεπιφανειακή τραχύτητα έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση διπολικής σύζευξης του τύπου “φλοιού πορτοκαλιού” (orange-peel)

Συνήθως η σύζευξη είναι σιδηρομαγνητική, καθώς υπάρχει συσχετισμός των διεπιφανειακών τραχυτήτων των δύο μαγνητικών υμενίων.

Στο επόμενο μάθημα:

”Μαγνητικές διατάξεις”