

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 2025

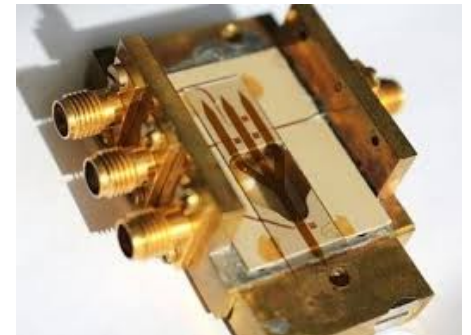
Μαγνητικές και υπεραγώγιμες διατάξεις

MRAMs



**Magnetic field
sensors**

**Spintronic and
magnonic microwave
devices**



Μαγνητικές Διατάξεις

«**Μαγνητικές διατάξεις**» (magnetic devices)

→ Πρόκειται για τμήματα (components) μικροηλεκτρονικών διατάξεων (devices), τα οποία παρέχουν την δυνατότητα δημιουργίας, χειραγώγησης, και ανίχνευσης μαγνητικών πεδίων, καθώς και της ιδιοστροφορμής (spin) των ηλεκτρονίων.

→ **Μίκρο- νάνο-δομημένα μαγνητικά υλικά**

Μαγνητικές Διατάξεις

Εφαρμογές Μαγνητικών Διατάξεων

- Μαγνητικοί αισθητήρες/ενεργοποιητές (λειτουργικά υλικά)
- Μαγνητική αποθήκευση πληροφορίας/μαγνητικές μνήμες
- Μαγνητική λογική/επεξεργασία πληροφορίας
- Συγκομιδή ενέργειας από το περιβάλλον (H/M ακτινοβολία)
- Ανίχνευση/παραγωγή ραδιοκυμάτων/μικροκυμάτων
- Μαγνητικά τρανζίστορ

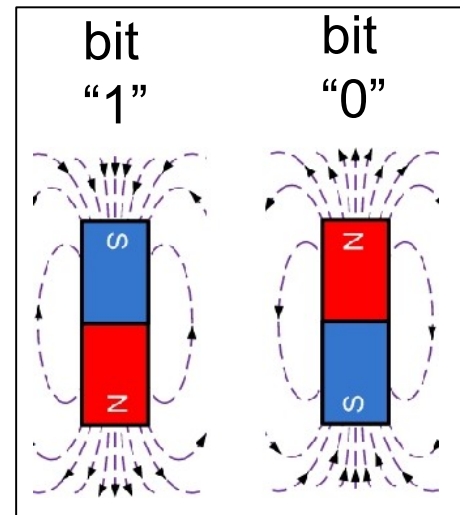
Μαγνητική Εγγραφή Δεδομένων

Σκληροί δίσκοι

Η μόνιμη εγγραφή δεδομένων στους (“συμβατικούς”) σκληρούς δίσκους (“HDD”), βασίζεται στο διπολικό μαγνητικό πεδίο, το οποίο, για bit πληροφορίας διάστασης d , μεταβάλλεται ως προς:

$$\frac{\mu}{r^3}, \text{ όπου } \mu \simeq M \cdot d^3 \text{ είναι η μαγνητική διπολική ροπή}$$

→ Κάθε bit πληροφορίας αποθηκεύεται σε έναν ξεχωριστό “μαγνήτη”..!

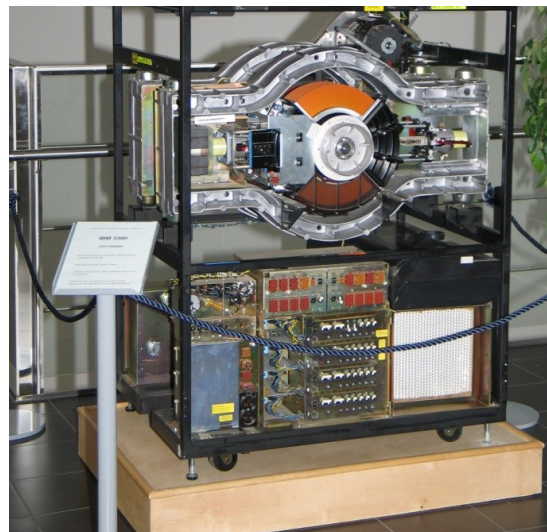


Μαγνητική Εγγραφή Δεδομένων

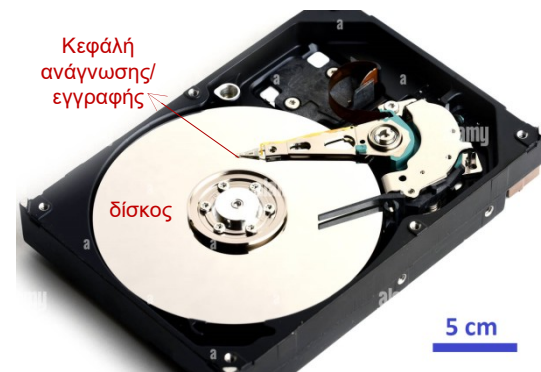
Σκληροί δίσκοι

Ιστορική αναδρομή

1957 – 5 MB
bit: **500 μm**



1980 – 2 GB
bit: **10 μm**



2009 – 320 GB
bit size: **0.1 μm**

Μέγεθος bit σήμερα: **0.008 μm !!**

Μαγνητική Εγγραφή Δεδομένων

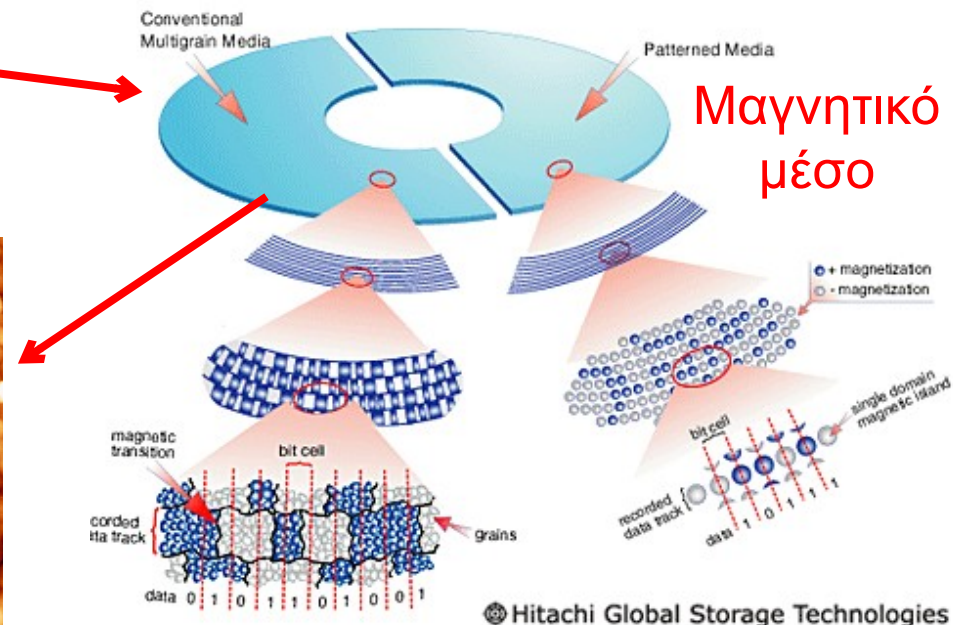
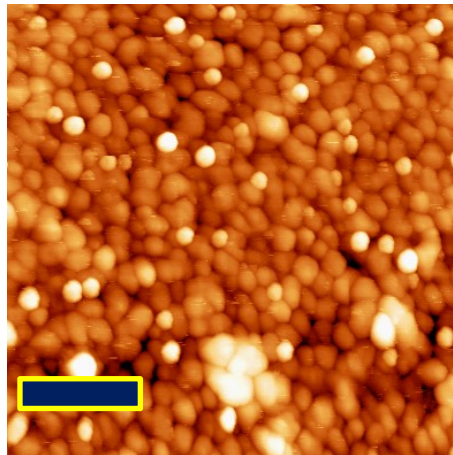
Σκληροί δίσκοι

Λεπτά υμένα **σκληρών** μαγνητικών υλικών, όπως CoPt, FePt



Μικροσκοπία
Ατομικών
Δυνάμεων

200 nm

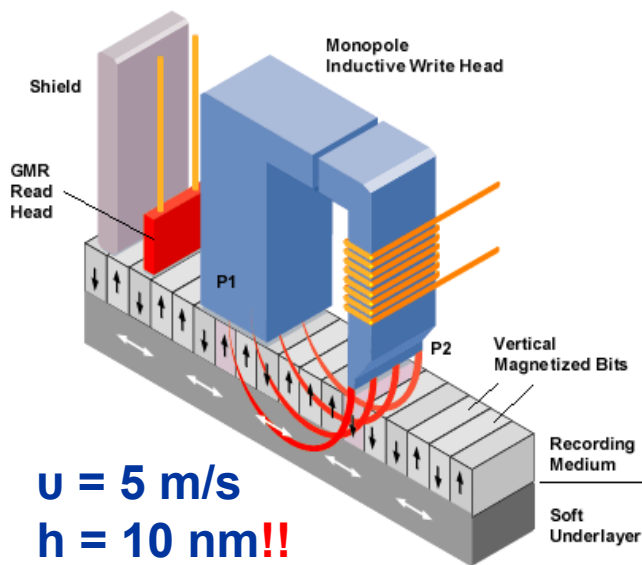


Hitachi Global Storage Technologies

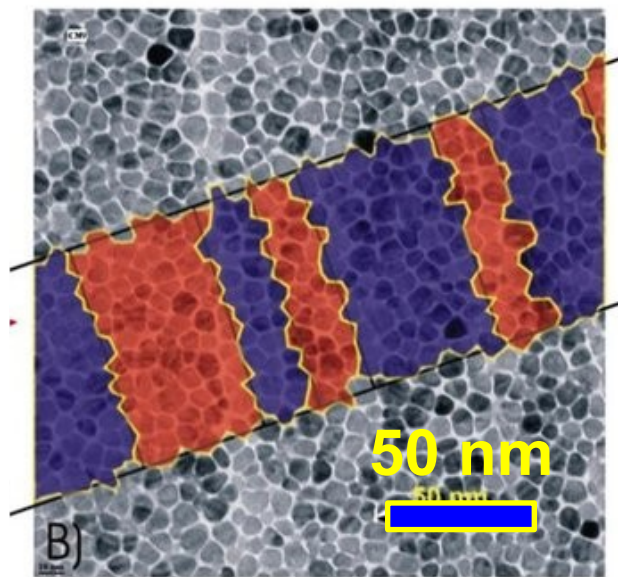
Μαγνητική Εγγραφή Δεδομένων

Σκληροί δίσκοι

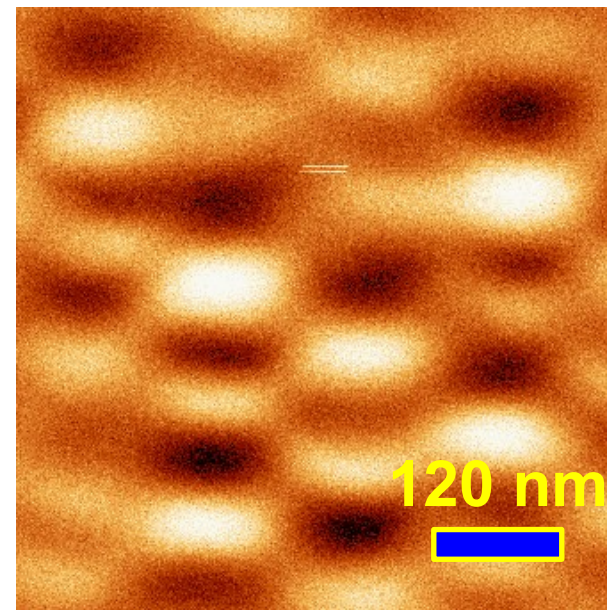
Λεπτά υμένια σκληρών μαγνητικών υλικών, όπως CoPt, FePt



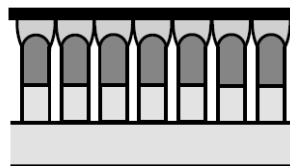
Απεικόνιση κεφαλής
ανάγνωσης/εγγραφής



Ηλεκτρονική μικροσκοπία
διέλευσης (TEM)



Μικροσκοπία μαγνητικών
δυνάμεων (MFM)



(διατομή)

Μαγνητική Εγγραφή Δεδομένων

Σκληροί δίσκοι

Κριτήρια μαγνητικών υλικών για εφαρμογές σε σκληρούς δίσκους

Κριτήριο 1

Απαιτείται αρκούντως υψηλή μαγνήτιση κόρου (M_s) για επαρκές S/N ratio

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 ₃ O ₄	480 kA·m ⁻¹

Μαγνητική Εγγραφή Δεδομένων

Σκληροί δίσκοι

Κριτήρια μαγνητικών υλικών για εφαρμογές σε σκληρούς δίσκους

Κριτήριο 2

Πεδίο ανισοτροπίας > Πεδίο απομαγνήτισης

$$\frac{2 \cdot K_u}{\mu_0 \cdot M_S} > N_{eff} \cdot M_S$$

L1₀ CoPt (“σκληρό”)

Co₃₅Fe₆₅ (“μαλακό”)

$$M_S = 850 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}, K_u = 5,5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$M_S = 1950 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}, K_u = 0,01 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\frac{2 \cdot K_u}{\mu_0 \cdot M_S} \approx 10^7 > 1,7 \cdot 10^5 \approx N_{eff} \cdot M_S$$

$$\frac{2 \cdot K_u}{\mu_0 \cdot M_S} \approx 10^4 < 4 \cdot 10^5 \approx N_{eff} \cdot M_S$$

$N_{eff} \approx 0,2$ για κολονοειδείς κόκκους

Μαγνητική Εγγραφή Δεδομένων

Σκληροί δίσκοι

Κριτήρια μαγνητικών υλικών για εφαρμογές σε σκληρούς δίσκους

Κριτήριο 3

Ενέργεια ανισοτροπίας > Ενέργεια θερμικής διακύμανσης

$$\frac{K_u \cdot V}{k_B \cdot T} > 40$$

Για νανοκολόνες διαμέτρου 8 nm και ύψους 20 nm:

L1₀ CoPt: **1400**

Co₃₅Fe₆₅: **2**

→ Κρίσιμο μέγεθος για L1₀ CoPt: διάμετρος 4 nm και ύψος 6 nm

Γιατί 40..;

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{K_u \cdot V}{k_B \cdot T}\right), \tau_0 = 10^{-9} \text{ s}$$

Για λόγο **40**: $\tau = 2,4 \cdot 10^8 \text{ s} = 10 \text{ χρόνια}$

→ Το κριτήριο της βιομηχανίας

Για λόγο **2**: $\tau = 10^{-8} \text{ s}$

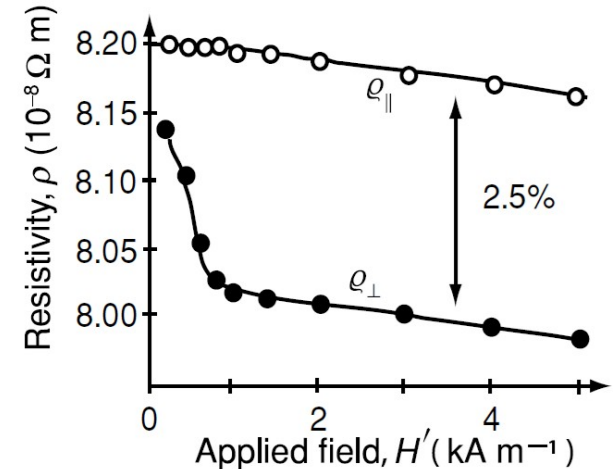
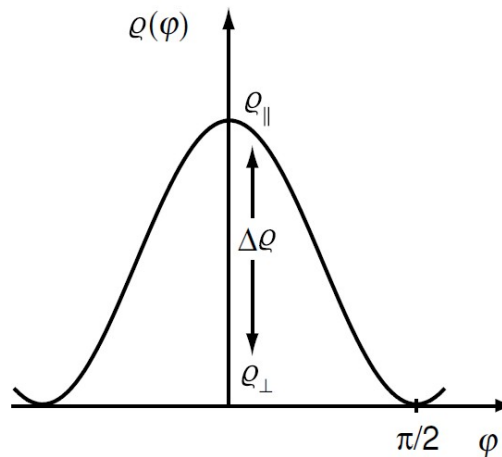
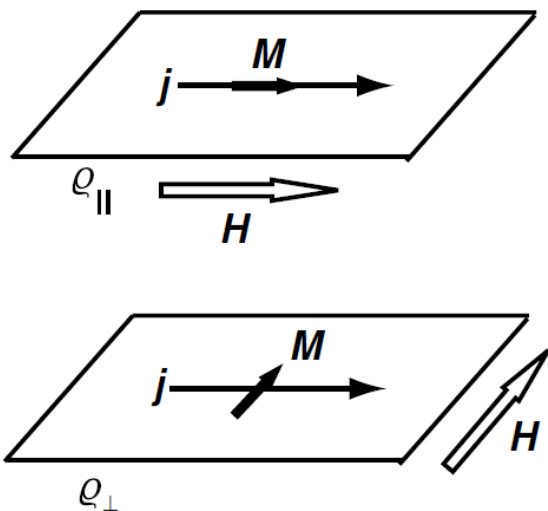
→ Υπερπαραμαγνητισμός!

Αισθητήρες μαγνητικού πεδίου

Ανισοτροπική μαγνητοαντίσταση – Anisotropic Magneto-Resistance (AMR)

Εξάρτηση της αντίστασης μαγνητικού υλικού, από τον σχετικό προσανατολισμό
φοράς ρεύματος/μαγνήτισης

→ Αλληλεπίδραση σπιν-τροχιάς



$$\rho(\varphi) = \rho_{\perp} + (\rho_{||} - \rho_{\perp}) \cos^2 \varphi$$

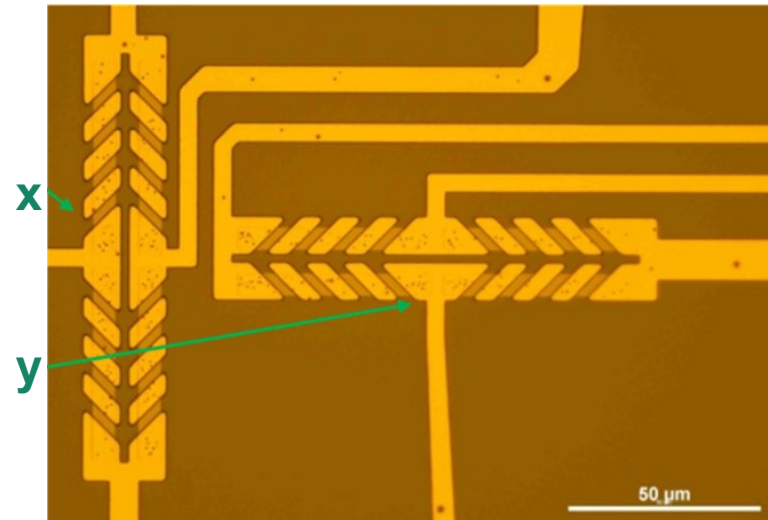
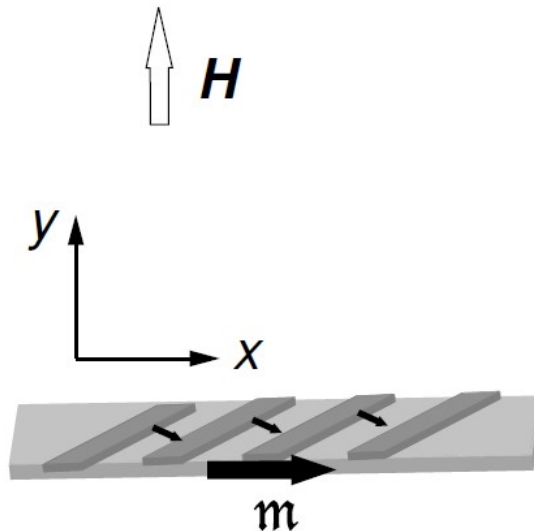
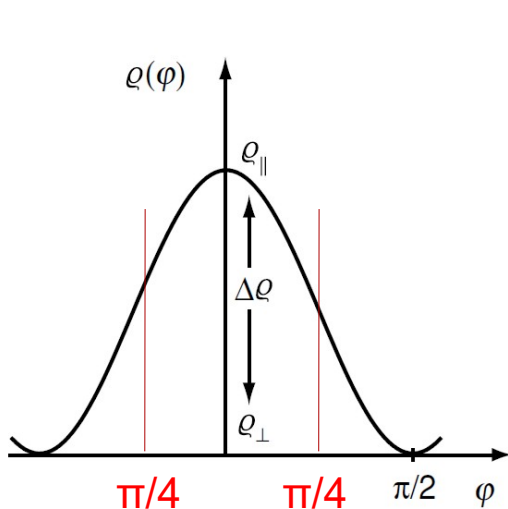
Μαγνητοαντίσταση: $MR = \frac{\rho_{||} - \rho_{\perp}}{\rho_{\perp}}$

Αισθητήρες μαγνητικού πεδίου

Ανισοτροπική μαγνητοαντίσταση – Anisotropic Magneto-Resistance (AMR)

$$\frac{d^2}{d\varphi^2}(\cos^2 \varphi) = -2 \cos 2\varphi = 0 \Rightarrow \varphi = \frac{\pi}{4}$$

Μέγιστη απόκριση στις 45°



(Πολυστρωματικά) λεπτά υμένια NiFe, CoFe, NiFeCr/NiFe, Ta/NiFe...
Ευαισθησία: nT – mT (μαγνητικό πεδίο της Γης: μT)

Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

Αφορά διατάξεις μικροηλεκτρονικής οι οποίες εκμεταλλεύονται το spin των ηλεκτρονίων, επιπρόσθετα με το ηλεκτρικό τους φορτίο

The Nobel Prize in Physics 2007



© The Nobel Foundation. Photo:
U. Montan
Albert Fert



© The Nobel Foundation. Photo:
U. Montan
Peter Grünberg

*«Η πιο πρόσφατη επανάσταση
στον χώρο του Μαγνητισμού»*

J. M. D. Coey, 2010

Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

Η συμβατική ηλεκτρονική βασίζεται στο φορτίο του ηλεκτρονίου, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το σπιν του.

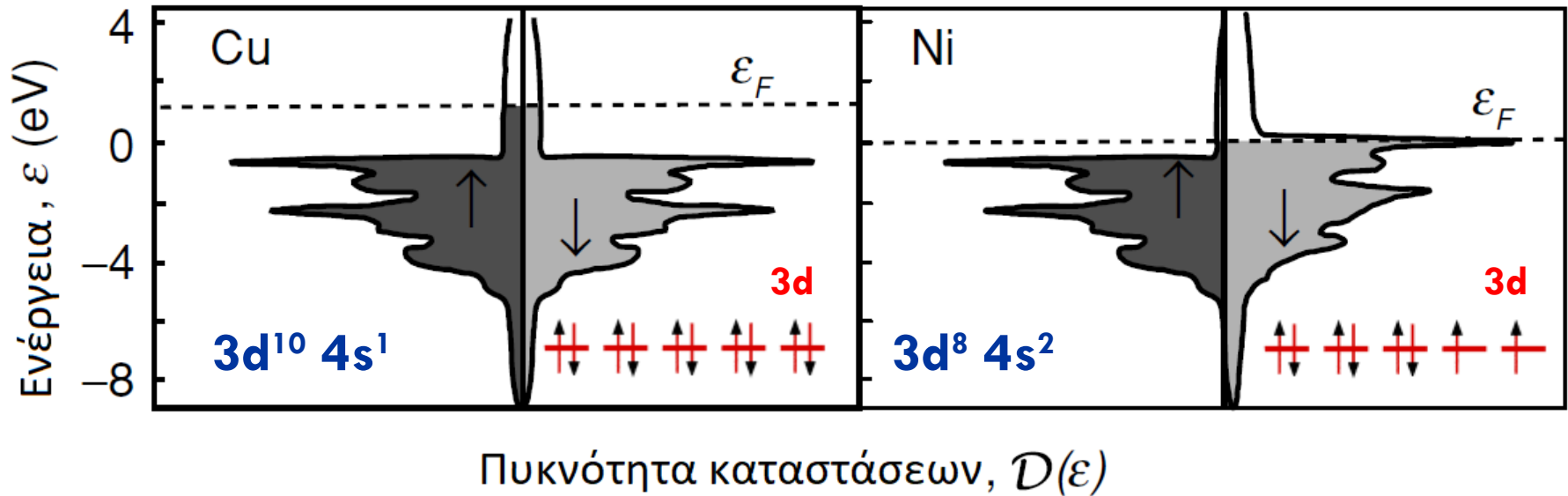
Η ιδιοστροφορμή του ηλεκτρονίου ισούται με: $\hbar \cdot m_s$, όπου $m_s = \pm \frac{1}{2}$

Στο ηλεκτρικό ρεύμα, ενώ το φορτίο των ηλεκτρονίων δε μεταβάλλεται, το σπιν μπορεί να μεταβληθεί!

- Μεταβολή λόγω σκεδάσεων
 - “Χειραγώγηση” μέσω μαγνητικών πεδίων
- ➔ 1^η γενιά ηλεκτρονικής του σπιν: διατάξεις 2 επαφών, όπως αισθητήρες γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης
- ➔ 2^η γενιά ηλεκτρονικής του σπιν: διατάξεις 3 επαφών, όπως τρανζίστορ σπιν

Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

Γιατί έχει σημασία το σπιν..;



Εξαρτώμενη από το spin μέση ελεύθερη διαδρομή ηλεκτρονίων

$$\lambda_{\text{Cu}\uparrow} = \lambda_{\text{Cu}\downarrow} = 20\text{nm}$$

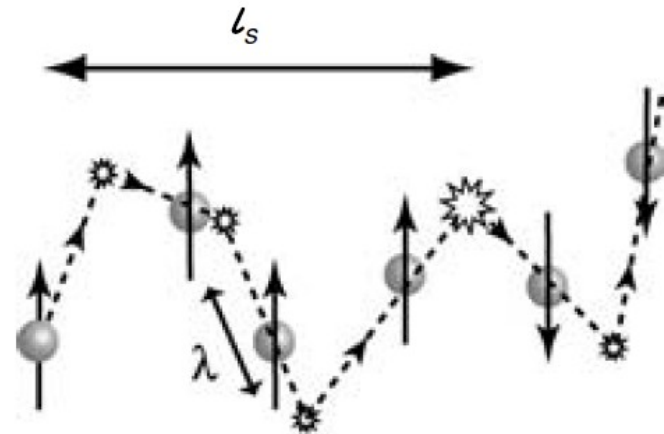
$$\lambda_{\text{Ni}\uparrow} = 5\text{nm}, \quad \lambda_{\text{Ni}\downarrow} = 1\text{nm}$$

Στα μαγνητικά μέταλλα υπάρχουν ηλεκτρόνια με σπιν “πλειοψηφίας” (majority-spin, $\uparrow$) και ηλεκτρόνια με σπιν “μειοψηφίας” (minority-spin, $\downarrow$)

Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

Μήκος διάχυσης σπιν (spin diffusion length, l_s)

Η μέση απόσταση που διανύει ένα ηλεκτρόνιο πριν αναστραφεί το σπιν του



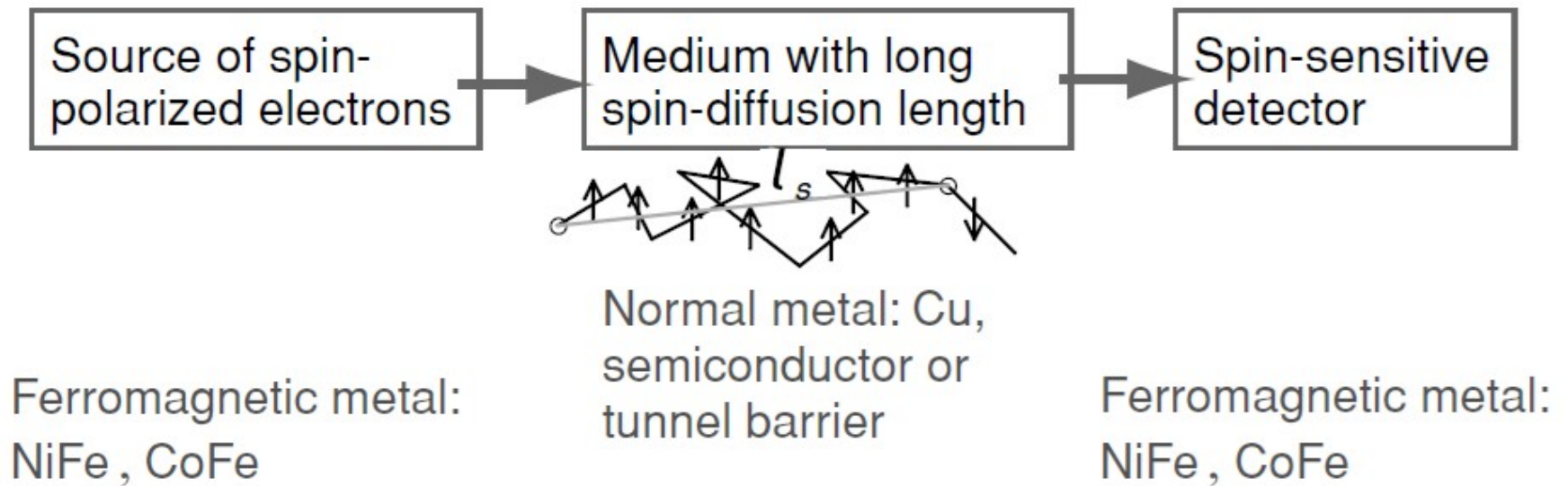
	Al	Co	Ni	Fe ₂₀ Ni ₈₀	Cu
$\lambda_{\uparrow}$	12	20	5	15	20
$\lambda_{\downarrow}$	12	1	1	1	20
l_s	350	40	10	3	200

Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

Γενικό σχήμα διάταξης ηλεκτρονικής του σπιν

“Πολωτής” σπιν

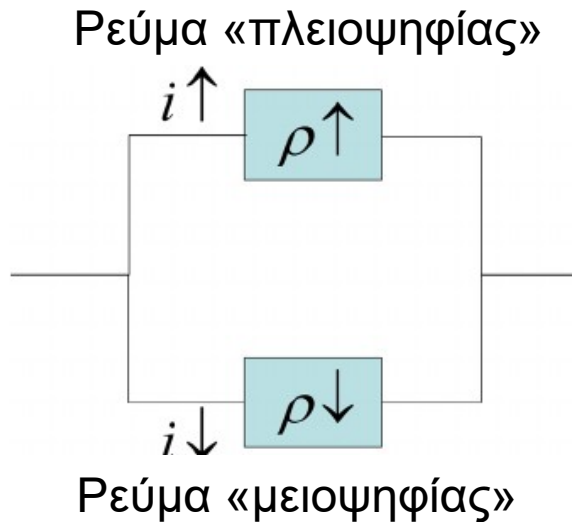
“Αναλυτής” σπιν



“Πόλωση” σπιν:
$$P = \frac{n_{\uparrow} - n_{\downarrow}}{n_{\uparrow} + n_{\downarrow}}$$

Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

Το μοντέλο των «δύο ρευμάτων», N. F. Mott, 1936



$$\rho = \frac{\rho_{\uparrow} \cdot \rho_{\downarrow}}{\rho_{\uparrow} + \rho_{\downarrow}}$$

The Nobel Prize in Physics 1977



Photo from the Nobel Foundation archive.
Philip Warren Anderson

Prize share: 1/3



Photo from the Nobel Foundation archive.
Sir Nevill Francis Mott

Prize share: 1/3

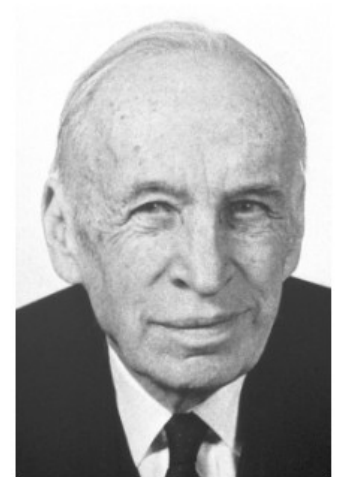


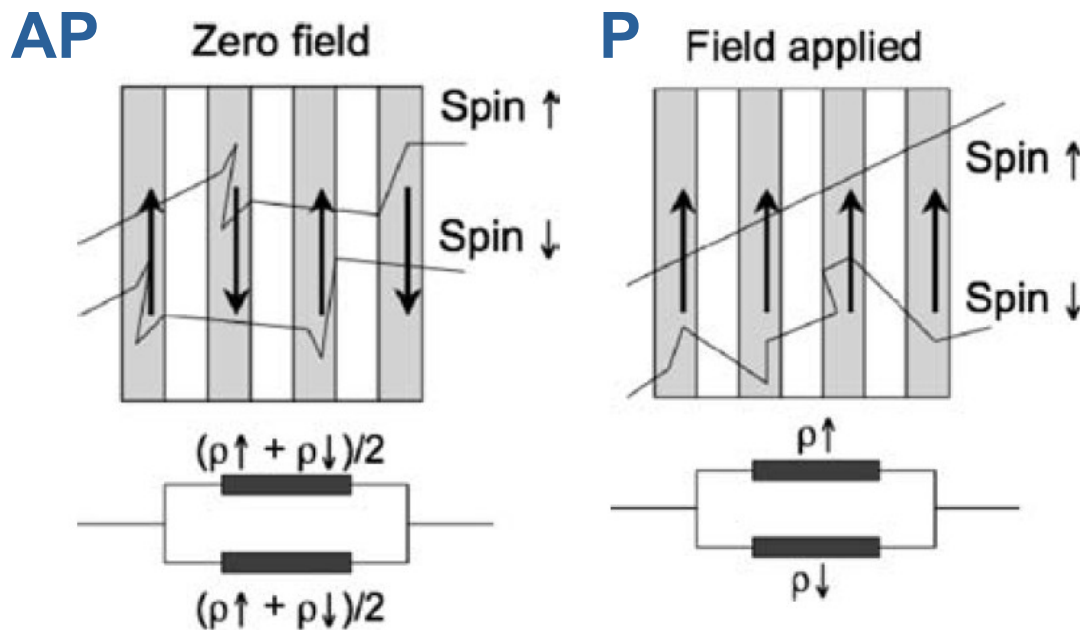
Photo from the Nobel Foundation archive.
John Hasbrouck Van Vleck

Prize share: 1/3

Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

Γιγαντιαία μαγνητοαντίσταση – Giant Magneto-Resistance (GMR) - 1988

- Ανισοτροπική μαγνητοαντίσταση (AMR): 1-2%
- Γιγαντιαία μαγνητοαντίσταση: 10-80%



Μαγνητοαντίσταση

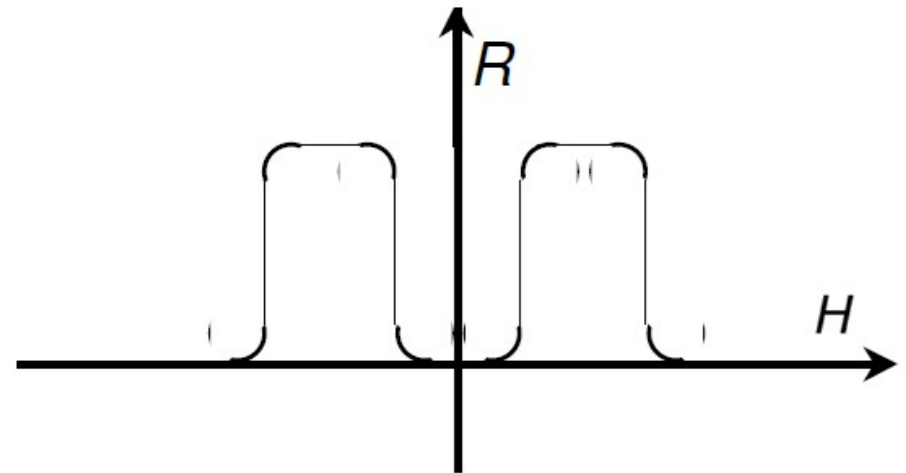
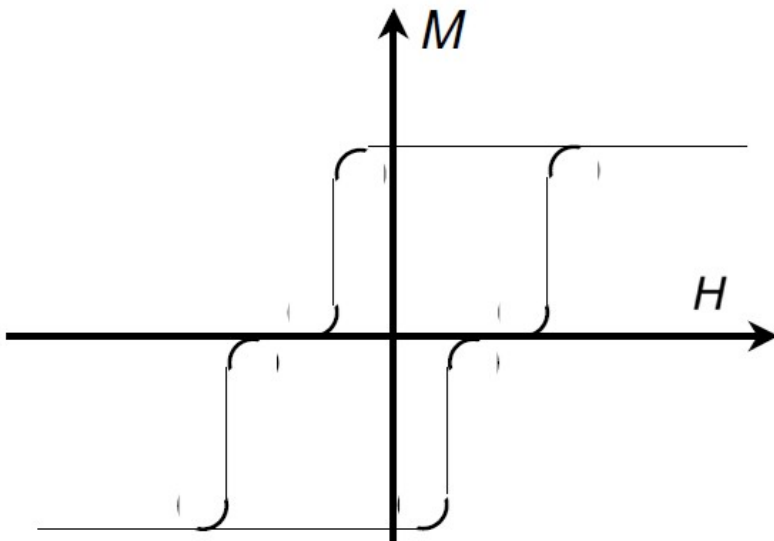
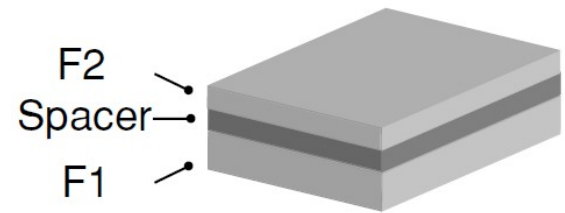
$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R_{AP} - R_P}{R_{AP}}$$

Να αποδείξετε ότι
 $R_{AP} > R_P$, όταν $\rho_{\uparrow} < \rho_{\downarrow}$

Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

Γιγαντιαία μαγνητοαντίσταση – Giant Magneto-Resistance (GMR)

“Βαλβίδες” σπιν (spin-valves) → Διατάξεις 2 επαφών

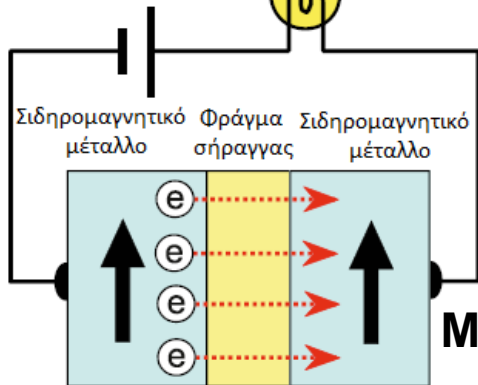


Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

Μαγνητική επαφή σήραγγας – Magnetic Tunnel Junction (MTJ)

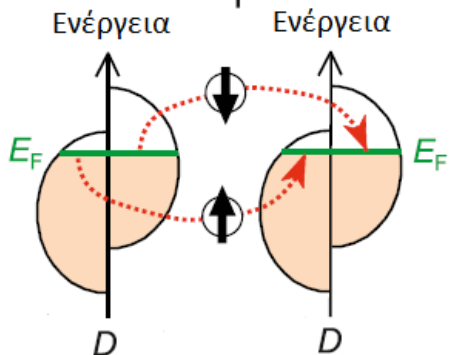
Παράλληλη

P



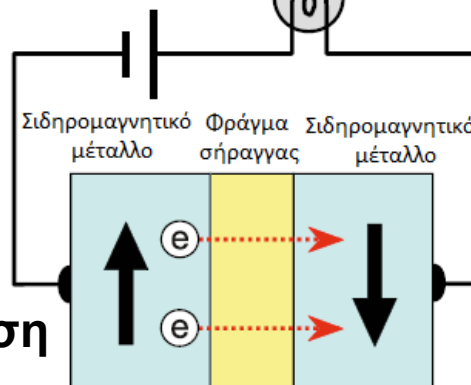
Μαγνήτιση

R_P

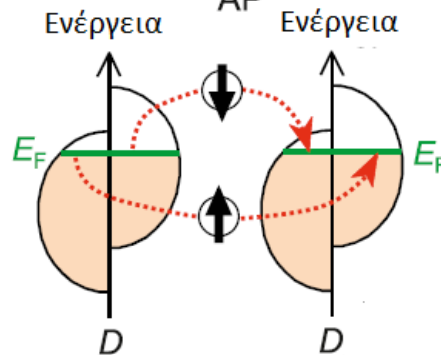


Αντί-παράλληλη

AP



R_{AP}



Λεπτά πολυστρωματικά υμένια
σιδηρομαγνητικό μέταλλο/
διηλεκτρικό/
σιδηρομαγνητικό μέταλλο

$$J^P \propto D_L^{\uparrow} D_R^{\uparrow} + D_L^{\downarrow} D_R^{\downarrow}$$

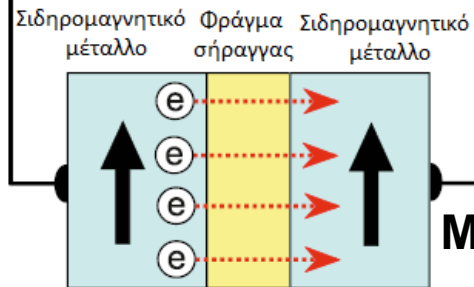
$$J^{AP} \propto D_L^{\uparrow} D_R^{\downarrow} + D_L^{\downarrow} D_R^{\uparrow}$$

Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

Μαγνητική επαφή σήραγγας – Magnetic Tunnel Junction (MTJ)

Παράλληλη

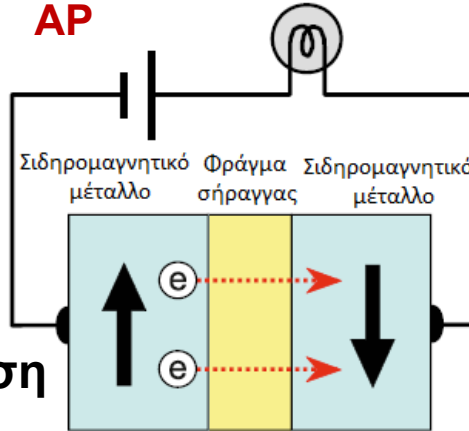
P



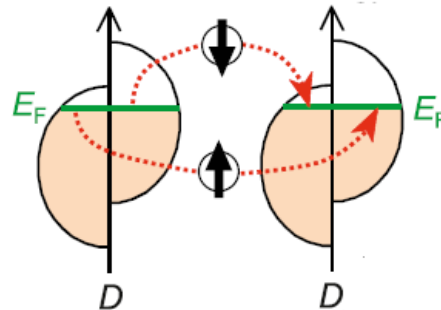
Μαγνήτιση

Αντί-παράλληλη

AP



Ενέργεια



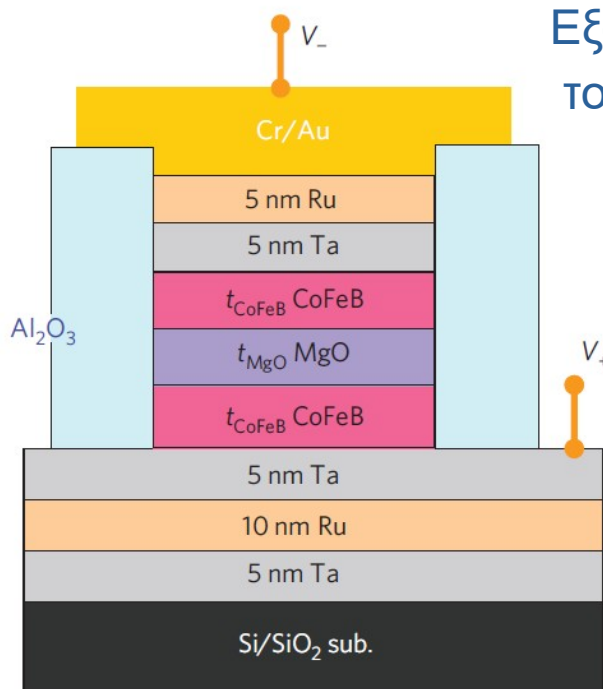
Λεπτά πολυστρωματικά υμένια
σιδηρομαγνητικό μέταλλο/
διηλεκτρικό/
σιδηρομαγνητικό μέταλλο

Μαγνητοαντίσταση σήραγγας
– Tunneling Magneto-
Resistance (TMR)

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R_{AP} - R_P}{R_{AP}}$$

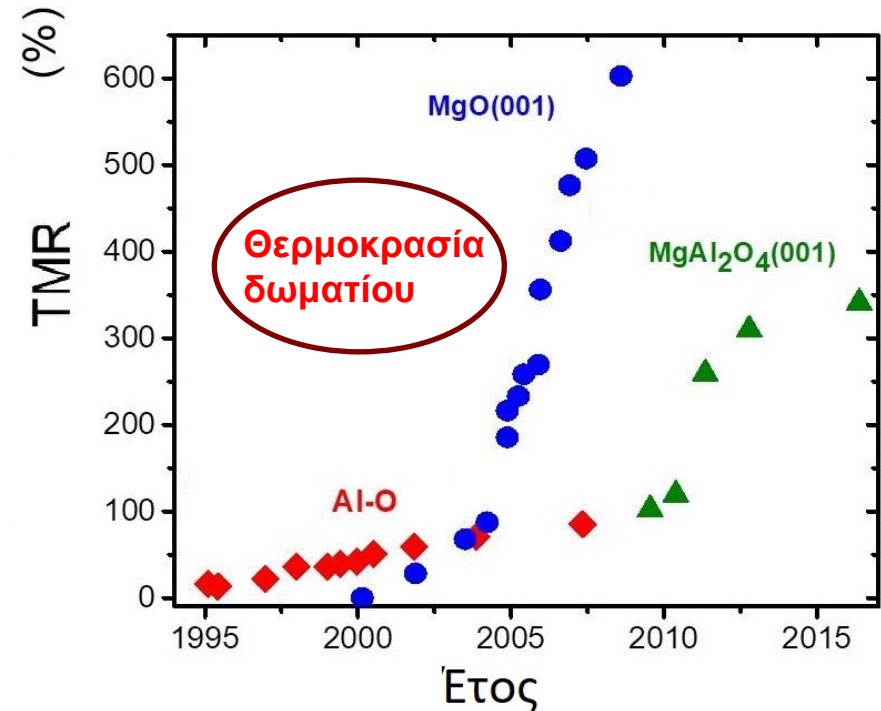
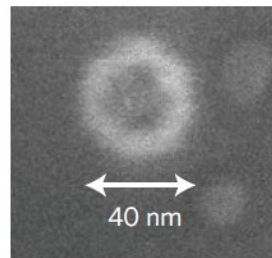
Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

Μαγνητική επαφή σήραγγας – Magnetic Tunnel Junction (MTJ)



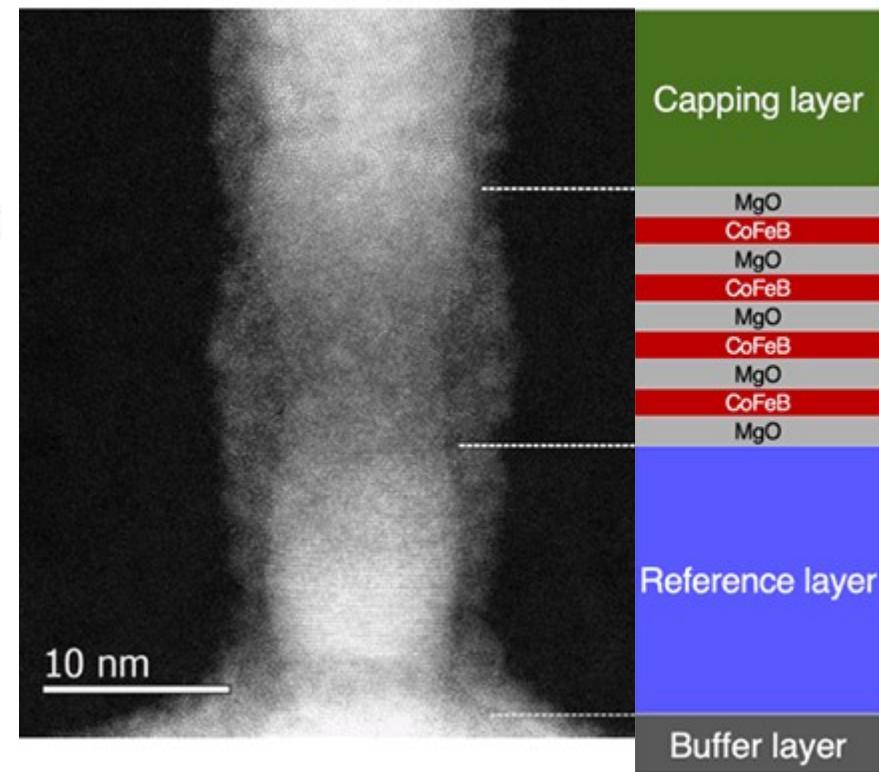
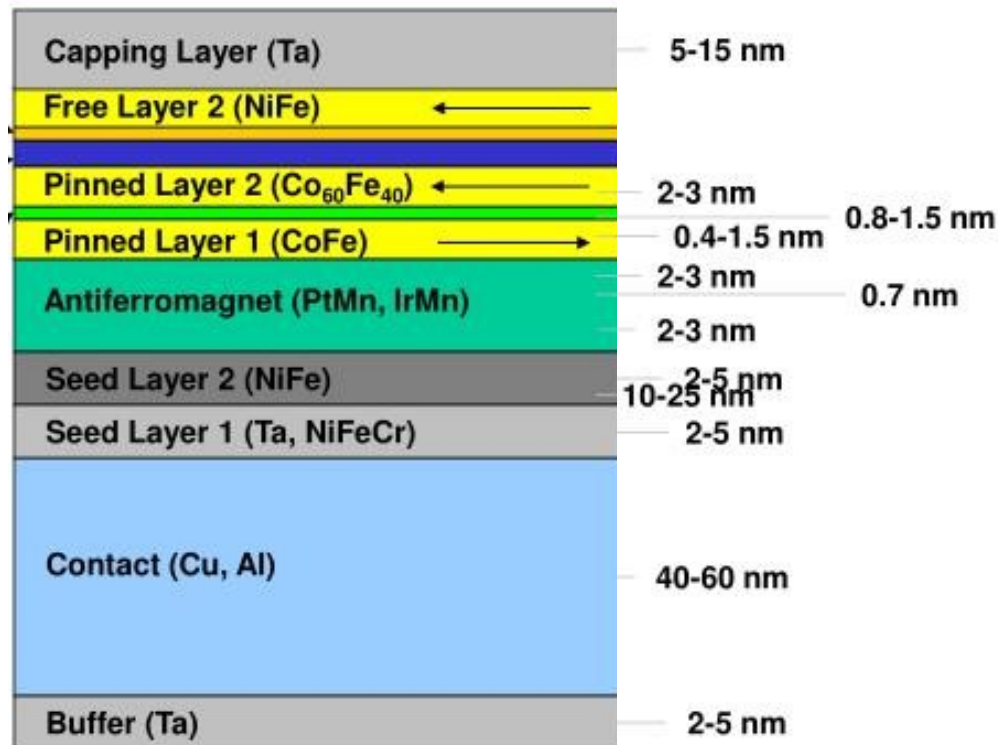
Εξάρτηση του H_c
του CoFeB από
το πάχος

Ηλεκτρονική
μικροσκοπία



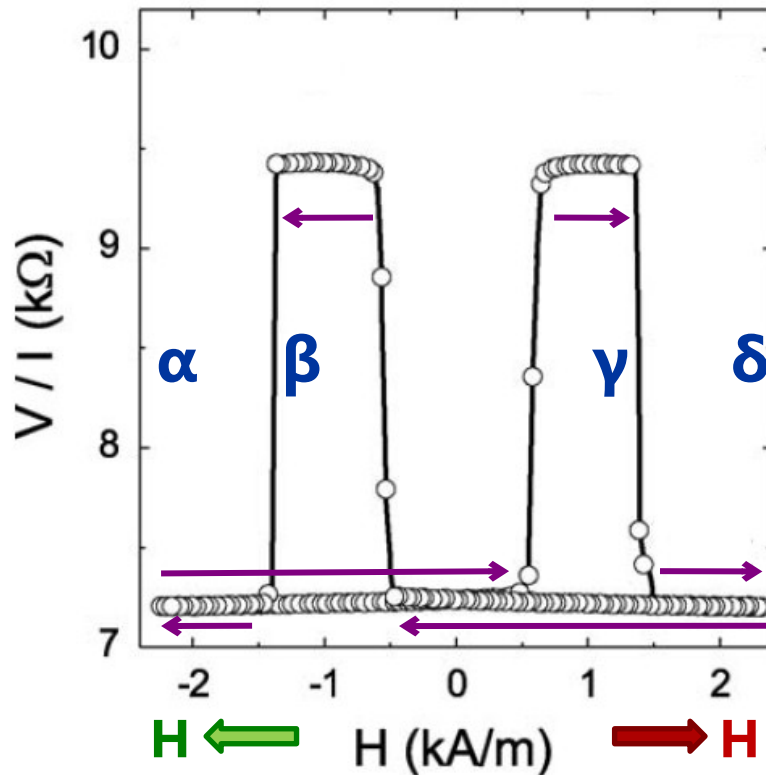
Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

Μαγνητική επαφή σήραγγας – Magnetic Tunnel Junction (MTJ)



Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

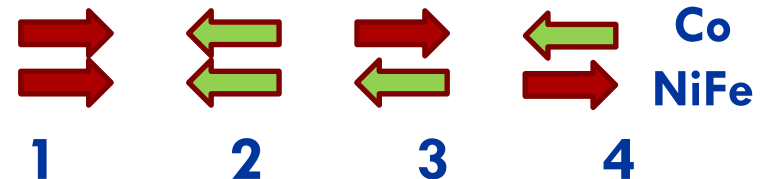
Μαγνητική επαφή σήραγγας – **Magnetic Tunnel Junction (MTJ)**



Co(8nm)/AlO_x(1.4nm)/NiFe(15nm)

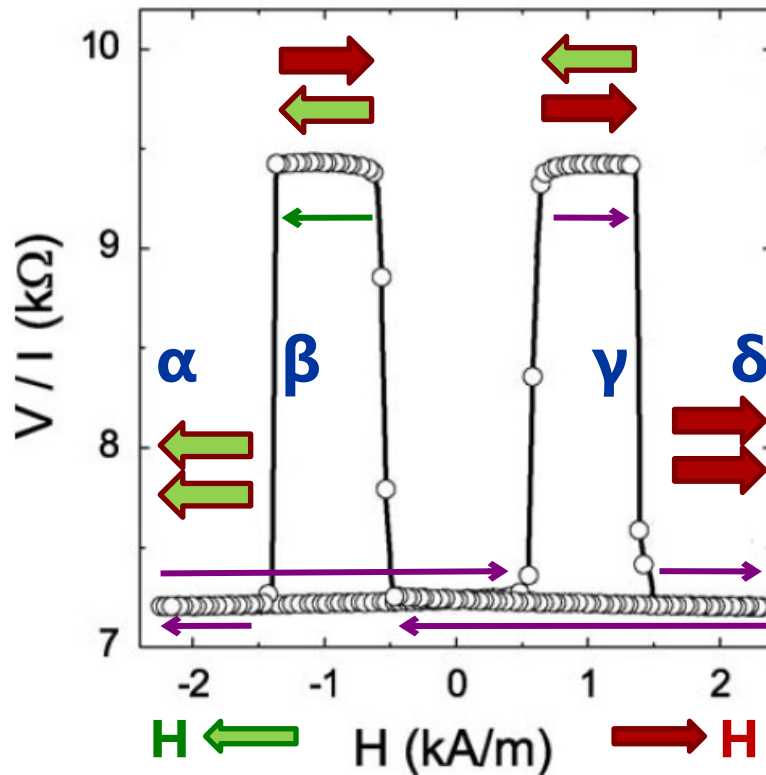
$$\text{TMR} = \frac{R_{\text{ap}} - R_{\text{p}}}{R_{\text{p}}}$$

Μαγνήτιση υμενίων



Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

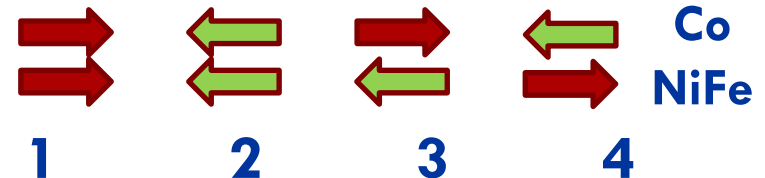
Μαγνητική επαφή σήραγγας – **Magnetic Tunnel Junction (MTJ)**



Co(8nm)/AlO_x(1.4nm)/NiFe(15nm)

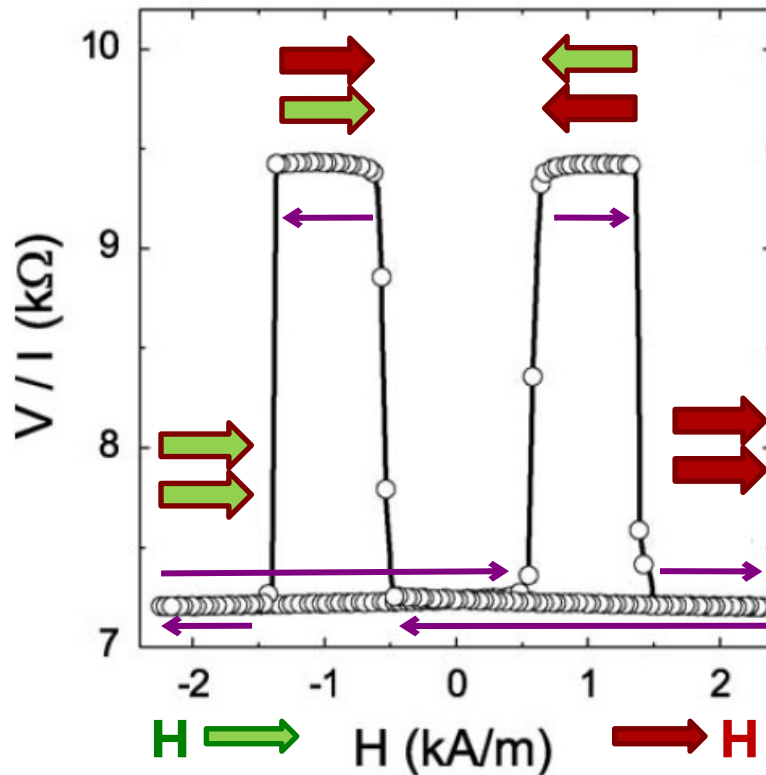
$$TMR = \frac{R_{ap} - R_p}{R_p}$$

Μαγνήτιση υμενίων



Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

Μαγνητική επαφή σήραγγας – **Magnetic Tunnel Junction (MTJ)**



Co(8nm)/AlO_x(1.4nm)/NiFe(15nm)

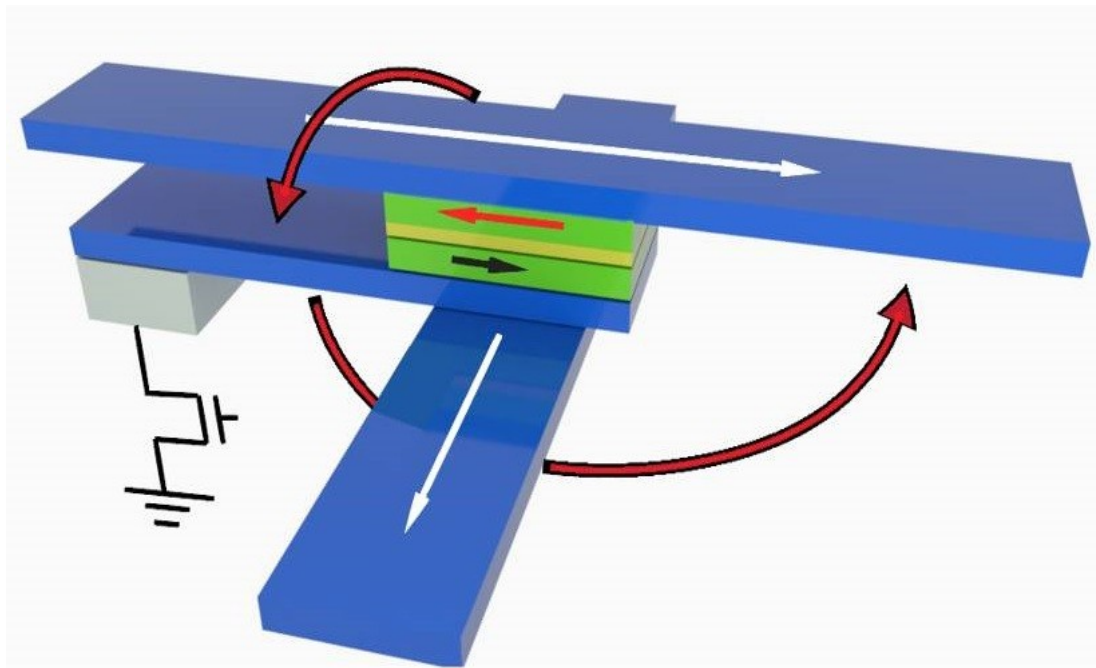
$$\text{TMR} = \frac{R_{\text{ap}} - R_{\text{p}}}{R_{\text{p}}}$$

$$\text{TMR} = 35\%$$

Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

Μαγνητικές μνήμες τυχαίας προσπέλασης
Magnetic Random Access Memories (MRAMs)

Διατάξεις 3 επαφών



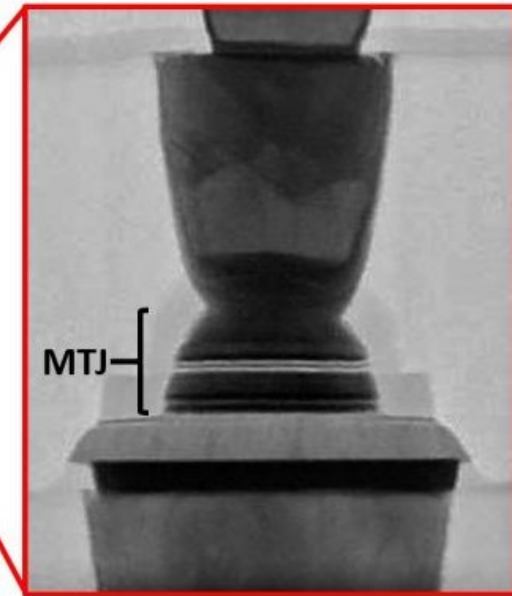
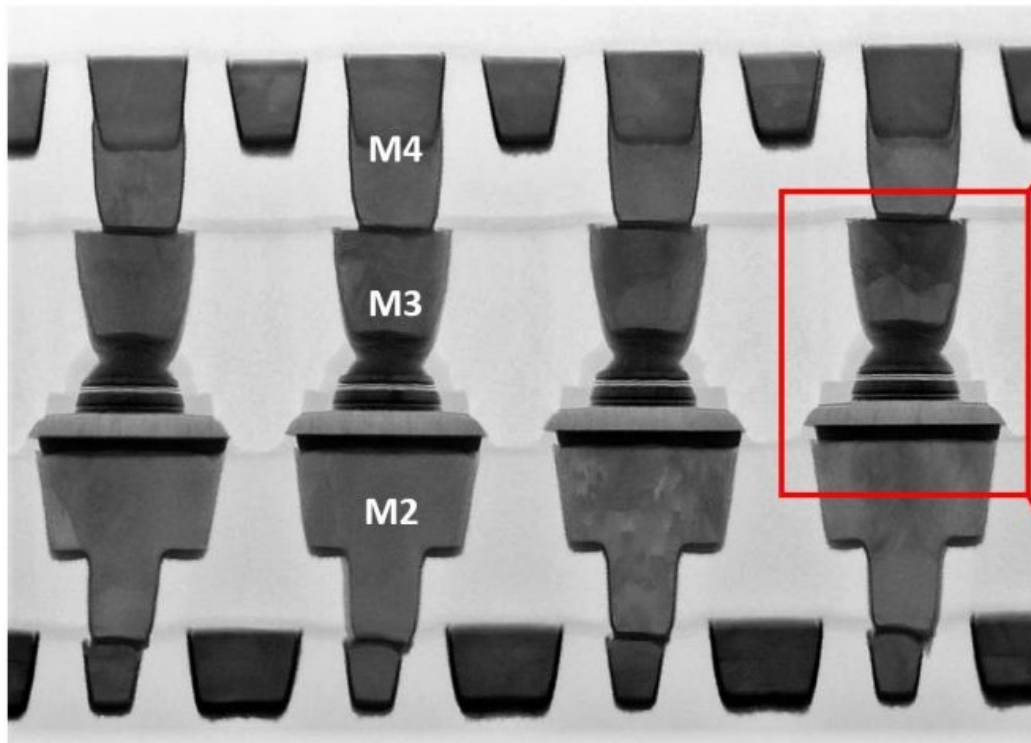
Μόνιμη αποθήκευση
δεδομένων σε μνήμη RAM!!!



Εμπορική κλίμακα: 28 nm

Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

Μαγνητικές μνήμες τυχαίας προσπέλασης
Magnetic Random Access Memories (MRAMs)



Source: Intel

IEDM2018

BEOL

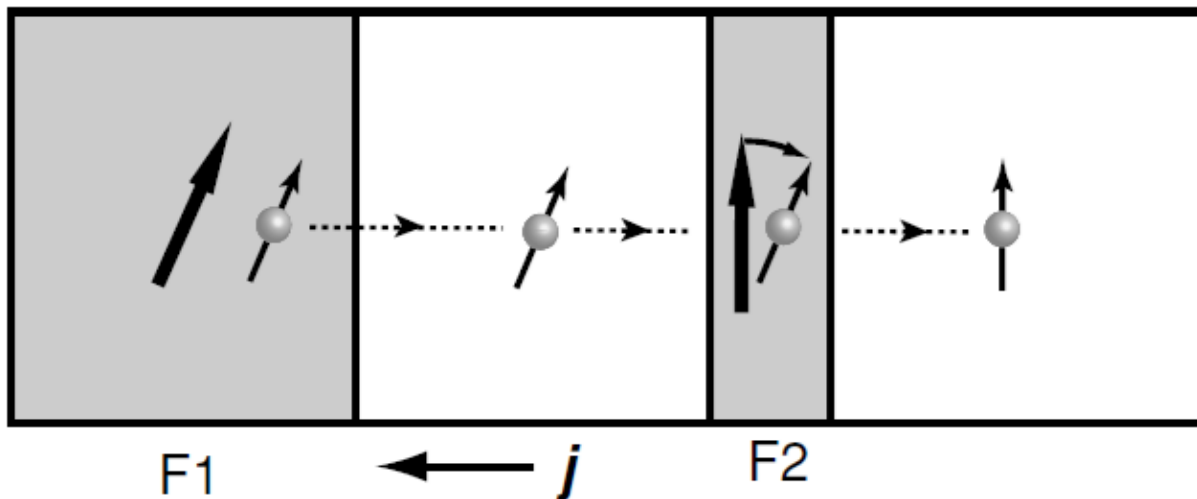
CMOS level

Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

Ροπή μεταφοράς σπιν – Spin-transfer torque (STT)

Ένα πολωμένο ηλεκτρικό ρεύμα, εκτός από ηλεκτρικό φορτίο, μεταφέρει και στροφορμή.

→Ενώ το ηλεκτρικό φορτίο διατηρείται, η στροφορμή των ηλεκτρονίων μπορεί να μεταβληθεί λόγω αλληλεπιδράσεων με το κρυσταλλικό πλέγμα, προκαλώντας αντίθετη φοράς μεταβολή της μαγνητικής διπολικής ροπής των ατόμων.



**Μεταβολή της
μαγνήτισης με
ηλεκτρικό ρεύμα!!!**

Στο επόμενο μάθημα:
Υπεραγωγιμότητα!