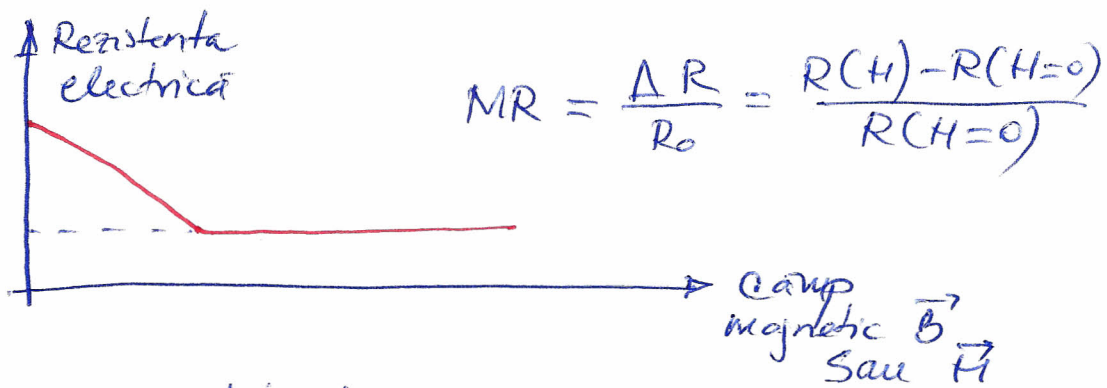


EFECTE DE MAGNETOREZISTENȚĂ ȘI APLICAȚII ÎN SENZORI ȘI STOCARE NONVOLATILĂ A INFORMAȚIEI

Magnetorezistență anizotropă (AMR), Magnetorezistență gigant (GMR)
Efect Hall anomal (AHE), Efect Hall de spin (SHE),
Magnetorezistență tunel.

Magnetorezistență (MR)

→ este variația rezistenței electrice a unui material (sau dispozitiv electronic) cu câmpul magnetic aplicat.



Pentru aplicații tehnologice este important ca efectul MR să apară la câmpuri magnetice mici (1 mV/mT) și la temperatura camerei.

Istoric: Efecte de MR la temperatura camerei (RT) și câmpuri joase (~mT)

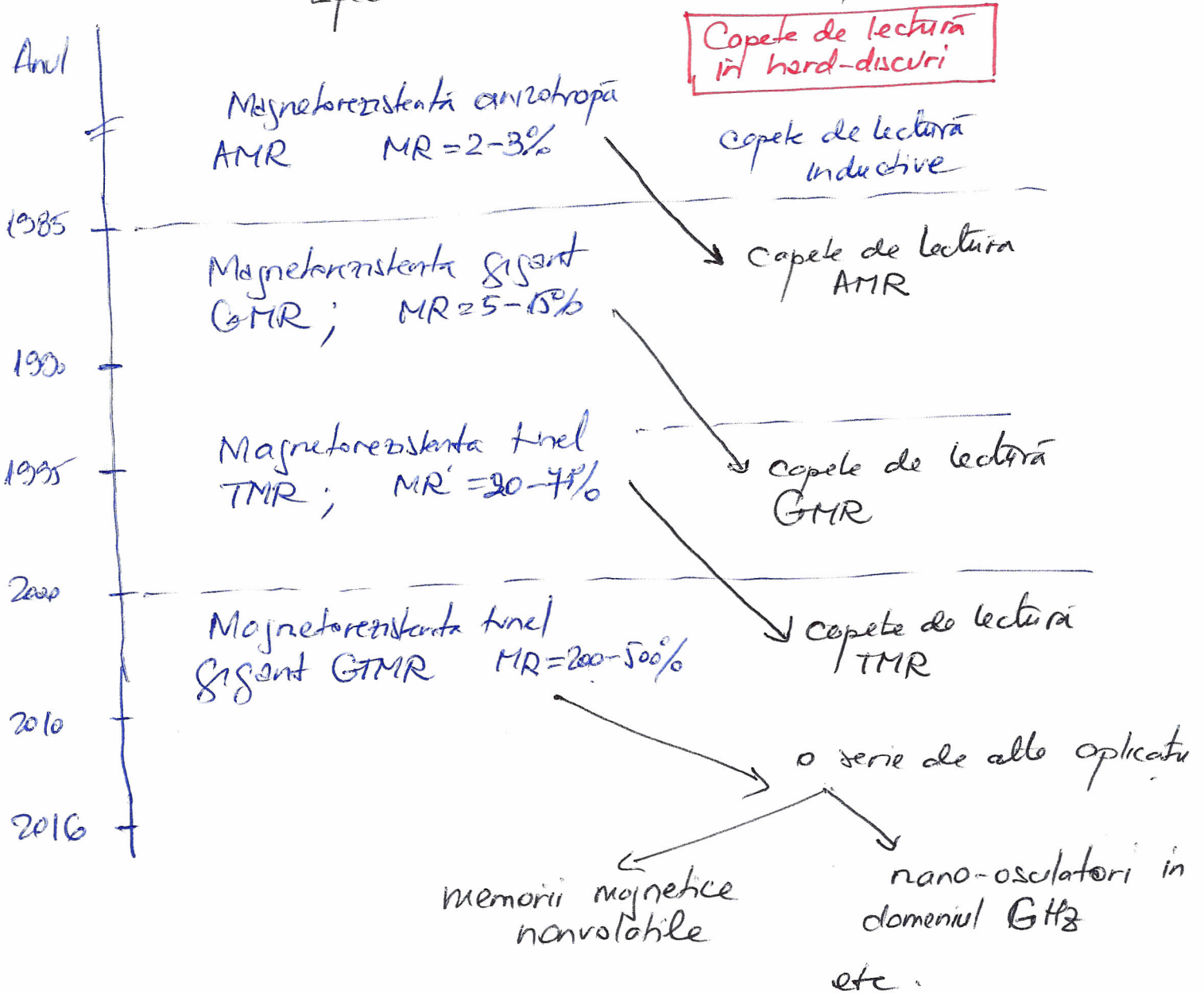
Anul	Descoperirea	Descoperitorii
1857	Efectul de magnetorezistență anizotropă MR ~ 1-2%	Lord Kelvin
1985	Efectul de magnetorezistență gigant GMR ~ 5-15%	
1990		Albert Fert Peter Grunberg P. Nobel Fizică 2007
1995	Efectul de magnetorezistență tunel TMR = 20-70%	T. Miyazaki J. Moodera
2001	Magnetorezistență tunel gigant TMR > 100% → 1000%	
2007		

Efectele de magnetorezistență au avut un impact important în tehnologiile senzorilor și ale stocării informației (2)

Evoluția tehnologiilor de stocare a informației

Efectul MR

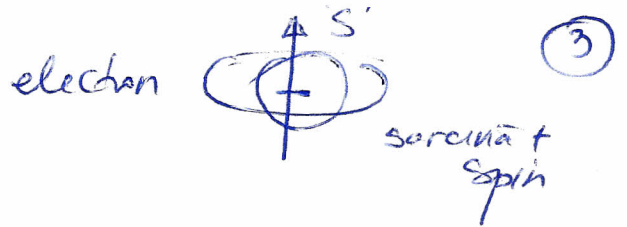
Aplicația tehnologică



Obiectul de cercetare și dezvoltare a unei ramuri noi a electronicii și onume "Electronica de spin" sau "Spintronica"

electron = sarcină + spin
 ↑ ↑
 electronica + magnetism
 ↳ spintronica

Bazele fizice ale Spintronicii



Electronica conventională

este bazată pe manipularea sarcinii electronului

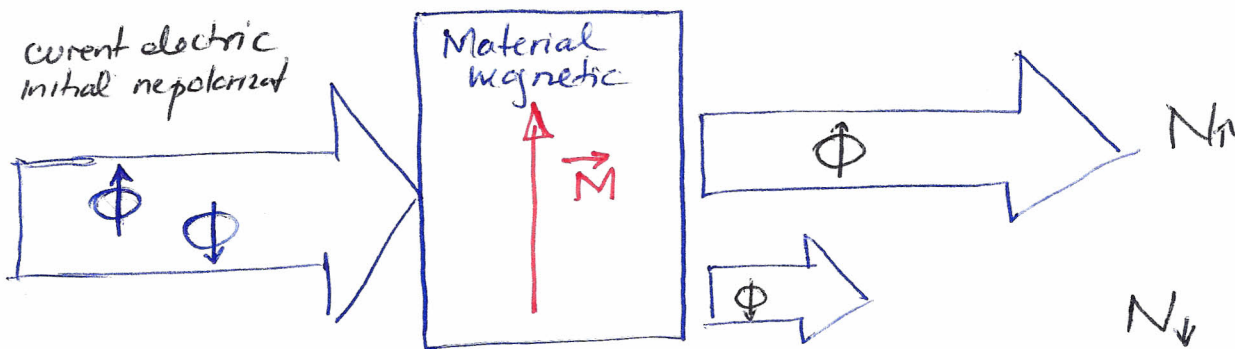
Magnetismul

are la bază controlul spinului electronului și a configurațiilor de spin în materiale magnetice

Electronica de spin → combină atât manipularea sarcinii cât și a spinului în vederea realizării unor noi dispozitive electronice cu funcționalități noi, complexe.

Ideea de bază:

Materialele magnetice pot fi utilizate ca **FILTRE DE SPIN** \Leftrightarrow Polarizatoarelor din Optică.



\vec{M} = magnetizare

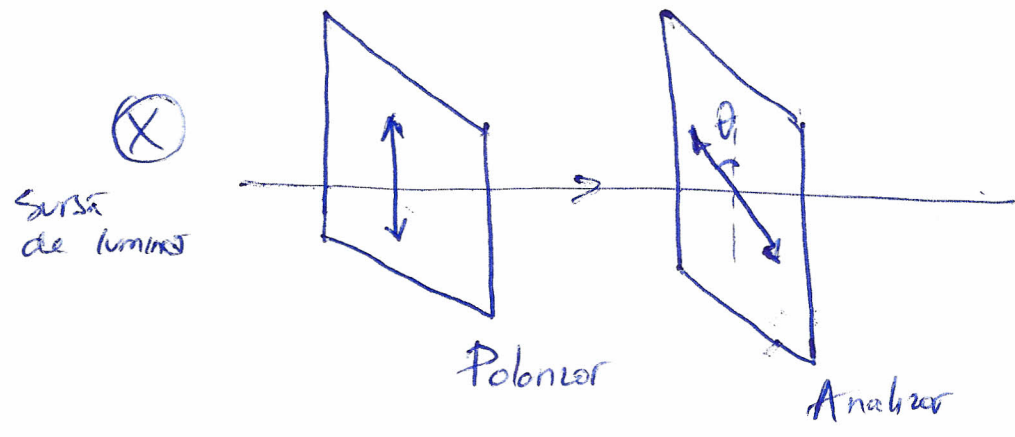
initial în curentul nepolarizat avem același număr de e^- cu spin \uparrow și \downarrow
($N_{\uparrow}^0 = N_{\downarrow}^0$)

după traversarea filmului feromagnetice, curentul devine polarizat în spin
ex. $N_{\uparrow} \gg N_{\downarrow}$

Definim polarizarea curentului sub forma:

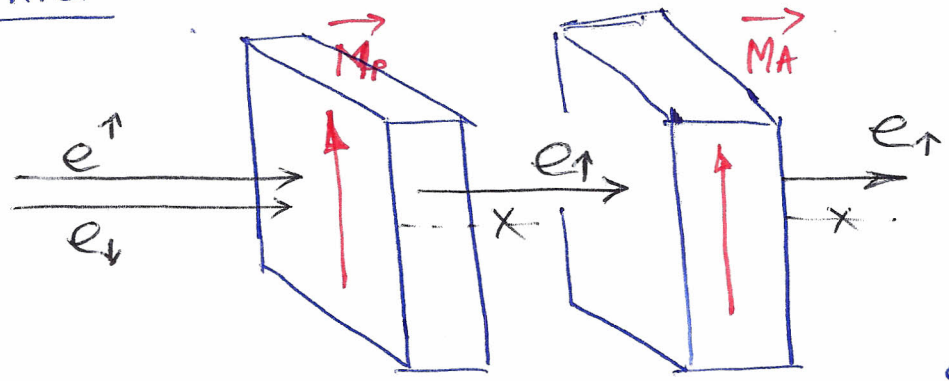
$$P = \frac{N_{\uparrow} - N_{\downarrow}}{N_{\uparrow} + N_{\downarrow}} \quad (\%) \text{ exprimată în procente}$$

Pe baza acestui concept, se poate realiza o analogie optică cu un sistem de tip Polarizor - Analizor a cărei transmisie a intensității luminoase depinde de unghiul θ între axa polarizorului și a analizorului

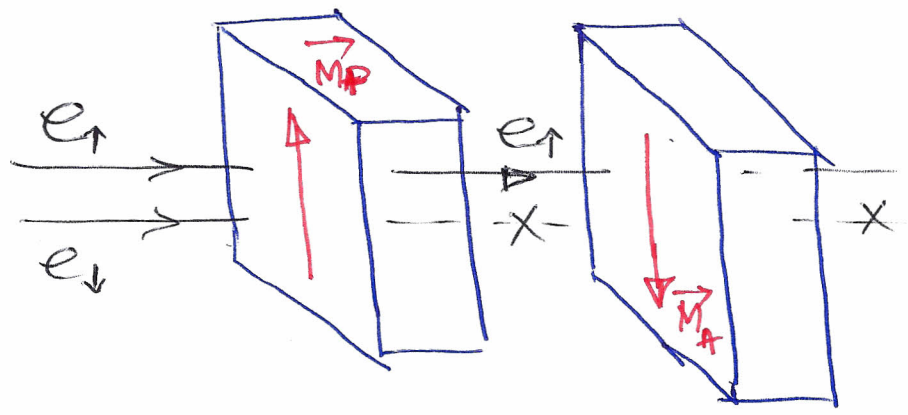


$$I = f(\cos \theta)$$

Aici



Dacă magnetizările \vec{M}_A și \vec{M}_P sunt paralele după traversarea celor 2 materiale magnetice curentul de electroni e este transmis



Dacă \vec{M}_P și \vec{M}_A sunt antiparalele electronii e reținuți din polarizor sunt blocați de \vec{M}_A și curentul transmis de sistemul P-A este nul.

Conductivitatea sistemului polarizor-analizor

$$\sigma_{\uparrow\uparrow} \gg \sigma_{\uparrow\downarrow} \Rightarrow$$

$$\text{rezistența electrică } R_{\uparrow\uparrow} \ll R_{\uparrow\downarrow}$$

Pentru o oarecare corecție a magnetizărilor \vec{M}_P și \vec{M}_A (ex. un unghi θ) se poate demonstra că:

(5)

$$R = \gamma (\cos \theta)$$

rezistența sistemului de tip filtru de spin (sau "rotinet" de spin)

Dacă notăm $R_{PP} = R_P$

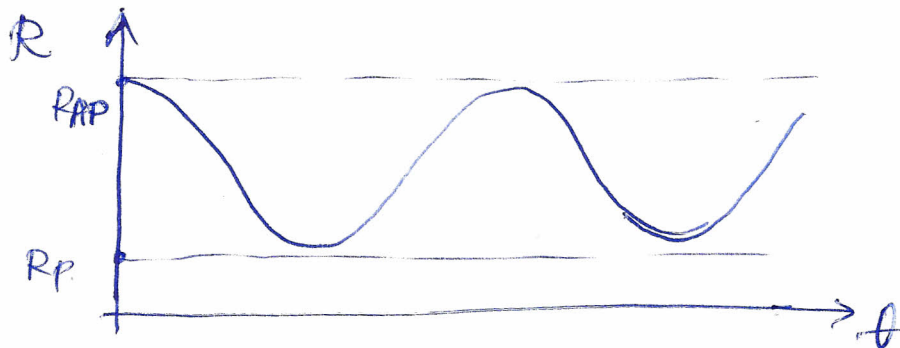
rezistența sistemului PA când $\vec{M}_P \parallel \vec{M}_A$

$R_{NA} = R_{AP}$

rezistența sistemului PA când \vec{M}_P și \vec{M}_A sunt antiparalele

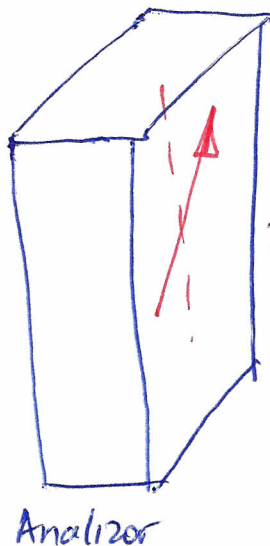
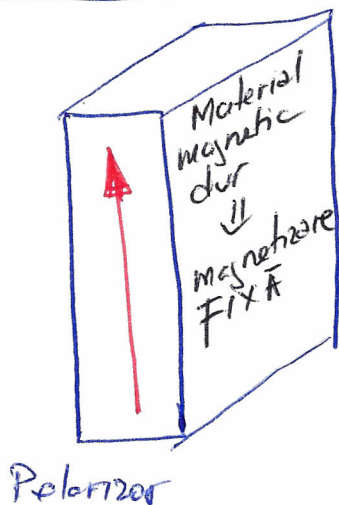
avem:

$$R(\theta) = \frac{R_P + R_{AP}}{2} + \frac{R_P - R_{AP}}{2} \cdot \cos \theta$$

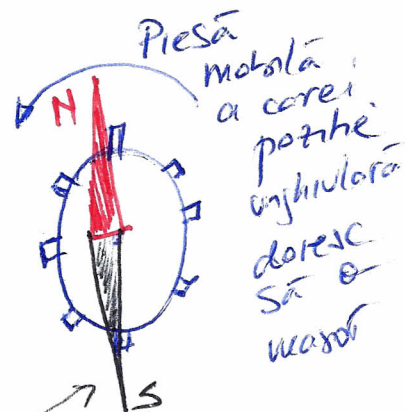


variație cosinusoidală care stă la baza funcționării unor senzori de poziție unghiulară (ex. sisteme ABS)

Idee:



Material magnetic moale
 \downarrow
 magnetizarea poate urmări fidel un câmp magnetic extern

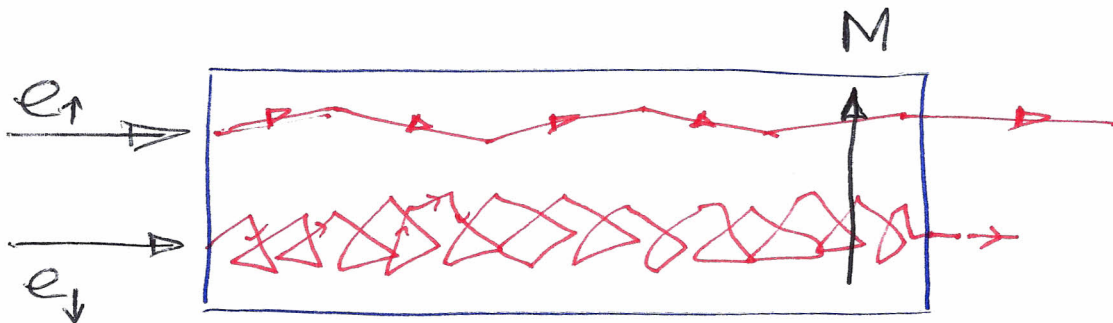


MAIENET PERMANENT FIXAT SOLIDAR CU PIESA MOBILĂ

Prin rotația perei mobile a carei poziție crește să
 se determin, magnetul permanent fixat solid, creează un
 câmp magnetic \vec{B} , care va produce rotația magnetizării
 anizotropului (magnetic moale) exact cu același unghi θ
 cu care sa roată perea mobilă. (6)

Au măsurarea rezistenței electrice a senzorului (PA)
 se poate determina unghiul θ , folosind o calibrare
 prealabilă.

De ce polarizează un film magnetic un curent de electroni
 care îl traversează?



Se știe că rezistența electrică este corelată cu
 fenomenul de împrăștire a electronilor în mișcarea
 lor în cristal sub influența câmpului electric.

Într-un material magnetic, probabilitatea de împrăștire
 depinde de orientarea spinului electronului relativ la
 direcția magnetizării:

→ electronii e_{\uparrow} cu spin paralel cu \vec{M} sunt
 mai puțin difuzați decât cei e_{\downarrow} cu spin
 antiparalel magnetizării \Rightarrow

parcurs liber mediu

τ_↑

} dependente de spin

$$\tau_{\uparrow} > \tau_{\downarrow}$$

$$\tau_{\uparrow} > \tau_{\downarrow}$$

\Rightarrow conductivitatea σ și
 rezistența $\sigma^{-1} = R$

depind de spin

$$\sigma_{\uparrow} > \sigma_{\downarrow} \quad (\rho_{\uparrow} < \rho_{\downarrow})$$

Intr-un model dezvoltat de către Mott curentul total de electroni se poate scrie ca o suma a curenților de electroni corespunzători electronilor up (\uparrow) și a celor corespunzători electronilor down (\downarrow) \Leftrightarrow aproximația curenților multipolenți care neglijează fenomenele de "spin-flip" (difuzie cu modificarea spinului).

În acest model conductivitatea totală este:

$$\underline{\sigma = \sigma_{\uparrow} + \sigma_{\downarrow}}$$

Concluzie:

Intr-un material magnetic conducția electrică este dependentă de spin. Teoria fenomenologică a conductivității electronice rămâne valabilă cu mențiunea că lungimile caracteristice (λ, τ, \dots) depind de spinul electronului în raport cu magnetizarea: \uparrow (\uparrow) \Leftrightarrow spin paralel cu \vec{M}
 \downarrow (\downarrow) \Leftrightarrow spin antiparalel la \vec{M} .

Efectele magnetorezistive pe care le vom studia au la bază aceste concepte. Ele sunt:

- 1) Magnetorezistența anizotropă (AMR)
- 2) Magnetorezistența gigant (GMR)
- 3) Magnetorezistența tunel (TMR)

Vom studia de asemenea două cazuri particulare a unui efect magnetotransportiv (efectul Mott) și anume:

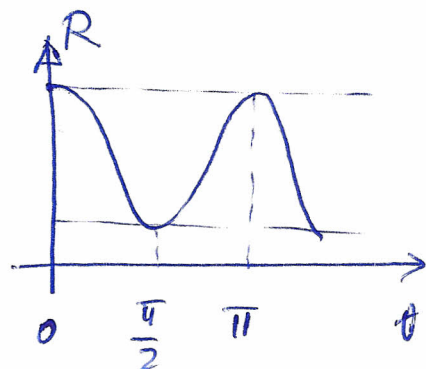
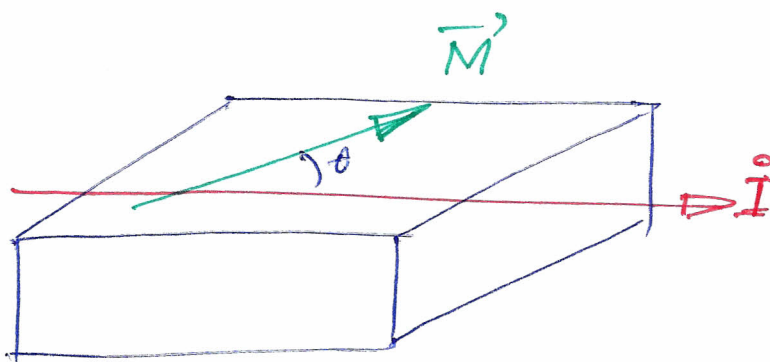
→ efectul Hall anomal (AHE)

→ efectul Hall de spin (SHE) care rezultă din luarea în considerare a spinului e^- .

① Magnetorezistență anizotropă (AMR)

⑧

În anul 1857 W. Thomson observă că rezistența electrică a unor materiale magnetice: Fe, Ni, Co și aliajele acestora, depinde de unghiul pe care îl face curentul care circula prin aceste materiale cu direcția magnetizării.



rezistența este maximă dacă $\vec{I} \parallel \vec{M}$
minimă dacă $\vec{I} \perp \vec{M}$

$$R(\theta) = R_{\perp} + (R_{\parallel} - R_{\perp}) \cos^2 \theta$$

Fenomenul poartă numele de magnetorezistență anizotropă (AMR = "Anisotropic Magnetoresistance")

și este o proprietate intrinsecă volumică a materialelor magnetice

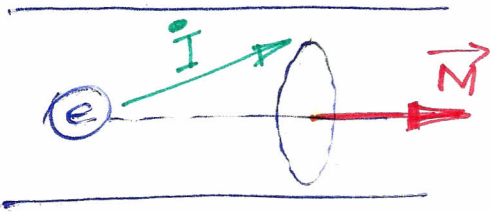
→ ca și amplitudine, $MR = \frac{\Delta R}{R} \approx 3-5\%$ în aliaje NiFe și CoFe la temp. camerei

→ este o consecință a interacțiunii spin-orbită în materialele magnetice (așa cum este în cazul anizotropiei magnetice)

→ efectul AMR a fost utilizat în tehnologiile primelor capete de lectură magnetică în hard-disk-uri. Astăzi efectul stă la baza unor magnetometre de precizie din telefoane mobile moderne, înlocuind senzorii Hall.

Explicatie fenomenologica

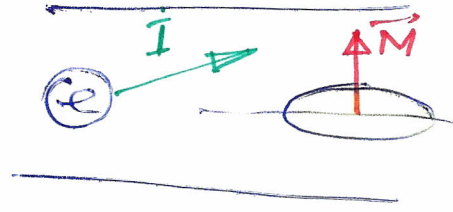
9



I paralel cu M

electronii descriu precesie Larmor pe orbite \perp pe \vec{M}
Acele orbite fiind perpendiculare pe curent vor contribui la o crestere a probabilitatii de imprastiere a electronilor in miscarea lor de drift

\Rightarrow crestere a rezistentei



I \perp M

Planul orbitelor Larmor fiind in acest caz paralel cu directia curentului va determina o probabilitate de imprastiere redusa fata de situatia anterioara

\Rightarrow rezistenti electrice reduse

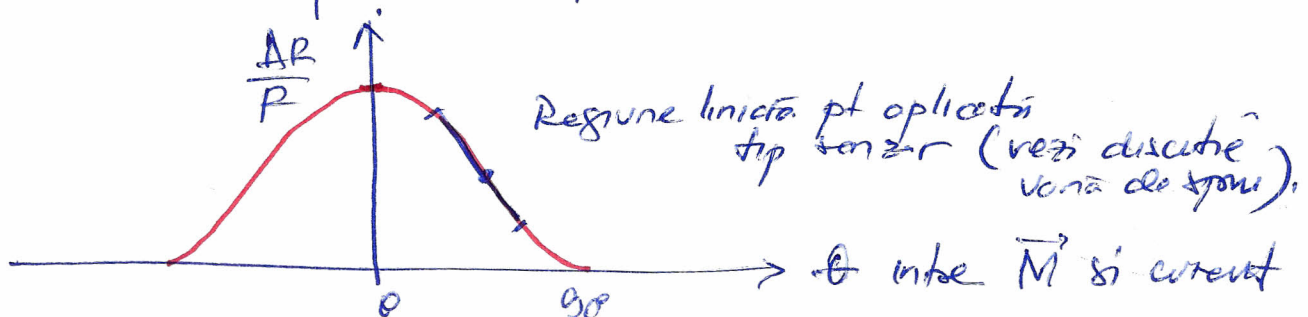
$$R_{\parallel} > R_{\perp}$$

Aplicatii ale fenomenului AMR

\rightarrow capete de lectura in HD-uri (in HDD) 1992-1998

\rightarrow magnetometre in telefoane celulare (recent)

\rightarrow senzori de pozitie, comp...



② Magnetorezistența gigant (GMR)

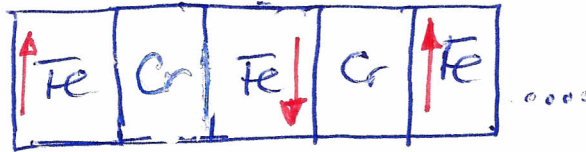
10

Premiul Nobel Pt. Fizică (2007) : Albert FERT (Orsay / Thales)
Fribourg

Peter Grunberg (Jülich)
Germania

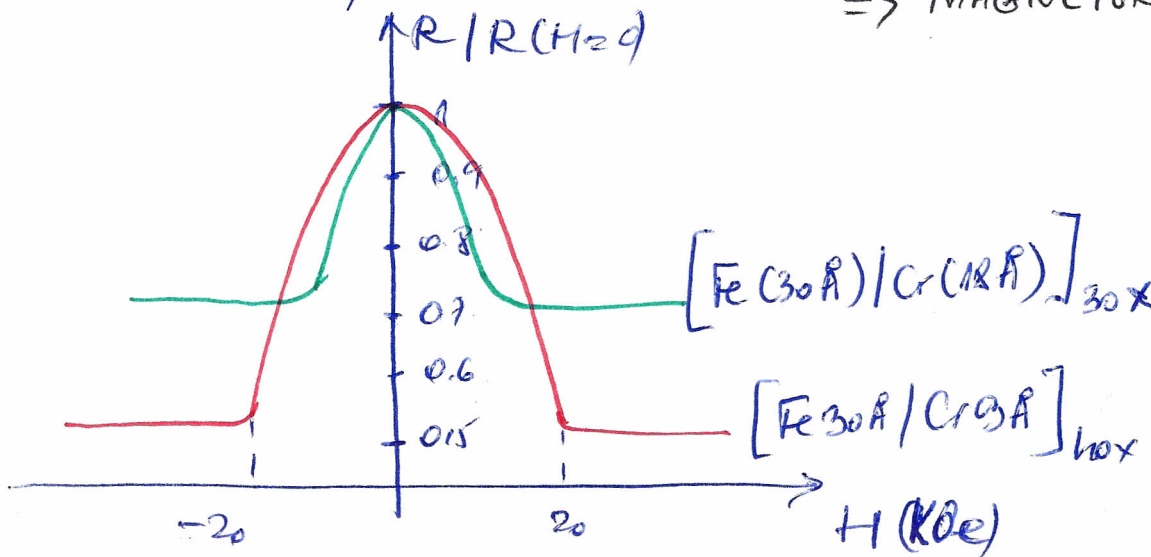
Efectul GMR a fost considerat de către Comitetul Nobel ca fiind la baza primelor aplicații reale în domeniul nano-tehnologiilor.

Acest efect a fost descoperit în 1988 simultan de către grupurile de cercetare sus-menționate: A. Fert - P. Grunberg.
Într-un sistem de filme subțiri multistrat Fe/Cr/Fe/Cr/Fe... există între filmele magnetice de Fe un cuplaj de tip anti-feromagnetic.

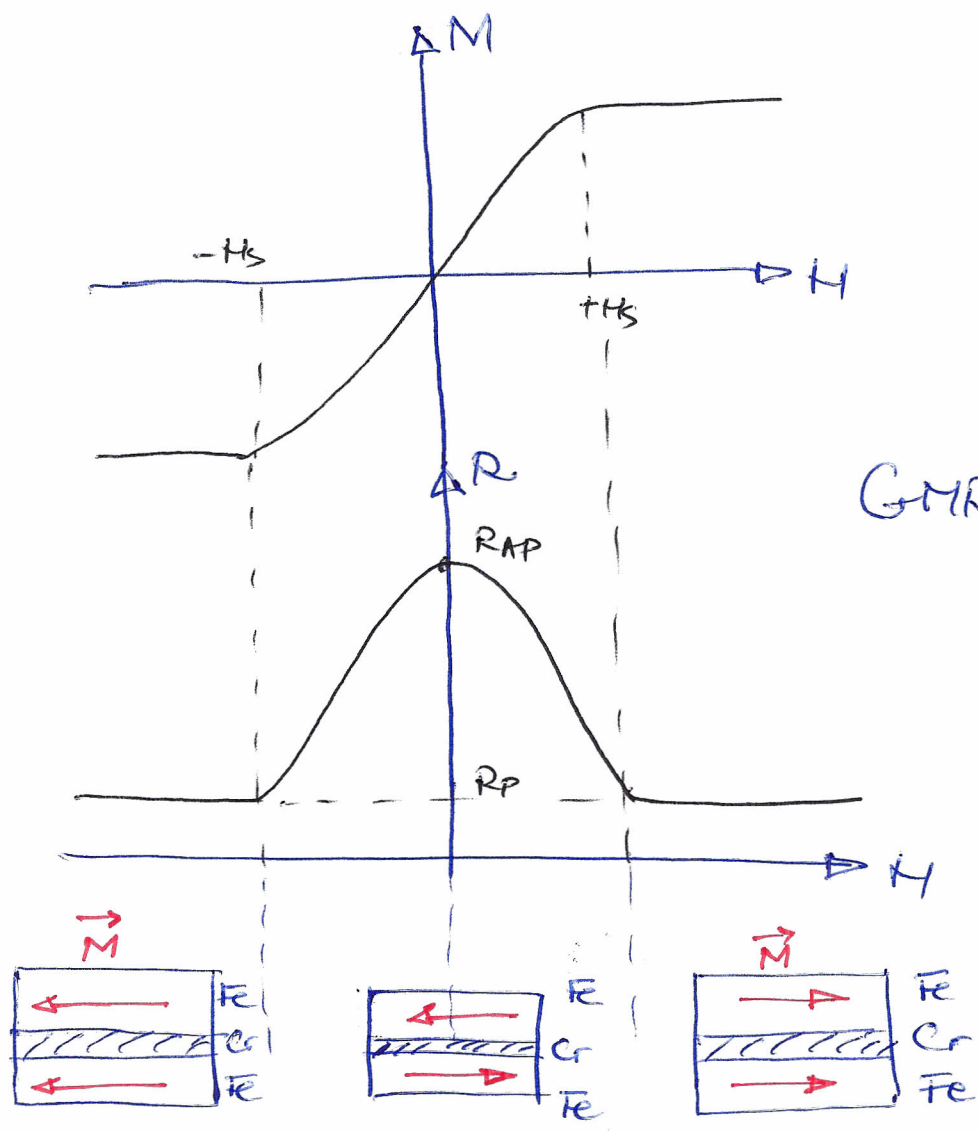


În absența unui câmp magnetic aplicat, la remanență configurația magnetizării este de tip antiferomagnetică.
Aplicând un câmp magnetic H momentele tind să se alinieze cu direcția câmpului. Între valoarea rezistenței electrice a unui astfel de "sandwich" multistrat în stare remanentă și saturație când toate magnetizările sunt paralele, s-a măsurat o variație $\Delta R / R_p = \frac{R_{AP} - R_P}{R_P}$
Cu mult peste magnetorezistența clasică (Lorentz).

\Rightarrow MAGNETOREZISTENȚA GIGANT (GMR)

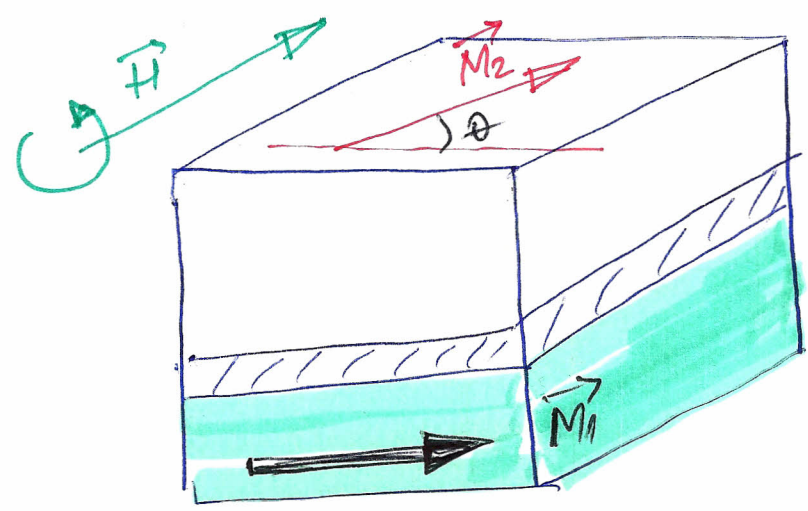


Se observă că amplitudinea efectului GMR crește cu creșterea nr. de secvențe de repetiție.



$$GMR = \frac{R_{AP} - R_p}{R_p}$$

Sistemul tip sandwich cu cuplaj antiferomagnetic nu era insa practic pt. aplicatii. Pt. aceasta, ulterior (IBM) (B. Dieny, V. Sperioza, S.S.P. Parkin) s-a inventat un sistem numit VANA (robina) de SPIN, care permite controlul independent al magnetizarii astfel; se folosesc materiale magnetice cu coercivitate diferita intr-o arhitectura multstrat HARD-SOFT



material magnetic moale: magnetizare agustabila printr-un camp magnetic extern
 strat de separare nemagnetic
 material magnetic dur \Rightarrow magnetizarea FIXA !!!
 stabila

Magnetizarea statului magnetic poate "urma" cu fidelitate variabile unui camp magnetic extern atat ca si orientare cat si ca si amplitudine. - 12

ex: un camp extern rotitor produce rotatia cu unghiul θ a magnetizării \vec{M}_2

Rezistența electrică a sistemului, privit ca sistem "polarnu" - "analizor" va fi:

$$R = \frac{R_p + R_{AP}}{2} + \frac{R_p - R_{AP}}{2} \cos \theta$$

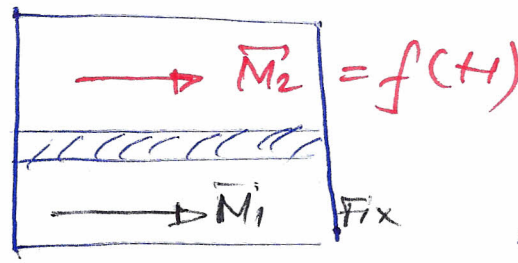
$$\theta = \angle(\vec{M}_1, \vec{M}_2)$$

sistemul se comporta astfel ca un "rotinet" pentru curentul electric care il traverseaza

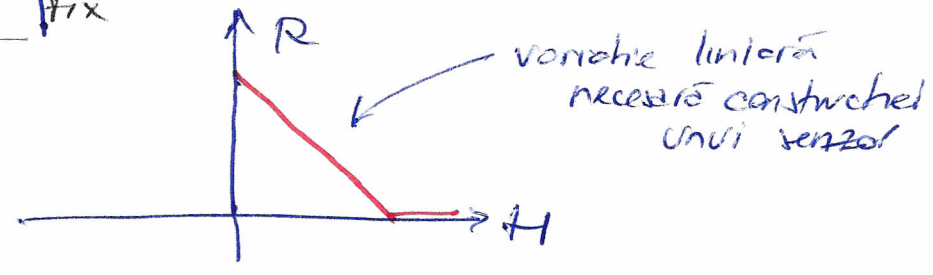
Acest efect sta la baza unor senzori de pozitie unghiulara, daca pe pozitia in rotatie a carei pozitie dorim sa o determinam fixam un magnet permanent al cuiu camp magnetic va produce rotatia magnetizării \vec{M}_2 din elementul GMR. Acest tip de senzor a fost implementat de catre SIEMENS in sistemele ABS pt BMW, etc inca din anul 1996.

GMR si capete de lectura in hard-disk-uri

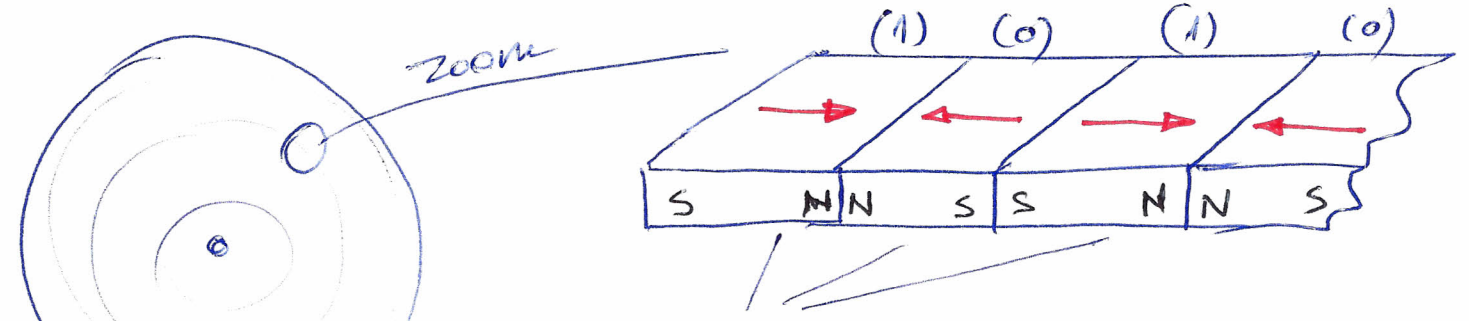
Controlul magnetizării \vec{M}_2 in arhitectura unui sistem GMR de tip HARD-SOFT printr-un camp magnetic extern \vec{H} in contextul in care \vec{M}_1 ramane fixa poate fi folosit pt. realizarea oricarii tip de alt senzor de Camp magnetic.



$\Rightarrow R = R(H)$

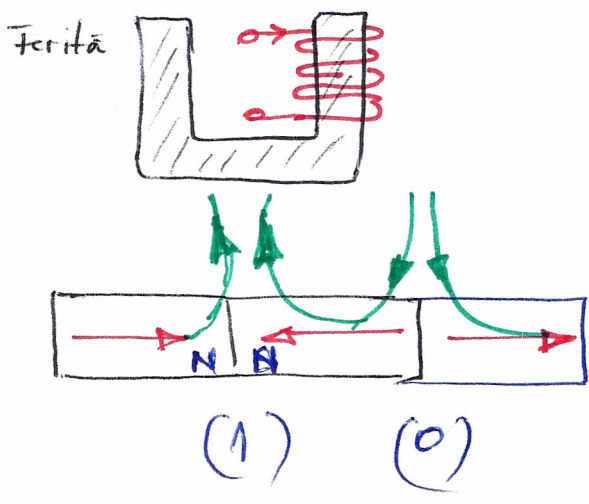


Hard-disk



sectoare conținând domenii
 Cu magnetizarea orientată
 opuse pt. codarea informației
 în mod binar (0) (1)
 Corespunzător celor 2 orientări,

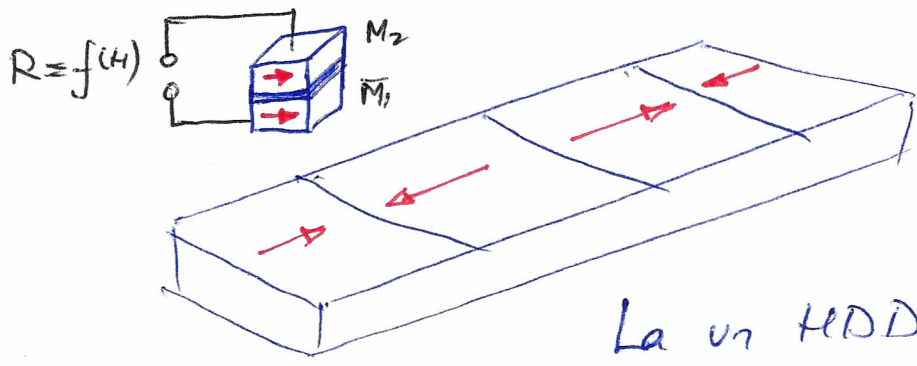
Inițial, pt citirea informației de pe sector se foloseau
 Capete de lectură inductivă, bazate pe fenomenul de
 Inducție electromagnetică (analog casetofon, magnetofon
 @ are cablu banda magnetică)



În bobina capului inductiv se
 inducea un curent al cărui semn
 depinde de orientarea câmpului
 magnetic emergent în zona de
 separare între 2 bari
 (V. fig). Aceste capete
 inductive erau mari ca și volum
 și limitau dimensiunea minimă a
 bitului de memorie pe disc...

Distribuirea acestui tip de senzor inductiv cu un
 Senzor magnetorezistiv care poate fi structurat extensiv de
 mic prin tehnici litografice specifice microelectronicii (de tipul
 celor folosite pt. realizarea circuitelor integrate) au condus la
 o crestere semnificativa a densitatii de informatie care a
 putut fi stocata magnetic pe o suprafata data. Aceasta a
 permis realizarea de suporturi hard-disk de densitate mare
 ($Tb/inch^2$). [HDD = high density hard disk]

cap lectura GMR

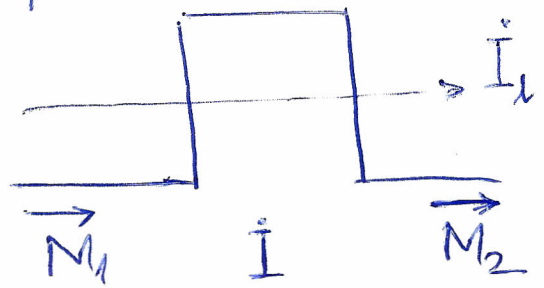


La un HDD cu o densitate de
 $1 Tb/inch^2$ dimensiunea laterala a capului
 de lectura GMR este de 20 nm.
 (Hitachi GST)

3) Magnetorezistenta tunel TMR

Daca intr-un sistem de tip VANA DE SPIN stratul
 de separare nemagnetica dintre cele 2 straturi magnetice
 este izolator, si daca grosimea acestuia este suficient
 de mica ($\sim 10 \text{ \AA}$) electronii vor putea traversa prin
 efect tunel.

Efectul de tip vana de
 spin



$$\frac{AR}{R_0} = f(\theta) \text{ va } \neq$$

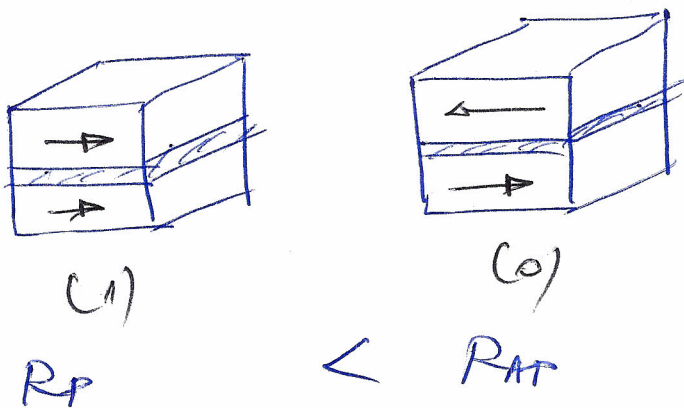
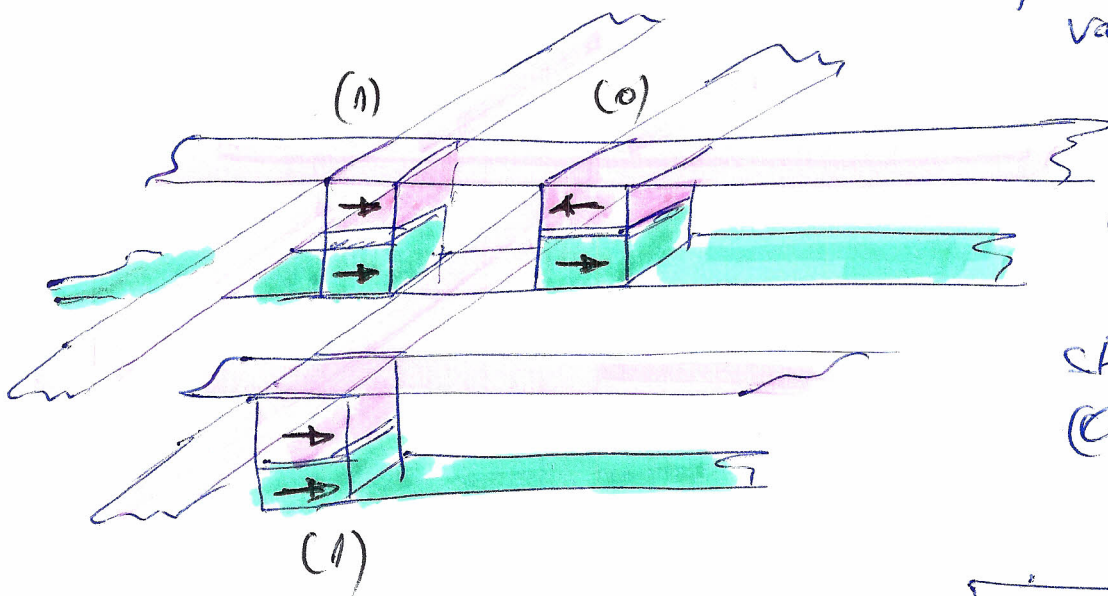
mai mare cu cel puțin
 un ordin de marime fata

de sistemele de tip GMR datorită dependenței - 15-
curentului tunel de spinul electronilor și de orientarea
relativă a magnetizării statorilor \vec{M}_1 și \vec{M}_2 .

Cu un raport zonal-geomot net superior se pot
realiza aplicații similare celor bazate pe efectul GMR:
senzori de câmp, busole, etc.

În plus, fenomenul de magnetorezistență tunel
sau TMR = "tunnel magnetoresistance" este la baza unor
noi generații de memorii magnetice cu acces aleator
non-volatile (MRAM). Acestea sunt constituite
dintr-un aranjament matricial de structuri de tip
joncțiune tunel magnetică.

Fiecare joncțiune va
putea stoca, prin
valoarea rezistenței
sale electrice
dependente de
orientarea \vec{M}_1 și
 \vec{M}_2 una dintre
stările binare
(0) sau (1)

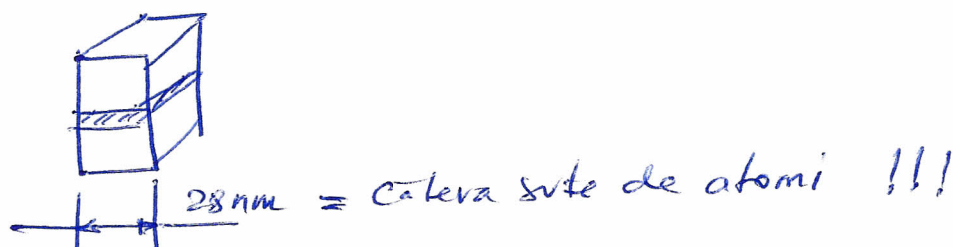


$$TMR = \frac{R_{Ap} - R_p}{R_p}$$

poate atinge valori
de pînă la 1000%
la temperatura
camerei.

Informația stocată magnetic este nonvolatilă, spre deosebire de memorile clasice de tip DRAM, SDRAM pe baza de semiconductori care necesită reînscăpșurare periodică (refresh) cu consum energetic semnificativ. Teoretic, timpul de retenție a informației stocate magnetic este de minimum 10 ani pt. sistemele deja comercializate (Motorola, NVE, EVER SPIN)

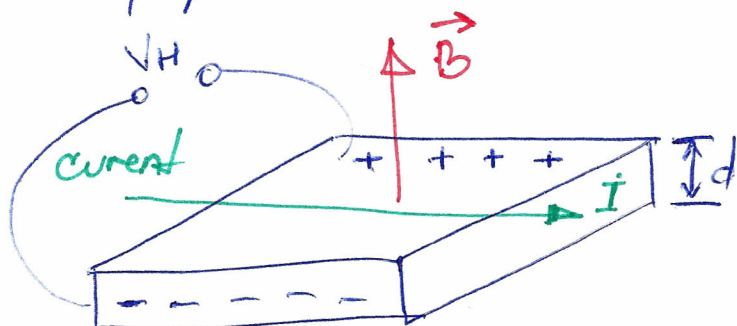
↳ lider mondial în producția de memorii MRAM
(2019, 1Gb tehnologie 28nm = dimensiunea laterală a joncțiunii torze)



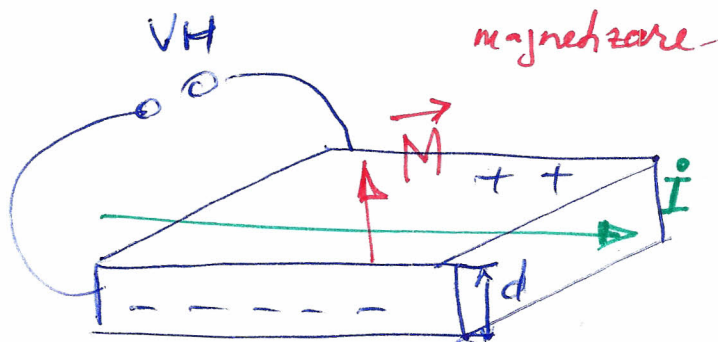
Tehnologia devine scalabilă cu cea CMOS (<10nm).

h) Efectul Hall anomal și Efectul Hall de spin

Efectul Hall anomal este analog efectului Hall clasic (vezi efecte magnetogalvanice) doar că apare în materiale magnetice (feromagnetice) care datorită magnetizării nu necesită aplicarea unui câmp magnetic perpendicular.



⇒ V_H
efect Hall clasic



⇒ V_H
efect Hall anomal

În plus, tensiunea Hall transversală în efectul -17 Hall anomal este cu ordine de mărime mai mare decât cea din efectul Hall normal.

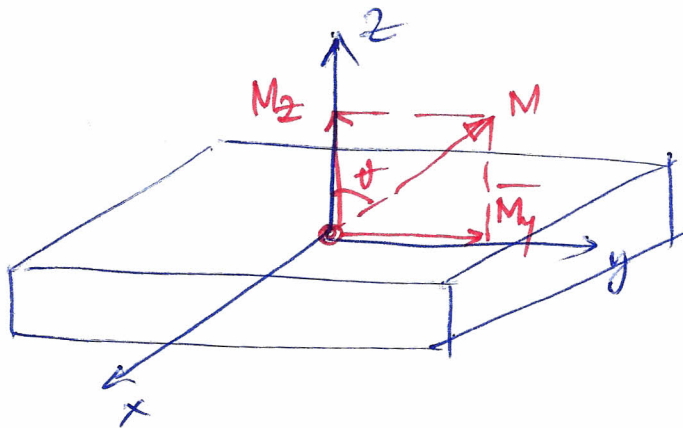
Am demonstrat la efectul Hall f-plate că:

$$V_H = R_H \frac{I B_z}{d}$$

Prin analogie:

$$V_H^{ANE} = R_S I \frac{\mu_0 M_z}{d}$$

componenta pe
axa oz a
magnetizării
(perpendiculară
pe banda
magnetică)



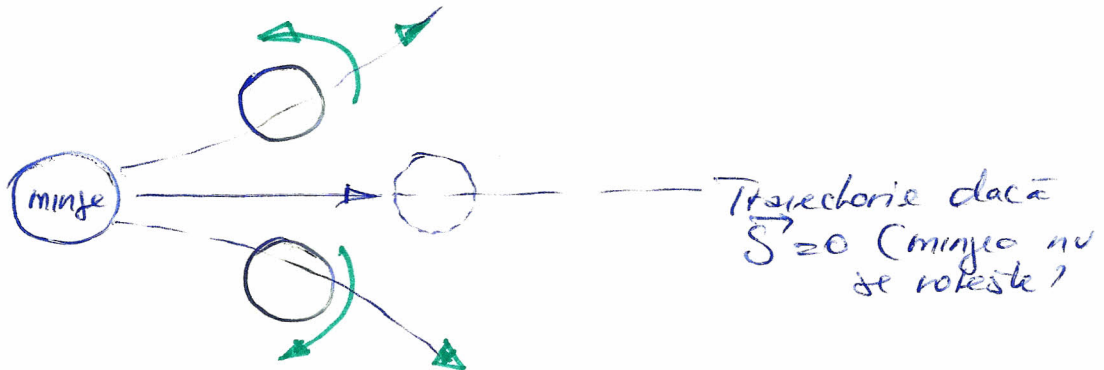
Faptul că semnalul V_H^{ANE} este invers proporțional cu grosimea benzii este extrem de util. Exact la fel cum un senzor Hall clasic este folosit pt măsurarea unui câmp magnetic B , efectul Hall anomal poate fi utilizat pentru determinarea cu precizie a magnetizării $\vec{M} \Rightarrow$ aparate de tip magnetometru a căror ~~se~~ sensibilitate crește cu descrescerea grosimii materialelor, total atipic față de magnetometrele standard al căror semnal depinde proporțional de volumul (grosimea) probei magnetice măsurate.

Efectul Hall de spin

(18)

Este analogul cuantic al efectului Magnus din mecanică

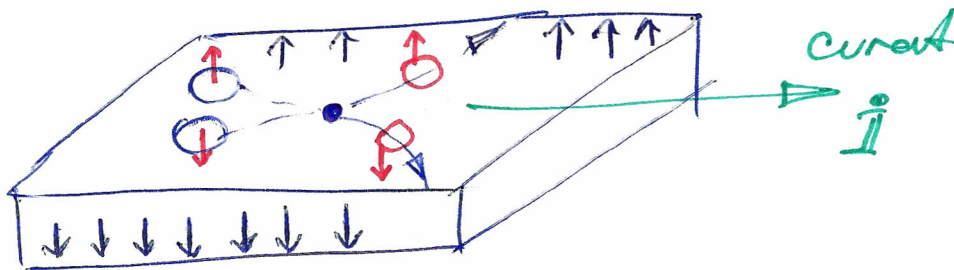
FOTBAL



Trajectorie dacă $\vec{S} = 0$ (mingea nu se rotește?)

trajectorii curbate în funcție de direcția de rotație (spin $\vec{S} \neq 0$) a mingii.

Pe baza unor considerații cuantice complexe care implică interacțiunea spin-orbită, se poate demonstra că dacă un electron se mișcă pe suprafață, în funcție de spinul său \uparrow sau \downarrow , va fi deflexat pe o direcție diferită.



Aceasta va conduce la o separare și acumulare de spin transversală direcției de circulație a unui curent, asemenea tensiunii Hall în efectul Hall normal. Efectul se numește efect Hall de spin.

Dacă materialul prin care curgă curentul este magnetic, numărul de electroni cu spin \uparrow și cel cu spin \downarrow este diferit

In acest caz, transversal va apare și
un comp electric de tip Hall, măsurabil, întrucât
 $N_A \neq N_D$.

(19)

Ca și celelalte efecte magnetocalorice dependente
sau nu de spin (Hall, AHE) și efectul Hall de spin
stă la baza unor noi generații de aplicații de tip
senzori și stocare nonvolatilă a informației cu eficiență
energetică ridicată și dimensiuni mici.