

# Modellazione e simulazione di nano-oscillatori spintronici comandati in corrente

Corso di Laurea in  
Ingegneria Elettrica

Tesi in  
Elettrotecnica

Candidato: Daniele Olivieri, matr. N42000902

Relatore: Prof. Massimiliano d'Aquino

Università degli Studi di Napoli Federico II

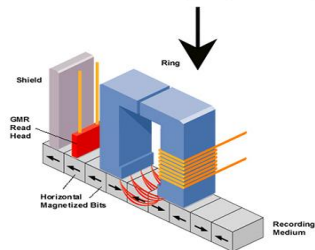
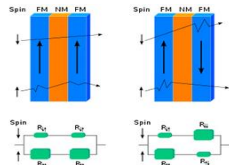
25 maggio 2023



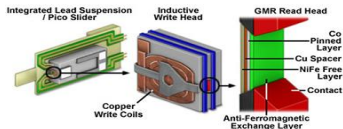
# Introduzione ai dispositivi spintronici



$$GMR = \frac{R_{\uparrow\downarrow} - R_{\uparrow\uparrow}}{R_{\uparrow\uparrow}}$$

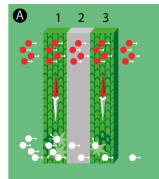
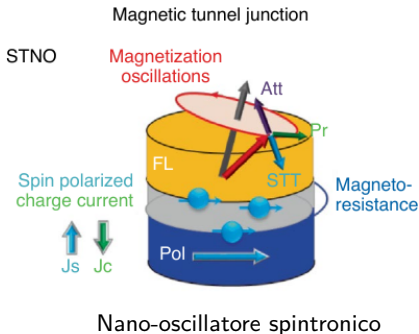


## GMR Head

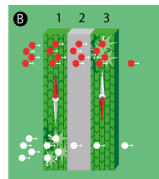


# Introduzione alla Magnetoresistenza

- Magnetoresistenza anisotropica (AMR), scoperta da Lord Kelvin nel 1856.
- Magnetoresistenza Tunnel (TMR), scoperta da Michel Jullière nel 1975.
- Magnetoresistenza Gigante (GMR), scoperta da Albert Fert and Peter Grünberg nel 1988.



Magnetizzazione parallela, bassa resistenza.



Magnetizzazione antiparallela, alta resistenza.



# Modello magnetico e termodinamico

Modello della Magnetostatica, equazioni di Maxwell:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 ,$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_{\text{lib}} ,$$

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

$$\vec{H} = \vec{H}_a + \vec{H}_m .$$

Energia libera di Gibbs ed Helmholtz nei materiali magnetizzati:

$$G = F(\vec{M}dV, T) - \mu_0 \vec{H}_a \cdot \vec{M}dV ,$$

$$F = U - TS .$$



# Minimizzazione dell'energia libera

Le interazioni di scambio, di anisotropia, l'interazione magnetostatica e quella con il campo esterno; imponendo l'annullamento della variazione prima della somma dei relativi termini di energia libera, si determinano i minimi di questo funzionale, che corrispondono agli equilibri (metastabili), condizione di minimo del sistema.

Introducendo il campo efficace:

$$\vec{H}_{\text{eff}} = \frac{2}{\mu_0 M_s} \nabla \cdot (A \nabla \vec{m}) - \frac{1}{\mu_0 M_s} \frac{\partial f_{\text{an}}}{\partial \vec{m}} + \vec{H}_m + \vec{H}_a ,$$
$$\begin{cases} \mu_0 M_s \vec{m} \times \vec{H}_{\text{eff}} = 0 , \\ \left. \frac{\partial \vec{m}}{\partial \vec{n}} \right|_{\partial \Omega} = 0 . \end{cases}$$

Per lo studio della dinamica si analizza invece l'equazione di *Landau-Lifshitz-Gilbert*:

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = -\gamma \vec{M} \times \vec{H}_{\text{eff}} + \frac{\alpha}{M_s} \vec{M} \times \frac{\partial \vec{M}}{\partial t} .$$

Il primo termine rappresenta la coppia dovuta alla precessione intorno al campo magnetico, il secondo rappresenta la coppia dissipativa.



# Impostazione del modello fisico su MATLAB

L'equazione LLG con l'aggiunta del termine dovuto allo spin-transfer torque (Slonczewski, 1996), per un nano-oscillatore spintronico con free layer di sezione ellittica  $130 \times 70 \text{ nm}^2$  e spessore  $3 \text{ nm}$ , diventa una ODE. È stata simulata in MATLAB e risolta ripetutamente applicando l'algoritmo *ode45* e considerando diverse condizioni di funzionamento del dispositivo.

```
% Perturbative LLG
```

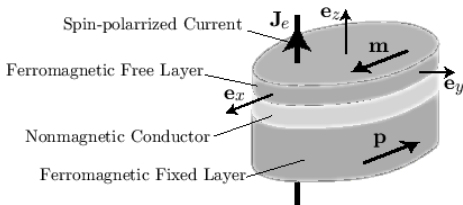
```
LLGprime=@(t,m) - cross(m,(heff(m,t))) - alpha*cross(m,cross(m,heff(m,t))) + beta(t)*cross(m,cross(m,p));
```

```
% LLG integration
```

```
[t,m]=ode45(LLGprime,[0 t_fin],[0.99 sqrt(1-0.99^2) 0],options)
```

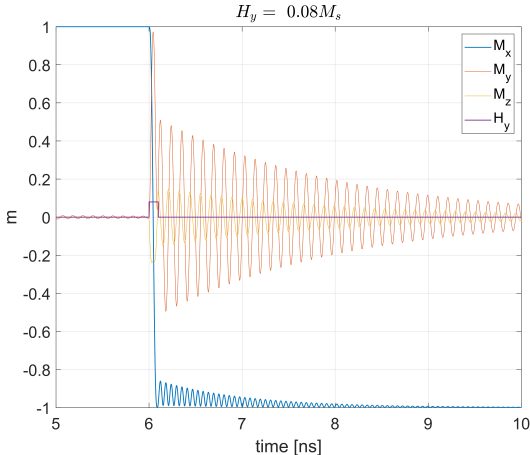
$$\text{LLG: } \frac{d\vec{m}}{dt} = -\vec{m} \times \vec{h}_{\text{eff}} - \alpha \vec{m} \times (\vec{m} \times \vec{h}_{\text{eff}}) - \beta \vec{m} \times (\vec{m} \times \vec{p}),$$

dove  $\beta = i/i_S$ .



# Precessional switching mediante campo magnetico esterno

Mediante l'applicazione di un campo esterno, per un intervallo di tempo di 0.1 ns, è stata simulata l'inversione di direzione della magnetizzazione. L'intervallo di tempo dell'impulso deve essere scelto in maniera molto accurata altrimenti lo switching diventa quasi-random.

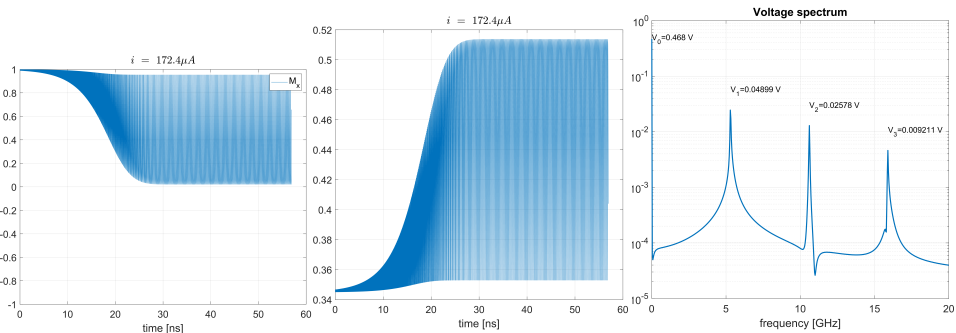


Componenti del vettore magnetizzazione.



# Oscillazione stazionaria con corrente polarizzata

Secondo la teoria di Slonczewski è possibile indurre la commutazione della magnetizzazione mediante una corrente iniettata nella spin-valve. Si è raggiunta in questa configurazione una oscillazione permanente della magnetizzazione.



Componente x del vettore di magnetizzazione

Aumento di tensione misurato ai capi del dispositivo

Analisi spettrale mediante FFT del segnale di tensione

La variazione di resistenza è proporzionale al prodotto scalare tra il vettore di magnetizzazione del free layer e il vettore polarizzante. Per questo motivo con una corrente costante è possibile misurare la variazione di resistenza mediante la variazione di tensione.





# Switching mediante corrente polarizzata

Scansionando il codice QR è possibile visualizzare un'animazione che mostra lo switching comandato in corrente della direzione della magnetizzazione.

