

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

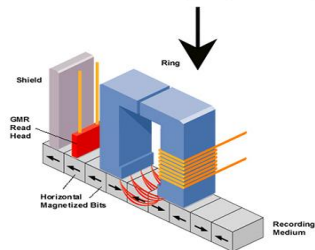
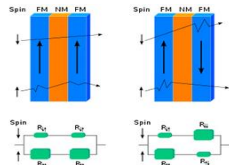
25 maggio 2023



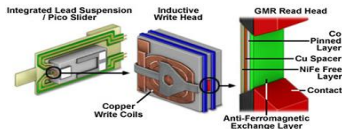
Introduzione ai dispositivi spintronici



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



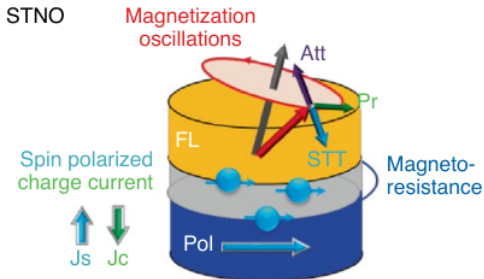
GMR Head



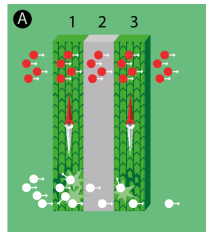
Introduzione alla Magnetoresistenza

- 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.

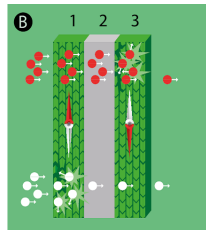
Magnetic tunnel junction



Nano-oscillatore spintronico



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 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
```

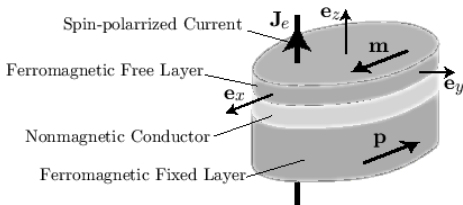
```
LLGprime=@(t,m) - cross(m,(heff(m,t))) - alpha*cross(m,cross(m,heff(m,t))) + beta(t)*cross(m,cross(m,p));
```

```
% LLG integration
```

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

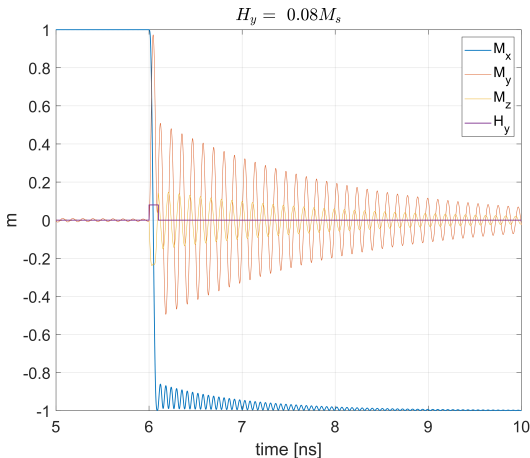
$$\text{LLG: } \frac{d\vec{m}}{dt} = -\vec{m} \times \vec{h}_{\text{eff}} - \alpha \vec{m} \times (\vec{m} \times \vec{h}_{\text{eff}}) - \beta \vec{m} \times (\vec{m} \times \vec{p}),$$

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.

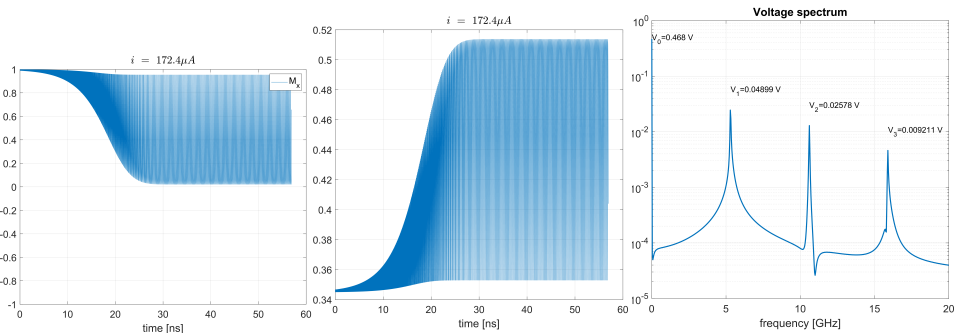


Componenti del vettore magnetizzazione.



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.

