

Modellazione e simulazione di nano-oscillatori spintronici comandati in corrente

Tesi di Laurea
in
Elettrotecnica

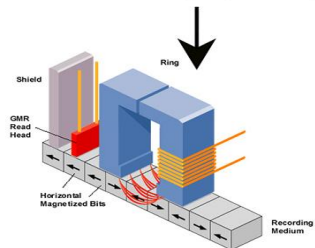
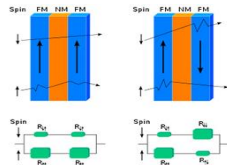
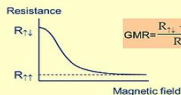
Daniele Olivieri
Massimiliano d'Aquino

Università di Napoli Federico II

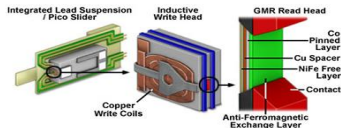
25 maggio 2023



Introduzione ai dispositivi spintronici



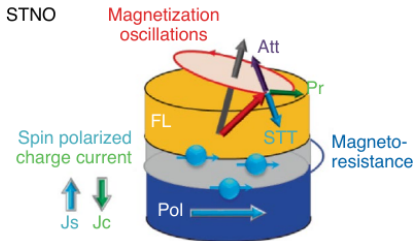
GMR Head



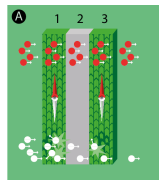
Introduzione alla Magnetoresistenza

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

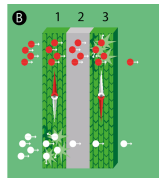
Magnetic tunnel junction



Oscillatore micromagnetico



Magnetizzazione parallela



Magnetizzazione antiparallela



Modello magnetico e termodinamico

Modello magnetico 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, i fenomeni di anisotropia, l'interazione magnetostatica nel dominio e l'interazione con il campo esterno; la somma di queste grandezze è stata differenziata per trovare la condizione di minimo per l'energia libera del sistema.

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

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

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



Impostazione del modello fisico su MATLAB

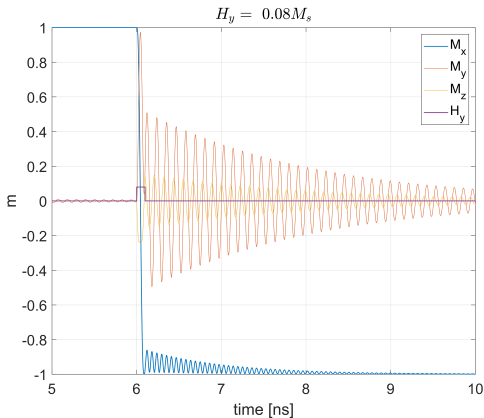
La LLG è stata definita in MATLAB e risolta ripetutamente applicando l'algoritmo *ode45* e considerando diverse condizioni di funzionamento del dispositivo.

```
% 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);
```



Commutazione precessionale

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.

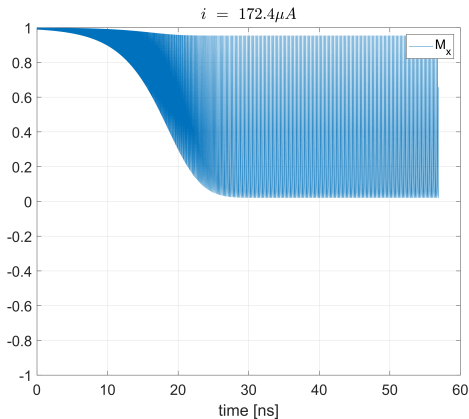


Componenti del vettore magnetizzazione.



Oscillazione stazionaria con corrente polarizzata

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



Componente x del vettore di magnetizzazione



Commutazione con corrente polarizzata

Scansionando il codice QR è possibile visualizzare un'animazione che mostra la commutazione completa della direzione della magnetizzazione.

