

# STUDIO DEI MODI ECCITATI IN GIUNZIONI MAGNETICHE AD EFFETTO TUNNEL CON ANISOTROPIA PERPENDICOLARE

*A. Meo<sup>1</sup>, D. Rodrigues<sup>1</sup>, A. Grimaldi<sup>1</sup>, V. Puliafito<sup>1</sup>, A. Giordano<sup>2</sup>, R. Tomasello<sup>1</sup>, G. Finocchio<sup>3</sup>, M. Carpentieri<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione Politecnico di Bari, Bari

<sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Messina, Messina

<sup>3</sup> Dipartimento di Scienze Matematiche e Informatiche, Scienze Fisiche e Scienze della Terra, Università degli Studi di Messina, Messina

Le giunzioni magnetiche ad effetto tunnel (MTJ) con anisotropia magnetica perpendicolare (PMA) rappresentano elementi chiave per applicazioni spintroniche avanzate, come memorie non volatili, sensori magnetici e nano-oscillatori. In queste strutture di scala nanometrica, la risonanza ferromagnetica indotta da effetto di spin-torque (ST-FMR) consente di mettere in evidenza i modi di eccitazione delle onde di spin all'interno dei sottili strati magnetici che compongono le MTJ, fornendo indicazioni essenziali per ottimizzare materiali e prestazioni di tali dispositivi.

Nel nostro lavoro [1] si è studiata una MTJ perpendicolare di dimensioni nel piano di  $65 \times 30 \text{ nm}^2$  in cui lo strato di riferimento (RL) è costituito da un sintetico antiferromagnete (SAF), una struttura in cui due strati ferromagnetici sono accoppiati tramite l'interazione di scambio di Ruderman–Kittel–Kasuya–Yosida (RKKY) mediata da un sottile strato metallico non magnetico. Una rappresentazione schematica del sistema è presentata in Figura 1(a). Lo studio si avvale sia di misure sperimentali e di simulazioni numeriche.

Sperimentalmente, l'indagine ST-FMR viene condotta applicando una corrente microonde variabile tra 2 e 26 GHz e un campo esterno perpendicolare, rilevando la tensione rettificata generata dall'effetto diodo spintronico (STD) [2]. In configurazione antiparallela della MTJ, in cui FL e strato superiore del SAF sono allineati antiferromagneticamente, per campi esterni maggiori di 220 mT, emergono due modi di risonanza ben distinti: I) un modo la cui frequenza aumenta al crescere del campo, II) un modo la cui frequenza si sposta verso frequenze inferiori.

Per comprendere in dettaglio il comportamento osservato, sono state effettuate simulazioni micromagnetiche con il codice nativo CUDA sviluppato all'interno del gruppo, Petaspin [3], basate sull'equazione di Landau-Lifshitz-Gilbert inclusiva del termine di spin-torque, comprendente anche l'effetto di back-torque sullo strato superiore del SAF, in contatto con la barriera di tunnel, dovuto alla riflessione degli elettroni all'interfaccia con lo strato libero (FL). Il SAF è descritto tramite un termine di accoppiamento antiferromagnetico interstrato (IEC) tra gli strati ferromagnetici componenti il SAF. Le curve di dispersione della frequenza di risonanza in funzione del campo perpendicolare applicato ottenute numericamente riproducono qualitativamente e quantitativamente quelle sperimentali (un esempio è mostrato in Figura 1(b)). Le simulazioni permettono di assegnare ciascun modo ad uno strato magnetico (I=FL, II=RL), di determinare un'inversione di polarità del segnale rettificato dovuta al back-torque e di determinare i profili spaziali delle oscillazioni. Il fatto che i modi siano caratterizzati da segnali rettificati di polarità opposta, con una separazione in frequenza di alcuni GHz, tunabile tramite il campo esterno, rende il sistema un ottimo candidato per rivelatori microonde dual-band. Inoltre, dal momento che la forza di IEC

determina l'ampiezza e la frequenza del modo dello strato superiore del SAF, ST-FMR diventa uno strumento ideale per caratterizzare il l'accoppiamento in queste strutture.

Infine, si è investigato anche l'effetto di un campo magnetico nel piano del dispositivo, trovando che è possibile incrementare di circa due ordini di grandezza l'efficienza di rettificazione rispetto al caso perpendicolare. L'analisi mostra come il segnale rettificato massimo si ottenga quando la MTJ si trova in una configurazione ibrida dovuta al campo esterno, in cui il FL ha magnetizzazione nel piano e il SAF fuori piano.

In conclusione, il nostro lavoro mostra che quando lo strato di riferimento di una MTJ perpendicolare è costituito da un sintetico antiferromagnete (SAF), si hanno oscillazioni sia nel FL che nel RL della MTJ, aprendo la possibilità di realizzare rivelatori microonde dual-band con risposta selettiva nelle bande X (8–12 GHz) e K<sub>u</sub> (12–18 GHz), di grande interesse per le telecomunicazioni satellitari.

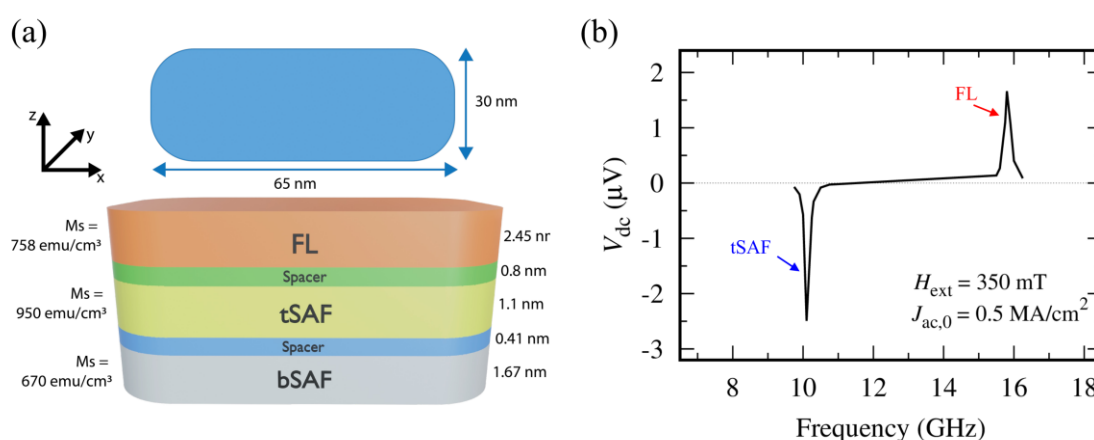


Figura 1. a) Rappresentazione schematica della giunzione magnetica ad effetto tunnel investigata. b) Andamento della tensione di output di rettificazione generata per effetto diodo spintronico ( $V_{dc}$ ) in funzione della frequenza della corrente AC per un campo perpendicolare di 350 mT. La figura mostra chiaramente la polarità opposta che caratterizza i modi dello strato libero (FL) e dello strato superiore del SAF (tSAF).

- [1] A. Meo, C. Sha, E. Darwin, R. Tomasello, M. Carpentieri, I. N. Krivorotov, and G. Finocchio, *Spin-wave eigenmodes in nanoscale magnetic tunnel junctions with perpendicular magnetic anisotropy*, Phys Rev Appl **23**, 034086 (2025).
- [2] G. Finocchio, R. Tomasello, B. Fang, A. Giordano, V. Puliafito, M. Carpentieri, and Z. Zeng, *Perspectives on spintronic diodes*, Appl Phys Lett **118**, 160502 (2021).
- [3] A. Giordano, G. Finocchio, L. Torres, M. Carpentieri, and B. Azzerboni, *Semi-Implicit Integration Scheme for Landau–Lifshitz–Gilbert–Slonczewski Equation*, J Appl Phys **111**, 07D112 (2012).