

SENSORE SPINTRONICO DI TEMPERATURA BASATO SU SKYRMIONI E GIUNZIONI MAGNETICHE AD EFFETTO TUNNEL

D. Rodrigues¹, M. Lianeris^{1, 1}, A. Meo¹, E. Raimondo², V. Puliafito¹, A. Giordano³, G. Finocchio⁴, R. Tomasello¹, M. Carpentieri¹

¹ Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione Politecnico di Bari, Bari

² Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma

³ Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Messina, Messina

⁴ Dipartimento di Scienze Matematiche e Informatiche, Scienze Fisiche e Scienze della Terra, Università degli Studi di Messina, Messina

La continua miniaturizzazione dei dispositivi nanoelettronici rende sempre più cruciale una gestione termica precisa ed efficiente, mettendo in luce i limiti dei sensori di temperatura convenzionali, i quali, specialmente su scale ridotte, sono spesso afflitti da risposte non lineari, bassa sensibilità e complesse procedure di calibrazione [1]. In questo scenario di crescente domanda per soluzioni innovative, la spintronica, una disciplina che sfrutta la proprietà intrinseca dello spin elettronico unitamente alla sua carica [2], emerge come un campo particolarmente fertile.

Nel nostro lavoro abbiamo proposto un sensore di temperatura su scala nanometrica basato su giunzioni magnetiche ad effetto tunnel (MTJ) che ospitano skyrmioni magnetici, rappresentato schematicamente in Figura 1(a). Queste ultime sono configurazioni di spin topologicamente protette, note per la loro robustezza, dimensioni nanometriche e dinamiche a basso consumo energetico [3]. Il principio di funzionamento del sensore proposto si fonda sulla dipendenza dalla temperatura della risposta risonante di questi skyrmioni, utilizzando l'effetto diodo spintronic (STD) [4]. Il comportamento del dispositivo è stato investigato approfonditamente tramite simulazioni micromagnetiche sistematiche, avvalendosi del codice nativo CUDA del gruppo, PETASPIN [5], e supportato da modelli analitici, includendo gli effetti della temperatura attraverso consolidate relazioni di scaling per i parametri magnetici del materiale.

Sono stati analizzati due principali design per lo strato libero (FL) della MTJ: uno a singolo strato libero (Single FL MTJ) e uno multistrato (Multilayer MTJ). Per il Single FL MTJ si è osservato che il raggio dello skyrmione mostra un aumento pronunciato con l'incremento della temperatura. Risultato fondamentale, sia l'ampiezza massima della tensione DC di rettificazione ottenuta per effetto diodo spintronic ($V_{dc_{max}}$) sia la frequenza di risonanza (ω_F) del modo di breathing esibiscono una chiara dipendenza lineare dalla temperatura nell'intervallo operativo studiato, mostrate in Figura 1(b). Pertanto, si hanno due meccanismi di rilevamento indipendenti ma complementari, con il dispositivo basato su skyrmione che dimostra una sensibilità termica significativamente superiore rispetto a una MTJ con magnetizzazione uniforme.

Il Multilayer MTJ è caratterizzata da picchi di V_{dc} più definiti, attribuibile a una superiore stabilità termica degli skyrmioni nella struttura multistrato. Questo si traduce in una capacità di rilevamento più accurata sia della frequenza di risonanza sia dell'ampiezza del picco. Anche in questa configurazione, la cruciale linearità della risposta di $V_{dc_{max}}$ e ω_F in funzione della temperatura è stata confermata, rafforzando la validità del metodo proposto.

Dal punto di vista delle applicazioni pratiche, i dispositivi proposti offrono vantaggi significativi, tra cui la compatibilità con i processi di fabbricazione CMOS standard, che ne

facilita l'integrazione diretta in sistemi su scala nanometrica, ad esempio per il monitoraggio locale della temperatura nelle unità di elaborazione centrale (CPU). Inoltre, il consumo di potenza è contenuto e l'autoriscaldamento per effetto Joule indotto dalla corrente AC applicata è risultato trascurabile rispetto all'intervallo di misurazione in considerazione.

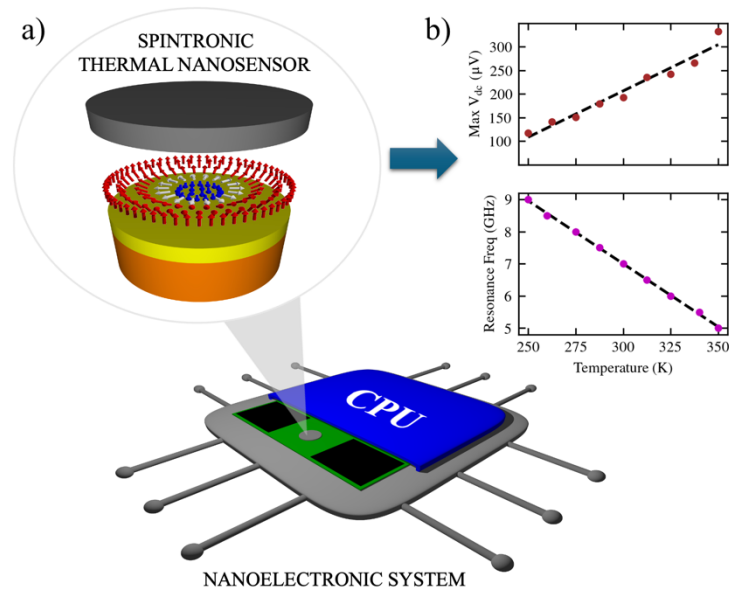


Figura 1: a) Rappresentazione schematica del dispositivo proposto, b) Andamento lineare dell'ampiezza massima della tensione di rettificazione ($V_{dc,max}$) e della frequenza di risonanza (ω_F) con la temperatura per il dispositivo Single FL MTJ.

- [1] N. V. S. R. Nalakurthi, I. Abimbola, T. Ahmed, I. Anton, K. Riaz, Q. Ibrahim, A. Banerjee, A. Tiwari, and S. Gharbia, *Challenges and Opportunities in Calibrating Low-Cost Environmental Sensors*, *Sensors* **24**, 3650 (2024).
- [2] B. Dieny et al., *Opportunities and challenges for spintronics in the microelectronics industry*, *Nat Electron* **3**, 446 (2020).
- [3] A. Soumyanarayanan et al., *Tunable room-temperature magnetic skyrmions in Ir/Fe/Co/Pt multilayers*, *Nat Mater* **16**, 898 (2017).
- [4] 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).
- [5] 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).