

Una porta logica riconfigurabile per pareti di dominio

Alessandro Smareglia

INTRODUZIONE

Oggigiorno la tecnologia dell'informazione fa un largo uso di dispositivi elettronici in cui lo stato logico di un sistema è determinato dalla presenza di carica. In passato lo spin dell'elettrone è stato trascurato dall'industria dell'elettronica, ma la scoperta del fenomeno della magnetoresistenza gigante (GMR) ha dato il via allo sviluppo della spintronica e di una nuova classe di dispositivi in cui lo stato logico, oltre che essere definito in base alla carica, è determinato dalla direzione della magnetizzazione. L'aggiunta di un nuovo livello su cui lavorare, lo spin, si traduce in un incremento delle prestazioni del dispositivo. I vantaggi

SIMULAZIONI NUMERICHE

Per verificare il comportamento della porta logica sono state effettuate diverse simulazioni attraverso il software¹ MUMAX³ [5,6]. La particolarità di questo programma è che si tratta di una soluzione GPU accelerated: cioè sfrutta l'elevato grado di parallelizzazione e l'elevata potenza di calcolo che le moderne schede grafiche offrono anche in ambito di un'utenza puramente consumer². Le simulazioni effettuate sono state fatte relativamente alle due porte AND e OR con uno o due ingressi applicati. In questo modo è stato possibile verificare che la porta AND si comporta

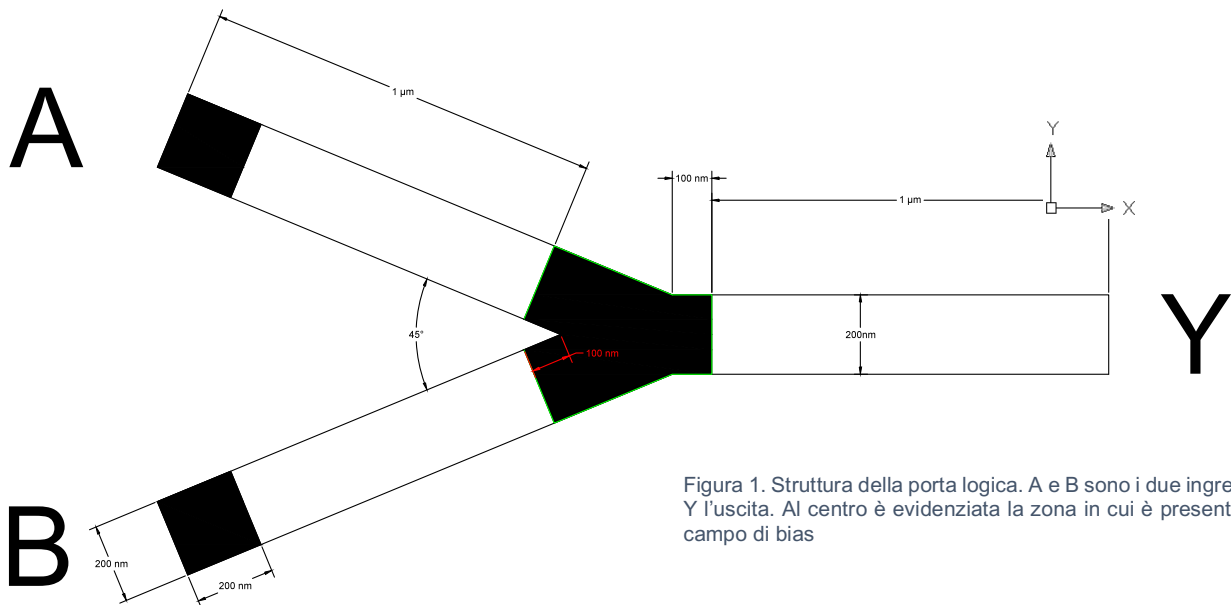


Figura 1. Struttura della porta logica. A e B sono i due ingressi Y l'uscita. Al centro è evidenziata la zona in cui è presente il campo di bias

spaziano da una maggior velocità nel trattamento delle informazioni, maggior scalabilità, minori consumi energetici, assenza di un numero massimo di cicli di scrittura e soprattutto la persistenza dell'informazione. Lo scopo di questo lavoro è analizzare attraverso simulazioni numeriche la dinamica della propagazione di un segnale attraverso una porta logica riconfigurabile. La funzione logica della porta può essere riprogrammata in base ad un campo di bias che può essere controllato localmente nella regione centrale del dispositivo [3]. A seconda del valore del campo applicato si ha una porta AND oppure una porta OR.

correttamente con un solo ingresso applicato. Le regioni di ingresso A e B sono state definite come quadrati di lato 200 nm.

Va ricordato che trattandosi di una nanostruttura l'anisotropia di forma gioca un ruolo fondamentale andando a definire quale direzione della magnetizzazione considerare. Nel caso in esame essendo la struttura estesa lungo l'asse x risulta naturale definire il valore logico 1 alla magnetizzazione orientata lungo il verso positivo dell'asse x e 0 a quella orientata nel verso negativo come indicato dagli assi in figura 1.

LA PORTA AND

Lo scopo di questo lavoro è stato verificare attraverso simulazioni con MuMax il funzionamento come porta logica AND quando la

¹ Il codice delle simulazioni, le e le gif animate sono liberamente disponibili in un repository github all'indirizzo: <https://github.com/teocrasto/SMRmumaxPolimi>

² La scheda grafica utilizzata è una NVIDIA GeForce GT 750M montata a bordo di un macbook pro 15".

struttura è immersa in un campo H di 155 Oe lungo l'asse x e il valore del campo H_{bias} nella zona centrale è di 70 Oe in direzione opposta al campo esterno.

Particolare attenzione va posta alla chiralità delle pareti di dominio che si vuole studiare. Due pareti con chiralità opposta non riescono a propagarsi correttamente fino all'uscita attraverso la struttura rimanendo bloccate poco prima della giunzione. Per risolvere questo problema, le due regioni A e B sono state inizializzate con una magnetizzazione che presenta un angolo di 5° rispetto all'asse x . Dalle simulazioni (figure 2 e 3) si nota come il segnale si propaghi soltanto quando si ha cooperazione fra i due ingressi. In questo modo le due pareti di dominio che si propagano lungo le braccia della struttura riescono ad unirsi e attraversare la struttura. Se invece viene applicato un solo ingresso la parete di dominio non riesce a propagarsi nella zona centrale rimanendo confinata sull'ingresso. Se definiamo la magnetizzazione come positiva quando è lungo il verso positivo dell'asse x allora possiamo costruire una tavola di verità per la nostra struttura e vedere che è analoga ad una porta logica AND

A	B	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

considerato il valore della magnetizzazione lungo l'asse x di tutto il dispositivo.

Il tempo di propagazione stimato per la porta AND è di 5ns. Nel caso di singolo ingresso è possibile notare un piccolo vortice che si propaga all'indietro lungo l'ingresso della porta.

LA PORTA OR

L'analisi e la verifica del comportamento della porta OR è del tutto analoga a quanto fatto per la porta AND. Il campo locale di bias, H_{bias} è stato impostato a 10 Oe. Le figure 4 e 5 illustrano l'evoluzione nel tempo della magnetizzazione. In questo modo anche una sola parete riesce a propagarsi all'interno del dispositivo. In questo caso si verifica un fenomeno molto interessante: è possibile assistere alla propagazione del segnale anche sull'altro ingresso senza però alcuna interferenza sul valore logico dell'uscita. I valori di output della porta logica sono riportati nella tavola di verità:

A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Il tempo di propagazione del segnale dall'ingresso all'uscita con due ingressi è stato stimato essere di 4.3ns, mentre con un solo ingresso risulta 3ns. È interessante notare come, nel caso di porta OR con

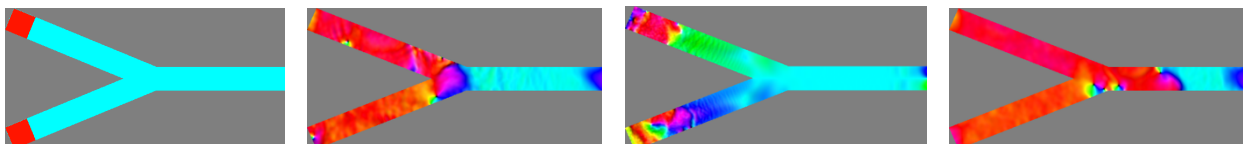


Figura 2. Propagazione in una porta AND di due segnali logici 1. Il rosso indica una magnetizzazione positiva lungo l'asse x , l'azzurro negativa.

È possibile fare una stima del ritardo di propagazione del segnale dall'ingresso all'uscita dalla porta e della velocità. Come riferimento per la velocità è stato considerato il valore della magnetizzazione nella zona centrale. Quando in

due ingressi applicati, rimanga confinata una parete di dominio in uno dei due bracci. Una possibile spiegazione è dovuta alla presenza dello spigolo della giunzione fra i due ingressi che blocca la parete.

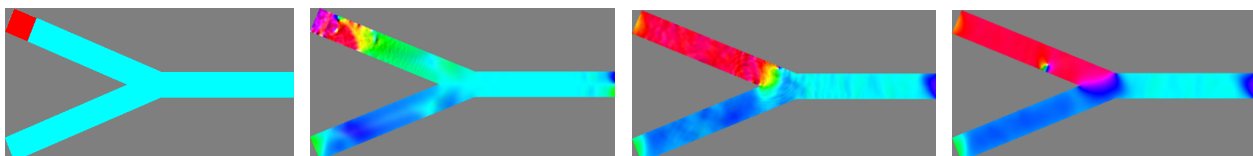


Figura 3. Propagazione in una porta AND di un segnale logico 1

questa regione, lungo l'asse x , verrà raggiunta la magnetizzazione di saturazione allora la parete di dominio avrà attraversato la regione. Per quanto riguarda il ritardo di propagazione invece si è

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Attraverso le sole porte logiche AND e OR non è possibile realizzare qualsiasi funzione logica: per fare ciò è necessario introdurre altri due elementi logici: la negazione e il fan-out. Attraverso

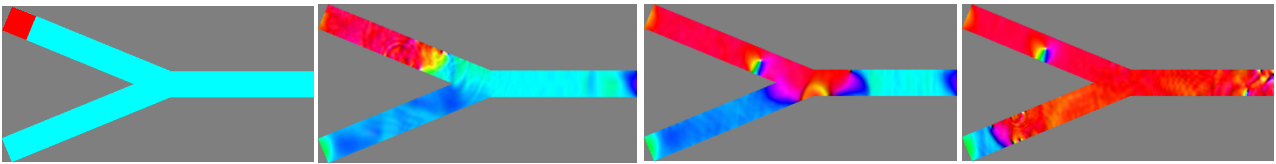


Figura 4. Propagazione in una porta OR di un segnale logico 1.

l'operazione di negazione è possibile realizzare le porte universali NOR/NAND e con queste realizzare ogni funzione logica. Recenti sviluppi in questa direzione hanno portato ad intere logiche magnetiche on chip [1] con addirittura la realizzazione di shift register [2].

Analogamente ad una rete logica è necessario un clock che sincronizzi e comunichi agli elementi combinatori se ritenere l'ingresso valido o meno. Come detto prima, abbiamo ricavato che la propagazione del segnale più lenta è quella attraverso una porta in configurazione AND. Questo influirà nel momento in cui si andrà a dimensionare il clock di una rete logica realizzata con questi dispositivi.

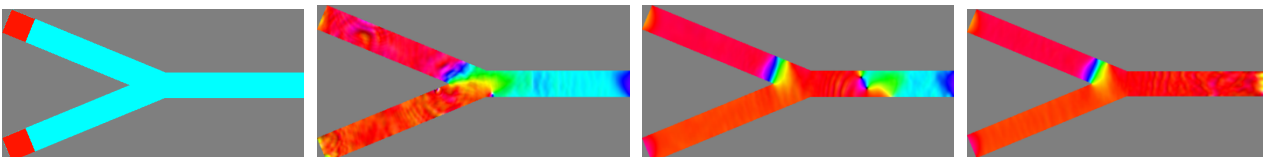


Figura 5. Propagazione in una porta OR di due segnali logici 1.

OSSERVAZIONI

Osservando attentamente le simulazioni è possibile notare anche un carattere ondulatorio nella propagazione della magnetizzazione come ad esempio riflessioni ed interferenza. Un piccolo esempio lo si può vedere nella figura 1c, ma forse il caso più emblematico risulta essere il seguente tratto dalla simulazione della porta OR. Si può

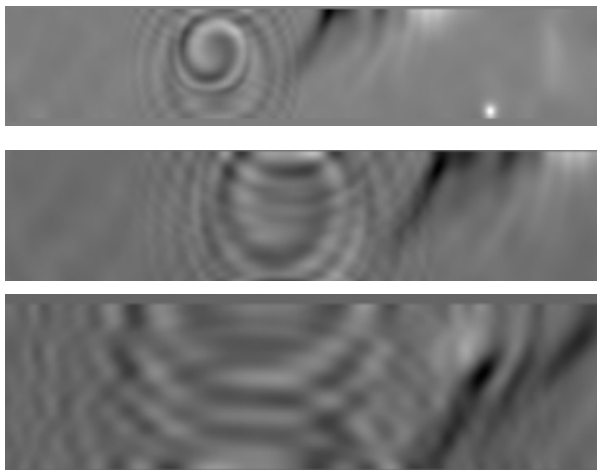


Figura 6. Collasso di due vortici e propagazione del magnone

notare come due vortici ruotino attorno ad un centro comune per poi collassare: si vede (figura 6) chiaramente che l'informazione sul collasso dei due vortici si propaga attraverso un fenomeno ondulatorio. Quella che stiamo osservando è un'onda di magnetizzazione ovvero un magnone. Vale anche la pena evidenziare come in figura si vede l'onda di magnetizzazione venire riflessa dai bordi del dispositivo, e dare luogo a fenomeni di interferenza. Rappresentare attraverso immagini stampate la dinamica di questi processi non è semplice, ma nel repository sono presenti delle animazioni illustrano l'evoluzione della magnetizzazione durante i vari passi delle simulazioni.

BIBLIOGRAFIA

- [1] D. A. Allwood *et al*, *Science* 309, 2005
- [2] D. A. Allwood *et al*, *Science* 296, 2001
- [3] E. Albisetti *et al*, *Nature Nanotechnology*, 2016
- [4] C. Murapaka *et al* *Nature Scientific Reports* 6:20130
- [5] A. Vansteenkiste, Mumax a new high performance micromagneti simulation tool
- [6] A. Vansteenkiste *et al*, *AIP Advances* 4, 107133 (2014)