



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione

TESI DI LAUREA TRIENNALE
IN
INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

Memorie Magnetiche Integrate

Relatore: Prof. Alessandro Paccagnella
Correlatore: Dott. Simone Gerardin

Laureando: Matteo Cherubin

ANNO ACCADEMICO 2011 / 2012

A mia mamma, che mi ha sempre
sostenuto in questi anni di studio.

Sommario

1 MEMORIE NON VOLATILI.....	- 1 -
1.1 Introduzione	- 1 -
1.2 Tipologie di memorizzazione.....	- 1 -
2 PROPRIETÀ MAGNETICHE DELLA MATERIA.....	- 9 -
2.1 Magnetizzazione della materia.....	- 9 -
2.2 Permeabilità magnetica e suscettività magnetica	- 10 -
2.3 Magnetizzazione delle sostanze	- 12 -
2.4 Equazioni generali della magnetostatica.....	- 13 -
2.5 Sostanze ferromagnetiche	- 14 -
3 MEMORIE MAGNETORESISTIVE (MRAM).....	- 17 -
3.1 Introduzione	- 17 -
3.1.1 Memorie magnetiche e Materiali Magnetoresistivi.....	- 17 -
3.1.2 Analisi di base di una MRAM.....	- 18 -
3.1.3 Metodi di scrittura.....	- 22 -
3.2 Considerazioni nello sviluppo delle MRAM	- 23 -
3.2.1 Architettura delle MRAM	- 23 -
3.2.2 Effetti dei materiali della MTJ riguardo lettura, performance e affidabilità delle MRAM	- 25 -
3.2.3 Memorie a campo di commutazione e Toggle MRAM.....	- 28 -
3.2.4 STT MRAM	- 38 -
3.2.4.1 Tecnologia di commutazione STT	- 38 -
3.2.4.2 Scalabilità e affidabilità delle celle di memoria a MTJ.....	- 40 -
3.2.4.3 Tecnologie per la produzione di STT-MRAM ad alta densità	- 43 -
3.3 MRAM attuali	- 47 -
4 CONCLUSIONI.....	- 57 -
5 BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	- 59 -

Introduzione

Le memorie non volatili (NVM) sono una particolare tipologia di memorie integrate che sono in grado di mantenere le informazioni anche quando non vengono alimentate.

Tra le NVM, nel passato hanno avuto una grande diffusione le memorie a Floating Gate (EPROM, EEPROM, Flash), ma poiché si è raggiunto un limite nella scalabilità di tali dispositivi, è stato necessario svilupparne di alternativi, ad esempio basati sull'utilizzo di nanocristalli (memorie a nanocristalli), di leghe di calcogenuri (memorie a cambiamento di fase), di materiali ferroelettrici (memorie ferroelettriche) o ferromagnetici (memorie magnetiche)

Tra le diverse tipologie di memorie non volatili, in questo elaborato vengono analizzate le memorie magnetiche ad accesso casuale (MRAM), che memorizzano le informazioni sotto forma di un campo magnetico.

Saranno descritte e confrontate tra loro, le diverse modalità di scrittura dei dati in tali memorie, passando dalla tecnica del campo di commutazione, alle Toggle MRAM, ed infine alle STT-MRAM.

È stata fatta inoltre una ricerca sulle tecniche di produzione di MRAM ad alta densità, e sulle principali memorie presenti attualmente in commercio, prodotte dalla compagnia Everspin Technologies.

1 MEMORIE NON VOLATILI

1.1 Introduzione

Le memorie non volatili (NVM) sono una particolare tipologia di memorie integrate che sono in grado di mantenere le informazioni anche quando non vengono alimentate.

I parametri tradizionali che permettono di valutare una memoria non volatile sono:

- Velocità;
- Consumo di potenza;
- Densità;
- Retention: l'abilità della cella di memoria di contenere il dato memorizzato per una quantità di tempo;
- Endurance (durezza): numero di cicli di programmazione/cancellazione che può essere supportato dalla cella di memoria prima di logorarsi.

1.2 Tipologie di memorizzazione

A seconda del principio fisico usato, si possono costruire vari tipi di NVM :

- Charge-Based Memories che sono realizzate con la struttura illustrata nella Figura 1. Tale struttura è simile ad un MOSFET standard, tranne che ha in più un elemento nel quale vengono immagazzinate le cariche elettriche. Tale elemento è situato tra il bulk di silicio e il Gate (che è chiamato Control Gate) , e può essere sia un Floating Gate di polisilicio, o un layer di nanocristalli, o uno strato di materiale dielettrico con alta densità di cattura delle cariche. Inoltre il

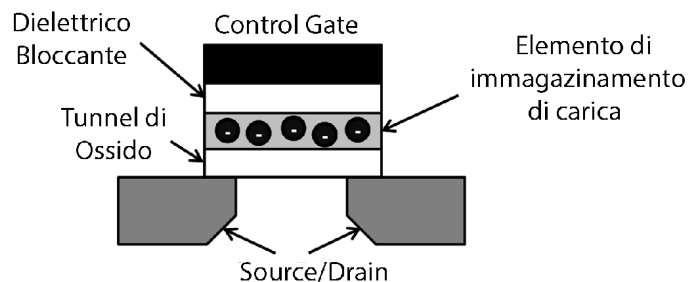


Figura 1:schema di una cella Charge-Based

dispositivo di immagazzinamento delle cariche è isolato dal Control Gate mediante un ossido di blocco, e dal bulk di Silicio da un tunnel di ossido.

Un Floating Gate MOSFET (FGMOS) consiste in uno standard MOS al quale è stato aggiunto il *Floating Gate*, isolato elettricamente da due strati di SiO₂, tra il substrato ed il *Control Gate*. Lo strato isolante di SiO₂ che separa il FG dal substrato deve essere sufficientemente sottile da permettere l'iniezione di cariche, mentre lo strato che lo separa dal *Control Gate* deve essere spesso a sufficienza da non consentire

la fuoriuscita di carica dal dispositivo. Il processo di iniezione delle cariche, in particolare, modifica la struttura del dispositivo.

Una limitazione delle celle a Floating Gate riguarda lo

spessore del tunnel di ossido che non si può ridurre al di sotto di 8 nm senza incorrere nelle correnti di perdita che compromettono la perdita delle informazioni contenute nel FGMOS. Tale fenomeno è uno dei più grandi inconvenienti del FGMOS, infatti i cammini conduttivi possono essere localizzati ovunque nel tunnel di ossido, portando alla scarica del Floating Gate. Per risolvere questi problemi il Floating Gate può essere rotto in tanti piccoli cristalli di silicio, isolati l'uno dall'altro (memorie a nanocristalli) o sostituito da uno strato di dielettrico con alta densità di cattura delle cariche elettriche. Variando la quantità di carica nel layer di memoria, il valore della tensione di soglia del transistor varia. La Fig. 3 mostra l'andamento della corrente di drain in funzione della tensione del transistor a Floating Gate. La curva a sinistra è caratteristica del transistor con carica netta positiva, o senza carica immagazzinata nel dispositivo di memorizzazione, e tale stato corrisponde all'operazione di cancellazione; la curva di destra invece è ottenuta con una carica netta negativa nell'elemento di memoria e corrisponde allo stato di memorizzazione. Lo stato della cella può essere letto polarizzando il Control-Gate ad una tensione fissa, con valore intermedio tra la tensione di

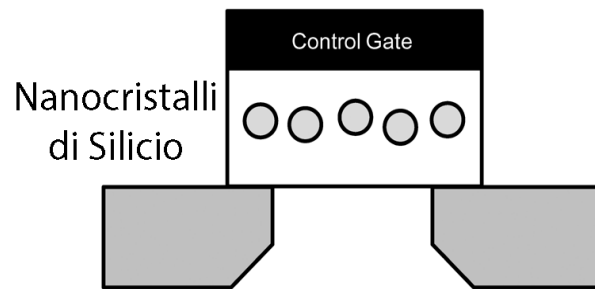


Figura 2: schema generale di una memoria a nanocristalli

programmazione e cancellazione, e confrontare la corrente di drain con quella di un MOSFET di riferimento: nello stato di cancellazione, ci sarà un sostanziale aumento di corrente, a differenza dello stato di programmazione nel quale la corrente di drain raggiunge valori trascurabili. La prima Erasable Programmable Read Only Memory (EPROM) basata su questi concetti, fu introdotta nel 1971; nel 1978 venne sviluppata la prima Electrically Erasable PROM (E²PROM), e nel 1984 ci furono i primi tentativi per la costruzione delle memorie NOR Flash, mentre l'architettura NAND fu introdotta più tardi.

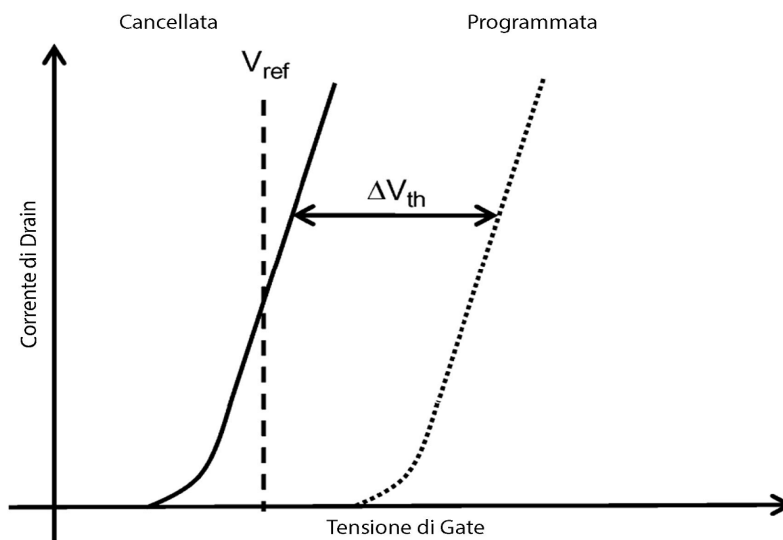


Figura 3

- Phase Change Memories (PCM) che sono un tipo di memoria non volatili, il cui materiale standard è una lega calcogenura composta da Germanio (Ge), Antimonio (Sb), Tellurio (Te) chiamata GST (composizione $Ge_2Sb_2Te_5$), in grado di cambiare fase (cristallina o amorfa) in modo reversibile e controllato per mezzo di una corrente di programmazione che attraversa la cella di memoria e che, riscaldando in modo opportuno il GST, induce il cambiamento di fase. L'utilizzo delle due differenti fasi in una memoria elettronica digitale nasce dall'osservazione sperimentale di una bassa resistenza elettrica per la fase cristallina (1 logico) e di un'elevata resistenza elettrica per quella amorfa (0 logico).

Il grande potenziale di questa tecnologia è dovuto al fatto che questi materiali mantengono le loro proprietà anche per volumi molto piccoli ($< 10\text{nm}$) quindi si possono realizzare celle di memoria sempre più piccole. Una tipica cella PCM è mostrata in Fig.4 ed è costituita da due elettrodi, un elemento riscaldante, e uno strato di GST, ma il volume effettivamente programmabile è solo una piccola parte dello strato calcogenuro.

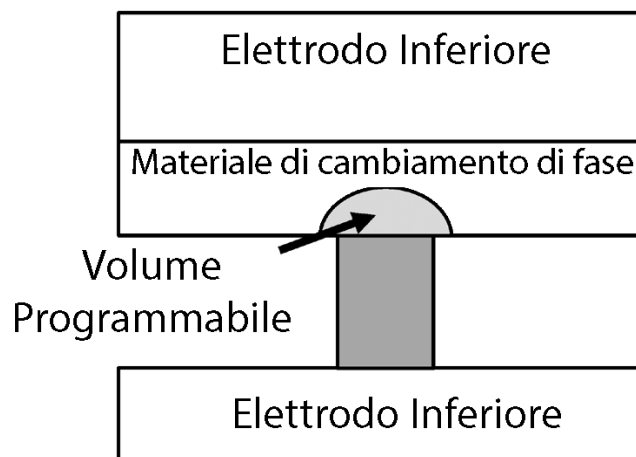


Figura 4: schema generale di una memoria a cambiamento di fase

Consideriamo la transizione dallo stato SET allo stato RESET: nello stato cristallino, quindi nello stato SET, la resistenza è bassa, e la cella di memoria sarà pilotata da una corrente elevata che fonde il volume programmabile. Dopo aver eccitato la struttura atomica, la corrente (e quindi il riscaldamento) viene interrotta rapidamente, la parte di volume programmabile si raffredda velocemente e passa allo stato amorfo (RESET), perché le molecole non hanno tempo di ridisporsi nella struttura cristallina.

Consideriamo ora la transizione dallo stato RESET allo stato SET: nello stato RESET la resistenza è alta, quindi è necessaria una tensione elevata (almeno 10 volte la tensione di SET) per riscaldare e fondere la cella. Interviene però un fenomeno fisico chiamato “electronic switching” in favore della transizione RESET-SET. Infatti nell’incremento della tensione tra lo strato amorfo e il GST, sopra un certo valore di tensione, un’elevata corrente fluisce anche se il materiale è nello strato amorfo. Con questa corrente e il riscaldamento per Effetto joule, il passaggio allo stato SET è facilitato. Dopo che le molecole sono

in movimento, il volume programmabile è mantenuto sotto la temperatura di fusione e poi raffreddato, per dare al materiale il tempo necessario affinché le sue molecole si dispongano nella struttura cristallina. Si ha lo stesso effetto effettuando un'operazione di fusione del volume programmabile seguita da un raffreddamento lento.

- Ferroelectric Memories che si basano sulla proprietà dei materiali ferroelettrici di mantenere una polarizzazione permanente anche dopo la rimozione di un campo elettrico esterno; la direzione del campo elettrico può essere sfruttata come bit di memoria. Le RAM ferroelettriche immagazzinano i dati in un condensatore, che usa uno strato di materiale ferroelettrico come dielettrico. Sono l'influenza di una tensione applicata, il condensatore viene caricato mediante la polarizzazione delle celle di cristallo del dielettrico. L'effetto della polarizzazione ha due stati stabili quando la tensione viene rimossa, che sono definiti come "alto" e "basso", o, elettricamente come "1" e "0".

Ci sono più di 500 materiali che esibiscono proprietà ferroelettriche, ma solo gli ossidi sono interessanti da un punto di vista tecnologico, in quanto appartengono alla categoria dei cristalli di perovskite, la cui polarizzazione permanente deriva dal fatto che hanno solo due stati stabili a seconda delle posizioni degli atomi di Zn o Pb.

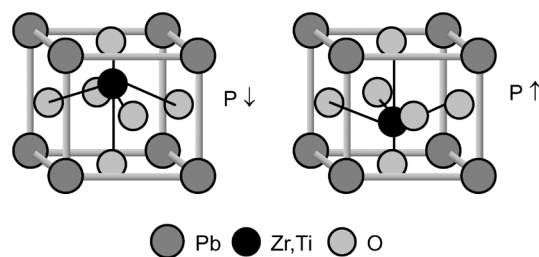


Figura5: struttura dei cristalli di perovskite

Ogni elemento di memoria consiste di un condensatore e di un transistor: il condensatore ferroelettrico (FECAP) ha 2 armature e uno strato ferroelettrico come isolante; la variazione di polarizzazione nel dielettrico induce una variazione di carica sugli elettrodi, il transistor ferroelettrico (FEFET) è simile al MOSFET tradizionale, ma utilizza uno strato di materiale ferroelettrico al

posto dell'ossido di Gate: la polarizzazione ferroelettrica deve essere compensata dalla carica nel canale e la direzione di polarizzazione influenza la tensione di soglia.

Sono presenti due stati stabili con polarizzazione opposta, che possono essere usati per rappresentare "0" e "1", la carica rimanente in questi stati può essere percepita con un condensatore. Sebbene l'elemento di memoria è un condensatore, non viene memorizzata una carica libera, ma la posizione degli atomi nel cristallo. Quando una tensione è applicata ai capi del condensatore, i cristalli si polarizzano nella direzione del campo elettrico esterno, quindi gli atomi mobili si muovono all'interno dei cristalli se non hanno una polarizzazione corrispondente a quella del campo elettrico esterno.

L'informazione immagazzinata nelle memoria ferroelettriche non può essere recuperata direttamente, ma è necessario cambiare la polarizzazione del condensatore ferroelettrico

Il transistor polarizza il condensatore in un particolare stato, ad esempio quello corrispondente allo stato "0". Se la cella aveva già memorizzato uno "0", non accadrà niente nelle linee di uscita; se la cella aveva un "1", il riordinamento degli atomi nello strato di materiale ferroelettrico causerà un breve impulso di corrente in uscita, che spingono gli elettroni del metallo sul lato "basso". La presenza di questo impulso indica che la cella ha un "1". Poiché questo processo sovrascrive la cella di memoria, la lettura delle FeRAM è un processo distruttivo, e richiede che la cellula debba essere riscritta, se è cambiata.

- Magnetoresistive Memories che sfruttano le proprietà magnetiche dei materiali.

	FG	PCM	FeRAM	MRAM
Stato	Prodotta	Prodotta	Prodotta	Prodotta
Dimensione	$4F^2/10F^2$	$5F^2$	$22F^2$	$45F^2$
Scalabilità	Limitata	Molto buona	Povera	Povera
Lettura	Veloce	Veloce	Veloce	Veloce
Scrittura	Lenta	Veloce	Veloce	Veloce
Potenza assorbita	Bassa	Alta	Bassa	Alta
MultiLivello	Si	Si	Difficile	Si
Endurance	10^5	10^{12}	10^{14}	10^{16}
Resistenza alle radiazioni	Poca	Molto buona	Buona	Molto buona

Tabella 1: confronto delle principali tipologie di MRAM

2 PROPRIETÀ MAGNETICHE DELLA MATERIA

2.1 Magnetizzazione della materia

In generale le azioni magnetiche sono dovute al fatto che un sistema di cariche in moto genera un campo magnetico, che indichiamo con il simbolo **B**. Determinare il valore del campo magnetico in una certa regione dello spazio vuol dire quindi darne in ogni punto direzione, verso e modulo. In generale questi variano da punto a punto (campo non uniforme) e, in un dato punto, possono variare nel tempo (campo non costante); inoltre il valore di B può dipendere dal mezzo che riempie lo spazio intorno alle sorgenti.

Consideriamo un solenoide rettilineo, di raggio R e lunghezza d, con n spire per unità di lunghezza, e disponiamolo con l'asse verticale. Sospendiamo tramite una molla una piccola bobina, costituita da N' spire di raggio $r \ll R$ coassiali con le spire del solenoide e percorse dalla corrente i'; supponiamo che la posizione di equilibrio della bobina, sotto l'azione della forza peso e della forza elastica, coincida con il centro O della faccia terminale del solenoide. Quando nel solenoide circola la corrente i che produce nei punti dell'asse il campo magnetico

$$F = \pm m' \frac{dB}{dx};$$

$m' = \pi r^2 N' i'$ è il momento magnetico della bobina. Se m' è concorde al campo B del solenoide, la forza sulla bobina è attrattiva e tende a portar la bobina verso l'interno del solenoide dove il campo è maggiore, se invece m' è discorde a B la forza è repulsiva e spinge la bobina verso l'esterno dove il campo è minore. Tarando il dinamometro, dalla misura dello spostamento della posizione di equilibrio a campo nullo si determina il valore della forza magnetica. Sospendiamo adesso al dinamometro, in modo che stiano nella posizione O, campioni di vari materiali aventi piccole dimensioni; quando nel solenoide circola corrente si osserva che su ciascun campione viene esercitata una forza.

Facciamo riferimento a un dato volume τ , uguale a tutti campioni. La forza per unità di volume vale, in modulo,

$$F_t = \frac{F}{\tau} = \frac{m}{\tau} \frac{dB}{dx} = M \frac{dB}{dx}$$

La grandezza M , che rappresenta il momento magnetico dell'unità di volume del materiale, si chiama magnetizzazione; essa è definita vettorialmente come

$$M = \frac{m}{\tau}$$

In base alle caratteristiche sperimentali, si possono individuare tre categorie di materiali:

1. Sono dette diamagnetiche le sostanze che hanno la magnetizzazione M opposta al campo magnetico B esterno ed è ad esso proporzionale;
2. Si chiamano sostanze paramagnetiche le sostanze in cui la magnetizzazione è concorde al campo magnetico; anche adesso M è proporzionale a B ;
3. Sono dette ferromagnetiche le sostanze che sono attratte verso la zona in cui il campo magnetico è maggiore: anche in questo caso la magnetizzazione è concorde al campo magnetico, ma la relazione tra M e B non è lineare e nemmeno univoca. Inoltre, i campioni tendono a rimanere magnetizzati anche dopo che il campo è stato spento.

2.2 Permeabilità magnetica e suscettività magnetica

Il momento magnetico per unità di volume che si forma per l'azione del campo magnetico esterno causa una modifica del campo stesso: il mezzo magnetizzato si aggiunge alle sorgenti di B costituite dalle correnti di conduzione, facendo variare valore del campo magnetico che c'era originariamente.

Esaminiamo l'effetto di un solenoide indefinito il cui campo ha espressione $B_0 = \mu_0 n i$: col simbolo B_0 indichiamo il valore del campo magnetico nel vuoto. Supponiamo di riempire completamente il solenoide con un mezzo omogeneo; dalla misura di B troviamo che esso è parallelo e concorde a B_0 e che il rapporto tra i moduli vale ovunque

$$\frac{B}{B_0} = \chi_m$$

A questo rapporto diamo il nome di permeabilità magnetica relativa (al vuoto) del mezzo considerato. Quindi:

$$B = \chi_m B_0 = \mu_0 \chi_m n i = \mu n i$$

Definendo permeabilità magnetica la grandezza

$$\mu = \mu_0 \chi_m$$

La legge di Ampere-Laplace $B = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \oint \frac{ds \times u_r}{r^2}$ ha validità generale in quanto il campo magnetico nel vuoto ha sempre coefficiente moltiplicativo μ_0 ; possiamo quindi dire che sperimentalmente il campo magnetico esistente in un mezzo indefinito omogeneo in cui è immerso un circuito percorso da corrente è dato da

$$B = \frac{\mu i}{4\pi} \oint \frac{ds \times u_r}{r^2}$$

La variazione del campo magnetico dovuta alla presenza del mezzo è dunque

$$B - B_0 = \chi_m B_0 - B_0 = (\chi_m - 1) B_0 = \chi_m B_0$$

Definiamo in tal modo una nuova grandezza, la suscettività magnetica

$$\chi_m = \chi_m - 1; \chi_m = \chi_m + 1,$$

che nel nostro contesto ha il significato di variazione relativa del campo magnetico

$$\chi_m = (B - B_0) / B_0.$$

Le sostanze diamagnetiche hanno $\chi_m < 1$, quindi $\chi_m < 0$:

le sostanze paramagnetiche hanno $\chi_m > 1$, quindi $\chi_m > 0$:

per le sostanze ferromagnetiche χ_m e χ_m non sono funzioni univoche di B; la permeabilità di una sostanza ferromagnetica può arrivare a valori dell'ordine di $10^3 \div 10^5$.

2.3 Magnetizzazione delle sostanze

Il moto degli elettroni intorno al nucleo di un atomo può essere assimilato a correnti microscopiche, alle quali è associato un momento magnetico; nella maggior parte dei casi questi momenti si compensano e l'atomo non ha momento magnetico, mentre quando agisce un campo magnetico esterno il moto degli elettroni cambia e ha origine un momento magnetico che è opposto al campo esterno (questo è il meccanismo classico del diamagnetismo, e si capisce che è sempre presente).

In alcune sostanze vi sono condizioni di asimmetria per cui le molecole possono avere un momento magnetico intrinseco; a causa dell'agitazione termica delle molecole il momento medio è nullo, ma sotto l'azione di un campo magnetico esterno, c'è un fenomeno di orientazione parziale (orientazione dei domini di Weiss) e ha origine un momento magnetico parallelo e concorde al campo esterno, che supera l'effetto diamagnetico (questo è ciò che accade con i materiali paramagnetici).

Nel ferromagnetismo vi sono dei momenti magnetici che vengono orientati concordemente al campo magnetico esterno, ma è sufficiente anche un campo relativamente debole per ottenere un'orientazione quasi completa dei momenti elementari, per cui gli effetti sono notevolissimi; tale magnetizzazione continua anche nel caso si annulli l'effetto del campo magnetico esterno, rendendo tali materiali dei magneti. Questa proprietà si mantiene solo al di sotto di una certa temperatura, detta temperatura di Curie, al di sopra della quale il materiale si comporta come un materiale paramagnetico. Per il ferro, ad esempio, questa temperatura è di circa 770 °C.

Esiste un'altra categoria di materiali, i materiali antiferromagnetici, ad esempio il manganese, il cromo, l'ematite, gli ossidi MnO_2 , FeO , Co . In tali materiali, contrariamente a quanto accade per i materiali ferromagnetici in cui la configurazione di minima energia si ha per spin paralleli, l'interazione tra gli atomi è tale da realizzare una configurazione di minima energia quando gli spin sono antiparalleli. La

magnetizzazione di questi materiali, al di sotto di una certa temperatura detta di Néel, e in assenza di campo magnetico esterno, è praticamente nulla. Anche quando vi è un campo magnetico esterno, i dipoli magnetici tendono a mantenere la disposizione antiferromagnetica.

2.4 Equazioni generali della magnetostatica

Supponiamo di avere un corpo di forma cilindrica magnetizzato uniformemente con magnetizzazione M parallela all'asse e isoliamo un disco di spessore dz . Suddividiamo il disco in prismetti di base $d\Sigma$ e altezza dz , e quindi di volume $d\tau = dz d\Sigma$. Ogni prismetto ha il momento magnetico orientato come M , $dm = M d\tau = M dz d\Sigma u_z$.

Secondo il principio di equivalenza di Ampere lo stesso momento magnetico è posseduto da una spira a forma di nastro, di area $d\Sigma$, e altezza dz , e percorsa da una corrente di_m tale che

$$dm = di_m d\Sigma u_z = M dz d\Sigma u_z \Rightarrow di_m = M dz$$

Sostituiamo ora ogni prismetto di materiale magnetizzato con l'equivalente circuito percorso dalla corrente di_m . Se M è costante le correnti si elidono a due a due e quindi rimangono attive solo le correnti sulla superficie laterale del cilindro, mentre quelle interne si annullano. È analogo quindi considerare il disco di materiale magnetizzato uniformemente ad un circuito percorso dalla corrente di_m . Se si procede nella stessa maniera per tutti i dischi di altezza dz che costituiscono il cilindro magnetizzato di altezza h , concludiamo che esso equivale ad una fascia di altezza h e percorsa dalla corrente

$$i_m = \int_0^h M dz = M h$$

Se invece si considera la circuitazione di M lungo un percorso chiuso generico che concateni la corrente i_m ,

$$\oint M \cdot ds = i_m$$

A causa della corrente i_m abbiamo che

$$\oint B \cdot ds = \mu_0(i + i_m) = \mu_0 i + \mu_0 \oint M \cdot ds$$

Se ora introduciamo un nuovo campo vettoriale H , che identifica il campo magnetico nei materiali, attraverso la definizione $H = \frac{B}{\mu_0} - M$ ovvero $B = \mu_0(H + M)$ vediamo che viene soddisfatta la relazione

$$\oint H \cdot ds = i$$

Che esprime la legge di Ampere per il campo H : la circuitazione di H estesa ad una qualsiasi linea chiusa è uguale alla somma delle correnti di conduzione concatenate dalla linea.

2.5 Sostanze ferromagnetiche

In natura esistono sostanze come FeO , o Fe_2O_3 , che sottoposte all'azione di un campo magnetico si magnetizzano, diventando sorgenti permanenti di campo magnetico. Sperimentando con campi magnetici esterni noti si osserva innanzitutto che la magnetizzazione è elevata anche con piccoli valori dei campi; inoltre tali effetti si presentano anche nei materiali aventi leghe di Fe , Ni e Co .

Per trovare la relazione tra B e H serviamoci di un solenoide toroidale: il campo H viene variato variando l'intensità di corrente nelle spire e il campo B nel mezzo viene misurato con una sonda di Hall. Per ogni valore di H si misura B e si ricava il valore della magnetizzazione tramite $M = (B / \mu_0) - H$. In tale modo siamo a conoscenza di $B(H)$ e di $M(H)$.

Supponiamo che inizialmente il materiale si trovi nello stato vergine (figura 6), quindi in 0, cioè non sia mai stato sottoposto a magnetizzazione, e che siano nulli tutti i campi. Facendo crescere H i valori di B e M si dispongono lungo la curva a , detta curva di prima magnetizzazione; quando H supera il valore H_m , la magnetizzazione resta costante al valore M_{sat} e il campo magnetico cresce linearmente con H , ma molto più lentamente di prima. Infatti, per $M = M_{sat} = \text{costante}$, per $B = \mu_0(H + M_{sat})$ è una retta con pendenza μ_0 ,

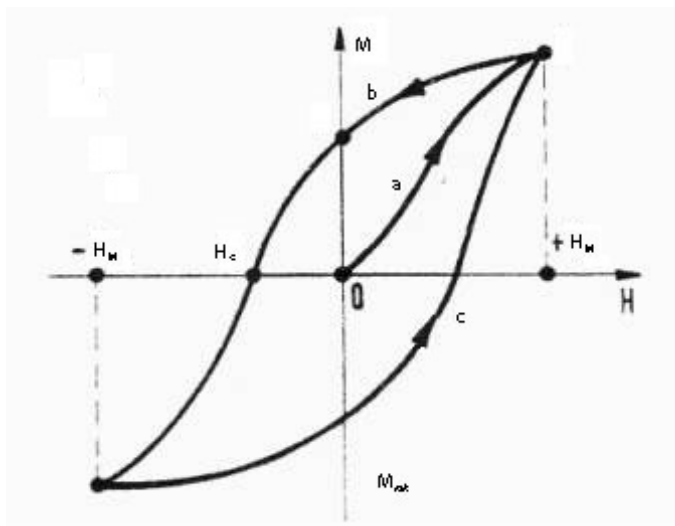


Figura6: rappresentazione di un ciclo di isteresi

cioè molto piccola. Si dice che per $H > H_m$ il materiale ha raggiunto la saturazione e il valore M_{sat} si chiama magnetizzazione di saturazione.

Se dopo aver raggiunto il valore H_m facciamo diminuire H , i valori di B e di M si dispongono lungo una curva b che si mantiene al di sopra della curva di prima magnetizzazione e interseca l'asse delle ordinate ($H=0$) col valore B_r o M_r , legati da $B_r = \mu_0 M_r$: si parla in tal caso di magnetizzazione residua e di campo magnetico residuo, e indica che il materiale è magnetizzato anche in assenza di corrente; è diventato cioè un magnete permanente.

Per annullare la magnetizzazione va invertito il senso della corrente e far diminuire H fino al valore H_c , detto campo coercitivo, in corrispondenza del quale $M=0$ e $B = \mu_0 H_c$. Facendo ulteriormente decrescere H si osserva che oltre il valore $-H_m$, la curva è rettilinea, come lo era oltre H_m , con la stessa pendenza: il materiale ha raggiunto la magnetizzazione di saturazione, ma ora ha il verso opposto. Infine, se si riporta H al valore H_m si percorre la curva c fino al ricongiungimento con la curva a (figura 7). La curva completa prende il nome di ciclo di isteresi del materiale.

Finché H varia nell'intervallo $H_m, -H_m$ o maggiore, si ottiene sempre lo stesso ciclo, mentre invece se si diminuisce l'intervallo di variabilità si ottengono cicli sempre più stretti finché si riporta il materiale allo stato vergine: questo è il metodo per smagnetizzare il materiale.

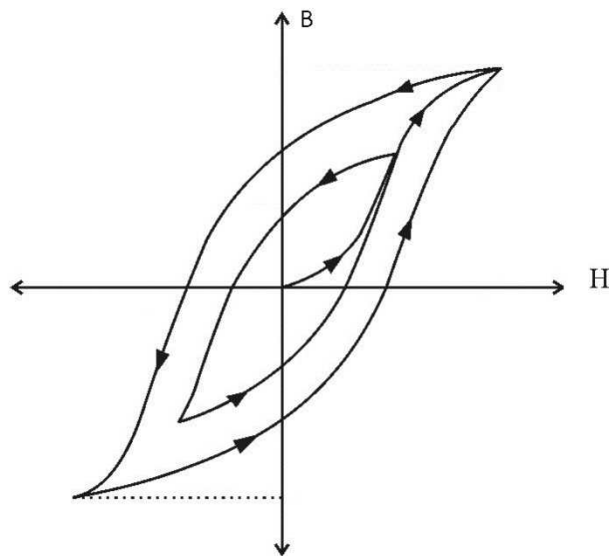


Figura 7

La forma del ciclo di isteresi dipende fortemente dalla composizione chimica del materiale: con materiali “duri” il ciclo di isteresi è abbastanza ampio, e questo è il motivo per cui tali materiali vengono usati per la costruzione di magneti permanenti, mentre i materiali “dolci” hanno un ciclo di isteresi molto stretto, e sono di facile smagnetizzazione.

Un’ altra proprietà fondamentale per i materiali ferromagnetici è che per ognuno di essi esiste una temperatura critica, T_c , la temperatura di Curie, al di sopra del quale il materiale diventa paramagnetico, con suscettività che segue da

$$\frac{\chi_m(T-T_c)}{\rho} = C = \text{costante}$$

ρ è la densità della sostanza e C è una costante

3 MEMORIE MAGNETORESISTIVE (MRAM)

3.1 Introduzione

Le MRAM memorizzano le informazioni sotto forma di un campo magnetico. La prima MRAM prodotta venne diffusa nel mondo del commercio nel 2006 (la memoria 4Mb MR2A16A prodotta prima da Everspin Technologies, e poi da Freescale Semiconductor) seguita da molte altre memorie di questo tipo prodotte negli anni seguenti. Le maggiori compagnie di tutto il mondo continuano a investire negli sviluppi delle MRAM con lo scopo di introdurre dispositivi che portino ad un incremento nel mercato delle memorie. Allo stesso tempo il grande effetto dei miglioramenti nei materiali usati nella costruzione delle MRAM hanno avuto un impatto positivo nel progresso di tali memorie.

3.1.1 Memorie magnetiche e Materiali Magnetoresistivi

L'uso di materiali magnetici nelle memorie potrebbe sembrare un ritorno ai primi computer costituiti da matrici con nuclei di ferrite come principale elemento di memoria. Negli anni recenti vennero sviluppate molte idee per servirsi di piccoli film magnetici per memorizzare dati nelle memorie a semiconduttore. L'idea principale è usare materiali aventi una resistività che dipenda dallo stato magnetico, in modo che i dati possano essere memorizzati sotto forma di uno stato magnetico, e letti misurando la resistenza del dispositivo.

L'utilizzo dello stato magnetico, anziché di una carica elettrica ha due benefici:

- A differenza delle cariche elettriche che possono essere disperse tramite dei cammini conduttivi, la polarizzazione magnetica non si disperde, quindi i bit memorizzati sono perfettamente non volatili;
- La determinazione della resistenza non richiede un cambiamento nello stato magnetico, quindi l'operazione di lettura non ha un effetto distruttivo, come accade per le FeRAM.

Lo stato di magnetizzazione di un materiale può essere misurato con il fenomeno della magnetoresistenza, che è il cambiamento della conduttività del materiale quando è immerso in un campo magnetico; la magnetoresistenza è caratterizzata dal rapporto MR (Magnetoresistance Ratio) definito nel seguente modo:

$$MR = \frac{R_{high} - R_{low}}{R_{low}}$$

Dove R_{high} e R_{low} sono le due diverse resistenze del dispositivo.

Nel 1988 si ottennero valori elevati di MR usando dei multilayered films, ottenuti separando due strati ferromagnetici adiacenti, con uno non ferromagnetico, ad esempio Fe/Cr/Fe; tale effetto ha preso il nome di magnetoresistenza gigante (GMR). Sebbene l'effetto GMR abbia un notevole MR, la bassa resistività nei film magnetici obbligava l'utilizzo di segnali di basse tensioni poiché i dispositivi non potevano essere attraversati da correnti elevate.

Lo sviluppo nel 1955 della giunzione a tunnel magnetica offrì un miglioramento del segnale di lettura per le MRAM; questa caratteristica peculiare per le magnetoresistenze ad effetto tunnel (TMR), seguita da alti valori di MR portarono ad una maggior diffusione dei dispositivi a TMR su quelli a GMR.

Inoltre i dispositivi a TMR sono perpendicolari, ossia la corrente fluisce perpendicolarmente alla superficie del film, permettendo la fabbricazione di celle di memoria con area piccola rispetto quelle a GMR.

3.1.2 Analisi di base di una MRAM

Una giunzione a tunnel magnetica (MTJ) è una struttura multistrato costituita da uno strato molto sottile di ossido racchiuso tra due strati di materiale ferromagnetico. Quando la barriera di tunnel è molto sottile, tipicamente <2nm, per effetto tunnel, gli elettroni passano attraverso la barriera di ossido, perpendicolarmente alla superficie. La relativa orientazione di magnetizzazione in questi due layers determina la resistenza del dispositivo a MTJ. Quando la magnetizzazione dei due strati magnetici è parallela la resistenza è bassa poiché gli elettroni presenti nella banda maggioritaria sono in grado di passare attraverso la barriera e arrivare fino alla banda maggioritaria all'altra parte.

Quando l'orientazione è antiparallela, la resistenza è alta in quanto gli elettroni situati nella banda maggioritaria passano nella banda minoritaria dell'altra parte della barriera. Dei due strati ferromagnetici, uno è magneticamente orientato, in modo che la sua magnetizzazione non cambi, mentre l'altro è libero di commutare tra due stati stabili.

In realtà una giunzione magnetica è costituita da una struttura multistrato:

- l'elettrodo superiore, la cui direzione della magnetizzazione può essere invertita, è il layer di memoria;
- l'elettrodo inferiore è sostituito da una struttura che consiste di una coppia di layer ferromagnetici: il pinned layer e il reference layer, separati da un sottile strato di metallo, e seguiti poi da uno strato di materiale antiferromagnetico (AF layer). Il pinned layer e il reference layer creano un Anti-Ferromagnete Sintetico (SAF), il cui verso della magnetizzazione è fissato. La SAF ha lo scopo di ridurre il campo demagnetizzante del pinned layer e lo "stray magnetic field" rispetto ad una struttura più semplice costituita da un singolo strato ferromagnetico.

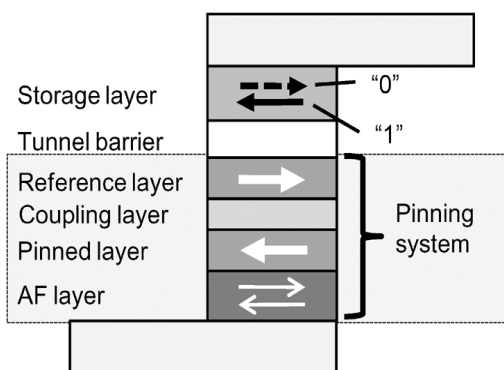


Figura 8: Struttura schematica di una MRAM

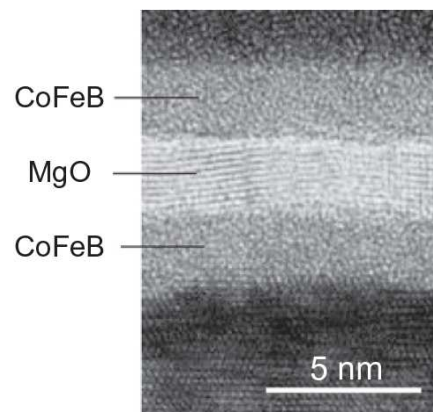


Figura 9: immagine TEM di una MTJ in un microscopio

Per il design delle MRAM, l'elemento di memoria ha sempre una forma allungata, in modo che l'anisotropia magnetica¹, con riferimento all'anisotropia di forma², mantenga la magnetizzazione soltanto lungo un'asse preferenziale.

¹ L'anisotropia magnetica è la dipendenza direzionale delle proprietà magnetiche di un materiale. Un materiale isotropo dal punto di vista magnetico non ha una direzione preferenziale di orientazione

L'orientamento del momento magnetico genera dei poli magnetici alle estremità dell'elemento; il momento magnetico varia significativamente a seconda della forma del perimetro della cella di memoria. Per un elemento a forma rettangolare, dove le estremità sono piane, le polarità ai bordi possono essere così forti da riuscire a ruotare il momento magnetico che c'era prima,causando quattro diverse direzioni del momento del campo magnetico alle estremità, quindi sfavorendo la ripetibilità

L'esistenza dei domini magnetici alle estremità causa delle variazioni del campo magnetico lungo la cella di memoria; se si assottigliano i bordi, appuntendoli, si eliminano i contributi del campo magnetico ai poli, favorendo la ripetibilità. Nella pratica, però vengono fabbricate celle con forma circolare alle estremità, anzichè con forma di punte sottili, acquisendo una forma ellittica.

La forma del perimetro di una cella di una memoria magnetica, influenza enormemente la distribuzione delle polarità magnetiche e di conseguenza influenza il valore della soglia necessaria al cambiamento della magnetizzazione. Poiché la forma dell'elemento di MRAM varia da un rettangolo a quella ellittica, il valore della soglia magnetica varia del 120 %.

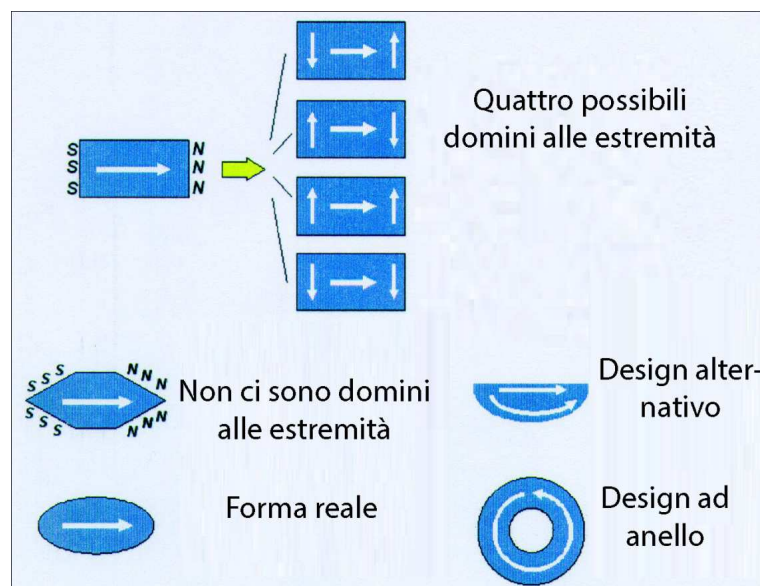


Figura 10: variazione del campo magnetico a seconda della forma della cella di memoria

² Anisotropia di forma: quando una particella macroscopica o microscopica non è perfettamente sferica la magnetizzazione non sarà uguale in tutte le direzioni: si avrà un asse preferenziale; questo fatto discende dalla presenza di un campo smagnetizzante che dipende direttamente dalla geometria dell'oggetto ferromagnetico.

Ci sono inoltre due tipi di giunzione a tunnel magnetica:

- MTJ-planare, nella quale la magnetizzazione degli strati ferromagnetici giace nella direzione del piano:
- MTJ-perpendicolare nella quale la direzione della magnetizzazione è perpendicolare alla direzione del piano.

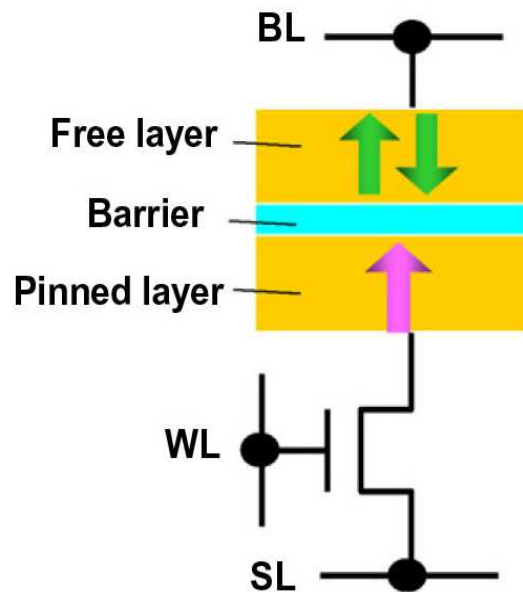


Figura 11:immagine di una cella di MRAM a giunzione perpendicolare

Un esempio di MRAM diffusa nel mercato è la 4Mb MRAM, prodotta da Freescale Semiconductor, Inc: è basata in una cella di memoria di tipo 1T1MTJ, di dimensione $1.55\mu\text{m}^2$, costruita con un processo CMOS dual Gate a $0.18\mu\text{m}$, con le linee di programmazione costituite da materiale permeabile. La memoria 4Mb ha bassi valori di tensione, alta densità, e elevata durezza. La cella di memoria è costituita da un pass transistor, un'unica MTJ, un elettrodo superiore e uno inferiore, e due linee di programmazione ortogonali. In questa architettura le linee di programmazione sono fisicamente separate dalla MTJ, che riduce il formarsi di fenomeni parassiti. La MTJ è composta da un pinned layer, una barriera di tunnel, e da un free layer. Il circuito lettura è composto da un pass transistor, connesso elettricamente ai due elettrodi della MTJ, e acceso durante la fase di lettura, e pilota una corrente di circa $10\ \mu\text{A}$. La distribuzione statistica dei valori delle resistenze R_{low} e R_{high} è molto stretta, con una separazione di più di 20σ tra il valore medio di R_{low} e R_{high} .

3.1.3 Metodi di scrittura

Ci sono due diversi metodi usati per programmare lo strato magnetico non orientato: field switching e spin-torque switching. Nella prima, la corrente viene trasportata nelle linee adiacenti la giunzione magnetica per generare il campo magnetico nel free layer (quello che memorizza la direzione di magnetizzazione). Il transistor di isolamento è acceso durante la fase di lettura, mentre è sempre spento durante la fase di scrittura, per prevenire che le correnti di scrittura passino attraverso la MTJ e la sovrascrivano. Poiché ogni cella di memoria ha esattamente un transistor e una MTJ, questa architettura è conosciuta come architettura 1T-1MTJ MRAM; il metodo di scrittura field switching sarà spiegato meglio nel paragrafo 3.2.3.

Altri tipi di architettura sono stati proposti, ma hanno richiesto vari compromessi dal punto di vista ingegneristico. La Figura 12 mostra la scrittura di una cella di memoria: le correnti i_1 e i_2 passano attraverso le write lines in modo che il loro campo faccia cambiare il bit

memorizzato, soltanto se la cella di memoria si trova tra entrambe le write lines.

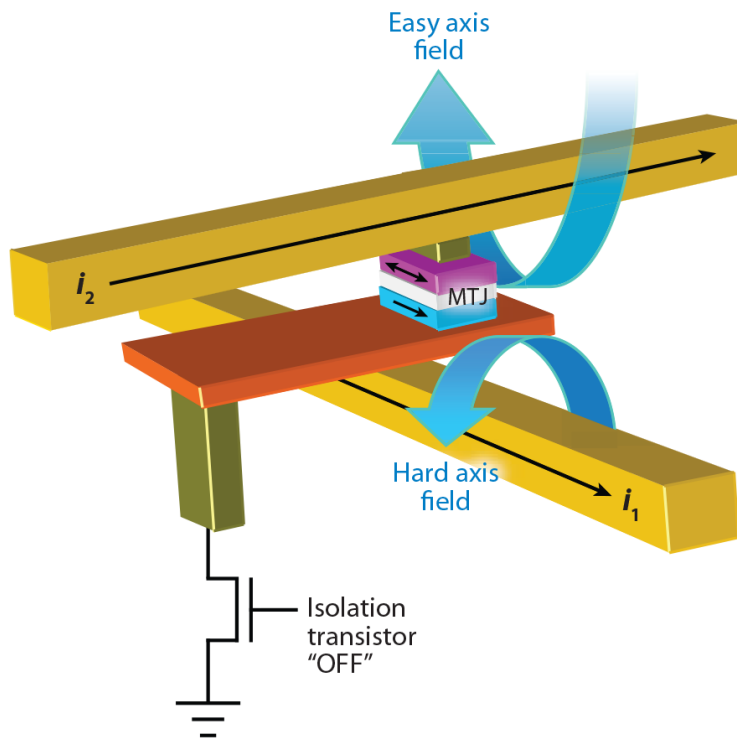


Figura 12: scrittura di una MRAM a 1 MTJ

Spin-Torque- Transfer switching è una nuova tecnica basata sul principio della torsione dello spin; in tale metodo, il cambiamento del bit memorizzato è accompagnato da un impulso di corrente lungo la MTJ. Il momento angolare dello spin trasportato dalle correnti che passano attraverso la giunzione magnetica causa il cambiamento di magnetizzazione del free layer, con lo stato finale (parallelo o antiparallelo) determinato dalla direzione dell'impulso della corrente. Il principio di funzionamento delle STT-MRAM sarà approfondito meglio nel paragrafo 3.2.4.

La lettura dell'informazione viene ottenuta tramite la misura della resistenza elettrica della cella. Le celle sono disposte a griglia e quindi basta attivare il giusto transistor di riga e di colonna per far scorrere una corrente dalla cella verso terra.

3.2 Considerazioni nello sviluppo delle MRAM

Vengono elencate ora alcuni miglioramenti portati nelle MRAM che sono stati necessari per la loro diffusione nel mercato.

3.2.1 Architettura delle MRAM

Le MRAM sono organizzati in matrici, nelle quali i bit sono contenuti nell'intersezione tra le linee e le colonne. La lettura di un bit richiede una corrente di controllo che fluisca nella matrice, in modo da indirizzare correttamente la lettura dello stato resistivo di un singolo elemento.

Si può quindi usare un dispositivo semiconduttore (un diodo o un transistor) in serie alla giunzione per provvedere alla selettività necessaria. L'utilizzo del diodo renderebbe la MRAM più facile da implementare, a causa della semplice struttura del diodo, ma d'altra parte l'integrazione di diodi a Silicio amorfo richiederebbe diodi di grandi dimensioni per pilotare le correnti di lettura.

Nel passato sono stati fatti tentativi per creare una cella ad alta densità usando un MTJ integrato con un metallo/isolante/metallo, e in serie con un diodo, che producevano però piccole correnti ($0.2\mu\text{A}/\mu\text{m}^2$) e valori di diode rectification ratios³

³ Rapporto tra il valore massimo e minimo della corrente.

≈ 20 . Si utilizza quindi un transistor in serie alla MTJ visto che a parità di dimensione, esso fornisce una maggiore corrente di saturazione.

Il massimo valore della corrente che fa variare il valore della magnetizzazione (margini di lettura) si ottiene quando il flusso di corrente nella cella è limitato soltanto dalla resistenza della giunzione, e non dalla corrente di saturazione del transistor.

Un'altra possibilità di raggiungere una densità molto elevata è usare una matrice senza elementi semiconduttori; in questo caso, a discapito di uno schema di misurazione più elevato, necessario a prevenire cammini parassiti della corrente, è possibile ottenere una misura più accurata della resistenza del tunnel della giunzione.

Uno schema proposto si basa sulla misura della corrente del circuito per creare una massa virtuale; la massa virtuale ha origine utilizzando un amplificatore operazionale con una rete di retroazione, e il flusso di corrente si può calcolare usando un amplificatore invertente.

Poiché tutte le colonne della matrice sono connesse o ma massa, o a massa virtuale, la caduta di tensione la caduta di tensione della giunzione è stabilita dalla tensione di una delle linee della matrice

Altri approcci seguono lo stesso spirito di controllare la tensione di polarizzazione delle righe e le colonne della matrice per definire percorsi unici di corrente. Gli svantaggi però riguardano un aumento del tempo di accesso dovuto al tempo richiesto per stabilire la tensione necessaria sulle linee, una maggiore complessità di progettazione e un area più grande del circuito di lettura

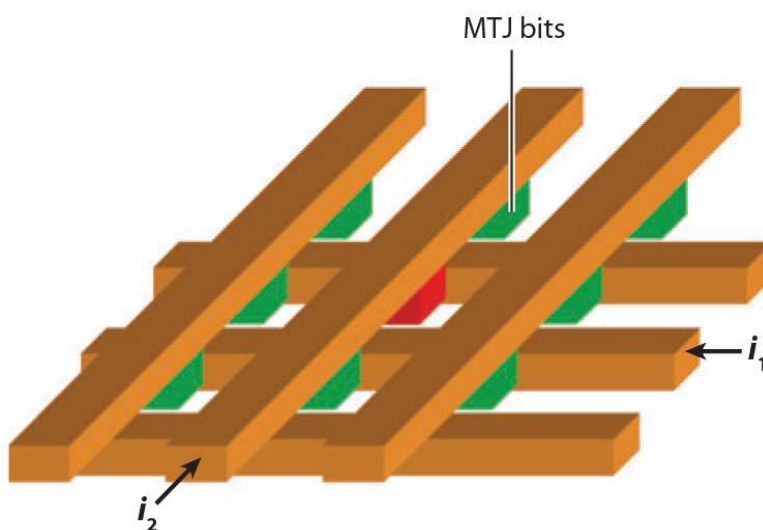


Figura 13: una matrice di memoria consiste di molte celle MRAM

3.2.2 Effetti dei materiali della MTJ riguardo lettura, performance e affidabilità delle MRAM

Due proprietà fondamentali che riguardano il materiale della MTJ sono il MR (Magnetoresistance Ratio) e il RA (resistance-area product).

A causa della corrente che attraversa perpendicolarmente la superficie della giunzione a tunnel magnetica, la resistenza è inversamente proporzionale all'area della giunzione, e il RA è la costante di proporzionalità. RA è una proprietà del materiale, controllata dalle dimensioni della barriera di tunnel. La resistenza di tunnel dipende esponenzialmente dallo spessore della barriera di tunnel, quindi piccole variazioni dello spessore di AlO_x comportano grandi variazioni nella resistenza.

Il dispositivo a MTJ dovrebbe avere una resistenza nell'ordine delle decine di $\text{k}\Omega$ per minimizzare l'effetto della resistenza serie del transistor necessario in fase di lettura, il quale tipicamente ha una resistenza nell'ordine di qualche $\text{k}\Omega$, che richiede l'utilizzo di

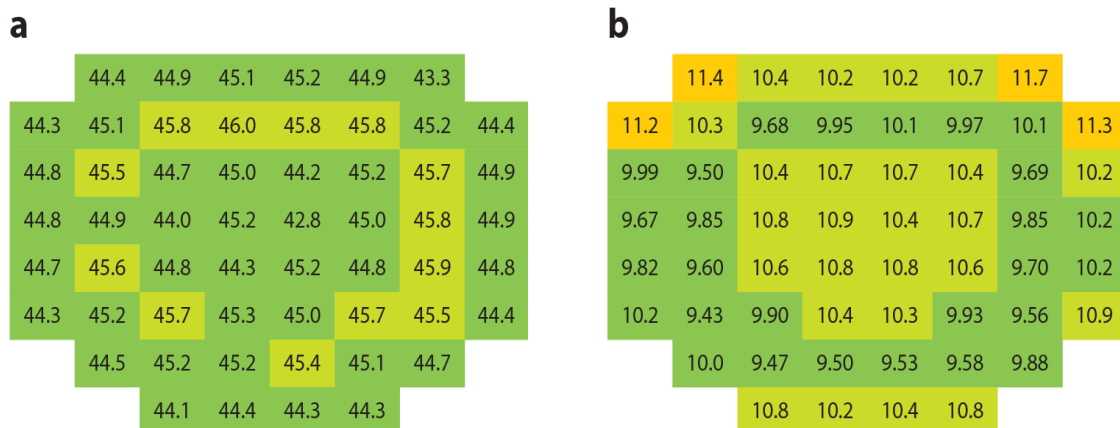


Figura 14: uniformità del rapporto MR e del prodotto RA in un wafer di 200mm.

una barriera di ossido avente spessore nell'ordine di 1nm. La dipendenza esponenziale dallo spessore dell'ossido di tunnel del RA combinata con l'utilizzo di barriere di tunnel sempre più sottili è una sfida per produrre MTJ ripetibili e uniformi nell'area del wafer usato per la produzione della memoria. Come si vede in figura 14, se dividiamo un wafer di 200mm in tante sub sezioni, se si calcola il RA e MR di ognuna e poi quello medio: $RA_{medio}=10.2\text{k}\Omega \mu\text{m}^2$ e $MR_{medio}=45\%$, e si fa una rappresentazione della normale, nell'intervallo:

$$[RA_{medio} - \sigma; RA_{medio} + \sigma] \text{ c'è uniformità di RA del 5\%,}$$

$[MR_{medio} - \sigma; MR_{medio} + \sigma]$ c'è un uniformità di MR del 1%.

Gli strati metallici sono formati mediante sputtering(bombardamento del metallo con un fascio di ioni)mentre la barriera di AlO_x si ottiene bombardando col plasma di ossigeno uno strato di Al. Questa uniformità è raggiunta attraverso la deposizione di Al con un processo di uniformità al 0.5% alla distanza di 1σ .

Ci sono due diversi tipologie di uniformità di resistenza importanti per le operazioni di MRAM: uniformità nel livello del wafer (descritta nel sopra) e uniformità nella matrice, che riguarda la misura bit per bit, della variazione della resistenza. Durante le operazione di lettura, un tipico circuito di lettura confronta la resistenza della cella di memoria, con una resistenza di riferimento, per determinare se il bit è nello stato di alta o bassa resistenza. La figura 15 illustra gli effetti delle variazioni della resistenza in una matrice di MRAM. Nello stato di bassa resistenza, i bit con resistenza più alta tendono ad avvicinarsi al valore di riferimento R_{ref} , mentre nello stato di alta resistenza, i bit con resistenza più bassa tendono ad avvicinarsi al valore di riferimento R_{ref} . Se si sta lavorando con memorie con bit che contano almeno qualche Mb, il circuito deve essere in grado di leggere correttamente lo stato di questi bit nelle code di distribuzione; mentre se i bit sono statisticamente separati da 5 o 6 σ rispetto R_{ref} sono illeggibili, ma poiché ci sarà approssimativamente un bit difettoso ogni 2Mb, questo non è un problema.

Un criterio ragionevole per aumentare l'affidabilità è separare di 6σ dal valore medio R_{ref} , poiché il circuito deve essere in grado di leggere correttamente misure più piccole di 6σ nella distribuzione di R_{high} , e più grandi di 6σ in quella di R_{low} , si definisce la resistenza utilizzabile, ΔR_{use} la differenza tra R_{ref} e le code alla distanza di 6σ da R_{low} e R_{high} . Un largo valore di ΔR_{use} rende il circuito più robusto e meno sensibile al rumore.

Vari fattori influenzano la distribuzione normale della resistenza; ad esempio ogni variazione dell'area della cella di memoria, dovuta al processo litografico, può causare variazioni nella resistenza. Anche la qualità della barriera di tunnel può portare a variazioni statistiche della resistenza del mezzo, in quanto certe imperfezioni degli strati del MTJ, dovute a variazioni del loro spessore, producono degli "hot spot" che trasportano corrente, causando un cammino conduttivo, che tende ad far aumentare la conducibilità.

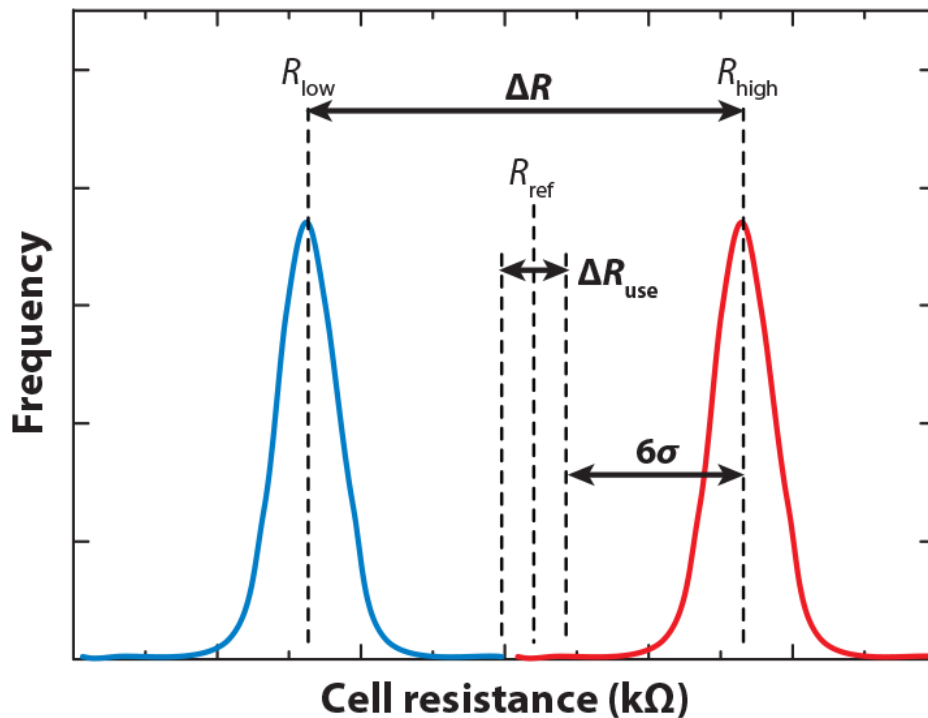


Figura 15: rappresentazione della gaussiana dei valori alto e basso della resistenza di una matrice di MRAM

Per aumentare l'affidabilità del prodotto, bisogna impedire i guasti per rottura del dielettrico e deriva della resistenza; il primo viene rilevato come un brusco aumento della corrente dovuto alla formazione di cammini elettrici nella giunzione, mentre il secondo è una graduale riduzione della resistenza della giunzione nel tempo, che può portare alla lettura di margini ridotti, e quindi aumentare il tasso di errore. Il grado di movimento che può essere tollerato è dato dalla combinazione del MR, dalla distribuzione originaria della resistenza e dalla capacità del circuito di lettura di leggere i piccoli segnali. Entrambi i fenomeni di guasto sono influenzati dalla tensione elettrica e dalla temperatura, inoltre, il MR è proporzionale alla tensione impressa.

Fino a poco tempo fa, i dispositivi con più alti valori di MR si ottenevano usando come barriere tunnel AlO_x che producevano, alla temperatura ambiente, valori di MR del 40% - 60%, per le comuni leghe ferromagnetiche. Tuttavia, una svolta nel raggiungimento di valori di MR del 200% si è ottenuta con barriere di tunnel di MgO .

Recenti studi hanno dimostrato l'integrazione con successo di una nuova generazione di di MTJ con alti valori di MR usando CMOS costruiti col processo produttivo a 90 nm; grazie all'utilizzo del MgO per realizzare la barriera di tunnel, si riesce ad ottenere

alti valori di MR, e quindi si aumenta sensibilmente la lettura del segnale rispetto le celle di memoria aventi la barriera di tunnel di AlO_x .

Le nuove MTJ basate su MgO sono state utilizzate nella produzione della memoria 4Mb prodotta da Everspin: la barriera di MgO facilita tempi di accesso più veloci, perché il MR corrispondente è quasi il doppio del MR di una struttura simile con una barriera di AlO_x .

L'alto MR associato con le barriere di MgO implica un'elevata polarizzazione nelle correnti che scorrono nel tunnel, rendendo il meccanismo Spin-Torque Transfer più efficiente. Questo miglioramento nell'efficienza è un secondo beneficio della barriera di MgO poiché le STT MRAM richiedono meno corrente per invertire la magnetizzazione del free layer.

Sebbene i valori elevati MR ottenibili con materiale a base di MgO sono molto incoraggianti, questo tipo di materiale richiede un ulteriore sviluppo prima di poter essere pronto per la produzione di MRAM nel commercio.

3.2.3 Memorie a campo di commutazione e Toggle MRAM

La più semplice matrice di memoria a campo di commutazione ha struttura simile a quella mostrata in figura 16: una serie di bit con le digit lines che passano sotto la MTJ, e bit lines che passano sopra esso. Come già approfondito in 3.1.2 la forma delle celle di memoria hanno forma allungata, in modo da avere anisotropia magnetica per creare stati a energia stabile, con direzione del momento magnetico parallela all'asse maggiore del bit, chiamato easy-axis. I due stati magnetici sono stabili, entrambi magnetizzati lungo l'easy-axis, ma ruotati di 180 l'uno rispetto all'altro, corrispondono agli stati di alta e bassa resistenza. Il bit selezionato per la commutazione è al punto di incrocio tra digit e bit lines; il bit selezionato è sottoposto all'azione del campo magnetico generato sia dalla bit line, che dalla digit line, mentre gli altri bit lungo la bit line e la digit line, chiamati half-selected bit, in quanto sono sottoposti soltanto da uno dei due campi magnetici.

Uno dei problemi fondamentali delle MRAM a cambiamento di campo è progettare i bit e gli impulsi di campo magnetico in modo che i bit selezionati commutino sempre, mentre quelli mezzo-selezionati non cambino mai. Verranno descritte ora le difficoltà

nel realizzare la commutazione del momento magnetico di una cella, e le soluzioni proposte.

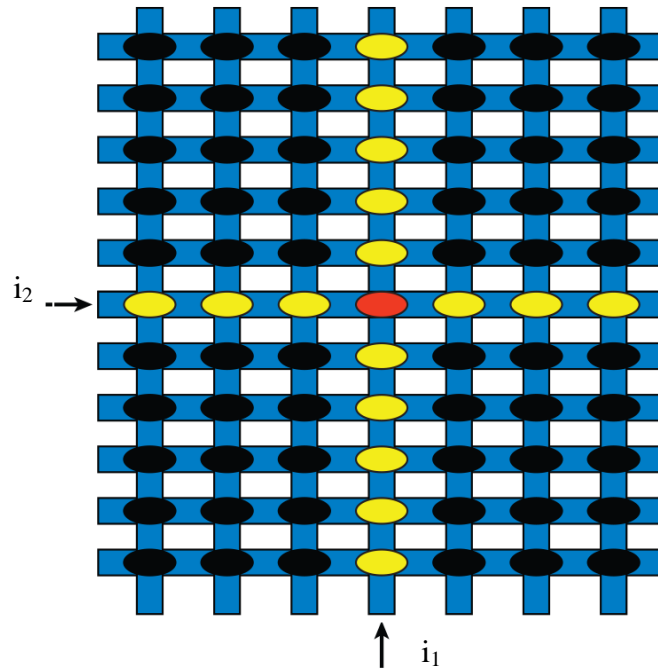


Figura 16: rappresentazione di una generica field-switched memory; i bit gialli sono le celle mezze selezionate, mentre il bit rosso è la cella selezionata

Commutazione convenzionale. L'approccio convenzionale per fare commutare il bit di una MRAM si basa sulla combinazione del campo magnetico generato da un hard-axis⁴ e da un easy-axis per commutare il momento magnetico del free layer da una direzione dell' easy-axis all'altra. Per fare ciò ci basiamo sulle teorie di Stoner-Wohlfarth di commutazione di un singolo momento magnetico.

Nel modello di Stoner-Wohlfarth, la magnetizzazione non varia all'interno del ferromagnete, ed è rappresentata dal vettore M , il quale ruota in seguito al cambiamento del campo magnetico H . Il campo magnetico varia soltanto lungo un asse, il suo valore scalare h è positivo in una direzione, e negativo per la direzione opposta. Si assume che il materiale ferromagnetico abbia un'anisotropia magnetica, con valore di anisotropia

⁴ Un corpo con anisotropia magnetica triassiale ha ancora un easy-axis, ma anche un hard-axis, che identifica la direzione di massima energia

K_u . Poiché il campo magnetico varia, la magnetizzazione è limitato al piano contenente la direzione del campo magnetico e l'easy-axis. Pertanto può essere rappresentata con

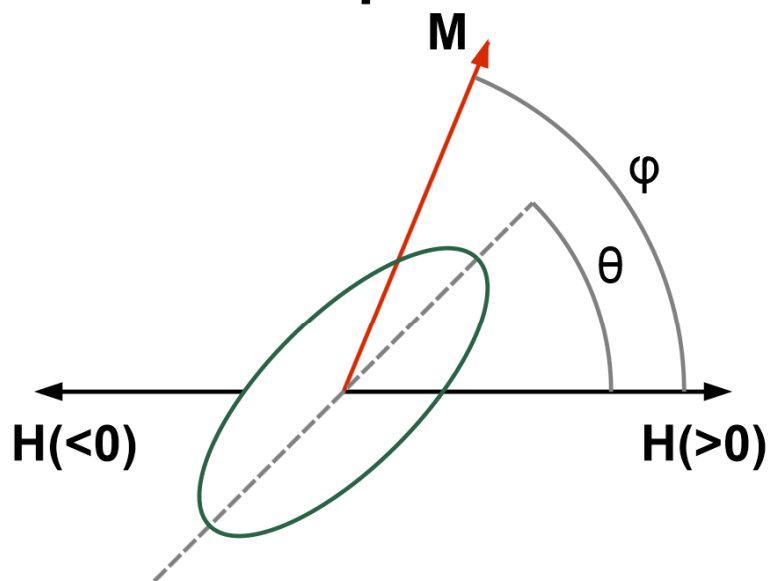


Figura 17

un angolo φ , che è l'angolo tra M e il H; specifichiamo anche l'angolo θ , compreso tra H e l'easy-axis.

L'energia del sistema è:

$$E = VK_u \sin^2(\varphi - \theta) - \mu_0 M_s V H \cos \varphi ,$$

dove V è il volume del magnete, M_s è la magnetizzazione di saturazione, e μ_0 è la permeabilità magnetica nel vuoto. Il primo termine identifica l'anisotropia magnetica, mentre il secondo l'energia di accoppiamento con il campo applicato.

L'equazione normalizzata vale:

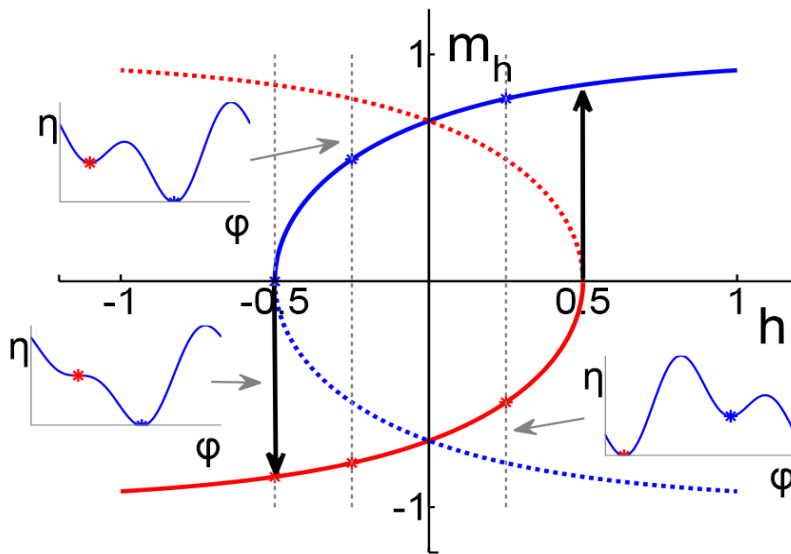


Figura 18: esempio di rappresentazione delle soluzioni dell'equazione di Stoner-Wohlfarth

$$\eta = \frac{E}{2K_u V} = -\frac{1}{4} \cos(2(\varphi - \theta)) - h \cos \varphi$$

dove $h = \frac{\mu_0 M_s H}{2K_u}$. Una direzione del momento magnetico M è in equilibrio meccanico se la risultante delle forze in essa è 0. Questo accade quando $\frac{\partial \eta}{\partial \varphi}$ è nulla:

$$\frac{\partial \eta}{\partial \varphi} = \frac{1}{2} \sin(2(\varphi - \theta)) + h \sin \varphi = 0.$$

Per ogni angolo θ tra easy-axis e il campo H , la soluzione dell'equazione consiste di due curve. In figura 18 vengono riportate tali curve nel grafico tra h e m_h dove $m_h = \cos \varphi$ è la componente normalizzata di magnetizzazione nella direzione del campo H .

La curve rossa e blu collegano direzioni di magnetizzazione stabili; per valori di h compresi tra $-1/2$ e $1/2$ le due curve si sovrappongono e ci sono due stati stabili. In questa regione si verifica un ciclo di isteresi: ci sono tre livelli di energia: Le stelle rosse e blu sono le direzioni di magnetizzazione stabili, corrispondenti a energia minima. Se le linee verticali tratteggiate si intersecano con le linee tratteggiate rosse e blu, le direzioni

di magnetizzazione sono a energia massima e determinano le barriere di energia tra gli stati.

In una misura ordinaria di isteresi magnetica, h inizia con un valore positivo elevato e diminuisce fino a raggiungere un valore molto piccolo (e negativo). La direzione di magnetizzazione inizia con la curva blu. Per $h=0.5$ compare la curva rossa, ma per $h>0$ lo stato blu ha un valore di energia minore (quindi è più stabile) perché è più vicino alla direzione del campo magnetico. Quando il campo diventa negativo, lo stato rosso ha un'energia più bassa, ma la magnetizzazione non cambia subito direzione in quanto c'è una barriera energetica; per $h=-0.5$ la barriera energetica scompare, e si passa allo stato rosso

Dopo questo salto, la magnetizzazione rimane sulla curva rossa fino a quando il campo aumenta oltre $h = 0.5$, dove si passa alla curva blu. Il modello di Stoner-Wohlfarth è un classico esempio di isteresi magnetica, il ciclo è simmetrico rispetto l'origine c'è commutazione della direzione di magnetizzazione per $h=\pm h_s$, con h_s che prende il nome di campo di commutazione.

Come si nota in figura 19, la forma del ciclo di isteresi ha una forte dipendenza dall'angolo tra il campo magnetico e l'easy-axis; se quest'ultimi sono paralleli ($\theta = 0$) il ciclo di isteresi è più ampio ($m_h=h_s=1$).

La magnetizzazione inizia con direzione parallela al campo e non ruota finché non diventa instabile, e va nella direzione opposta. Nel caso opposto, con $\theta = 90$, con il campo H perpendicolare all'easy axis, non si verifica alcun salto, ma la magnetizzazione ruota continuamente da una direzione all'altra.

Per un dato angolo θ , il campo di commutazione h_s è il punto in cui la soluzione passa da un valore di energia minima (stato stabile) ad un valore di energia massima (stato instabile), quindi basta risolvere:

$$\frac{\partial \eta}{\partial \varphi} = \frac{1}{2} \sin(2(\varphi - \theta)) + h \sin \varphi = 0$$

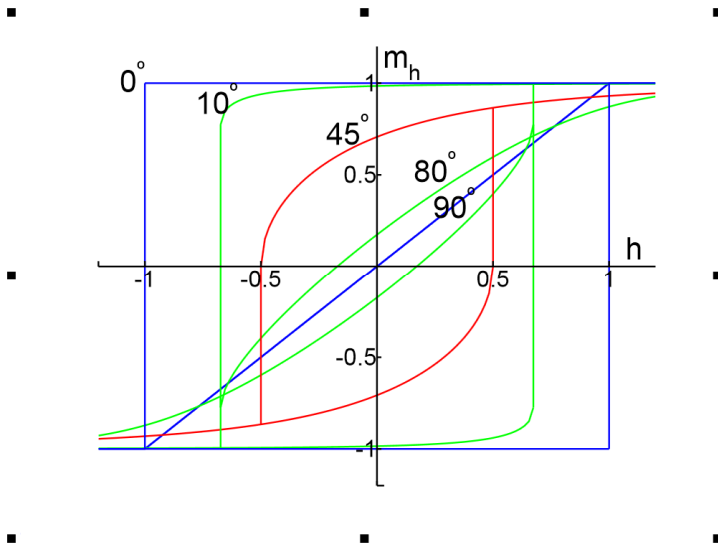


Figura 19: rappresentazione di come varia il ciclo di isteresi a seconda dell'angolo θ

Da cui si ricava $h_s = \frac{(1-t^2+t^4)^{1/2}}{1+t^2}$, con $t = \sqrt[3]{\tan \theta}$

Un modo alternativo per rappresentare h_s è dividere il vettore h nelle componenti $h_{//} = h \cos \theta$ e $h_{\perp} = h \sin \theta$, rispettivamente parallela e perpendicolare all'easy-axis.

Quindi

$$h_{//}^{\frac{2}{3}} + h_{\perp}^{\frac{2}{3}} = 1$$

Se le componenti sono tracciate l'una sull'altra il risultato è l'astroide di Stoner-Wohlfarth, visibile in figura 20.

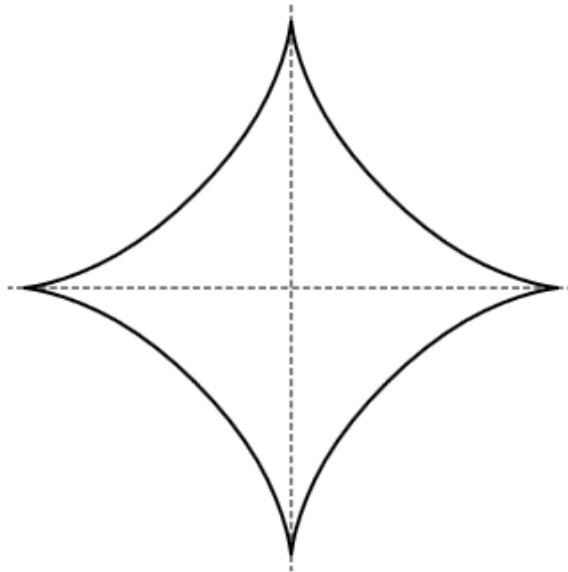


Figura 20: rappresentazione del modello dell'astroide risolvendo le equazioni di Stoner-Wohlfarth

Si ha una commutazione della magnetizzazione per ogni combinazione di campi tali che soddisfino l'equazione di Stoner-Wohlfarth.

È utile pensare a questo meccanismo in termini di una barriera energetica di inversione, che è ridotta dal hard-axis, permettendo a easy-axis relativamente piccole di commutare il verso della magnetizzazione del bit lungo questo asse. Se prendiamo come riferimento la figura 16, grazie all'applicazione di una corrente i_2 , si abbassa la barriera energetica, e grazie alla corrente i_1 la barriera scompare e la magnetizzazione commuta. Si può comprendere allora che tutte le celle mezza-selezionate hanno una barriera energetica ridotta e, se quest'ultima ha un livello troppo basso possono essere soggette a fenomeni di inversione termica casuale.

Poiché ogni matrice di memoria ha una grande varietà di campi di commutazione, ma le stesse correnti sono usate per programmare ogni bit, è necessario generare campi di commutazione che siano più grandi di quello del maggiore bit che commuta..

Inoltre, il campo applicato deve essere mantenuto al di sotto di un valore massimo per evitare che la barriera di energia del bit mezzo-selezionati diventi così bassa da aumentare notevolmente la probabilità di disturbi termici. È stato dimostrato che la regione operativa è molto piccola per correnti di programmazione ragionevoli; l'applicazione di correnti ottimali per avere tassi di errore trascurabili pone sfide significative di progettazione. Inoltre l'approccio della commutazione del campo si può

applicare per commutare un singolo bit, ma la dispersione del campo di commutazione è difficile da controllare, a causa della dipendenza del campo di commutazione dall'anisotropia di forma, infatti piccole variazioni nella forma e nella superficie hanno grandi effetti nella distribuzione del campo di commutazione nella matrice di memoria.

Toggle MRAM. Le Toggle MRAM evitano il problema delle cellule mezza selezionate attraverso l'uso di una modalità di commutazione chiamata "Savtchenko switching", che impiega una struttura a free layer e l'orientamento dei bit combinato con una specifica sequenza di impulsi di corrente. La selettività, in questo modo è notevolmente migliorata in quanto un singolo impulso di corrente non abbassa la barriera energetica di inversione, indipendentemente dall'ampiezza di quest'ultimo.

La commutazione in questo tipo di MRAM si basa sul comportamento unico di uno strato libero di un materiale antiferromagnetico sintetico (SAF), che è formato da due strati di materiale ferromagnetico, separato da uno strato di materiale non magnetico. Una rappresentazione schematica è visibile in figura 21 dove, in a è visibile un singolo strato, mentre in b mostra il comportamento di una SAF in un campo magnetico. Per una SAF, esiste un valore particolare del campo, H_{sw} , tale che, per valori maggiori di H , due strati, aventi direzione di magnetizzazione non parallela, ruoteranno il loro momento magnetico, in modo da essere ortogonali al campo H , e poi lo inclinano leggermente in avanti verso il campo in un movimento a forbice (figura 22).

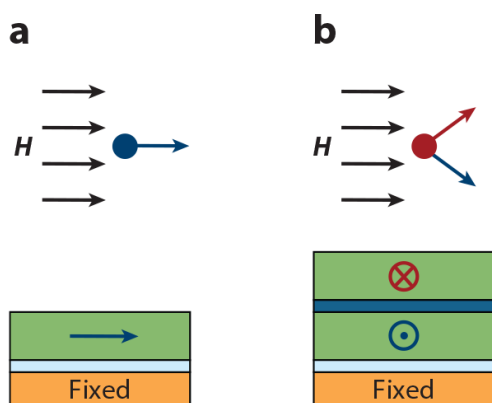


Figura 21: rappresentazione di (a) un free layer singolo, e (b) una SAF immersi in un campo magnetico

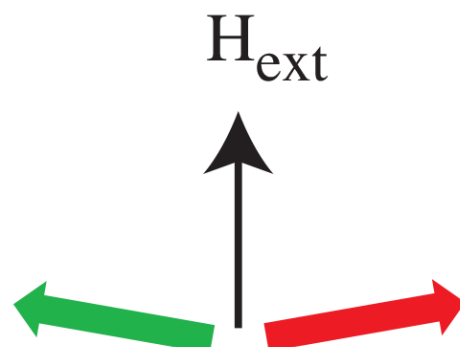


Figura 22: rappresentazione del movimento a forbice

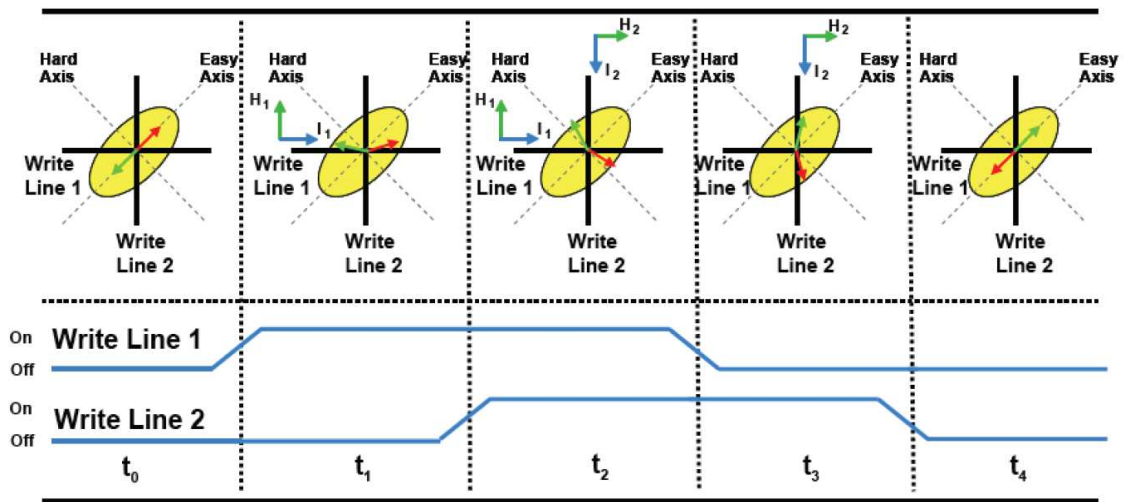


Figura 23:schema delle operazioni di scrittura di una toggle MRAM;

La figura 23 seguente descrive la sequenza di impulsi di corrente che vengono utilizzati per ruotare l'orientamento del anti-ferromagnete di 180 gradi. La digit line e la bit line sono indicati come la linea 1 e la linea 2 e sono orientati a 45 gradi rispetto l'easy axis e l'hard axis, in modo da produrre campi magnetici anche a 45 gradi con tali assi. Partendo con l'anti-ferromagnete allineato lungo l'easy axis, prima accendiamo la corrente della linea 1, che produce un campo nella direzione di "2", poi accendiamo anche la corrente della linea 2, che produce un campo addizionale in "1": il campo totale ora è diretto lungo l'easy axis. Spegliamo allora la corrente in 1, lasciando il campo magnetico nella direzione "1"; nell'ultimo step spegniamo anche la corrente in 2 e l'anti-ferromagnete torna in equilibrio con l'easy axis, solo che ha la direzione di magnetizzazione invertita rispetto a prima.

Se viene attivata soltanto la corrente di una linea, il campo magnetico di 45 non è sufficiente a cambiare lo stato. Infatti la singola riga fa alzare la barriera energetica di commutazione in modo che siano stabilizzati contro l'inversione durante l'impulso di campo magnetico. Questo è in netto contrasto con l'approccio visto con le MRAM a campo di commutazione, dove i bit semi-selezionati hanno una energia di

commutazione ridotta, e quindi sono più suscettibili ai disturbi. La relazione tra la fase degli impulsi è quindi necessaria per migliorare la selettività del bit in una matrice.

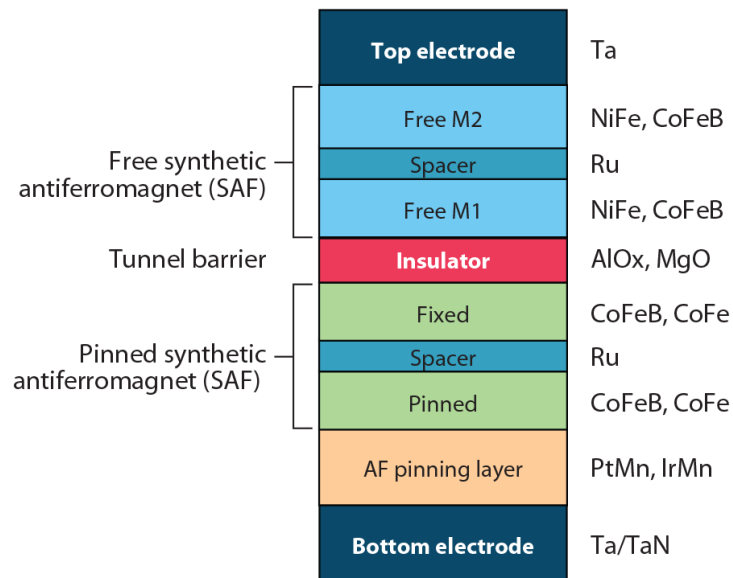


Figura 24: struttura di una toggle MRAM

3.2.4 STT MRAM

3.2.4.1 tecnologia di commutazione STT

La commutazione di magnetizzazione tramite la tecnica Spin-Torque transfer (STT) fu proposta da Berger e Slonczwski nel 1996, e si basa sull'effetto mediante il quale, l'orientazione della magnetizzazione in una giunzione a tunnel magnetica può essere modificato usando una corrente polarizzata.

Il processo di commutazione della magnetizzazione tramite il meccanismo STT è visibile in figura 25; per la commutazione da stato antiparallelo (AP) a parallelo (P), gli elettroni fluiscono dallo stato avente direzione di magnetizzazione fissata (pinned layer), allo stato in cui la direzione del momento magnetico è libera (free layer). Dopo che gli elettroni attraversano il pinned layer, gli elettroni aventi la stessa direzione dello spin della direzione del momento magnetico del pinned layer vengono iniettati nel free layer, e la corrente viene polarizzata dallo spin⁵. Tale corrente polarizzata esercita STT nella magnetizzazione nel free layer e quando la quantità di corrente polarizzata eccede un valore di soglia, la magnetizzazione del free layer commuta.

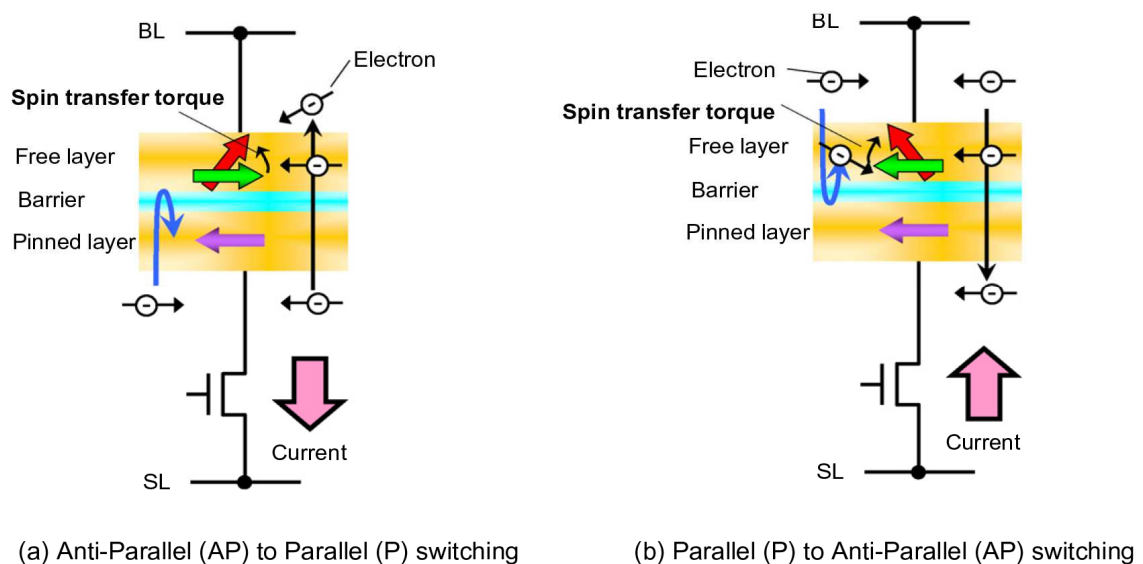


Figura 25: schema della commutazione per STT

⁵ Generalmente una corrente non è polarizzata (consiste per il 50% da spin verso l'alto, e 50% di spin verso il basso), ma se la maggioranza degli elettroni ha la stessa orientazione di spin, la corrente è polarizzata

Nella commutazione da P ad AP, gli elettroni fluiscono dal free layer al pinned layer: dopo che gli elettroni attraversano il free layer, gli elettroni che hanno direzione dello spin uguale a quella di magnetizzazione del pinned layer lo attraversano, mentre gli elettroni con direzione dello spin opposta, vengono riflessi nel confine tra la barriera di MgO e il pinned layer, e vengono iniettati nel free layer. Questa corrente esercita una STT nella magnetizzazione del free layer, e quando la quantità di corrente polarizzata dallo spin eccede un valore di soglia della corrente, la magnetizzazione del free layer commuta.

Il valore intrinseco della densità della corrente di commutazione J_{c0} è il parametro più importante che caratterizza il principio di funzionamento delle STT MRAM. Il valore di tale densità della corrente di commutazione è espresso dalle seguenti equazioni:

$$J_{c0}^{P \rightarrow AP} = \frac{\alpha \gamma e M_s t}{\mu_b g(0)} \cdot [(H_{ex} + H_{dip}) + (H_{ki} + H_d)]$$

$$J_{c0}^{AP \rightarrow P} = \frac{\alpha \gamma e M_s t}{\mu_b g(\pi)} \cdot [(H_{ex} + H_{dip}) - (H_{ki} + H_d)]$$

$$g(\theta) = P / [2(1 + P^2) \cos \theta]$$

Dove α è la costante di smorzamento di Glibert, γ è la costante giromagnetica, e è la carica dell'elettrone, t è lo spessore del free layer, μ_b è il magnetone di Bohr, M_s è la magnetizzazione di saturazione del free layer, $g(\theta)$ è l'efficienza del meccanismo di STT, e θ è l'angolo di magnetizzazione tra free layer e pinned layer. Le notazioni H_{ex} , H_{ki} , e H_{dip} sono rispettivamente il valore del campo applicato nel piano, dell'anisotropia nel piano, e il campo del bipolo che agisce sul free layer. H_d è il campo di smagnetizzazione efficace. Il valore della densità della corrente di commutazione J_c è anche una funzione della durata dell'impulso di corrente τ_p . In figura 26 si nota che J_c incrementa rapidamente per valori di τ_p minori di 10ns. questa regione è chiamata

regione di precessione, dove la commutazione per STT avviene con un movimento di precessione⁶ della magnetizzazione del free layer attorno il campo magnetico effettivo.

Dall'altra parte per valori di τ_p maggiori di 10ns J_c ha un andamento lineare, e tale regione viene definita regione delle fluttuazioni termiche, dove le fluttuazioni termiche del free layer contribuiscono alla commutazione della magnetizzazione.

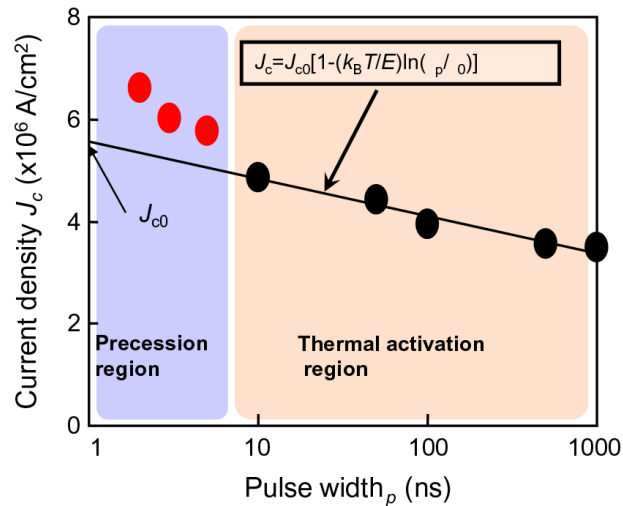


Figura 26: densità della corrente di commutazione in funzione della durata dell'impulso

3.2.4.2 Scalabilità e affidabilità delle celle di memoria a MTJ

Scalabilità della cella di memoria in termini di corrente di scrittura.

La figura 27a mostra un esempio di connessione tra un transistor MOS con il pinned layer di una MTJ; per la conversione di uno stato P a uno AP è necessario che una forte tensione (vdd) sia connessa al free layer, mentre per il MOS, bulk e source sono connessi a basse tensioni (ground). Quando la tensione al Gate vale vdd, la corrente fluisce la free layer al fixed layer, e la magnetizzazione cambia verso. Questo modalità di operare prende il nome di Source-Ground.

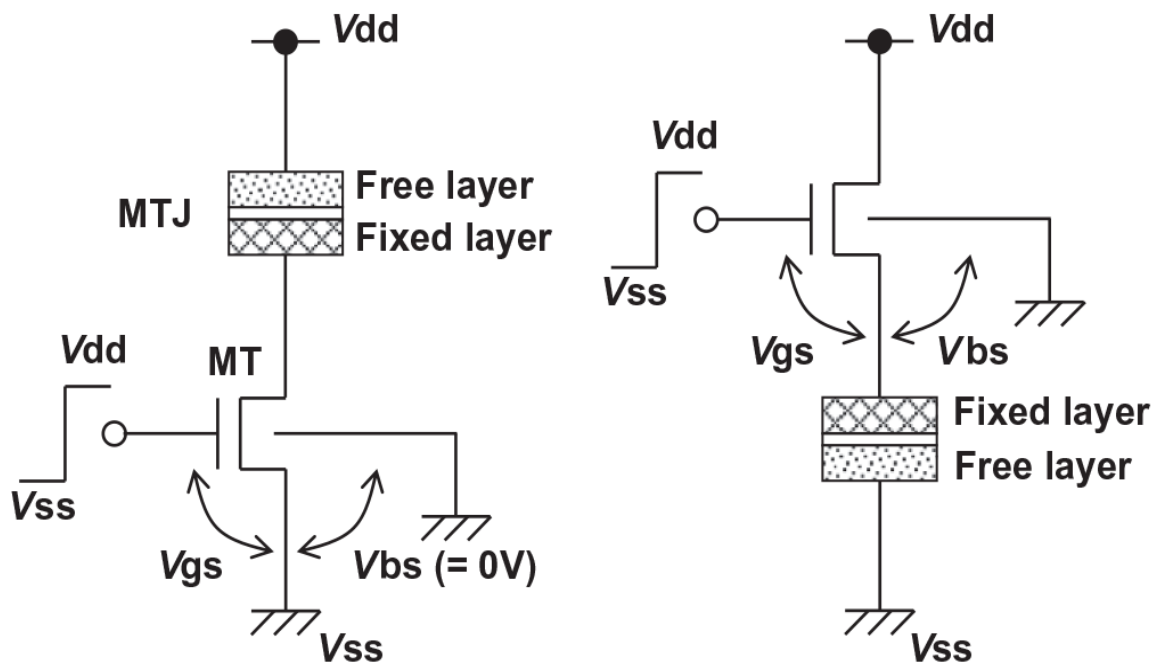
Poiché la tecnologia MOS si sta evolvendo in una direzione dove la corrente, per unità di lunghezza del Gate si manterrà per le prossime generazioni, se si usano

⁶ In fisica la precessione è la rotazione dell'asse di rotazione di un corpo attorno ad un asse

MOSFET a prestazioni elevate si avrà una corrente di $800\mu\text{A}-1\text{mA}/\mu\text{m}$, mentre se si usano MOSFET a basso consumo, si avrà una corrente di $400-600\mu\text{A}/\mu\text{m}$.

La figura 27b mostra un esempio di connessione tra un transistor e una cella di memoria, per la conversione di uno stato AP in uno P. il free layer della MTJ è connesso a V_{ss} , il drain del MOSFET è connesso a V_{dd} e il bulk a V_{ss} ; in questo modo la tensione di source è la stessa di quella del pinned layer. Questo tipo di collegamento prende il nome di source-follower.

Sebbene la tensione di Gate raggiunga il valore V_{dd} , V_{gs} diminuisce a causa dell'aumento della tensione di source, e V_{bs} diventa negativo. A causa di questi fenomeni, la corrente che scorre nel MOSFET con questo tipo di connessione è circa la metà di quella che scorre nel transistor con il collegamento di tipo Source-Ground; bisognerà quindi costruire transistor di dimensioni maggiori che pilotino correnti più elevate. Quindi la dimensione del transistor determina la dimensione della cella di memoria.



(a) Source-ground (P -> AP) (b) Source-follower (AP -> P)

Figura 27: funzionamento del transistor di scrittura della STT-MRAM

La tabella 2 mostra inoltre che mantenendo costanti le dimensioni della cella MTJ, e diminuendo quelle del transistor, vari di molto la dimensione della cella di memoria:

MTJ size	F^2	F^2	F^2	F^2
Tr gate width, W	$10F$	$4F$	$2F$	F
Cell size	$40F^2$	$16-12F^2$	$8-6F^2$	$4F^2$

Tabella 2

Affidabilità dello strato di MgO

La barriera di MgO è usata nella giunzione a tunnel magnetica, e la sua affidabilità è di fondamentale importanza per il corretto funzionamento della cella di memoria.

La tensione applicata durante la scrittura, V_w , deve essere minore della tensione di breakdown del dielettrico: V_{BD} , ed è maggiore quando scriviamo nello stato AP rispetto quando scriviamo nello stato P. Il rapporto MR e il prodotto RA sono vincolati dalla tensione V_w secondo la relazione:

$$V_w = J_{c0} \times RA \times \left(\frac{MR}{100} + 1 \right);$$

dove J_{c0} è la densità della corrente di valutazione.

La tensione dielettrica di breakdown è espressa da: $V_{BD} = E_{BD} \times t_{MgO}$

Dove E_{BD} è il valore della tensione di breakdown del film di MgO, e t_{MgO} è lo spessore della barriera di MgO.

Il valore di E_{BD} , e quindi di V_{BD} vengono studiati per far resistere la memoria a 10 anni di scrittura e impedire fenomeni di TDDB.

Stabilità termica richiesta della MTJ per NV-RAM

Quando un dato viene scritto su una STT-MRAM, la corrente che passa attraverso la MTJ induce una torsione dello spin degli elettroni del free layer del dispositivo. La

probabilità che si verifichi il fenomeno opposto, in una cella avente corrente I_{cell} è data da:

$$P_1 = 1 - \exp \left[-\frac{t}{\tau_0} \exp \left\{ -\frac{E}{K_B T} \left(1 - \frac{I_{cell}}{I_w} \right) \right\} \right]$$

Dove I_w è il valore della corrente di valutazione, τ_0 e t sono il tempo di durata di un ciclo, e di un impulso elettrico. Quando consideriamo operazioni non volatili, tutte le celle devono mantenere il loro stato durante le operazioni di lettura, e conservare i bit immagazzinati nel tempo, per consentire al chip di operare correttamente. Se espandiamo l'equazione precedente, si ottiene la funzione fallimento del chip:

$$F_{chip} = 1 - \exp \left[-m \frac{t}{\tau_0} \exp \left\{ -\frac{E}{K_B T} \left(1 - \frac{I_{cell}}{I_w} \right) \right\} \right]$$

Dove m è il numero di bit nei quali viene fatto accesso nello stesso momento, t è la durata totale ($10 \text{ anni} \times t_{read}/t_{cycle}$).

Layout della cella di memoria

Per raggiungere una STT-RAM ad alta densità, si desidera avere una cella di memoria con area piccola, ma che abbia una corrente sufficiente da far commutare la magnetizzazione, quindi assume una grande importanza la larghezza del Gate del MOSFET.

Venne proposto l'implementazione una cella con un MTJ e due transistor (2T1R). Per minimizzare l'area della cella, la zona di isolamento tra una cella e quella adiacente nella direzione della Bit Line, viene sostituita da un transistor di una cella adiacente.

3.2.4.3 Tecnologie per la produzione di STT-MRAM ad alta densità

Attualmente si sta sviluppando il metodo della registrazione perpendicolare per la MTJ, nel quale la magnetizzazione ha direzione perpendicolare al piano degli strati (nella tipologie di memorie fino a qui vista la magnetizzazione ha direzione parallela a quella

del piano). Tale procedura raggiunge alta stabilità termica e più bassi valori della corrente di commutazione, rispetto le STT-MRAM analoghe, ma con la direzione della magnetizzazione parallela a quella del piano. In ogni modo la riduzione della corrente di commutazione porta a piccole correnti di lettura, e come risultato, i tempi di accesso del chip degradano. Per prevenire tale degradazione è stato proposto un sistema di ristrutturazione del segnale.

Per migliorare la densità del chip si può usare una cella a multilivello(figura 28), nella quale il numero dei bit memorizzati è uguale al numero delle giunzioni magnetiche. In questa struttura della cella di memoria, i multipli livelli di resistenza si ottengono cambiando la dimensione delle varie MTJ per raggiungere diversi valori della resistenza e diverse correnti di commutazione.

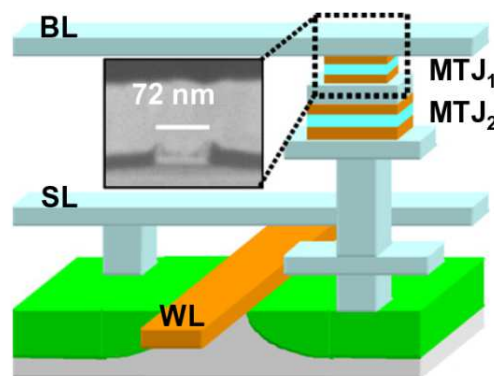


Figura 28: schema di una cella multi-livello

Fujitsu, in collaborazione con l'università di Toronto, recentemente ha sviluppato un metodo di lettura efficiente e affidabile per le STT-MRAM. Venne osservato infatti, che in fase di lettura, dopo che viene applicata un'elevata tensione per determinare la resistenza della giunzione, la corrente che passa nella cella di memoria non è molto inferiore alla corrente di scrittura, e può accadere pertanto che una fluttuazione elettrica della caratteristica della MTJ, può far sì che la corrente di lettura si comporti come una corrente di scrittura, portando all'inversione della direzione di magnetizzazione della giunzione. Venne sviluppato allora un circuito con un design innovativo per risolvere questi problemi di perdita del valore memorizzato.

Questo nuovo metodo di lettura usa una resistenza negativa⁷, con valore intermedio tra R_{high} e R_{low} collegata in parallelo alla resistenza della cella di memoria, ed R_{tot} la

$$resistenza\ equivalente\ vale\ R_{tot} = \frac{R_{MTJ}(-R)}{R_{MTJ}-R}.$$

Se la MTJ è nello stato ad alta resistenza, il circuito ha una resistenza totale negativa.

Se la MTJ è nello stato a bassa resistenza, esibisce un valore normale della resistenza (positivo).

Questi accorgimenti consentono di utilizzare un segnale d'ingresso più basso per valutare lo stato di MTJ, eliminando il problema dell'inversione della magnetizzazione nella fase di lettura

Fujitsu recentemente ha progettato nuove STT-MRAM più piccole del 60% e più facili da integrare: come già spiegato precedentemente, se la cella di memoria ha un valore elevato della corrente di commutazione, il transistor deve avere dimensioni elevate per poter pilotare tale corrente di scrittura, che risulta essere un vincolo per la riduzione delle dimensioni della cella. Fujitsu Laboratories ha invertito la struttura della MTJ, sviluppando una nuova MTJ, consistente in pinned layer, barriera di ossido e il free layer, chiamata TP-MTJ (top pinned MTJ), che si contrappone alla precedente BT-MTJ (bottom pin MTJ). Ad ogni modo, poiché la distanza tra la barriera di tunnel il pinned layer e l'elettrodo di base è ridotta, per guasti elettrici durante la fabbricazione è stato inserito un buffer tra la barriera di tunnel e l'elettrodo di base, che permette che, nella commutazione AP→P la corrente di scrittura vada nella stessa direzione della

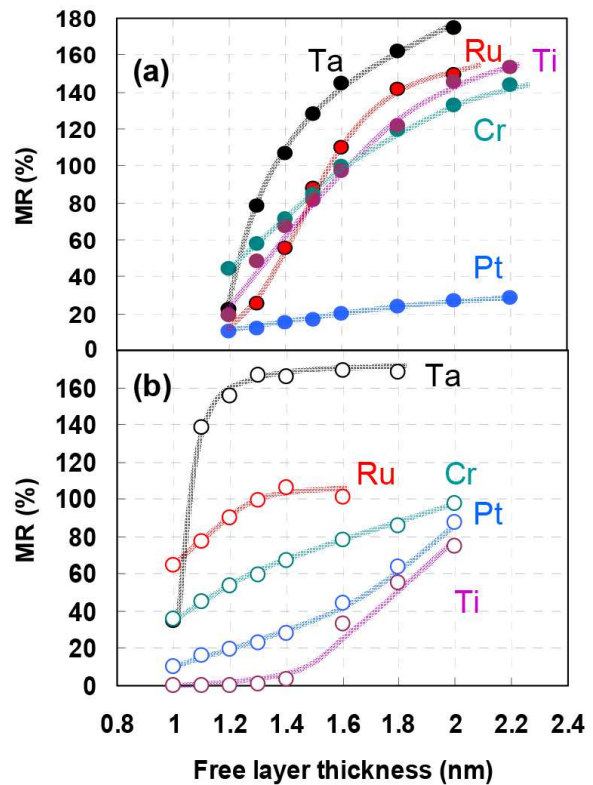


Figura29: spessore del free layer

⁷ resistenza il cui valore diminuisca all'aumentare della corrente

corrente del transistor, permettendo quindi alla cella di funzionare con dispositivi di dimensioni più piccole

La struttura della TP-MTJ è visibile in figura30: la giunzione a tunnel magnetica è realizzato con il processo di sputtering a radiofrequenza, e riscaldamento sottovuoto alla temperatura di 350°C per due ore, sotto il campo magnetico di 1.5T.

Nel design della struttura a stack, lo spessore del free layer e dello strato di metallo adiacente ad esso, devono essere scelti con attenzione, in quanto hanno un effetto significativo nella caratteristica del MTJ, specialmente nel caso in cui il free layer è più sottile di qualche nanometro.

Il fattore di conservazione per la cella a TP-MTJ è di 43.6 che non è sufficiente per garantire l'immagazzinamento di un dato per 10 anni; tale fattore è destinato a diminuire a causa dell'effetto joule che si verifica durante le misurazioni.

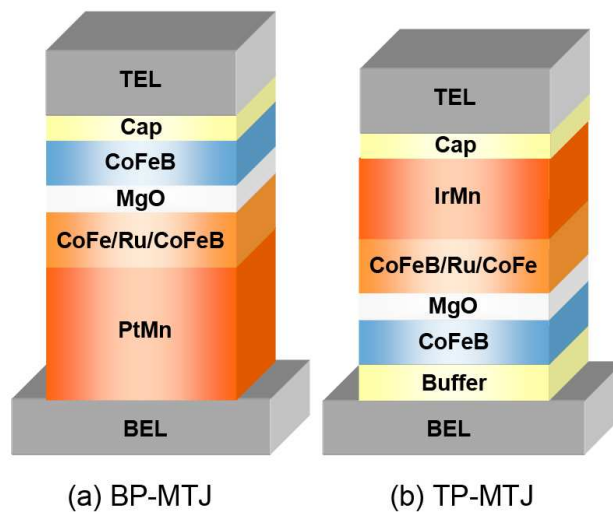


Figura30:schema delle strutture di celle MRAM (a) BP-MTJ e (b) TP-MTJ

3.3 MRAM attuali

Everspin Technologies è il leader mondiale nello sviluppo e nella produzione di memorie (MRAM) e di sensori magnetoresistivi. Con origini in Freescale Semiconductor e ora sostenuta da importanti società d'investimento in capitale di rischio, Everspin ha lanciato il suo primo prodotto MRAM commerciale nel 2006. Un numero sempre crescente di aziende leader ha adottato MRAM Everspin per i loro prodotti più avanzati.

La compagnia Everspin Technologies nel 2011 ha prodotto 4 milioni di MRAM, e con di produrne 5 milioni nell'anno odierno. Le MRAM prodotte da Everspin Technologies sono:

Everspin Technologies 256Kb Parallel MRAM:

le memorie MR256A08B / MR256D08B sono MRAM a 262,144 bit, organizzate come 32.768 parole di 8 bit. Queste memorie sono ideali per le applicazioni che devono immagazzinare permanentemente e recuperare velocemente dati critici e programmi, mantengono il valore memorizzato per 20 anni e sono protette dall'assenza di alimentazione mediante un circuito a bassa tensione che impedisce la scrittura con tensioni non specificate.

Caratteristiche MR256A08B:

- ✓ 32K x 8 MRAM;
- ✓ tensione di alimentazione di 3.3V;
- ✓ ciclo di lettura/scrittura di 35ns;
- ✓ cicli di lettura/scrittura illimitati;
- ✓ non volatili;
- ✓ sono compatibili con SRAM a basso consumo e altri prodotti non volatili, quali:
 - TSOP2-small footprint;
 - 400-mil, 33-lead plastic;
 - Small-outline;
 - BGA-48-pin;
 - SOIC packages-32-lead;
- ✓ valori di temperature permessi: 0 a 70°C.

Caratteristiche MR256D08B:

- ✓ Alimentazione duale, 32K x 8 MRAM;
- ✓ Tensione assorbita di 3.3V
- ✓ ciclo di lettura/scrittura di 45ns;
- ✓ compatibili con SRAM;
- ✓ cicli di lettura/scrittura illimitati;
- ✓ dati non volatili anche dopo 20 anni;
- ✓ intervallo di temperatura: 0 a 70°C.

Esempi di memoria 256Kb in commercio prodotte da Everspin:

MR256A08BCSO35;

MR256A08BCSO35R;

MR256A08BSO35;

MR256A08BSO35R;

MR256A08BCYS35;

MR256A08BCYS35R;

MR256A08BYS35;

MR256A08BYS35R;

MR256A08BCMA35;

MR256A08BCMA35R;

MR256A08BMA35;

MR256A08BMA35R;

MR256D08BMA45;

MR256D08BMA45R

Everspin technologies 1Mb Parallel MRAM

Everspin technologies MR0A08B, MR0D08B, e MR0A16A sono MRAM a 1.048.576 bit. I dispositivi Everspin MRAM sono disponibili in una varietà di caratteristiche, come ad esempio doppia alimentazione, SPI seriale, organizzate come 131.072 parole di 8 bits, o 65.536 parole di 16 bit, e cicli di lettura/scrittura tra i 35 ns e i 45 ns, senza ritardo, e illimitate operazioni di lettura/scrittura.

Caratteristiche MR0A08B:

- ✓ Alimentazione duale organizzata come 131.parole di 8 bit;
- ✓ Cicli di lettura/scrittura di 35ns;
- ✓ Illimitati cicli di lettura/scrittura;
- ✓ I dati sono mantenuti non volatili per più di 20 anni;
- ✓ Una memoria sostituisce in efficienza e semplicità una memoria Flash, SRAM,EEPROM;
- ✓ Assorbe la tensione di 3.3V;
- ✓ Ha una protezione automatica per la per l'assenza di alimentazione.

Caratteristiche MR0D08B:

- ✓ Alimentazione duale organizzata come 131.parole di 8 bit;
- ✓ Cicli di lettura/scrittura di 45ns;
- ✓ I dati sono mantenuti non volatili per più di 20 anni;
- ✓ Una memoria sostituisce in efficienza e semplicità una memoria Flash, SRAM,EEPROM;
- ✓ Assorbe la tensione di 3.3V;
- ✓ La tensione di I/O aupporta valori di interferenza tra 1.65 e 2.6 V;

Caratteristiche MR0A16A:

- ✓ Cicli di lettura/scrittura di 45ns;
- ✓ Organizzata come 65.536 parole di 16 bit;
- ✓ I dati sono mantenuti non volatili per più di 20 anni;
- ✓ Una memoria sostituisce in efficienza e semplicità una memoria Flash, SRAM,EEPROM;
- ✓ Assorbe la tensione di 3.3V;
- ✓ Ha una protezione automatica per la per l'assenza di alimentazione.

Esempi di memoria 1Mb in commercio prodotte da Everspin:

MR0A08BCYS35;

MR0A08BSO35;

MR0A08BMA35;

MR0A08BCMA35;

MR0A08BYS35,

MR0A08BYS35R;

MR0A08BCYS35R;

MR0A08BSO35R;
MR0A08BMA35R;
MR0A08BCMA35R;
MR0D08BMA45;
MR0D08BMA45R;
MR0A16ACYS35;
MR0A16AYS35;
MR0A16AMA35;
MR0A16ACMA35;
MR0A16AVYS35;
MR0A16AVMA35;
MR0A16AYS35R;
MR0A16ACYS35R

Everspin Technologies 4Mb Parallel MRAM

Le MRAM da 4Mb Everspin MR2A08A e MR2A16A offrono compatibilità con le SRAM, e tempi di lettura/scrittura di 35ns, con un numero illimitato di operazioni di cancellazione/scrittura.

La MR2A08A è una MRAM a 4.194.304 bit , organizzata con 524.288 parole di 8 bit.

La MR2A16A è una MRAM a 4.194.304 bit organizzata con 262.144 parole di 16 bit. I dati sono sempre non volatili, per tempi superiori ai 20 anni; e sono automaticamente protetti dall'assenza dell'alimentazione da un circuito a bassa tensione, che previene operazioni di scrittura per tensioni non specificate. Le memorie MR2A08A e MR2A16A sono memorie ideali per le applicazioni che richiedono immagazzinamento di dati in modo permanente, oppure la loro lettura in tempi brevi.

Queste memorie inoltre, permettono la memorizzazione dei dati in modo sicuro, in un ampio campo di temperature, questi prodotti infatti sono offerti alla temperatura commerciale (da 0 a 70°C), industriale(da -40 a 85°C), o estesa(da -40 a 105°C).

Esempi di memoria 4Mb in commercio prodotte da Everspin:

MR2A08AMA35;

MR2A08ACMA35;

MR2A08AYS35;

MR2A08ACYS35;

MR2A08AMYS35;

MR2A08AYS35R;

MR2A08ACYS35R;

MR2A08AMYS35R;

MR2A08AMA35R;

MR2A08AMA35R;

MR2A16AMA35;

MR2A16ACMA35;

MR2A16AYS35;

MR2A16ACYS35;

MR2A16AVYS35;

MR2A16AVMA35;

MR2A16AYS35R;

MR2A16ACYS35R;

MR2A16AVYS35R;

MR2A16AMA35R;

MR2A16ACMA35R;

MR2A16AVMA35R;

Everspin Technologies 16 Mb Parallel MRAM

Questi due tipi di memorie forniscono dispositivi compatibili con SRAM, che hanno tempi di lettura/scrittura molto veloci (35ns) e ammettono illimitate operazioni di scrittura/cancellazione. La MRAM MR4A08B è costituita da 16.777.216 bit, e organizzata come 2.097.152 parole da 8bit; invece la MRAM MR4A16B è organizzata come 1.048.576 parole da 16 bit. Per entrambe i dati sono mantenuti non volatili per periodi di tempo superiori ai 20 anni, e sono automaticamente protetti dall'assenza dell'alimentazione da un circuito a bassa tensione, che previene operazioni di scrittura per tensioni non specificate. Queste memorie inoltre, permettono la memorizzazione dei dati in modo sicuro, in un ampio campo di temperature, questi prodotti infatti sono offerti alla temperatura commerciale (da 0 a 70°C), industriale(da -40 a 85°C), o estesa(da -40 a 125°C).

Tali memoria, inoltre hanno una struttura più semplice delle memorie FLASH, SRAM, EEPROM, e sono più efficienti.

Esempi di memoria 16Mb in commercio prodotte da Everspin:

MR4A08BCYS35;
MR4A08BYS35;
MR4A08BYS35R;
MR4A08BCYS35R;
MR4A08BMA35;
MR4A08BCMA35;
MR4A08BMA35R;
MR4A08BCMA35R;
MR4A16BCYS35;
MR4A16BMA35;
MR4A16BCMA35;
MR4A16BYS35;
MR4A16BYS35R;
MR4A16BCYS35R;
MR4A16BMA35R;
MR4A16BCMA35R;

Everspin Technologies Serial MRAM

I dispositivi a memorie MR MR25H256 / MR25H10 / MR25H40 offrono compatibilità alle memorie seriali FLASH e EEPROM, e sono caratterizzate da operazioni di lettura/scrittura senza ritardi, e dalla possibilità di compiere illimitate operazioni di scrittura/cancellazione. A differenza delle altre memorie seriali però, lettura e scrittura avvengono ad accesso casuale. Queste memorie seriali sono la soluzione per le applicazioni il cui scopo è immagazzinare e recuperare i dati velocemente e usando il minor numero di I/O “pins”.

La memoria MR25H40 è costituita da 4.194.304 bit, ed è organizzata da 524.288 parole di 8 bit; La memoria MR25H10 è costituita da 1.048.576 bit, ed è organizzata da 131.072 parole di 8 bit; La memoria MR25H256 è costituita da 262.144 bit, ed è organizzata da 327.568 parole di 8 bit.

I dispositivi a MRAM seriali sono disponibili sia nella forma 5mm x 6mm x 8-pin DFN package, che in quella 5mm x 6mm x 8-pin DFN Small Flag package; entrambi però sono compatibili con le memorie seriali EEPROM, FLASH e FeRAM. La memoria MR25H40 permette l’immagazzinamento in un vasto intervallo di temperature: (da -40° a 85°C; da -40° a 125°C).

Esempi di memoria seriale in commercio prodotte da Everspin:

MR25H256CDC;

MR25H256CDCR;

MR25H256CDF;

MR25H256CDFR;

MR25H256MDC;

MR25H256MDCR;

MR25H256MDF;

MR25H256MDFR;

MR25H40CDC;

MR25H40MDC;

MR25H40MDCR;

MR25H40CDCR;

MR25H10MDC;

MR25H10MDCR;

MR25H10CDCR;

MR25H10CDC;

4 CONCLUSIONI

Le Toggle MRAM sono attualmente in produzione, e hanno una densità che varia dai 256 Kb ai 16 Mb, e sono prodotte dalla compagnia Everspin Technologies, che sta attualmente sviluppando Toggle MRAM, con lo scopo di raggiungere livelli sempre maggiori di densità per il futuro. Questi tipi di memorie forniscono dispositivi non volatili che hanno tempi di lettura/scrittura molto veloci (35ns), e ammettono illimitate operazioni di programmazione/cancellazione. Alcune caratteristiche che hanno portato alla loro diffusione sono state la scrittura tramite l'effetto "toggle switching" e la barriera di tunnel.

Le STT-MRAM sono attualmente in una fase di sviluppo, e grazie alla loro scalabilità hanno la potenzialità di cambiare il commercio delle MRAM a medio termine.

5 BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- [1]Gerardin S, Paccagnella A., Present and Future Non-Volatile Memories for Space, <http://ieeexplore.ieee.org>,2010;
- [2]http://it.wikipedia.org/wiki/Memoria_a_cambiamento_di_fase;
- [3]http://en.wikipedia.org/wiki/Ferroelectric_RAM;
- [4]Prince B., Emerging Memories-Technologies and trends. Kluwer Academic Publishers;
- [5]http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetoresistive_random-access_memory;
- [6]Mazzoldi P., Nigro M., Voci C., Fisica Volume II, Edises;
- [7]http://en.wikipedia.org/wiki/Stoner%E2%80%93Wohlfarth_model;
- [8]http://en.wikipedia.org/wiki/Stoner%E2%80%93Wohlfarth_astroid;
- [9]Slaughter J. M., Materials for Magnetoresistive Random Access Memories, <http://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev-matsci-082908-145355>,2009;
- [10]Ditizio R., Werbaneth P., Cell Shape and Patterning Considerations for Magnetic Random Access Memory (MRAM) Fabrication, <http://repository.cmu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1000&context=ece>,2004;
- [11] Sousa R. C., Prejbeanu I.L., Non volatile magnetic random access memories (MRAM), http://crocustechnology.com/pdf/MRAM_CR_v5a.pdf,2005;
- [12]<http://qti.sns.it/DispenseCorsi/Vignale/3.%20Magnetoresistive%20Devices%20II.pdf>;
- [13]http://en.wikipedia.org/wiki/Spin-transfer_torque;

- [14]Kawahara T., Ito K., Takemura R., Ohno H., Spin-transfer torque RAM technology: Review and prospect,http://ac.els-cdn.com/S002627141100446X/1-s2.0-S002627141100446X-main.pdf?_tid=593b1d52-019e-11e2-bcc5-00000aacb362&acdnat=1347979218_acdc019c0e89c37dc87f7d1ae9cd7512 ,2011;
- [15]<http://www.fujitsu.com/global/news/pr/archives/month/2010/20100210-03.html>;
- [16]<http://www.mram-info.com/fujitsu-developed-new-stt-mram-cell-60-smaller-and-easier-integrate>;
- [17]<http://everspin.com/>;
- [18]Young Min Lee, Chikakko Yoshida, Koji Tsunoda, Shinjiro Umehara, Masaki Aoki, and Toshihiro Sugii, Highly Scalable STT-MRAM with MTJs of Top-pinned Structure in 1T/1MTJ Cell,
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=05556123>, 2010;
- [19]M. Durlam, D. Addie, J. Akerman, B. Butcher, P. Brown, J. Chan, M. DeHerrera, B.N. Engel, B. Feil,G. Grynkewich, J. Janesky, M. Johnson, K. Kyler, J. Molla, J. Martin, K. Nagel, J. Ren, N.D. Rizzo,T. Rodriguez, L. Savtchenko, J. Salter, J.M. Slaughter, K. Smith, J.J. Sun, M. Lien, K. Papworth, P. Shah,W. Qin, R. Williams, L. Wise, and S. Tehrani, A 0.18 μ m 4Mb Toggling MRAM,
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1269448>,2005;