

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettronica



**MODELLI DI SWITCHING IN MEMORIE RESISTIVE: RUOLO DELLA
TEMPERATURA E DEGLI SFORZI MECCANICI**

Relatore: Prof. Daniele IELMINI

Tesi di Laurea Magistrale di:

Stefano Ambrogio

Matricola: 761392

Anno Accademico 2011-2012

Indice

Indice	i
Introduzione	iii
1 Le memorie a switching resistivo	1
1.1 Memorie Non Volatili	1
1.2 Memorie a switching resistivo	2
1.3 Memorie RRAM	3
1.3.1 Thermochemical memory effect (TCM)	5
1.3.2 Valence change memory effect (VCM)	6
1.3.3 Conductive Bridge RAM (CBRAM)	7
1.4 Prospettive di scaling	8
2 Modellizzazione del set e del reset di celle in HfO_x mediante modelli analitici e numerici	11
2.1 Modelli preesistenti	11
2.1.1 Modello a conduzione TAT	12
2.1.2 Modello dinamico a 'clessidra'	14
2.2 Modello filamentare	17
2.2.1 Set	22
2.2.2 Dipendenza di V_c da I_c	23
2.2.3 Reset	24
2.2.4 Relazione analitica per i tempi di set e reset	25
2.3 Modello numerico COMSOL	27
2.3.1 Risultati delle simulazioni	29

3	Modello di switching a gap variabile	33
3.1	Il modello	33
3.1.1	Reset	34
3.1.2	Set	42
3.1.3	Vantaggi e Limiti	47
3.2	Modello a gap - area variabile	50
3.3	Interpolazione dei dati sperimentali	54
4	Modellizzazione dei fenomeni di switching complementare	57
4.1	Complementary Resistive Switching, CRS	57
4.1.1	Logica CRS	60
4.1.2	Simulazione del CRS	61
4.2	Complementary Switching, CS	65
4.2.1	Interpretazione unificata dei modelli di switching	69
4.2.2	Modellizzazione del CS	72
5	Modellizzazione di celle CBRAM I: asimmetria di set/reset	77
5.1	Principio di funzionamento di una memoria CBRAM	77
5.2	Caratterizzazione statica di celle 1R	78
5.3	Caratterizzazione statica di celle 1T1R	87
6	Modellizzazione di celle CBRAM II: modello dinamico di switching	93
6.1	Il modello	93
6.2	Dipendenza da t_{reset}	97
6.3	Dipendenza da t_{set}	98
	Conclusioni	103
	Bibliografia	107
	Ringraziamenti	111

Introduzione

Nel corso degli ultimi due decenni si è assistito ad una forte diffusione dei dispositivi elettronici portatili, tra cui vale la pena citare i telefoni cellulari, le fotocamere digitali, i lettori musicali, i computer portatili o i tablet. Questo fenomeno sociale ha determinato una crescente necessità di immagazzinamento di informazioni a lungo termine, provocando un vastissimo sforzo nel campo industriale e della ricerca per fornire memorie non volatili con capacità sempre maggiori. Tali dispositivi, in grado di mantenere i dati anche senza un'alimentazione elettrica, devono anche soddisfare requisiti di affidabilità, velocità, e, soprattutto, basso costo. La memoria Flash è diventata leader indiscussa del settore, dato che ha permesso di venire incontro a queste richieste con un'inesauribile capacità di scalare le sue dimensioni in accordo con la legge di Moore, fino agli odierni 20 nanometri.

Fino a quando si potrà continuare lungo questa strada? La domanda risulta essere più che lecita, poiché si ritiene di essere vicini al limite ultimo di questa tecnologia. Nuove ed interessanti tecniche sono state utilizzate come, per esempio, l'immagazzinamento multilivello dei dati, grazie al quale una singola cella può memorizzare fino a tre bit. Tuttavia si rende ogni giorno più urgente seguire approcci radicalmente diversi ed altamente innovativi per riuscire a superare il nodo tecnologico dei 10 nanometri. Oltre allo scaling, si desidera sviluppare una nuova classe di memorie capaci non solo di immagazzinare molti dati, ma anche di essere estremamente veloci. Questa categoria di memorie, denominata Storage Class Memory (SCM), mira ad avere sia la capacità di un Hard Disk, sia la velocità di una memoria di sistema DRAM o SRAM.

La tecnologia RRAM costituisce un valido protagonista per la creazione delle SCM, riunendo in sé notevoli vantaggi. Accanto ad una estrema semplicità costruttiva, si intravede la possibilità di realizzare strutture ad elevata densità d'integrazione. Infatti, la singola cella viene realizzata mediante una sovrapposizione di tre soli strati secondo la struttura Metallo - Isolante - Metallo (MIM). Questa semplicità si riflette nell'architettura della memoria, progettabile anche in strutture 3D e realizzabile durante il Back End of the Line, non

esigendo particolari requisiti di cristallinità. Ciò consentirebbe inoltre la progettazione di piccoli settori di memoria direttamente sul chip (System on Chip, SoC). Infine si ricorda come le velocità di lettura e scrittura siano notevoli, nonché si possano avere tensioni di alimentazione molto basse, se confrontate con la tecnologia Flash.

Tuttavia, la spiegazione dei fenomeni fisici insiti nei meccanismi di switching è ancora fonte di un acceso dibattito nella comunità scientifica. Solo mediante una comprensione più profonda delle dinamiche presenti sarà possibile trovare una soluzione ai problemi che affliggono queste memorie, come l'insufficiente ritenzione del dato programmato e la variabilità dei parametri chiave quali i valori resistivi nei due stati stabili. E' in tale ottica che si inserisce il lavoro di questa tesi, con lo scopo di interpretare i meccanismi di scrittura e cancellazione mediante modelli analitici di calcolo, in vista di uno scaling della tecnologia.

L'oggetto della tesi di laurea qui presentata, svolta presso il Dipartimento di Elettronica e Informazione del Politecnico di Milano nell'anno accademico 2011-2012, è lo sviluppo di modelli analitici per lo switching in memorie RRAM, che evidenzino il ruolo dei feedback termici e meccanici presenti. La compattezza delle rappresentazioni esposte consente un'implementazione dei modelli in un simulatore circuitale tipo Spice, contenendo tuttavia un'impostazione fisica rigorosa basata sull'analisi di dati e dipendenze sperimentali. Il lavoro è stato sviluppato nell'ambito di un progetto di ricerca sulle memorie RRAM finanziato da Fondazione Cariplo. La modellizzazione si è basata sui risultati ottenuti da campioni di memorie RRAM ad ossido, fornite da Sematech, e di memorie CBRAM a ponte conduttivo, provenienti da Adesto.

Qui di seguito vengono riportati i principali argomenti trattati nel corso di questo tesi.

Capitolo 1. Dopo una veloce panoramica sulle memorie non volatili, si introduce il concetto di memorie resistive e si fornisce una classificazione basata sul loro funzionamento fisico.

Capitolo 2. Si presentano alcuni esempi di modelli fisici preesistenti riguardanti la modellizzazione dei fenomeni di switching. In particolare si osservano con attenzione i modelli filamentare e quello numerico sviluppato mediante il simulatore COMSOL.

Capitolo 3. Si propone un nuovo modello analitico per comprendere i meccanismi di switching in memorie RRAM basato sui feedback termici.

Capitolo 4. Dopo una introduzione sulle architetture sviluppabili mediante le memorie resistive, si introduce il concetto di Complementary Resistive Switching (CRS), seguito da un'interpretazione fisica mediante il modello esposto nel capitolo 3. Infine si accenna al Complementary Switching come possibile alternativa al CRS e si dà una modellizzazione di principio utilizzando i concetti di stress e feedback meccanici.

Capitolo 5. Si espongono i risultati sperimentali e le relative simulazioni statiche di memorie CBRAM, studiandone i comportamenti.

Capitolo 6. Si presenta un innovativo modello basato sul concetto di stress e rilassamento nel dispositivo. Particolare attenzione verrà rivolta ai risultati delle misure in impulsata, nonché agli effetti di feedback meccanico.

Capitolo 1

Le memorie a switching resistivo

In questo capitolo verrà presentata una panoramica sulla situazione attuale delle memorie non volatili, alla quale seguirà un approfondimento sulla tecnologia resistiva. Di questa si analizzerà la famiglia delle memorie RRAM, a cui seguirà una classificazione dei dispositivi in base al funzionamento fisico.

1.1 Memorie Non Volatili

Per memoria non volatile si intende un dispositivo capace di memorizzare un'informazione e di mantenerla anche senza un'alimentazione elettrica. Il loro impiego risulta essere vastissimo oggi, essendo queste utilizzate in qualsiasi strumento elettronico, sia esso un lettore mp3, una memoria usb, una fotocamera digitale o un cellulare, apparecchi nei quali si vogliono conservare dati a lungo termine e senza l'ausilio di potenza elettrica, come invece accade nelle memorie DRAM ed SRAM. Le memorie non volatili si distinguono in tre famiglie, le Read Only Memory (ROM), i dispositivi di immagazzinamento magnetico quali gli hard disk e le memorie a stato solido. In quest'ultimo campo, la tecnologia leader da decenni è quella delle memorie Flash. Questa ha dominato e continua ad imporsi sulla scena mondiale grazie ad una grande capacità di scalare, ovvero di ridurre le sue dimensioni, al passo con le richieste del mercato. Superando di volta in volta dimensioni ritenute invalicabili, ad oggi si è giunti a tecnologie a 20 nm. Tuttavia, si ha la sensazione di essere vicini al vero limite ultimo in fatto di scaling. Le Flash sono infatti costituite da un transistor a Floating Gate nel quale si immagazzina una carica che consente di variare la tensione di soglia V_T del dispositivo. Tuttavia, la riduzione delle dimensioni comporta una diminuzione

della carica immessa, in altre parole quest'ultima risulta essere troppo piccola, tale per cui anche la presenza o assenza di un solo elettrone causa variazioni significative della V_T .

Un altro inconveniente risulta essere legato alle tensioni operative di questa tecnologia. Infatti, a fronte di un continuo ridursi delle tensioni di alimentazione fino al Volt delle logiche attuali, le Flash continuano a lavorare con alimentazioni superiori ai 6 - 8 V [1]. Queste sono necessarie per le operazioni di programmazione -tunneling attraverso l'ossido della carica da memorizzare- e cancellazione -tunneling Fowler - Nordheim della carica memorizzata-. E' per tale ragione che si sono aperti nuovi filoni di ricerca per superare questi limiti, consci del fatto che, affinché una nuova tecnologia abbia un successo tale da essere messa in produzione, è necessario che sia scalabile sotto il nodo dei 10 nm, abbia delle migliorate velocità di lettura e scrittura, dissipando poca potenza e mostrando ottime proprietà di ciclabilità e ritenzione. Tra le varie idee, verrà qui presentata la famiglia delle memorie a switching resistivo.

1.2 Memorie a switching resistivo

Le memorie resistive si basano sullo sfruttamento della capacità di un determinato mezzo di commutare reversibilmente tra due stati stabili distinti da diverse proprietà resistive. In particolare, si può assegnare il dato '1' allo stato basso resistivo, mentre si associa lo '0' a quello alto resistivo. All'interno di questa macrofamiglia si distinguono numerose categorie di commutazione, come esemplificato da Fig. 1.1. Quelle più futuribili, come quelle che sfruttano effetti nanomeccanici o il cambiamento della resistività di una sola molecola, sono accompagnate da aree di ricerca ben più esplorate. Qui troviamo le memorie magnetoresistive (MRAM), le ferroelettriche (FeRAM) e le memorie a cambiamento di fase (PCM). Le prime due sfruttano la polarizzazione semi-permanente di domini magnetici per memorizzare il dato. Al variare della polarizzazione si ottengono diverse correnti di tunnel che originano due diverse resistività e, quindi, due differenti stati logici. Le memorie PCM, le più mature a livello industriale, sfruttano invece la capacità di un mezzo calcogenuro di passare reversibilmente tra uno stato amorfo alto resistivo ed uno cristallino basso resistivo. Per svolgere ciò si utilizza l'effetto Joule dovuto allo scorrere di una corrente. Superando la temperatura di fusione e raffreddando velocemente si ha un'amorfizzazione del mezzo. Scaldando sotto il punto di fusione si favorisce invece la cristallizzazione del calcogenuro. Infine si hanno le memorie Resistive RAM propriamente dette, basate su processi di ossido - riduzione (RRAM).

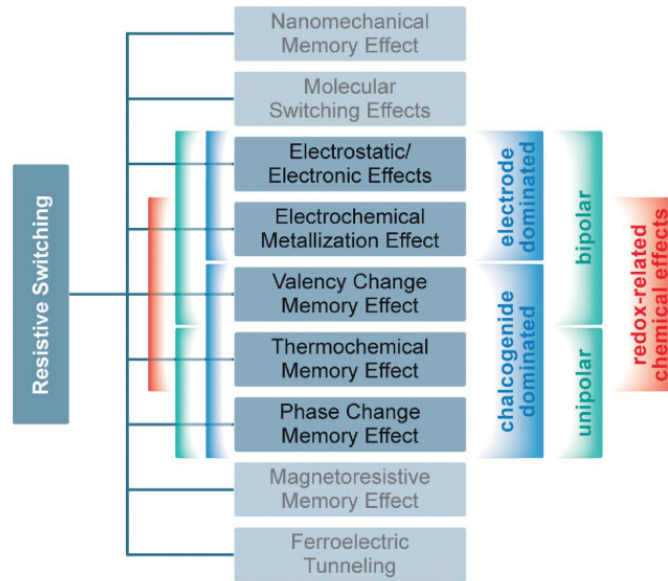


Figura 1.1: Classificazione delle varie famiglie di memorie a switching resistivo. Si osservano anche le suddivisioni in base all'unipolarità o bipolarità dello switching, al tipo di mezzo impiegato e al funzionamento secondo reazioni di ossido - riduzione.

1.3 Memorie RRAM

Le memorie RRAM, come già introdotto, rappresentano una promettente alternativa alle odierne tecnologie in produzione grazie alla loro estrema semplicità di costruzione. Sono generalmente costituite da una struttura MIM -Metallo Isolante Metallo-, dove gli elettrodi sono composti da materiali differenti, come, per esempio, oro, platino, nitruro di titanio, tungsteno. [2], mentre l'isolante può variare fra una moltitudine di ossidi binari, calcogenuri o, persino, composti organici. Nonostante i primi studi sulle proprietà di switching resistivo risalgano agli anni '60 [3], solo a partire dagli anni '90 si è registrato un deciso interesse per la ricerca in questo campo.

Prima di dare una panoramica sui tipi di meccanismi coinvolti, è necessario distinguere due categorie di switching. Come mostrato in Fig. 1.2(a), lo switching è detto unipolare quando è possibile ottenere entrambe le transizioni mediante tensioni aventi la medesima polarità. Supponendo di essere in uno stato alto resistivo, per passare a quello basso resistivo, ossia per compiere il set della cella, si applica una tensione positiva, per esempio. La crescita della corrente viene limitata mediante un sistema detto di compliance, che può essere un diodo, un transistor o un limitatore esterno. Viceversa, per passare dallo stato

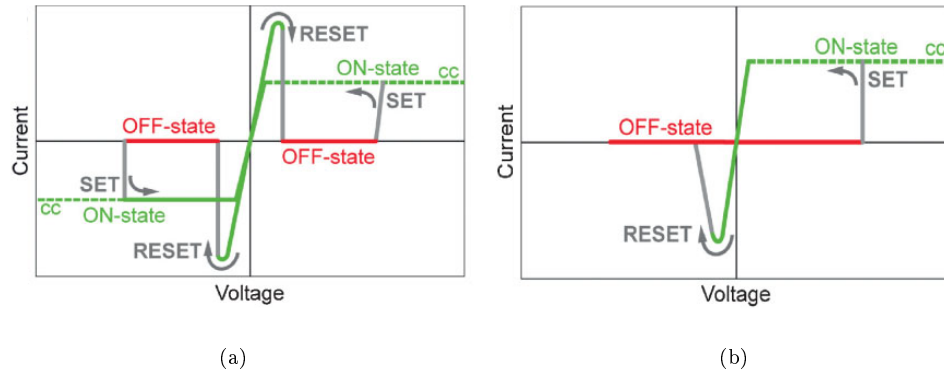


Figura 1.2: Caratteristiche tensione - corrente schematiche. Sono mostrate le diverse tecniche di programmazione, unipolare (a) e bipolare (b). In verde è indicato lo stato basso resistivo, in rosso quello alto resistivo. In grigio sono riportate le transizioni.

basso resistivo a quello alto resistivo, ossia per effettuare il reset, non si limita la corrente, arrivando alla commutazione per V_{reset} positiva e minore di V_{set} . Lo stesso comportamento avviene con tensioni negative. Invece, in Fig. 1.2(b) è schematizzato lo switching bipolare, nel quale il set avviene per tensioni positive, nell'esempio, mentre il reset si presenta per differenze di potenziale negative.

Per poter transire tra i due stati, è prima necessario effettuare una operazione preliminare, detta di Forming, mediante la quale si possono attivare le transizioni. Infatti, provocando un leggero breakdown all'interno dell'isolante, si viene a creare un filamento che determina uno stato basso resistivo. Si deve ricordare come la conduzione avvenga appunto mediante dei filamenti e non in maniera distribuita [4], comportando un'indipendenza tra l'area del contatto e la resistenza mostrata, come evidenziato da Fig. 1.3.

A questo punto si rende opportuna una classificazione delle memorie RRAM in base al loro funzionamento fisico. Si osservi come non esista, ad oggi, una spiegazione completa dei vari fenomeni, ma siano tuttora oggetto di studio ed analisi. Le categorie principali sono:

1. "Thermochemical memory effect" (TCM) nelle RRAM unipolari realizzate con ossidi metallici (ad es. NiO);
2. "Valence change memory effect" (VCM) nelle RRAM bipolari realizzate con ossidi metallici (ad es. HfO_x);
3. "Bipolar electrochemical metalization effect" (ECM) nelle Conductive Bridge RAM (CBRAM);

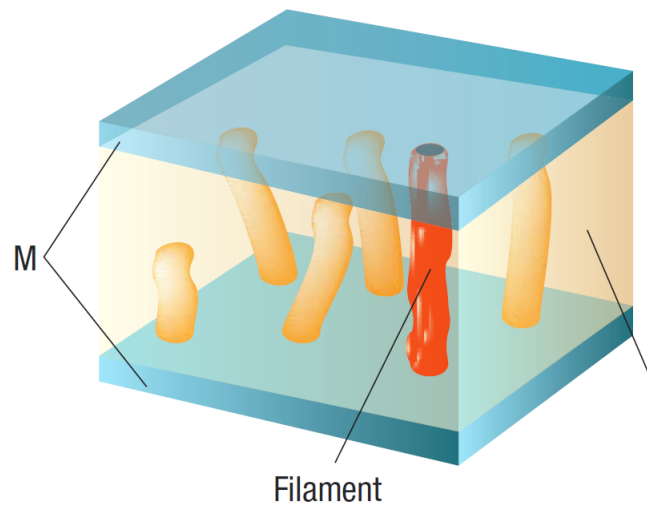


Figura 1.3: Struttura MIM. La conduzione di corrente avviene tramite dei filamenti che connettono gli elettrodi [2].

1.3.1 Thermochemical memory effect (TCM)

Le memorie RRAM che basano il loro funzionamento sull'effetto termochimico presentano una caratteristica unipolare. Il fenomeno fisico che consente le transizioni resistive è il riscaldamento per effetto Joule, dovuto al passaggio di corrente. Infatti, l'innalzamento di temperatura provoca delle variazioni della stechiometria mediante delle reazioni di ossidazione-riduzione che cambiano la conducibilità locale. Proprio la dipendenza dalla temperatura spiega l'unipolarità, essendo i fenomeni di migrazione ionica coinvolti non dipendenti dal verso del campo elettrico applicato. Il materiale eletto a modello per questa categoria di memorie è l'ossido di Nickel, NiO, con elettrodi in Platino. Poiché le tensioni necessarie a far commutare la resistività sono diminuite con la riduzione dello spessore di ossido, tale tecnologia è oggi compatibile con quella CMOS. Come schematizzato in Fig. 1.4, il set viene compiuto alzando la tensione ai capi della struttura. Poiché il filamento è interrotto, la resistenza è elevata. Giunti ad una certa soglia V_{set} , la temperatura è sufficiente a causare un breakdown nel dielettrico. Questo genera una riduzione, almeno parziale, del Nickel localmente, diventando metallico, mentre la zona circostante vede l'ossidazione degli ioni Ni^{2+} in Ni^{3+} . Per controllare le dimensioni del filamento si utilizza un sistema di compliance che limita la corrente e, di conseguenza, la tensione ai capi del dispositivo. Il reset viene ottenuto senza limitare la corrente. In questo modo la temperatura cresce parabolicamente,

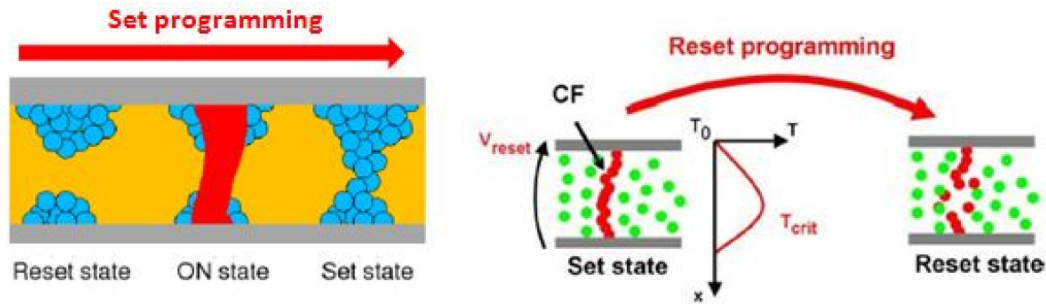


Figura 1.4: Schematizzazione dei fenomeni di set e reset in memorie a switching termochimico. Durante il set, la tensione applicata aumenta la temperatura locale grazie all'effetto Joule, causando un breakdown che crea il filamento. Nel reset, invece, l'incremento di temperatura provoca una diffusione degli ioni a metà del filamento, interrompendolo [5].

come mostrato in Fig. 1.5, arrivando ad attivare principalmente gli atomi al centro del filamento che diffonderanno, lasciando una zona svuotata che interrompe il ponte metallico.

1.3.2 Valence change memory effect (VCM)

Un'altra categoria di memorie RRAM sfrutta il cambiamento del numero di valenza degli atomi coinvolti. In questi dispositivi sono presenti sia l'effetto termico che attiva la migrazione ionica, sia una riduzione locale degli atomi metallici che porta alla formazione di un filamento conduttivo. In tali strutture, gli anioni ossigeno sono molto mobili, di conseguenza, applicando una tensione opportuna, questi migrano, generando zone a bassa densità di O e, quindi, più conduttive per la sola presenza di metalli ridotti. Per comodità, si preferisce far riferimento alle vacanze di ossigeno. Tramite una differenza di potenziale positiva, tali vacanze migrano verso il catodo, negativo, provocando il set della cella. Analogamente, una tensione negativa genera una migrazione verso il CF, che si dissolve per l'ossidazione del metallo presente e la ricombinazione tra ossigeni e vacanze. Le considerazioni presentate fanno facilmente concludere come queste memorie abbiano una caratteristica bipolare, dove il campo elettrico decide il verso della migrazione ionica. Un esempio sono le celle in Afnio, HfO_x , oggetto della prima parte di questa tesi.

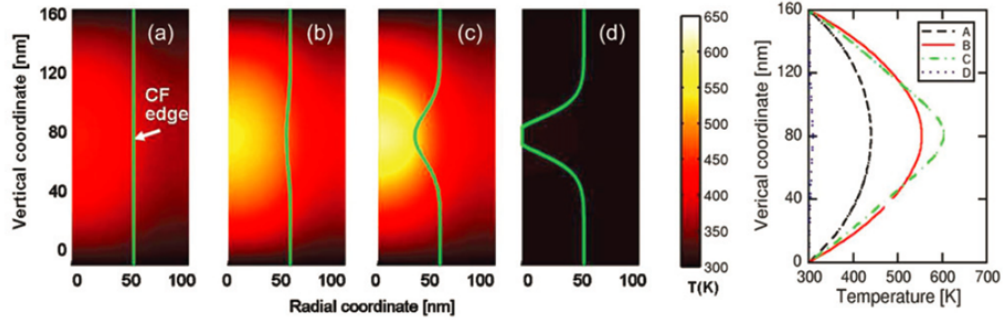


Figura 1.5: Profili 2D simulati di temperatura lungo il filamento, durante il reset. Il locale innalzamento provoca una migrazione degli ioni dal centro verso l'esterno, aprendo un gap, come si osserva scorrendo le varie immagini ottenute per tensioni sempre superiori. A lato si osservano i profili di temperatura lungo l'asse del filamento [5].

1.3.3 Conductive Bridge RAM (CBRAM)

Le memorie CBRAM, anche dette PMC -Programmable Metalization Cell-, sono delle memorie RRAM in cui l'isolante è costituito da un calcogenuro, mentre gli elettrodi, metallici, assumono ruoli differenti. Uno dei due è realizzato con un metallo inerte, per esempio in Platino, mentre l'altro, chiamato elettrodo attivo, è composto da un metallo che, sotto l'applicazione di un campo elettrico, migra all'interno dell'isolante creando un percorso conduttivo in grado di portare la cella nello stato di set. I materiali più utilizzati sono Argento e Rame. Il modello fisico che descrive la migrazione è sempre quello di un processo termicamente attivato, guidato dal campo elettrico. In Fig. 1.6 è riportata una caratteristica tensione - corrente per una memoria CBRAM. In (a) si osserva la transizione di set, nella quale si ha il trasporto di Ag^+ che completano il CF fino all'elettrodo in Platino, come riportato in (b), definendo lo stato basso resistivo. Il reset avviene, invece, mediante una tensione negativa che richiama gli ioni positivi verso l'elettrodo attivo, come mostrato in (c), arrivando ad annullare il filamento e definendo, infine, lo stato alto resistivo. Essendo un processo dipendente dal campo elettrico, lo switching è intrinsecamente bipolare. Questa tecnologia, particolarmente recente [6], presenta un'elevata variabilità dei parametri durante i vari cicli di programmazione. Sarà necessario sviluppare film sottili in grado di assicurare

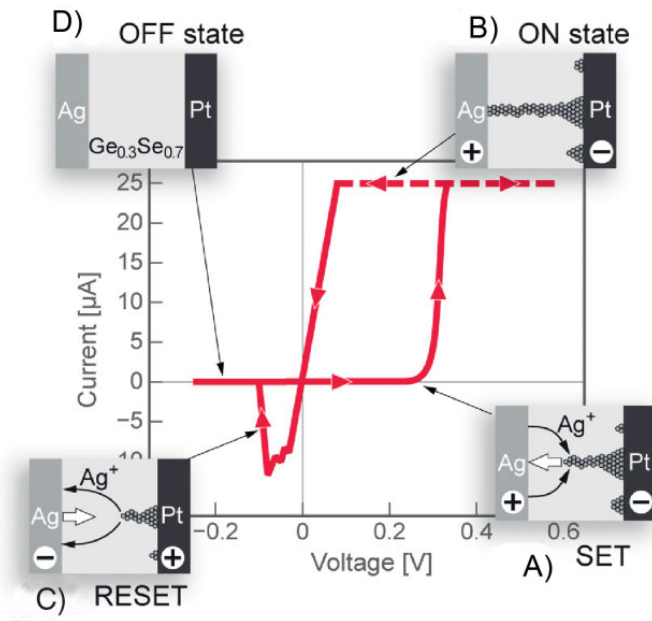


Figura 1.6: Caratteristica IV di una memoria CBRAM. Si osservano (a) la transizione di set, seguita dallo stato basso resistivo (b), caratterizzato da un filamento formato. In (c) si ha la transizione di reset che porta alla dissoluzione del filamento, (d).

un'elevata stabilità per i futuri sviluppi delle CBRAM.

1.4 Prospettive di scaling

Le tecnologie resistive sembrano essere le possibili candidate al ruolo di memoria non volatile dominante nel futuro, grazie a molteplici fattori. Si osserva infatti come sia possibile scalare questi dispositivi sotto i 10 nm, poiché, come si è visto, la cella consiste essenzialmente di un filamento conduttivo del diametro al massimo di una decina di nanometri. Questo costituirebbe infatti il limite ultimo alla riduzione delle dimensioni. Un altro fattore che gioca a favore di questi dispositivi è l'estrema semplicità di costruzione, essendo realizzate da una sovrapposizione di soli tre strati di materiale, significando inoltre un costo assai contenuto per la produzione. Non sono tuttavia da dimenticare gli inconvenienti nella realizzazione di queste memorie. Il primo consiste nella facilità di lettura dei due stati, affinché sia semplice è necessario che la finestra resistiva, ossia la differenza fra il valore della resistenza di reset e di quella di set, sia abbastanza ampia. Poiché, per ridurre le dimensioni e per dissipare una minor potenza, si vorrebbe avere un filamento più piccolo mediante una corrente di

compliance inferiore, lo stato di set non è più così differente da quello di reset. E' necessario considerare questo compromesso, altrimenti la realizzazione dei sense amplifier diventa complessa e le fluttuazioni dovute al rumore portano ad errori di lettura. Inoltre, filamenti piccoli comportano una peggior ritenzione del dato, aspetto non secondario, a causa dei fenomeni di stress meccanici e termici presenti. Un punto di forza per cui conviene puntare su questa tecnologia risiede nella velocità di programmazione, fino a 50 ns, molto inferiore ai tempi richiesti dalle Flash e vicini a quelli delle SRAM, attestatesi sotto i 10 ns.

Capitolo 2

Modellizzazione del set e del reset di celle in HfO_x mediante modelli analitici e numerici

In questo capitolo vengono presentati alcuni modelli preesistenti riguardanti il funzionamento dei fenomeni di set e reset in celle di HfO_x . Dopo una prima parte dedicata ad approcci alternativi al problema, seguirà una descrizione del modello filamentare e di quello numerico sviluppato mediante il simulatore COMSOL. Grazie ai risultati ottenuti si riuscirà a descrivere il modello di switching a gap variabile, esposto nel capitolo successivo.

2.1 Modelli preesistenti

La ricerca svolta nel campo della modellistica delle memorie RRAM è vasta ed è possibile trovare numerosi esempi il cui scopo è dare una spiegazione fisica dei fenomeni alla base di questi dispositivi. Tuttavia, non è ancora a conoscenza dell'autore un modello in grado di comprendere esaustivamente tutte le particolarità in gioco. In particolare, non si è tuttora ben appreso il funzionamento della cella durante la transizione di reset, né la ragione di una così elevata variabilità dei parametri. E' proprio la predizione e la comprensione dei fenomeni che causano la variabilità nelle transizioni la sfida maggiore, nonché lo scoglio principale, verso la scalabilità e la conseguente produzione di vaste strutture di memoria.

2.1.1 Modello a conduzione TAT

Un interessante esempio, il cui scopo consiste nell'interpretazione della variabilità dei processi, è dato dal modello sviluppato da Ximeng Guan et al. [7, 8]. In tale rappresentazione, si considera la struttura dell'ossido, interposto tra gli elettrodi, ricca di vacanze di ossigeno V_o , le quali fungono da trappole che facilitano la conduzione elettronica per tunneling -trap-assisted-tunneling, TAT-. A seconda della concentrazione e distribuzione delle stesse si definiscono diverse configurazioni che possono portare agli stati alto e basso resistivi. Infatti, applicando una tensione, si produce una migrazione degli ioni di ossigeno, portando ad una generazione e ricombinazione delle V_o , causa della variabilità della corrente e della resistenza. Lo studio è stato eseguito in una simulazione 2D. Come mostrato in Fig. 2.1 (a), si osserva l'area tra i due elettrodi -posti a destra, dove si applica la tensione, e a sinistra, a massa-, nella quale sono presenti dei punti disposti casualmente, rappresentanti le vacanze iniziali, prima dell'operazione denominata forming. Questa consiste nell'applicazione di una tensione superiore a quella che genera lo stato di set, provocando un effetto breakdown nel dielettrico e diminuendo, di conseguenza, la concentrazione di ossigeno o , equivalentemente, aumentando la densità di vacanze di ossigeno e incrementando, quindi, la conducibilità elettrica. In (b) si riporta la corrente simulata e, in (c), si osservano le nuove vacanze generate. Dando una tensione si vengono infatti a creare dei campi elettrici locali che riescono a strappare gli ioni ossigeno, spingendoli verso l'elettrodo di sinistra. Si osservano i filamenti conduttivi creati e i percorsi percolativi. In (d) si ha il reset simulato, ottenuto a diverse tensioni di stop negative. Più queste sono elevate, più si ottiene uno stato alto resistivo. Ciò viene interpretato grazie alla formazione di una barriera, un gap (e - f), dove non sono presenti vacanze a causa della ricombinazione con gli ioni ossigeno, respinti dall'elettrodo di sinistra. In questo modo è difficile che gli elettroni riescano a passare, limitando la corrente. Le fluttuazioni della stessa vengono così spiegate: poiché nel gap è presente un campo elettrico intenso, si avranno, saltuariamente, delle generazioni di vacanze che consentiranno agli elettroni di passare per tunneling, incrementando la corrente. Tuttavia, poiché la probabilità di ricombinazione è più elevata, vista la alta concentrazione di ossigeno proveniente dall'elettrodo, tali V_o tenderanno rapidamente a scomparire, aumentando la resistenza mostrata. Infine, in (g) si ha un set simulato a diverse correnti di compliance. Più queste sono elevate, maggiore è il numero di percorsi conduttivi creatisi, (h - i).

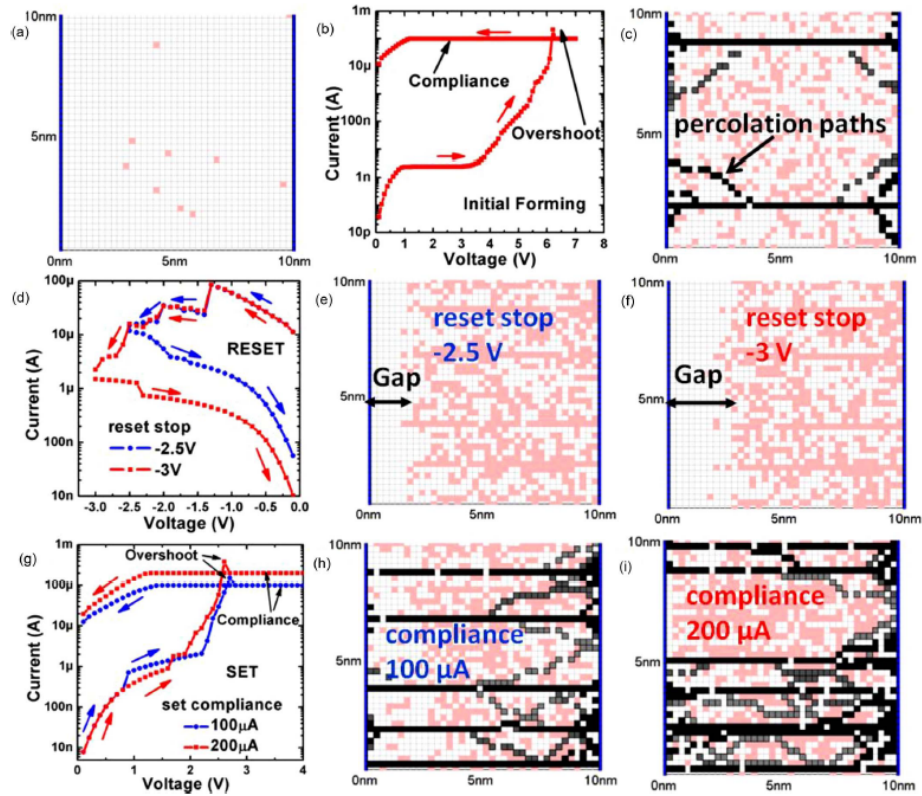


Figura 2.1: Modello presentato da Guan et al. [7, 8]. Si mostra un piano dell'ossido posto tra i due elettrodi a sinistra e a destra. Durante il forming (b) si creano numerose vacanze di ossigeno che generano dei percorsi conduttivi, ossia uno stato basso resistivo (c). Nel reset (d), diverse tensioni di stop provocano la formazione di gap di V_o di dimensioni variabili, (e - f) dovuti alla ricombinazione tra ioni ossigeno e vacanze. Infine, nel set (g), si ha la nuova formazione di catene di trappole, il cui numero dipende dalla corrente I_c impiegata, (h - i).

2.1.2 Modello dinamico a 'clessidra'

Nel modello ora presentato, l'approccio considerato si discosta alquanto dalla pittura precedentemente esposta. In tale rappresentazione, presentata da R. Degraeve et al. [9], si modella il filamento come costituito da HfO_x , in cui le cinetiche di set e reset sono decise dalla migrazione delle vacanze di ossigeno V_o . Geometricamente si ha la schematizzazione mostrata in Fig. 2.2. In (a) si ha la struttura fisica iniziale, costituita da strati di TiN, che funge da Bottom Electrode, HfO_2 , HfO_x , risultante dalla deposizione sopra l'ossido stechiometrico dell'ultimo layer, Hf. In (b) si espongono le conseguenze del forming, il quale provoca la generazione di un filamento di HfO_x all'interno dell'ossido. Si schematizza, quindi, la struttura attiva come in (c), dove si osservano un serbatoio di vacanze V_o superiore -Top Reservoir, TR- di grandi dimensioni, uno inferiore, -Bottom Reservoir, BR- e un sottile canale che rappresenta un collo di bottiglia -Constriction, C-. La geometria del restringimento e del serbatoio inferiore risultano essere determinate dal processo di forming. Più la potenza utilizzata è elevata, maggiori sono le dimensioni iniziali dei due contenitori. Successivamente, durante i set/reset, il numero totale di vacanze rimane invariato, assumendo, quindi, l'assenza dei fenomeni di generazione e ricombinazione delle V_o , elemento base del modello TAT. Inoltre, il filamento non si rompe mai, bensì si assottiglia o si ispessisce, annullando la presenza di un gap, come invece presente nel modello precedente.

La conduzione viene modellizzata grazie alla presenza, nel restringimento, di una banda di conduzione dovuta all'interazione tra le tante vacanze presenti. Durante il reset, Fig. 2.3, una volta giunti ad una tensione V_{trans} per cui le V_o diventano mobili, inizia il reset caratterizzato da un'elevata fluttuazione della corrente -punti neri sperimentali-. Queste variazioni vengono spiegate mediante un equilibrio dinamico. Fissata una tensione, il numero di V_o in C fluttua a causa delle vacanze che vanno verso i serbatoi e che arrivano da questi. Avanzando con la rampa di tensione del reset, il numero n_c di vacanze nel restringimento si riduce, aumentando la resistenza della cella. In Fig. 2.4 si osservano dei fitting di due diverse curve di reset. Si nota come, in (a), $n_c = 10$ al minimo, mentre, in (b), $n_{cmin} = 190$. La differenza tra gli andamenti di n_c è espressa in (c). La ragione della diversità tra i due casi risiede nella potenza utilizzata durante il forming, maggiore nel caso (b). Qui, infatti, la maggior corrente impiegata ha aumentato la dimensione di C ed il numero di vacanze, facendo sì che il serbatoio inferiore risulti più grande, arrivando ad un equilibrio, nel reset, per n_c superiore.

Il set è dovuto all'ispessimento di C a causa dell'iniezione di vacanze. Come si evince da Fig. 2.5, a seguito di una tensione di trigger V_{trig} , si registra uno snap back, arrivando ad

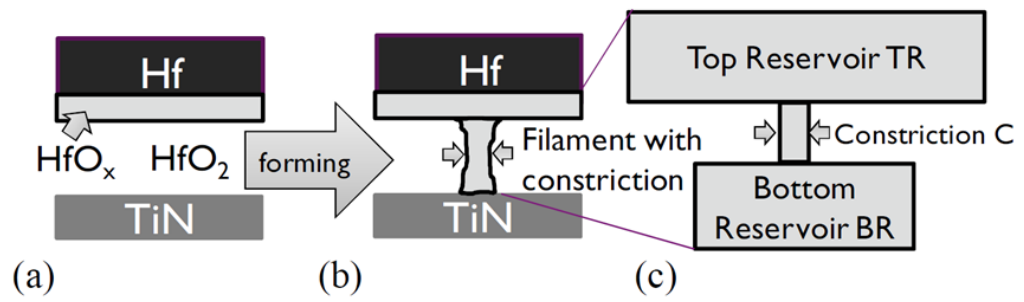


Figura 2.2: Sequenza degli strati in una cella RRAM, (a), dove si nota la presenza di uno spessore di HfO_x . A seguito del forming (b) si viene a creare un canale conduttivo modellizzabile come (c) un serbatoio superiore e uno inferiore connessi tramite un restringimento centrale [9].

una tensione di equilibrio, identificabile, secondo il modello filamentare più avanti descritto, con V_c [10]. Si è utilizzata una resistenza di carico di 26 k Ω .

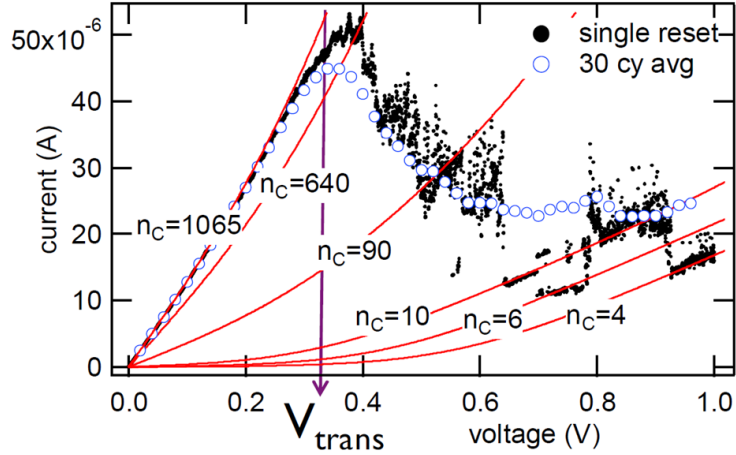


Figura 2.3: Curva IV sperimentale di reset e relative simulazioni, in rosso, per diverse quantità n_c di vacanze nel restringimento. La caratteristica è stata ottenuta con una rampa lenta di tensione (0.1 V/min). In blu sono mostrati i valori medi su 30 cicli [9].

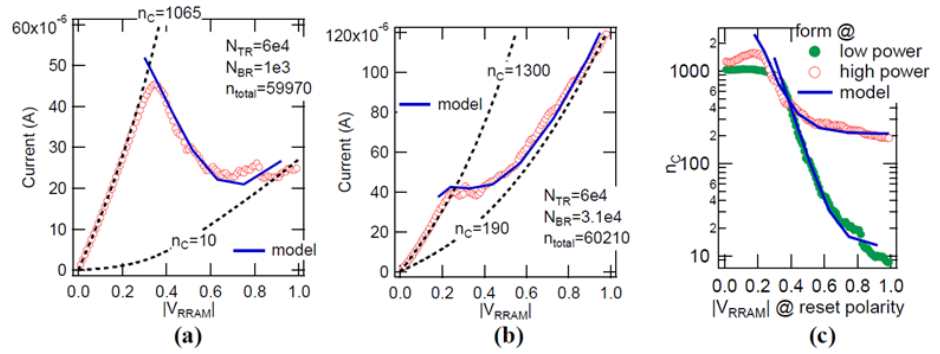


Figura 2.4: Curve sperimentali, in rosso, e simulazioni, in blu. In (a) e (b) si ha il reset a causa della riduzione del numero n_c di vacanze nel restringimento. In (c) si osservano gli andamenti di n_c riportati dai casi (a) e (b), mostrando come, per elevate potenze di forming, il reset si stabilizzi in uno stato più conduttivo, avente un maggior numero di vacanze [9].

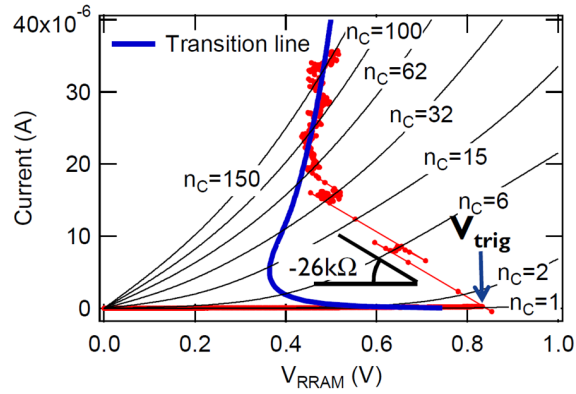


Figura 2.5: Caratteristica IV sperimentale, in rosso, e simulata, in blu. E' necessaria una tensione V_{trig} per far iniziare la transizione. All'avanzare del set corrisponde un aumento del numero n_c di vacanze nel restringimento. La resistenza di carico misura 26 k Ω [9].

2.2 Modello filamentare

Come è stato precedentemente mostrato, una cella RRAM è costituita da tre strati sovrapposti, secondo la struttura metallo - isolante - metallo, altrimenti detta MIM. Gli elettrodi, ossia le parti metalliche, sono composti da elementi inerti come, per esempio, Platino (Pt), Tungsteno (W), o Nitrato di Titanio (TiN). Lo strato intermedio è invece costituito da ossidi metallici, come, per esempio, ossido di Afnio HfO_x [11], nel caso da noi considerato, oppure ossido di Zirconio, Titanio, Nickel ($\text{HfO}_x/\text{ZrO}_x$ [12], TiO_x [13], NiO [14, 15, 16]). Si noti come l'ossido di Afnio abbia, in realtà, formula stechiometrica pari a HfO_2 . Essendo però tale composto molto isolante, nelle memorie si è soliti impiegare HfO_x , con $x < 2$. Per aumentare ulteriormente la conducibilità è necessario effettuare il forming. Questa operazione, infatti, consente di far crescere il numero di atomi di Afnio presenti grazie alla riduzione degli ioni Hf^+ , compiuta variando la struttura atomica dell'ossido e facendo migrare gli ioni ossigeno. Per evitare una rottura irreversibile dell'ossido si limita la corrente ponendo la cella in serie ad un limitatore di corrente, per esempio un transistor MOS nella struttura 1 Transistore 1 Resistore, 1T1R. Riassumendo, a seguito del forming, nel dielettrico è presente una zona amorfa con un maggior numero di atomi Hf. La cella ora si trova in uno stato basso resistivo, denominato set. Per poter passare a quello alto resistivo si applica successivamente una tensione di polarità opposta, poiché la cella di Afnio presenta un comportamento bipolare. In questo modo si giunge alla condizione detta di reset. Per ritornare al set si utilizza ancora

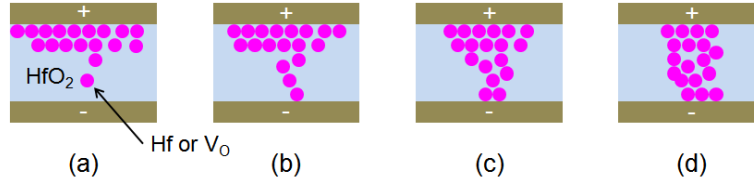


Figura 2.6: Schematizzazione del set secondo il modello filamentare. Inizialmente assente, (a), il filamento conduttivo si forma tramite un'iniziale nucleazione, (b), a cui fa seguito un ispessimento dello stesso, (c), giungendo infine allo stato di set, (d). Con V_o si intende la presenza di una vacanza di ossigeno [10].

una tensione positiva.

Il modello filamentare interpreta gli stati di set e di reset come conseguenza della formazione e dissoluzione di un filamento conduttivo (conductive filament, CF) composto da ioni di Hafnio ridotti che migrano guidati dal campo elettrico e accelerati dal riscaldamento locale ottenuto per effetto Joule [10, 17]. Come si osserva in Fig. 2.6 (a), inizialmente si ha lo stato di reset, a cui segue un processo di nucleazione del CF, in (b). Si ritiene che si crei un filamento del diametro di pochi atomi dovuto allo scorrere degli ioni lungo un percorso preferenziale, caratterizzato da una concentrazione locale di difetti superiore, consentendo, quindi, un trasporto migliore. Lungo tali vie si ha, infatti, un addensamento del campo elettrico che abbassa la barriera delle buche di potenziale attraverso cui gli ioni si muovono. Successivamente si ha un ispessimento del filamento, (c), a causa della migrazione ionica, per arrivare allo stato basso resistivo di set, (d). Affinché tutto ciò avvenga, si suppone che, all'elettrodo positivo, o Top Electrode (TE), sia presente una riserva di ioni metallici. Il reset si svolge in maniera opposta. A partire dal filamento formato, si giunge allo stato alto resistivo dissolvendo il CF tramite una migrazione ionica che attira l'Hafnio verso il TE, a cui viene posta una tensione negativa.

Trascurando il tempo iniziale di nucleazione, il moto degli ioni può essere descritto come un avanzamento degli stessi attraverso buche di potenziale successive, termicamente attivato. Come mostrato in Fig. 2.7 (1), in assenza di una tensione, l'energia di attivazione del processo è pari a E_{A0} . A seguito dell'applicazione del campo elettrico, si ha un abbassamento di tale barriera che consente una maggior mobilità degli ioni. Lo si esprime come

$$E_A = E_{A0} - \alpha qV \quad (2.1)$$

dove α è il coefficiente di abbassamento di barriera, q la carica elementare, V la tensione ai capi della cella. Si assume quindi, per la velocità di crescita del diametro ϕ del filamento,

una legge alla Arrhenius:

$$\frac{d\phi}{dt} = Ae^{-\frac{E_A}{kT}} \quad (2.2)$$

dove A è un prefattore, k è la costante di Boltzmann e T è la temperatura del filamento. Il calcolo di T risulta fortemente influenzato dal riscaldamento per effetto Joule che il filamento subisce a causa dello scorrere della corrente. La temperatura viene ricavata mediante l'equazione di Fourier nel caso stazionario:

$$k_{th} \frac{d^2T}{dz^2} + J^2\rho = 0 \quad (2.3)$$

dove k_{th} è la conducibilità termica dell'Afnio, pari a 23 W/mK, J è la densità di corrente e ρ rappresenta la resistività del metallo nel CF. Si trascurano i transitori iniziali poiché la costante di tempo τ_{th} del filamento risulta essere dell'ordine dei ps, ossia molto inferiore ai tempi tipici delle operazioni di set e reset. Imponendo le condizioni ai limiti $T(0) = T_0 = 300$ K e $T(L = 20 \text{ nm}) = T_0$, dovute al fatto che gli elettrodi non si scaldano, ma rimangono a temperatura ambiente, e supponendo di avere un filamento lungo 20 nm, si risolve l'equazione, ottenendo una parabola avente il vertice al centro del CF. Il valore massimo è a metà del filamento ed è pari a

$$T_{max} = T_0 + \frac{J^2\rho L^2}{8k_{th}} \quad (2.4)$$

Supponendo il filamento cilindrico, si ha

$$R = \frac{4\rho L}{\pi\phi^2} \quad (2.5)$$

$$R_{th} = \frac{L}{2k_{th}\pi\phi^2} \quad (2.6)$$

pari rispettivamente alle resistenze elettrica e termica del filamento. Infine vale che $V = J\rho L$, dove V è pari alla tensione che cade sulla cella. Si ricava dunque

$$T_{max} = T_0 + \frac{V^2}{8\rho k_{th}} = T_0 + \frac{R_{th}}{R} V^2 \quad (2.7)$$

Sostituendo tale espressione in quella del tasso di crescita di ϕ , si ottiene

$$\frac{d\phi}{dt} = Ae^{-\frac{E_{A0} - \alpha qV}{k(T_0 + \frac{V^2}{8k_{th}\rho})}} \quad (2.8)$$

In questo modo si esprime la crescita del filamento, in altre parole il set. Per il reset il ragionamento è analogo, basta porre un segno meno davanti al prefattore A . Così si esprime l'assottigliamento del filamento. Questo modello ben spiega il comportamento bipolare della cella RRAM, infatti il set è originato dalla repulsione degli ioni positivi dall'elettrodo

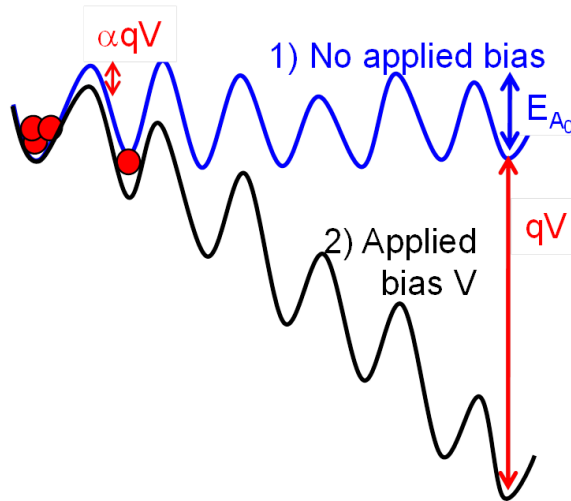


Figura 2.7: Pittura delle barriere di potenziale nell'ossido. In assenza di una polarizzazione, gli ioni vedono delle buche profonde E_{A0} , (1). Applicando invece una tensione, la barriera si abbassa del fattore αqV , agevolando la migrazione (2).

superiore, a cui è applicata una tensione maggiore di zero, con la conseguente formazione del CF, mentre il reset è dovuto al richiamo degli ioni al TE, a cui ora è applicata una tensione negativa.

Nella pratica la cella RRAM è in serie ad un transistor MOS di selezione che consente di evitare le sovralongazioni di corrente dovute alle capacità parassite presenti in parallelo alla cella, andando a generare la struttura 1T1R di Fig. 2.8. La tensione di alimentazione V_A si partisce sui due dispositivi. Durante il set il transistor ha il compito di limitare la massima corrente che scorre, mentre durante il reset si polarizza la tensione di gate ad un valore elevato per ridurre la resistenza serie mostrata.

Applicando due impulsi triangolari di tensione, uno positivo per il set e uno negativo per il reset, si ottiene la caratteristica tensione - corrente del dispositivo di Fig. 2.9. Si è assunta, come tensione di alimentazione, una rampa $V_A(t) = \beta t$, con $\beta = 2 \text{ V/s}$. Come si può apprezzare, le tensioni V_{set} e V_{reset} presentano lo stesso modulo, indice del fatto che la crescita o il decremento vengono attivati dalla temperatura, ossia dalla tensione, non dipendendo dal diametro del CF. Il valore per cui si registra l'inizio delle transizioni è circa pari a 0.5 V, mentre la tensione V_c si aggira intorno agli 0.4 V. È importante osservare come sia il set che il reset abbiano un andamento esponenziale. Questo costituisce un

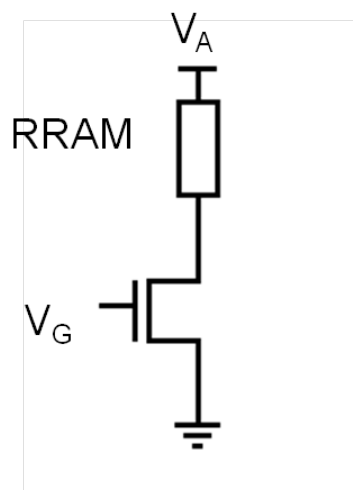


Figura 2.8: Struttura 1T1R. La tensione di alimentazione V_A cade sia sulla cella che sul transistor.

limite soprattutto nel caso del reset, dove la transizione brusca non è effettivamente rivelata sperimentalmente nelle RRAM. La si può invece osservare nelle CBRAM.

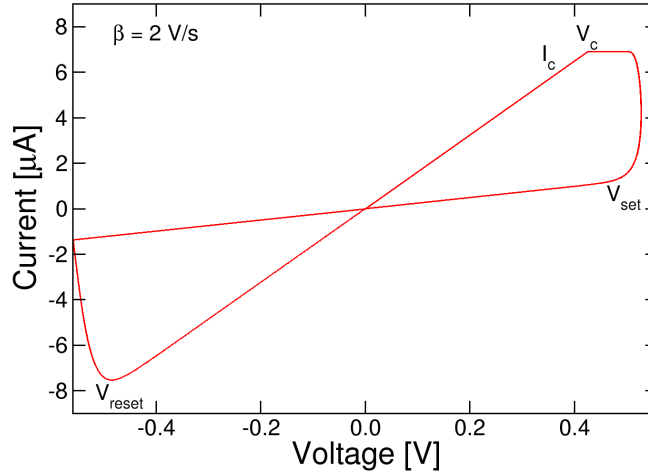


Figura 2.9: Caratteristica tensione - corrente simulata. $I_c \simeq 7 \mu\text{A}$, mentre $V_{set} = |V_{reset}| \simeq 0.5$ V.

2.2.1 Set

Si assuma di avere la cella nello stato alto resistivo, con una resistenza R molto superiore a quella del transistor MOS, R_{MOS} . Applicando una rampa positiva all'alimentazione V_A , poiché R è proporzionale a ϕ^{-2} e crescendo ϕ esponenzialmente con la tensione, R decresce secondo un andamento esponenziale. In generale, la tensione sulla cella è sempre esprimibile dalla partizione

$$V = V_A \frac{R}{R + R_{MOS}} \quad (2.9)$$

Al crescere di V_A , il diametro ϕ cresce, R diminuisce, quindi si abbassa la tensione sulla cella, rallentando la crescita di ϕ , perché decresce la temperatura nel CF, indotta dalla tensione. Si osserva, quindi, una reazione negativa che blocca la crescita del filamento. Questo accade quando è presente un sistema di limitazione della corrente ad un valore massimo denominato corrente di compliance, I_c . Sperimentalmente si osserva come V_c , ossia il valore finale a cui si stabilizza la tensione sulla cella dopo il set, sia scarsamente dipendente da I_c , ma sia dovuto ai parametri fisici della memoria. Per esempio, si registra $V_c \simeq 0.4$ V con RRAM in ossido di Afnio, $V_c \simeq 0.2$ V con CBRAM in argento, per tempi di set intorno al secondo. In Fig. 2.10 si osservano gli andamenti simulati della tensione sulla cella per I_c pari a $1 \mu\text{A}$, $100 \mu\text{A}$ e 10mA . A fronte di una variazione di quattro decadi della

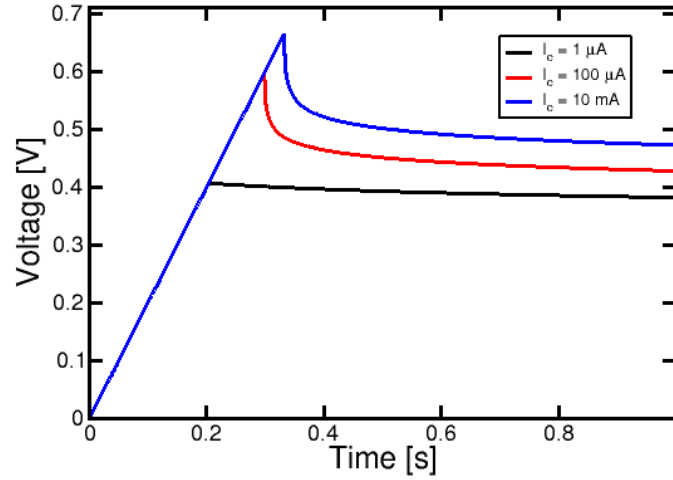


Figura 2.10: Andamenti calcolati della tensione ai capi di una cella in una configurazione 1T1R, durante il set ed in funzione del tempo. Dopo la rampa iniziale si osserva una stabilizzazione della tensione intorno agli 0.4 V. Le curve sono calcolate con I_c pari a $1 \mu\text{A}$, $100 \mu\text{A}$, 10mA .

corrente di compliance, si registra una variazione di V_c inferiore a 0.1 V.

2.2.2 Dipendenza di V_c da I_c

Da un'analisi più dettagliata, si apprezza una leggera dipendenza di V_c da I_c , come si vede nelle simulazioni a diverse compliance di Fig. 2.11. Per comodità, stavolta è stato impiegato un sistema di limitazione della corrente ideale. Se $I < I_c$, si assume $R_{MOS} = 0 \Omega$, mentre, per $I > I_c$, si utilizza un generatore di corrente pari a I_c -altro non è che un transistor ideale-. Maggiore è la corrente di compliance, maggiore è il tempo necessario per raggiungere valori elevati di corrente. Questo implica una V_c superiore. Ciò è dovuto al fatto che la crescita di corrente avviene esponenzialmente, non istantaneamente, come invece si tende a vedere sperimentalmente nelle caratteristiche IV dell'Afnio, causando un ritardo nell'avvio della reazione negativa che porta a stabilizzare V_c . Si osserva lo stesso comportamento del modello per qualsiasi sistema di limitazione della corrente, sia esso un resistore o un MOSFET reale o ideale. Ciò rappresenta un limite poiché, come si evidenzia dai dati sperimentali, il prodotto $V_c = RI_c$ è costante, avendo definito $R = V_c/I_c$ la resistenza dello stato basso resistivo ottenuta alla fine del set, come si osserva in Fig. 2.12 (a). Ciò indica come l'intera cinetica sia regolata dalla tensione.

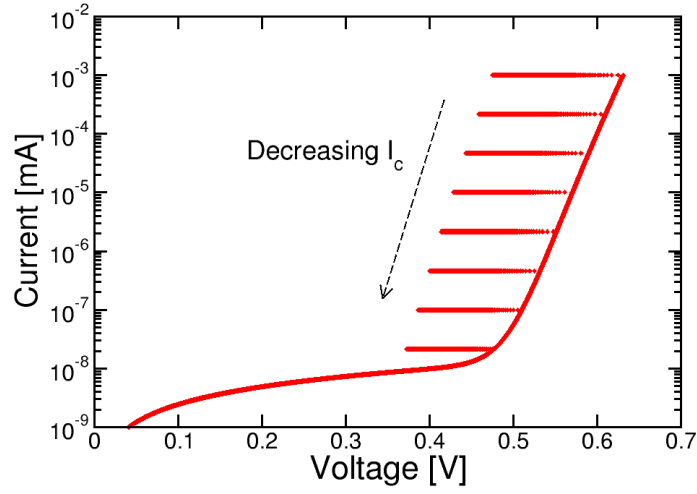


Figura 2.11: Caratteristiche tensione - corrente simulate al variare di I_c . Si osserva la riduzione di V_c per basse correnti.

2.2.3 Reset

A seguito del set, la cella è in uno stato conduttivo. Per poter passare allo stato alto resistivo si applica un impulso triangolare negativo di tensione il cui scopo è quello di dissolvere il CF richiamando gli ioni all'elettrodo superiore. La differenza di potenziale per cui la dissoluzione inizia a manifestarsi è denominata V_{reset} ed è pari alla tensione di set. Definendo I_{reset} la massima corrente -in modulo- durante il reset, si può scrivere

$$I_{reset} = \frac{V_{reset}}{R} = \frac{V_{reset}}{V_c} I_c = \eta I_c \quad (2.10)$$

con $\eta \simeq 1.1$. La sostanziale uguaglianza tra I_{reset} e I_c è ancora una volta indice della somiglianza tra i processi di set e reset, come evidenziato in Fig. 2.12 (b).

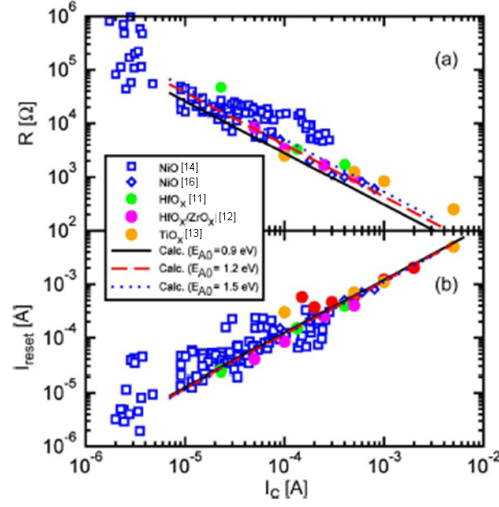


Figura 2.12: Dati sperimentali e relative simulazioni della resistenza di set, (a), e della corrente di reset, (b), in funzione di I_c . I dati mostrati derivano da misure su celle con diversi ossidi [17].

2.2.4 Relazione analitica per i tempi di set e reset

In questa sezione si vuole sviluppare una relazione analitica semplice che consenta il calcolo dei tempi di commutazione di set e di reset per una cella CBRAM, modellizzata similmente ad una RRAM, ma con energie di attivazione diverse per il set ed il reset. L'impiego di tale relazione è essenziale nel caso in cui si voglia predire, in un simulatore circuitale, l'interazione di queste memorie con altri componenti circuitali. Si conosce la relazione che lega il tasso di crescita del diametro ϕ del CF alla tensione applicata sulla cella mediante la ben nota relazione:

$$\frac{d\phi}{dt} = Ae^{-\frac{E_{A0} - \alpha qV}{k(T_0 + \frac{V^2}{8k_{th}\rho})}} \quad (2.11)$$

dove con E_A si intende l'energia di attivazione di set se si sta simulando il set, quella di reset nell'altro caso. Si supponga, per semplicità, di applicare un impulso costante di tensione, segue che l'espressione è integrabile per separazione delle variabili, ricavando in tal maniera la seguente formula:

$$t = \frac{\phi_{eff}}{A} e^{\frac{E_A - \alpha qV}{k(T_0 + \frac{V^2}{8k_{th}\rho})}} \quad (2.12)$$

dove con t si intende il tempo di commutazione di set o reset scegliendo le rispettive energia di attivazione e tensione di soglia. Il parametro ϕ_{eff} rappresenta un diametro caratteristico tarabile. Nell'esempio considerato in laboratorio è stato scelto un valore di 9 nm, pari alla

Parametro	Valore
E_{Aset}	0.7 eV
E_{Areset}	0.5 eV
A	10 m/s
ρ_{Hf}	53.7 $\mu\Omega\text{cm}$
k_{th}	429 W/mK
T_0	300 K
α	0.1

Tabella 2.1: Parametri utilizzati nel modello analitico.

metà del massimo diametro che si otteneva durante le simulazioni. Si è inoltre osservato come tale valore non variasse se non di qualche unità modificando la tensione applicata. Ne consegue che lo si può assumere come un parametro affidabile. In tabella 1.2 è possibile leggere i valori scelti per le altre costanti.

La scelta dei parametri è stata eseguita interpolando dei dati sperimentali, qui non mostrati. Come si può notare in Fig. 2.13(a), dove si osservano i tempi di set e reset in funzione della tensione applicata sulla cella, tale scelta riesce a spiegare anche commutazioni dell'ordine del nanosecondo, come effettivamente si riscontra nella realtà. In Fig. 2.13(b) sono evidenziate le dipendenze dei tempi dagli inversi delle energie di attivazione. Si apprezzano gli andamenti quasi lineari su scala logaritmica, simili ad una legge alla Arrhenius. Ciò era prevedibile semplicemente guardando la relazione costitutiva. La deviazione dall'andamento lineare è dovuta all'abbassamento di barriera causato dall'applicazione di una tensione.

Infine si possono analizzare i grafici della resistenza in funzione del tempo, durante il set, in Fig. 2.14 (a), ed il reset, Fig. 2.14 (b). Per elevate tensioni, precisamente per 3 V, i tempi di set e reset tendono a coincidere, mentre, per tensioni inferiori, i due valori si separano, comportando una decisa asimmetria.

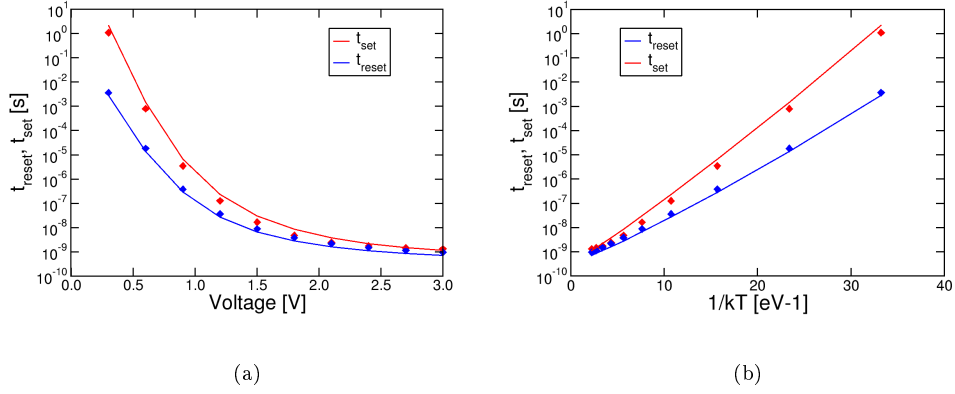


Figura 2.13: Risultati del modello numerico completo espressi dai punti e corrispondenti previsioni analitiche in linea continua. In rosso sono analizzati i tempi di set, in blu quelli di reset. In (a) sono mostrati i tempi in funzione della tensione applicata -per il reset ci si riferisce al modulo della tensione-, in (b) sono invece presenti gli stessi tempi, in funzione dell'inverso dell'energia di attivazione. Si apprezza la presenza di una legge approssimabile alla Arrhenius.

2.3 Modello numerico COMSOL

Il modello numerico sviluppato con il simulatore COMSOL da S. Larentis [18, 19] studia i meccanismi di set e reset in una cella RRAM basandosi sul trasporto per deriva e diffusione degli ioni di Afnio o, equivalentemente, delle vacanze di ossigeno. Si considera il filamento conduttivo come una zona nella quale la concentrazione di Hf o di vacanze sia più elevata della zona circostante, pari a n_D . Applicando una tensione, si viene a creare un flusso \mathbf{j}_D di ioni pari, secondo l'equazione di deriva - diffusione, a:

$$\mathbf{j}_D = -D\nabla n_D + \mu n_D \mathbf{F} \quad (2.13)$$

dove D , espresso in $[\text{cm}^2\text{s}^{-1}]$, è la diffusività ionica, μ $[\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}]$ la mobilità degli ioni ed \mathbf{F} il campo elettrico. La diffusività viene considerata come un processo alla Arrhenius, ossia si considera di avere $D = D_0 e^{-E_A/kT}$, con D_0 un prefattore ed E_A l'energia di attivazione. Mediante la diffusività si controlla anche la mobilità tramite la relazione di Einstein $D = \mu kT/q$.

L'equazione di deriva - diffusione viene risolta numericamente ponendola a sistema con

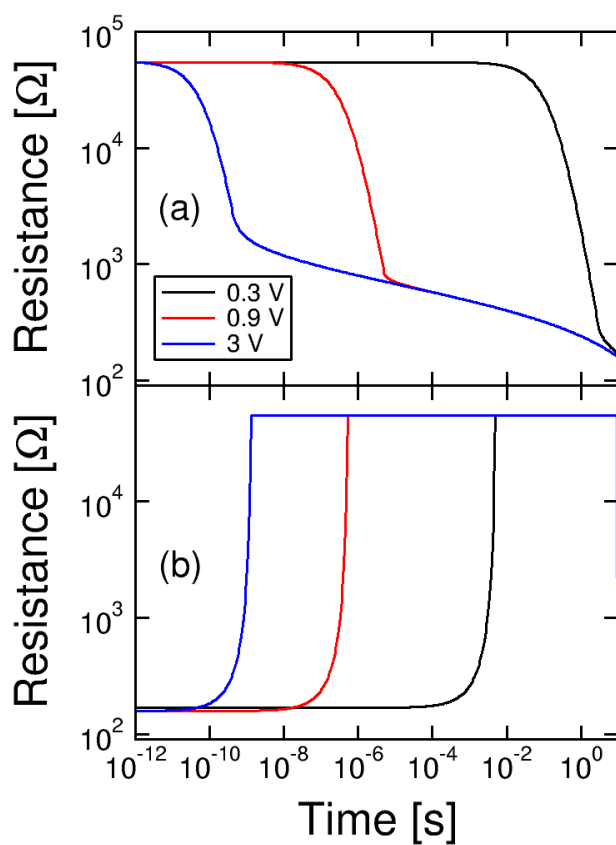


Figura 2.14: Profili simulati dal modello numerico della resistenza in funzione del tempo durante il set (a) ed il reset (b). Le tre curve corrispondono a tensioni applicate di 0.3 V, per la transizione più lenta, 0.9 V, 3 V.

l'equazione di Poisson per la densità di corrente \mathbf{j} ,

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = 0 \quad (2.14)$$

la legge di Ohm, contenente la conducibilità elettrica che cresce linearmente con la concentrazione di ioni,

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{F} \quad (2.15)$$

e l'equazione di Fourier per il calore, nel caso stazionario:

$$\nabla \cdot (k_{th} \nabla T) = -\mathbf{j} \cdot \mathbf{F} \quad (2.16)$$

dove con k_{th} si intende la conducibilità termica, anch'essa linearmente crescente con la densità ionica n_D . La risoluzione di tale sistema viene eseguita in una geometria 3D, riducibile a 2D grazie alla simmetria cilindrica, infatti si considera il filamento conduttivo come un cilindro.

2.3.1 Risultati delle simulazioni

In Fig. 2.15 si possono osservare i risultati sperimentali e le relative simulazioni di reset ottenute. Le diverse curve sono state ricavate eseguendo un set della cella con diverse correnti di compliance, arrivando, quindi, a stati basso resistivi diversi. Da notare come la V_{reset} rimanga costante, a circa 0.4 V, indipendentemente dalla resistenza di set R raggiunta, così come si evidenzia nella realtà. A questo punto si definiscono quattro punti A, B, C, D sulla simulazione a corrente maggiore. Tali stati possono essere visti come una sequenza temporale del reset. Come si apprezza da Fig. 2.16, nella quale sono mostrati gli andamenti su un piano di simmetria della concentrazione n_D degli ioni, della temperatura e del potenziale, all'inizio il valore di n_D è pressoché costante lungo tutto il filamento -stato A-, infatti il reset non è ancora iniziato. Successivamente si registra uno svuotamento nella metà superiore ed un accumulo degli ioni nell'altra metà, conseguenza di un moto di deriva e diffusione attivato termicamente, come infatti si nota guardando la temperatura, molto più elevata in prossimità della zona svuotata nei casi B, C, D. A conferma di questa variazione della densità di Afnio, si guardi la Fig. 2.17, nella quale si mostrano i grafici di n_D , T, V nei casi citati, lungo l'asse del CF. La concentrazione decresce rapidamente, definendo un gap, indicato in verde, lì dove n_D è inferiore ad un certo valore, nell'esempio $6 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. Anche la temperatura cresce nella zona svuotata, spostando il picco dal centro, in A, al gap, caso D. Infine risulta interessante osservare la tensione, la quale tende a cadere principalmente nella zona priva di ioni. Ciò fa sì che il campo elettrico che si instaura risulti essere molto intenso a causa

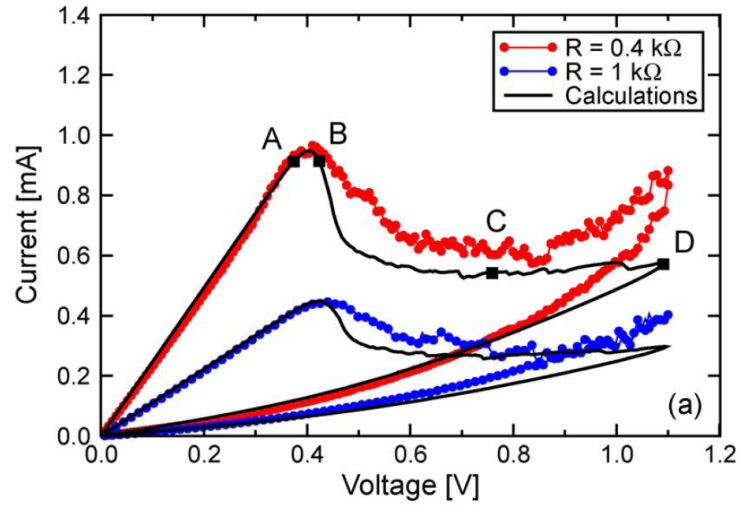


Figura 2.15: Dati sperimentali e relative simulazioni del reset per due diverse condizioni di set. La curva rossa corrisponde ad uno stato basso resistivo di 400Ω , mentre la blu si riferisce a $R = 1\text{k}\Omega$. Si definiscono quattro punti A, B, C, D, analizzati in seguito [18].

del decremento della conducibilità elettrica. Anche la potenza dissipata per effetto Joule cresce poiché aumenta il prodotto $\mathbf{j} \cdot \mathbf{F}$, incrementando T . Tuttavia, al diminuire di n_D , k_{th} diminuisce meno rispetto alla diminuzione della conducibilità elettrica σ , a causa del contributo fononico alla conducibilità termica. Ciò causa una efficienza di riscaldamento inferiore, abbassando la temperatura nel gap e spegnendo la migrazione ionica. In questo modo il reset si blocca, a meno di non aumentare ulteriormente la tensione sulla cella. In Fig. 2.18 sono mostrati i profili spaziali di n_D durante il reset, rendendo evidente la presenza di una zona svuotata.

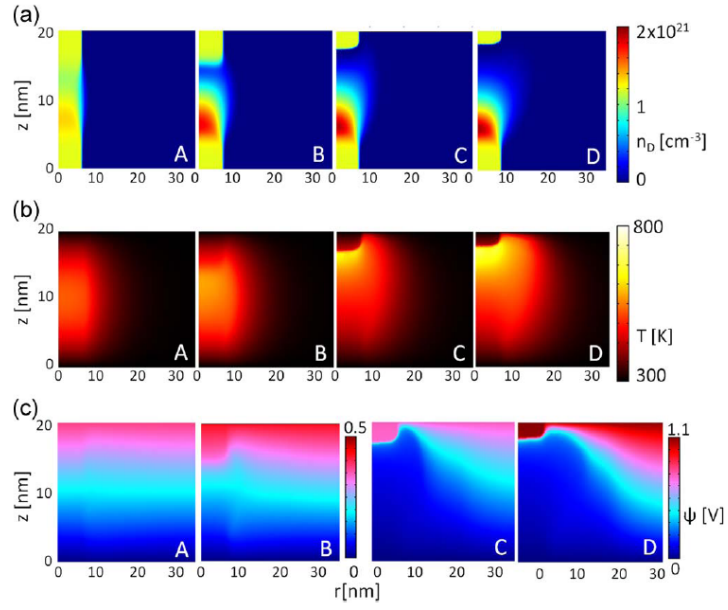


Figura 2.16: Mappe 2D delle concentrazioni di drogante n_D , della temperatura T e della tensione V , calcolate ai punti A, B, C, D di Fig. 2.15 [18].

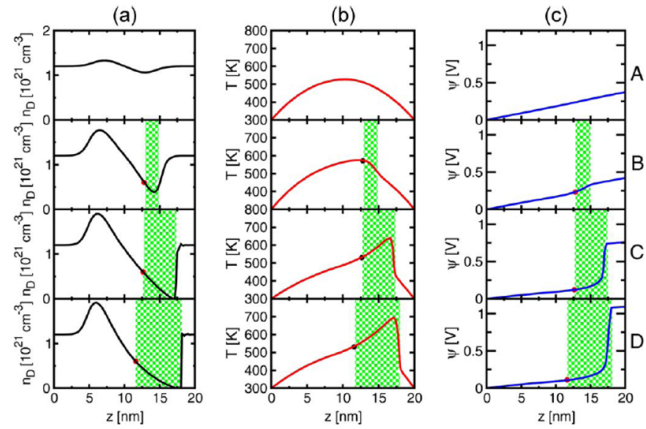


Figura 2.17: Profili di n_D , V , T lungo l'asse del CF, calcolati ai punti A, B, C, D di Fig. 2.15. Si osserva l'apertura di un gap dove si registrano i picchi di temperatura e campo elettrico [18].

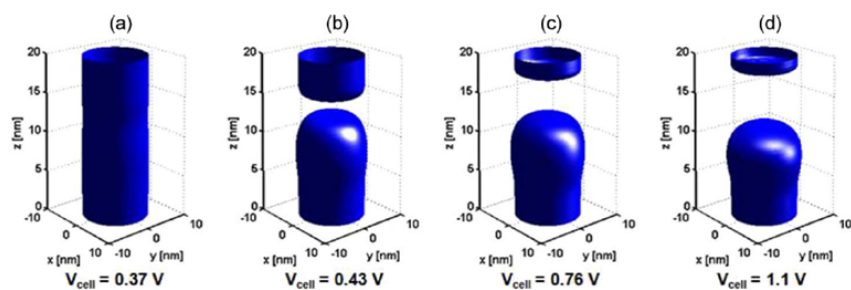


Figura 2.18: Profili 3D della concentrazione di drogante n_D , calcolati ai punti A, B, C, D di Fig. 2.15. Alla fine è evidente la presenza di una zona svuotata [18].

Capitolo 3

Modello di switching a gap variabile

In questo capitolo verrà presentato un innovativo modello fisico per il set ed il reset in memorie RRAM, basato sull'apertura e chiusura di una barriera di ossido all'interno del filamento conduttivo metallico a causa dei feedback termici. Si mostreranno i vantaggi ed i limiti di tale pittura fisica rispetto al modello filamentare. Infine verrà proposto un modello ibrido, con le relative simulazioni, in grado di ovviare agli svantaggi del semplice modello a gap variabile.

3.1 Il modello

Il modello di switching a gap variabile mira a studiare le proprietà di apertura e chiusura di una barriera di ossido all'interno del filamento conduttivo -CF-, analizzando i fenomeni di feedback termici presenti. Si osserveranno la presenza di un set caratterizzato da una reazione positiva che accelera la chiusura della barriera e di un reset che, invece, guidato da una reazione negativa, genera un'apertura graduale del gap, in accordo con i dati sperimentali di Fig. 3.1. L'idea di un'interruzione del filamento deriva dalle considerazioni conclusive svolte sul modello numerico sviluppato con il programma di simulazione COMSOL, come si può osservare in Fig. 2.17, dove si nota una sostanziale riduzione della concentrazione di ioni nella zona verde [18, 19]. Ne consegue che è possibile pensare il CF come diviso in tre zone dove la prima e l'ultima sono metalliche, quella centrale un ossido.

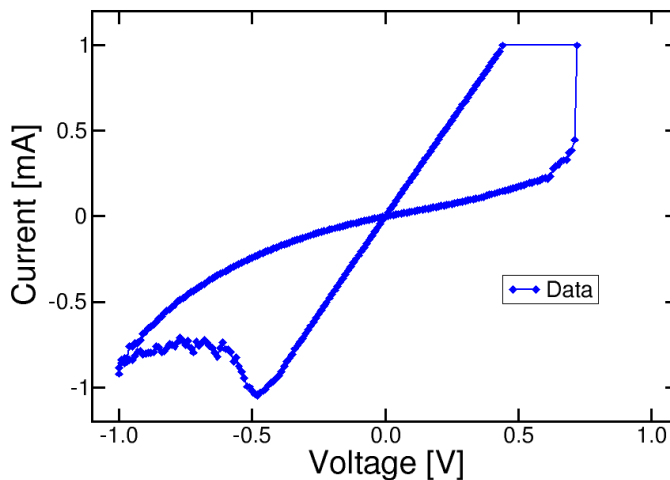


Figura 3.1: Caratteristica tensione - corrente di una cella di Afnio con uno spessore dell'ossido di 20 nm. Si osserva come $V_{reset} = -0.5$ V.

3.1.1 Reset

Si consideri il filamento nello stato di set, ossia completamente metallico, come in Fig. 3.2 (a). Come si osserva dalla soluzione dell'equazione di Fourier unidimensionale del calore in tale condizione, come già calcolato nel capitolo precedente, il profilo di temperatura è una parabola e il valore massimo è localizzato a metà della lunghezza del filamento conduttivo. Di conseguenza, durante il reset, aumentando il valore assoluto della tensione ai capi della cella, si verrà ad aprire una barriera a metà del CF poiché lì si raggiungerà la temperatura critica, corrispondente ad una tensione applicata pari a V_{reset} , che attiverà il moto degli ioni metallici e il conseguente svuotamento del CF. La scelta di T_{crit} è dettata dall'osservazione di una caratteristica tensione - corrente sperimentale. In Fig. 3.1 se ne apprezza un esempio. E' ben visibile come $V_{reset} = -0.5$ V. Sapendo che la temperatura è regolata dalla tensione, come espresso nel modello filamentare, V_{reset} costituirà la soglia critica di attivazione del processo di apertura della barriera.

Da ora in poi, per calcolare il profilo di temperatura lungo il filamento diviso, si risolverà l'equazione di Fourier del calore unidimensionale -si trascura il flusso radiale di calore-, in un dominio tripartito, nel quale il primo ed il terzo intervallo sono definiti con le resistività ρ e conducibilità termica k_{th} dell'Afnio. Più precisamente, si impiega $k_{thHf} = 23$ W/mK, pari al valore tabulato, e $\rho_{Hf} = 280$ $\mu\Omega$ cm. La resistività è superiore a quella dell'afnio,

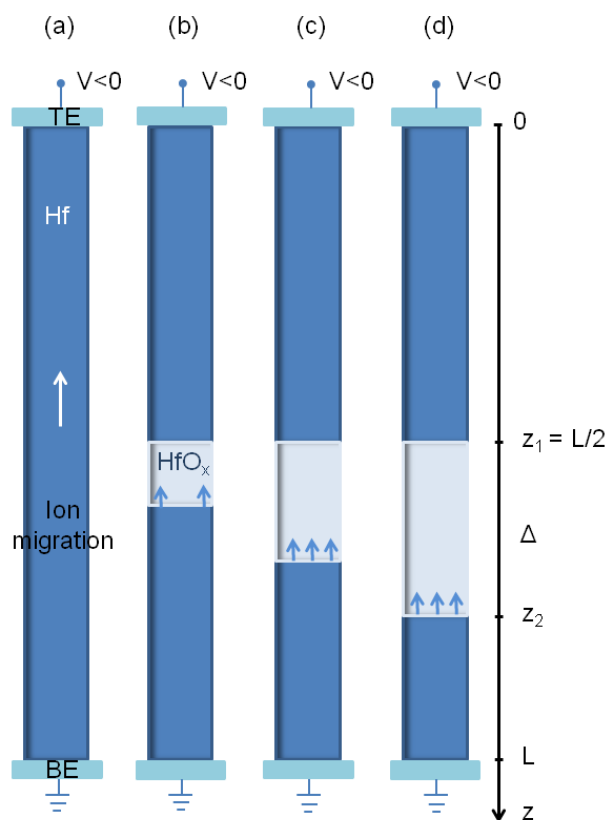


Figura 3.2: Schematizzazione del reset: all'inizio il CF è continuo, come in (a). A seguito dell'applicazione di una tensione negativa al Top Electrode, poiché il punto più caldo è a metà, lì si viene a creare un piccolo gap di ossido (b). Aumentando progressivamente il modulo della tensione al TE, gli ioni migrano dal bordo z_2 fino al bordo z_1 , lasciando scoperta una barriera sempre maggiore, come mostrato in (c) e (d).

che ha un valore pari a $\rho_{bulk} = 33 \mu\Omega\text{cm}$, perché tiene conto delle ridotte dimensioni del CF [10]. Secondo l'approssimazione di Fuchs-Sondheimer [20],

$$\rho_{Hf} = \rho_{bulk} \left(1 + \frac{3}{4} \frac{\lambda}{\phi} (1 - p)\right) \quad (3.1)$$

dove λ è il libero cammino medio degli elettroni e p è la probabilità di avere un urto elastico alla superficie del CF. Impiegando $\lambda=28 \text{ nm}$ e $\phi=2\text{nm}$, ossia valori tipici per il caso in questione, si ricava $\rho_{Hf}=200 \mu\Omega\text{cm}$. Considerando, inoltre, ulteriori fenomeni di scattering con impurezze e fononi, si può ritenere realistico un valore di ρ pari a $280 \mu\Omega\text{cm}$. La sezione interna presenta invece i parametri dell'ossido per quanto riguarda la resistività, ossia $\rho_{ox} = 1.3 \text{ m}\Omega\text{cm}$, mentre la conducibilità termica è una funzione lineare della lunghezza della barriera Δ , compresa tra 23 W/mK , corrispondente ad una barriera chiusa, e 0.68 W/mK per una lunghezza caratteristica, dove con $k_{thox0} = 0.68 \text{ W/mK}$ si ha il valore tabulato per un ossido di Afnio senza difetti [21]. La ragione di questa scelta risiede nel fatto che, per piccoli gap, l'ossido è altamente contaminato da impurità metalliche che non sono ancora state trasportate via, quindi la conducibilità termica è ancora elevata. A sostegno di tale ipotesi si mostra il grafico di Fig. 2.17 (a) nel quale, secondo la simulazione COMSOL, nel gap la concentrazione ionica decresce gradualmente e non repentinamente. Di conseguenza si scriverà

$$k_{thox}(\Delta) = k_{thHf} - (k_{thHf} - k_{thox0}) \frac{\Delta}{L_{eff}} \quad (3.2)$$

dove con L_{eff} si considera una lunghezza caratteristica per cui l'ossido diventa simile all'ideale. In Fig. 3.3 è mostrata tale funzione, sia per il caso di cella da 20 nm , in blu, che per quella da 5 nm , in rosso. Si nota come i due andamenti, assunti per semplicità lineari, siano diversi, quindi dipendenti dallo spessore della cella. La spiegazione della scelta risiede nei diversi campi elettrici che si vengono a formare all'interno del gap. A parità di tensione applicata, nella cella da 5 nm si svilupperanno campi superiori, di conseguenza si avrà un moto degli ioni più accelerato, arrivando a svuotare la zona più velocemente. La conducibilità termica tende quindi a scendere più rapidamente, come modellizzato.

Una volta aperta una piccola barriera, come in Fig. 3.2 (b), alzando ancora il valore assoluto della tensione applicata al TE si riesce a far sì che la temperatura del bordo z_2 sia tale da attivare la migrazione ionica degli atomi di Hf. Questi percorrono l'ossido portandosi all'altra estremità e unendosi al CF metallico superiore. Infine, in Fig. 3.2 (c - d) si evidenzia l'ulteriore apertura di una barriera, sempre dettata da un maggior incremento della tensione applicata. Dal punto di vista matematico, la crescita della barriera Δ è governata da una legge esponenziale simile a quella per il modello filamentare. La differenza risiede nella scelta

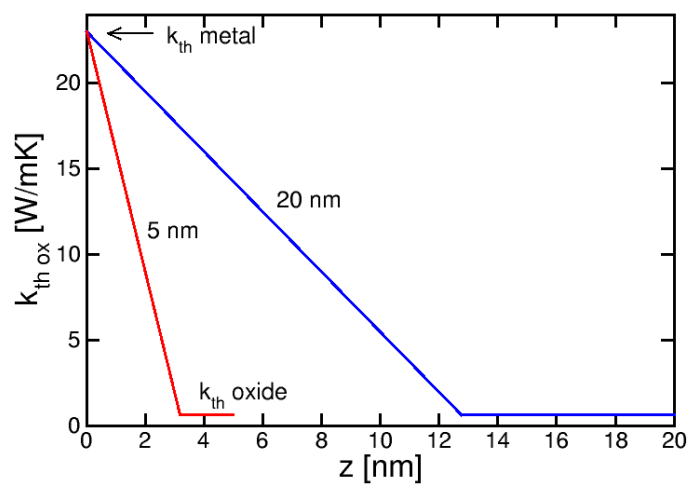


Figura 3.3: Schematizzazione dell'andamento della conducibilità termica dell'ossido in funzione dell'ampiezza del gap. In blu è mostrata la k_{thox} nel caso di una cella da 20 nm, in rosso per una da 5 nm. Si osserva come, per gap nulli, entrambe coincidano con la conducibilità metallica. I diversi andamenti riflettono le diverse condizioni in cui le due celle si trovano durante il reset. In particolare, i campi elettrici nel gap risultano più intensi per celle a 5 nm a parità di tensione applicata, provocando concentrazioni ioniche inferiori.

del valore di temperatura, non più pari al valore massimo nel CF, bensì, nel reset, uguale alla temperatura del punto z_2 . Qui, infatti, avviene la migrazione ionica che genera il cambio di stato. Segue quindi che

$$\frac{d\Delta}{dt} = Ae^{-\frac{E_{A0}}{kT(z_2)}} \quad (3.3)$$

Ora è necessario compiere un'analisi più approfondita del meccanismo di reset e della reazione negativa che ne regola il funzionamento. Si tengano in conto, come riferimento, le Fig. 3.4 e Fig. 3.5. Ci si ponga a t_0 , Fig. 3.4 (a), caso A. Si è assunta $|V_{reset}| = 0.5$ V come la tensione a cui si attiva il reset, questo implica che il gap sia ancora assente in questo istante. Appena si applica tale differenza di potenziale, il profilo di temperatura è una parabola, come indicato in Fig. 3.5(a). In blu si ha la temperatura per il modello in esame, in rosso quella per un filamento continuo. E' evidente come i due andamenti siano uguali poiché, non essendo ancora stata aperta una barriera, il CF è interamente metallico, uguale al CF equivalente. Poiché si è applicata la tensione critica, il valore massimo, pari a 785 K in questo caso, costituisce la soglia per cui il moto ionico viene attivato. Mantenendo nel tempo la tensione pari a 0.5 V, si apre un gap Δ di ossido, Fig. 3.4 (b). Questo genera un aumento della resistenza del CF, Fig. 3.4 (c), ed una ovvia riduzione della corrente, Fig. 3.4 (d). Ciò che è importante osservare è come la temperatura massima nel CF, Fig. 3.4 (e), si riduca, spegnendo la crescita della barriera, che difatti tende ad un valore costante di circa 1 nm, come si osserva a t_1 , caso B. Il profilo di temperatura corrispondente nel CF è quello in Fig. 3.5(b), dove con le linee verdi si indicano gli estremi della barriera di ossido, ora pari a 1 nm. Il bordo z_2 si trova, in questo istante, ad una temperatura inferiore, causando uno spegnimento della crescita del gap. In Fig. 3.4 (f) si vede la caratteristica tensione - corrente ottenuta, dove I scende dal valore in A fino a quello in B. A questo punto si alza il modulo della tensione, passando, in t_1 , a 0.7 V (Fig. 3.4 caso C). Immediatamente si ottiene il profilo di Fig. 3.5(c), dove si apprezza come z_2 sia ad una temperatura superiore a quella critica, generando un'ulteriore crescita della barriera. Il processo, identico a prima, porta ad una crescita del gap fino a circa 2.5 nm, nel caso D a t_2 , e ad un raffreddamento del CF, Fig. 3.5(d). In Fig. 3.4 (f) la corrente scende da C a D. In conclusione, applicando una tensione, il filamento risponde abbassando la temperatura dello stesso e bloccando il moto ionico, mediante un meccanismo di reazione negativa guidato dalla temperatura di z_2 . E' proprio grazie al processo descritto che è possibile fermare il reset in istanti diversi e quindi in stati di reset differenti, consentendo una possibile programmazione multilivello regolando l'apertura del gap.

Risulta utile introdurre il concetto di overvoltage per il reset. Si conosce che, alla V_{reset} ,

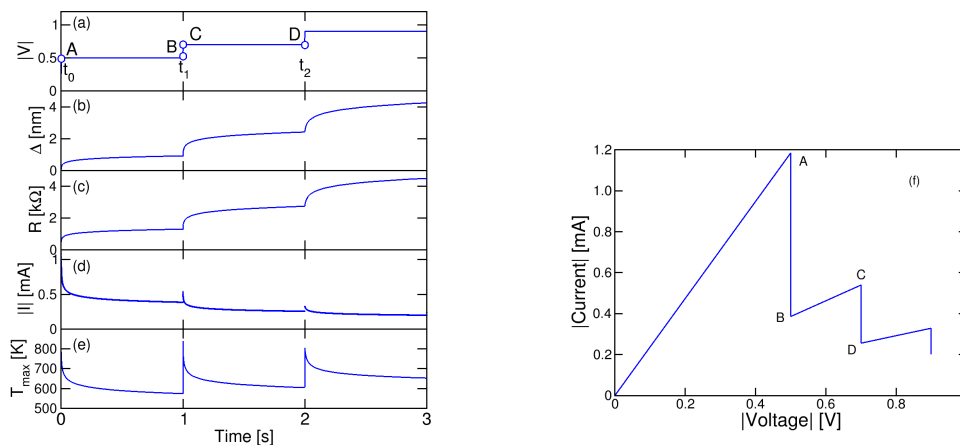


Figura 3.4: Simulazioni di Δ , R , I , T_{max} , in funzione del tempo e della tensione applicata. Nello stato A, a t_0 , si applica una tensione di modulo 0.5 V, (a). Questa genera un riscaldamento locale, (e), che provoca la crescita di una barriera Δ , (b), un aumento di resistenza, (c), e una diminuzione di corrente, (d). La crescita si spegne autonomamente a causa del raffreddamento indotto, arrivando al caso B. Il processo si ripete similmente passando da C a D. In (f) si osserva la caratteristica IV risultante, unendo i grafici (a) e (d).

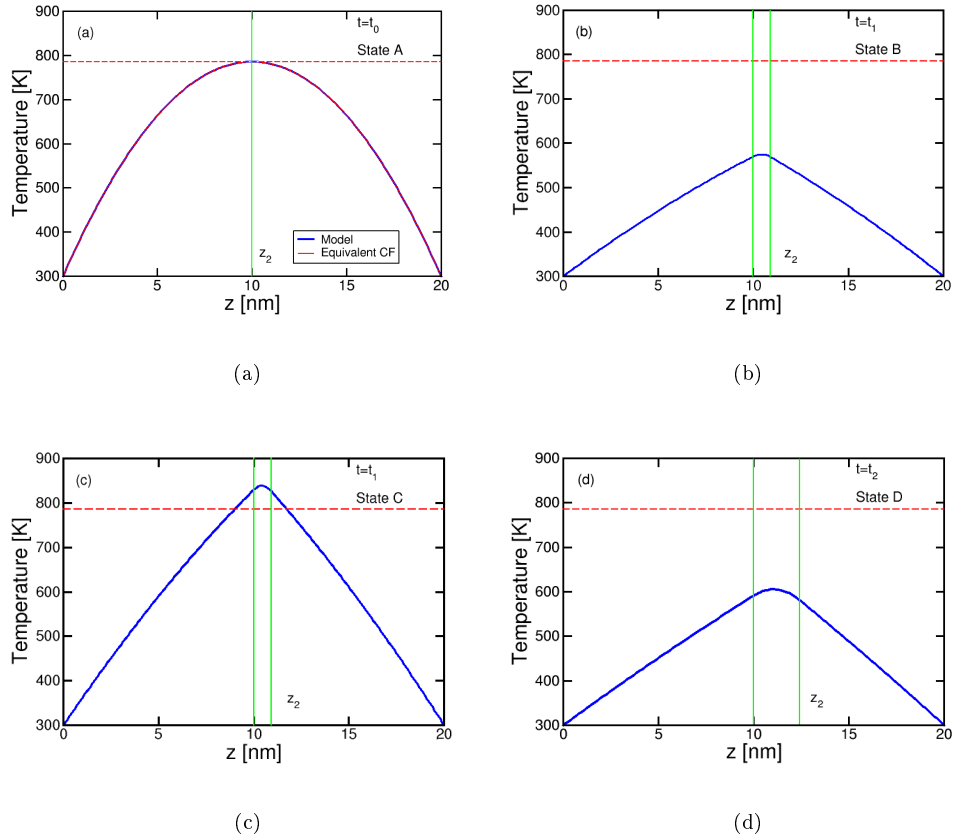


Figura 3.5: Profili calcolati di temperatura lungo il CF. In rosso è mostrato il profilo di un filamento equivalente formato, in blu quello relativo al modello a barriera di ossido. In (a) si vede il caso per $|V| = |V_{reset}| = 0.5$ V. Essendo questa la tensione critica, il picco di temperatura definisce la T_{crit} . Le linee verdi, delimitanti la zona di ossido, mostrano che in (a), a gap chiuso, i profili sono uguali (caso A di Fig. 3.4). Il moto ionico apre una barriera, come si vede in (b), raffreddando il filamento (caso B). In (c) si applica una tensione di 0.7 V, attivando ancora gli ioni (caso C). Infine la reazione negativa spegne la crescita raffreddando ulteriormente (caso D).

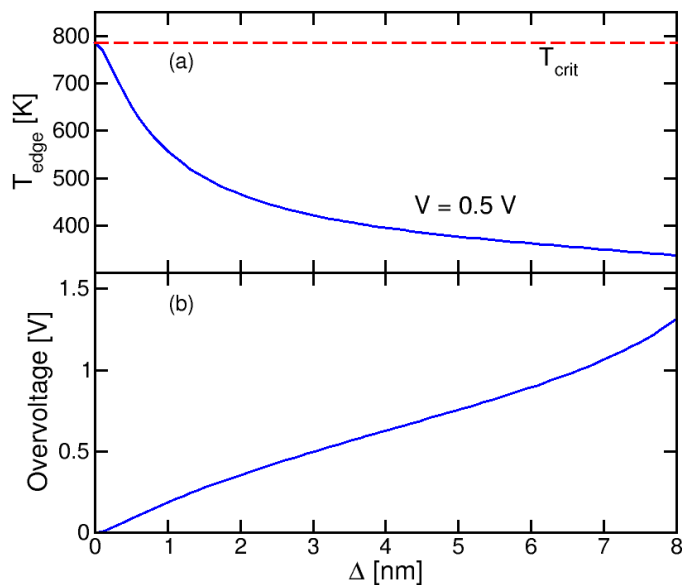


Figura 3.6: Dipendenze della temperatura del bordo z_2 e dell'overvoltage dall'ampiezza del gap. In rosso è indicata la temperatura critica. In (a) si vede il profilo simulato per tensione costante e pari a $|V_{\text{reset}}| = 0.5$ V. In (b) viene invece mostrata la tensione aggiuntiva da dare oltre a V_{reset} per alzare la temperatura di z_2 fino alla soglia critica. Il fatto che l'overvoltage sia monotono crescente rende il processo di reset controllato da una reazione negativa.

il processo di reset ha inizio, seguito da una reazione negativa. Per poter procedere è necessario applicare una tensione aggiuntiva, chiamata appunto overvoltage. In Fig. 3.6 (a) si osserva la temperatura del punto z_2 in funzione dell'ampiezza della barriera, con una tensione applicata pari a V_{reset} . Come ci si aspetta, questa diminuisce monotonamente. In rosso è indicato il riferimento della T_{crit} . In Fig. 3.6 (b) si mostra invece l'overvoltage da dare, oltre a V_{reset} , per far sì che la temperatura di z_2 arrivi alla soglia critica. Il fatto che tale tensione sia monotona crescente è giustificato dalla reazione negativa presente.

3.1.2 Set

Il set costituisce il fenomeno tramite cui si ha una transizione dallo stato alto a quello basso resistivo. Le evidenze sperimentali mostrano un cambiamento spesso repentino della corrente, come si evidenzia in Fig. 3.1. Il modello di switching a gap variabile prevede, per il set, un fenomeno di chiusura della barriera regolato da una reazione positiva. Una schematizzazione del funzionamento è osservabile in Fig. 3.7. In (a) si ha il filamento nello stato alto resistivo, risultato del processo di reset. E' presente un gap esteso da z_1 fino a z_2 . Applicando una tensione positiva al TE, si registra un riscaldamento per effetto Joule del CF tale per cui gli ioni metallici riescono a muoversi e, guidati dal campo elettrico, riempiono parte del gap, (b). Successivamente, il bordo z_1 avanza dentro la barriera, (c), giungendo a chiudere lo spessore di ossido e formando un CF completamente metallico, (d).

Analiticamente, il set si modella come il reset, avendo però cura di scegliere, nella relazione,

$$\frac{d\Delta}{dt} = Ae^{-\frac{E_{A0}}{kT(z_1)}} \quad (3.4)$$

la temperatura del bordo z_1 .

Come per il reset, è necessario uno studio attento dell'evoluzione temporale. Per fare ciò si considerino le Fig. 3.8 e Fig. 3.9. Sulla cella si applica una rampa di tensione positiva al TE, Fig. 3.8 (a). Il filamento presenta una barriera iniziale di ampiezza pari a circa 4 nm, Fig. 3.8 (b). La resistenza, poiché il gap è costante e non sono considerati i fenomeni di non linearità dell'ossido, è costante, Fig. 3.8 (c). Segue quindi che la corrente cresce linearmente, come in un normale resistore, Fig. 3.8 (d), e la temperatura massima aumenta parabolicamente, Fig. 3.8 (e). Tale comportamento si mantiene anche per $V = |V_{reset}| = 0.5$ V, corrispondente alla tensione critica del reset e, inoltre, pari alla tensione per cui inizia a manifestarsi il set nel modello filamentare. Questo risulta infatti essere un punto di forza del modello a gap poiché, sperimentalmente, si registra quasi sempre che la tensione di set è superiore alla tensione di reset. Continuando ad aumentare la rampa di tensione, si arriva al caso A espresso in Fig. 3.8 (b). Non si apprezza alcuna evoluzione sensibile, come infatti è prevedibile guardando Fig. 3.9 (a), dove si osserva come il profilo di temperatura sia alquanto inferiore alla soglia critica. In particolare, la temperatura del bordo z_1 risulta essere molto inferiore a T_{crit} . Come per il reset, la distanza tra le due linee verdi costituisce la zona occupata dall'ossido. Se si incrementa ancora la tensione, si inizia ad apprezzare una leggera diminuzione del gap, fino ad arrivare al caso B di Fig. 3.8 (a). Qui l'ossido presenta uno spessore di 3 nm. Dal grafico si evince come tale punto costituisca l'inizio di un processo repentino, autoaccelerato. Infatti, come mostrato in Fig. 3.9 (b),

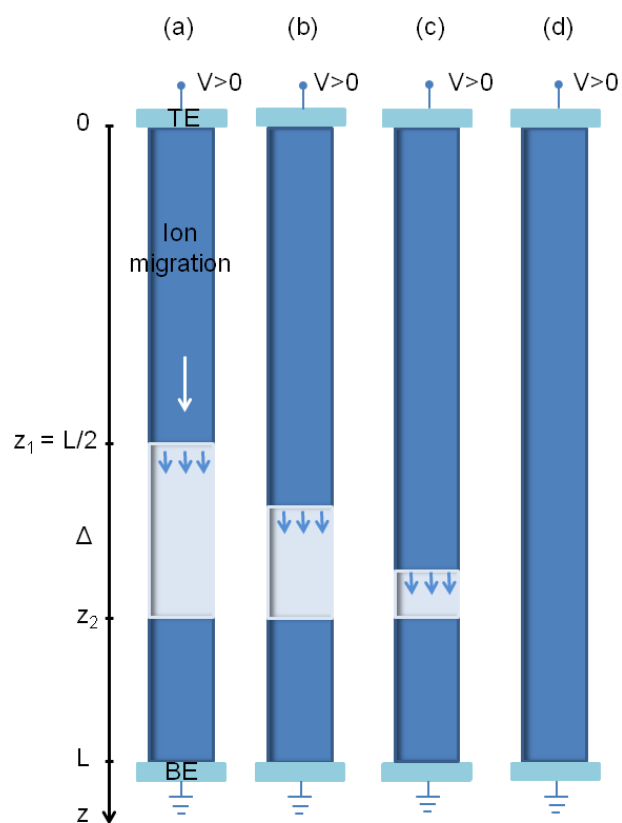


Figura 3.7: Schematizzazione del set: in (a) si ha il filamento ricavato dal reset, avente una barriera di ossido. Applicando una tensione positiva al TE, si genera un riscaldamento del CF che attiva gli ioni e li spinge nel gap, rimpicciolendolo (b - c) e, infine, chiudendolo, (d).

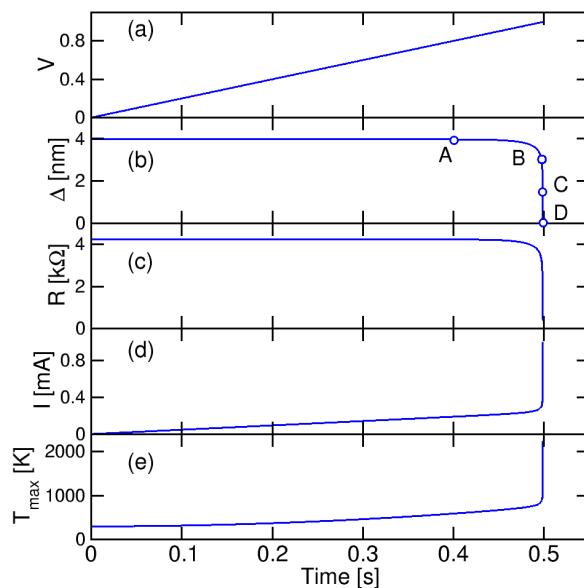


Figura 3.8: Evoluzioni temporali simulate. Si applica una rampa positiva di tensione, (a), la quale ha il compito di scaldare il filamento in cui è presente una barriera di ossido, (b). All'inizio la resistenza si mantiene costante, (c), poiché la temperatura, (e), risulta essere più bassa del valore critico. La corrente aumenta quindi linearmente, (d). Il caso A è collocato in tale regime. Quando la tensione arriva a scaldare a soglia il filamento, caso B, si verifica il set caratterizzato da una repentina chiusura della barriera, da una diminuzione drastica della resistenza e dall'aumento brusco della corrente. I casi C e D mostrano come il fenomeno sia autoaccelerato, avvenendo pressoché contemporaneamente.

in questo istante la temperatura di z_1 è finalmente giunta al valore critico, consentendo la crescita della zona metallica del CF. Il processo è una reazione positiva, infatti la chiusura dell'ossido avviene bruscamente. Nel caso C, il gap misura 1.5 nm ed il corrispondente profilo termico, Fig. 3.9 (c), mostra come la temperatura di z_1 sia aumentata, accelerando il moto ionico. In altre parole, è proprio l'autoriscaldamento che provoca la reazione positiva, non consentendo a T_{z_1} di scendere sotto la soglia critica. Infine, in D il gap si è annullato e il filamento si è molto surriscaldato, Fig. 3.9 (d). Il set si è concluso, restituendo un filamento interamente metallico. Da notare come i casi B, C, D siano tutti avvenuti pressoché nello stesso istante temporale.

Un'ulteriore conferma a supporto della presenza di una reazione positiva regolante il fenomeno è la Fig. 3.10. In essa si mostra la temperatura di z_1 al variare della dimensione della barriera. All'inizio la temperatura è inferiore alla soglia critica, non provocando alcuna

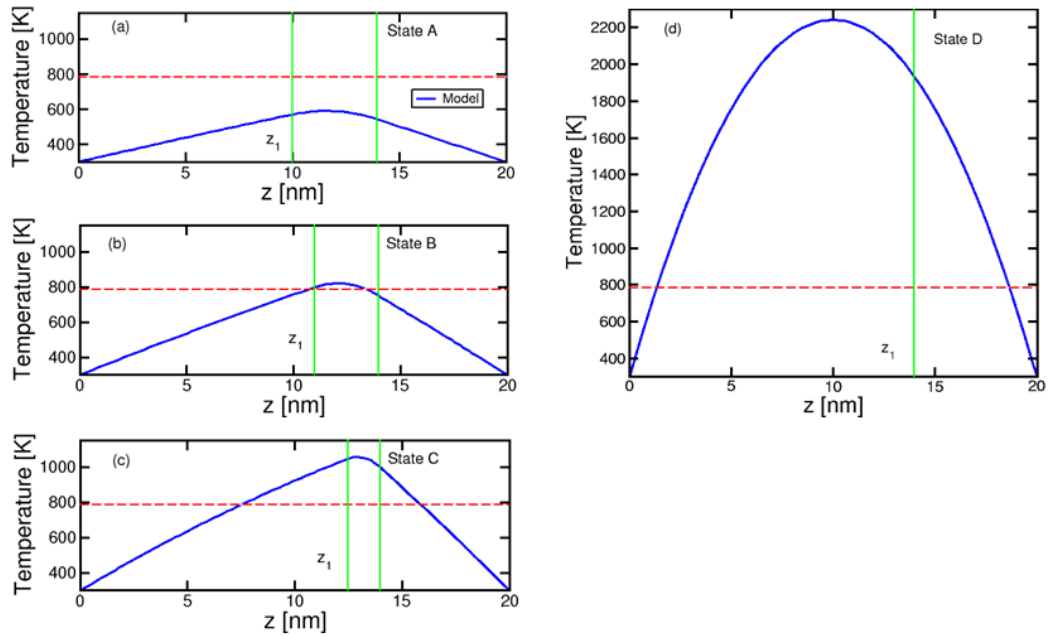


Figura 3.9: Profili termici lungo il filamento nei casi A, B, C, D di Fig. 3.8. In (a) si osserva una barriera, delimitata dalle linee verdi, dello spessore di 4 nm. La temperatura del bordo z_1 risulta essere molto inferiore alla soglia critica, tratteggiata in rosso. In (b) la tensione è tale da aver portato z_1 a soglia, generando la reazione positiva di chiusura della barriera mediante un'autosurriscaldamento del CF. In (c) si mostra come la temperatura di z_1 , ancora aumentata, abbia sensibilmente spinto z_1 a chiudere la barriera, fino a (d), dove il processo di set termina ed il gap si annulla.

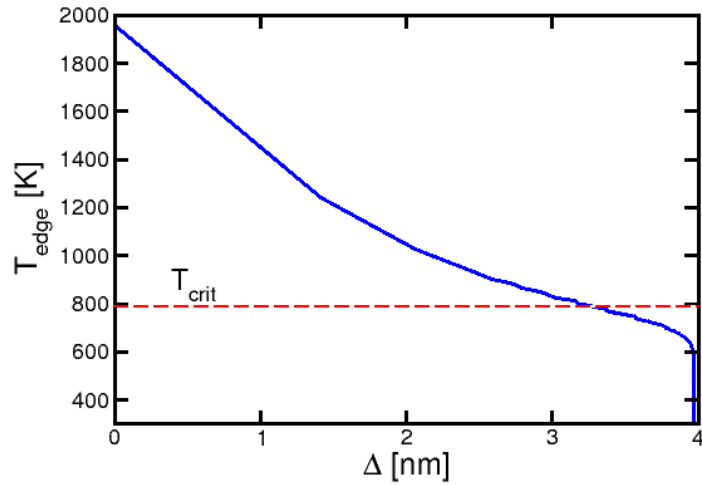


Figura 3.10: Andamento della temperatura del bordo z_2 al variare della dimensione di barriera, durante il set. Per gap elevati la temperatura è inferiore alla soglia. Successivamente, aumentando la tensione, si registra un incremento di temperatura che genera il set repentino, una volta raggiunta T_{crit} . L'andamento monotono giustifica la reazione positiva.

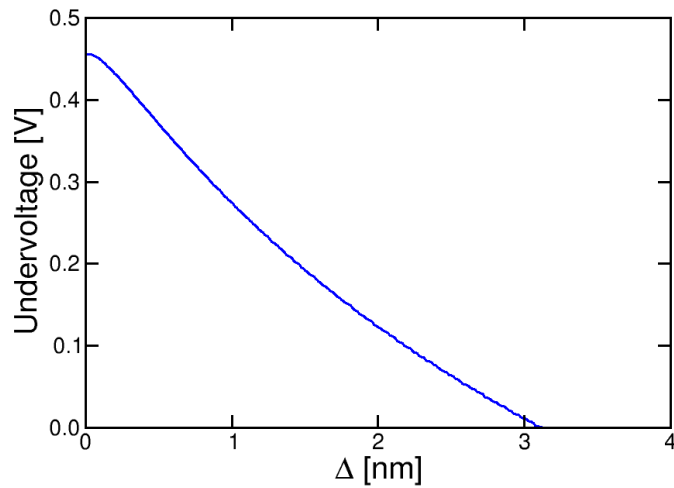


Figura 3.11: Grafico della tensione equivalente, undervoltage, da sottrarre alla tensione $V_{\text{set}} = 1$ V, per far sì che la temperatura del bordo z_1 sia pari alla temperatura critica. L'andamento monotono giustifica la reazione positiva.

variazione del gap. Successivamente si ha una lieve diminuzione della barriera fino a poco più di 3 nm. Non costituisce ancora un processo repentino, infatti corrisponde all'incirca alla sezione tra i casi A e B di Fig. 3.8. Una volta giunti alla temperatura critica, si registra una diminuzione continua della barriera accompagnata da un aumento costante di temperatura. La reazione positiva è giustificata dall'andamento monotono crescente - temporalmente si inizia con un gap elevato che poi va a chiudersi-, che genera un aumento di T_{z_1} continuo fino alla fine del set. Infatti, parallelamente a quanto fatto nel reset, è possibile definire una tensione chiamata undervoltage che sarebbe quella caduta di potenziale da sottrarre alla tensione di set, pari ad 1 V, per poter avere T_{z_1} equivalente alla temperatura di soglia. Come si può osservare in Fig. 3.11, fino ad un gap di circa 3 nm è pressoché nulla, crescendo poi monotonamente per barriere inferiori, come giustificato dalla reazione positiva di autoriscaldamento.

3.1.3 Vantaggi e Limiti

Il modello di switching a gap variabile consente di spiegare il set brusco, che si evidenzia sperimentalmente, tramite una reazione positiva di chiusura del gap. Rende chiara inoltre la ragione dell'asimmetria tra V_{set} e V_{reset} grazie agli andamenti dei profili di temperatura e, quindi, i diversi tempi necessari a generare il set ed il reset, in accordo con i valori sperimentali dell'ordine del secondo di Fig. 3.12, nei quali è palese il fatto che sia necessaria, a parità di tempo di commutazione, una tensione o un'energia maggiori per attivare il set rispetto al reset. Il modello spiega, inoltre, il reset graduale mediante una reazione negativa durante l'apertura della barriera di ossido. In Fig. 3.13 si apprezza una simulazione di una caratteristica tensione - corrente.

Il modello consente, inoltre, di prevedere i reset parziali. Sperimentalmente si osserva come, interrompendo la rampa negativa di tensione applicata ad un certo valore, tornando a zero, riapplicando una seconda rampa fino ad un valore più negativo e così via, si riescono a definire degli stati intermedi di reset che consentono anche una possibile memorizzazione multilivello. Il modello considera il reset regolato da una reazione negativa che consente un blocco della crescita della barriera. Interrompendo, quindi, le rampe di tensione a valori diversi, si definiscono dei gap di misure diverse, generando dei differenti stati di reset. In Fig. 3.14(a) si osservano dei dati sperimentali [19], mentre in Fig. 3.14(b) si vedono le corrispondenti simulazioni. E' interessante notare come, all'aumentare della tensione di stop nel reset, si registra sperimentalmente un corrispettivo aumento della tensione di set. Questa evidenza viene spiegata, dal modello a gap variabile, grazie al fatto che, modificando

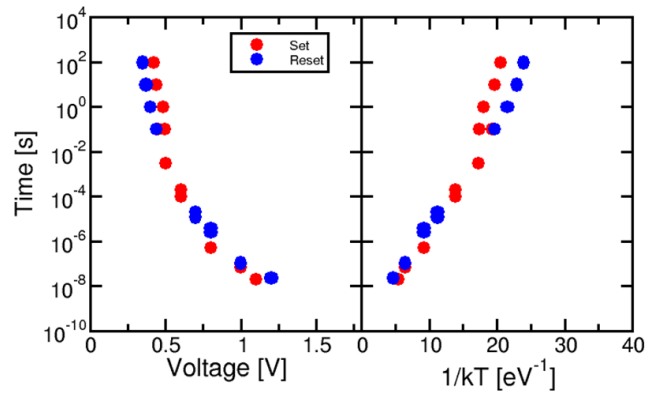


Figura 3.12: Valori sperimentali dei tempi di commutazione per il set, in rosso, ed il reset, in blu, in funzione delle tensioni applicate o degli inversi delle energie necessarie. Si riscontra un'asimmetria per tempi dell'ordine del secondo.

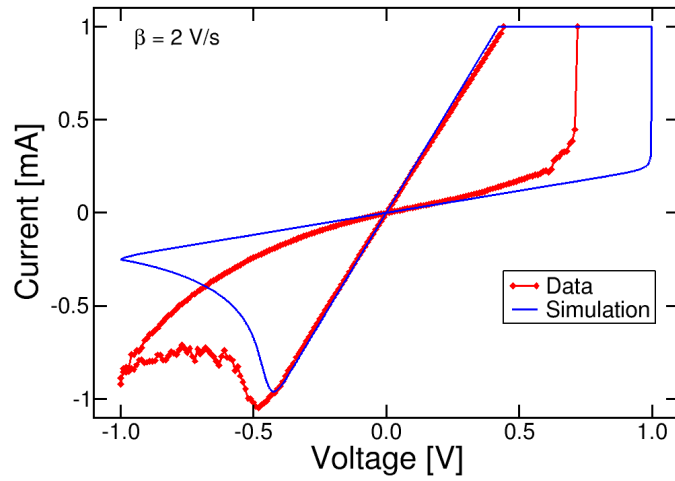


Figura 3.13: Caratteristiche tensione - corrente sperimentale, in rosso, e simulata secondo il modello di switching a gap variabile, in blu. La rampa di tensione calcolata ha una velocità $\beta = 2$ V/s.

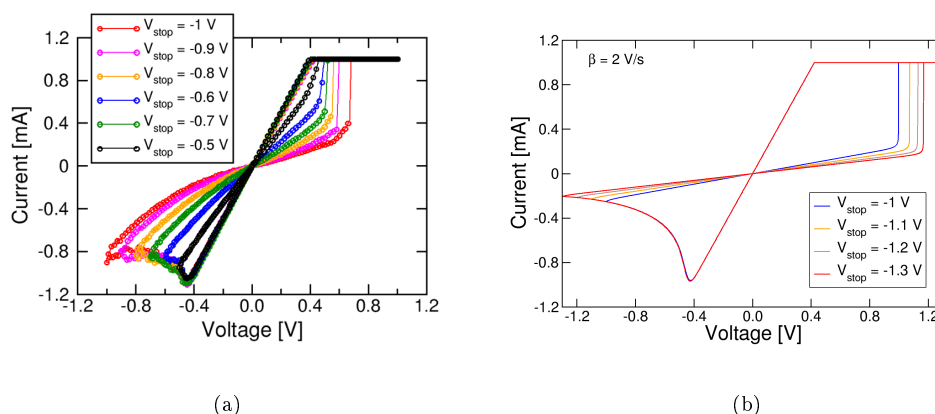


Figura 3.14: Reset parziali sperimentali in (a), simulati in (b). Si osserva come, al variare della tensione di stop nel reset, varia anche la tensione di set.

la lunghezza dell'ossido, varia la tensione necessaria a riscaldare fino a T_{crit} il bordo z_1 . Tale fatto non era comprensibile mediante il modello filamentare poiché questo prevedeva un'unica tensione di set, indipendente dalla cinetica di reset.

Uno dei limiti presenti in tale modello risulta essere la mancanza della necessità di una limitazione della corrente, di conseguenza la mancanza di una spiegazione della scarsa dipendenza di V_c da I_c . Infatti, una volta che la barriera si è chiusa, poiché il diametro del filamento non può crescere, non può di conseguenza neanche ridursi oltre un certo valore la resistenza mostrata. Ciò è chiaramente in contrasto con le evidenze sperimentali per le quali, in assenza di una limitazione di corrente, il filamento si ispessisce in maniera poco controllabile, facendo crollare la resistenza. Solo mediante un limitatore di corrente la crescita del diametro subisce una reazione negativa che blocca un ulteriore ispessimento del filamento e fa sì che la tensione sulla cella si stabilizzi a V_c , valore dipendente dai parametri fisici [17]. Inoltre, un altro aspetto non trattato risulta essere quello della non linearità dello stato alto resistivo, non previsto dal suddetto modello. Come si osserva in Fig. 3.13, lo stato di reset sperimentale mostra una curvatura dovuta alla dipendenza dei parametri di conducibilità dalla temperatura. In generale, la conducibilità elettrica in un isolante può essere descritta dall'effetto Poole - Frenkel, come schematizzato in Fig. 2.7. Gli elettroni sono di solito intrappolati nelle buche di potenziale presenti nell'ossido. La presenza di fluttuazioni termiche e l'energia dovuta ai campi elettrici presenti consentono loro di passare in banda

di conduzione, compiere un certo tragitto e infine rilassare, ridepositandosi in un'altra buca. Per semplificare la rappresentazione modellistica, si può compiere la seguente approssimazione. Poiché la conducibilità elettrica σ_{Hf} viene aumentata dalla presenza di un campo E che trascina gli elettroni, si può scrivere

$$\sigma_{Hf} = \sigma_{Hf0}(1 + \gamma E) \quad (3.5)$$

dove γ è un parametro di fitting. Un altro limite evidente dalla Fig. 3.13 è l'errore nella simulazione della tensione di set. Questo è legato all'aver trascurato la non linearità la quale, modificando la resistività dell'ossido, varia le tensioni di set e reset.

3.2 Modello a gap - area variabile

Il modello che si proporrà ora rappresenta una possibile soluzione ai limiti prima presentati per quello a gap variabile. Lo scopo di questa nuova pittura è quello di mantenere il reset reazionato negativamente e il set positivamente, di considerare l'andamento non lineare, di avere ancora V_{set} maggiore di V_{reset} e di spiegare V_c tramite una reazione negativa. In Fig. 3.15 si osserva uno schema esemplificativo. Si consideri un filamento interamente metallico, ossia nello stato di set, Fig. 3.15 (a). Il reset avviene applicando, al solito, una tensione negativa al TE. Questo causa l'apertura di un gap esattamente allo stessa maniera del modello iniziale, come in Fig. 3.15 (b). A questo punto si applica una tensione positiva al TE, passando alla fase di set. Stavolta si modella il processo come la crescita di un filamento conduttivo metallico all'interno dell'ossido, (c), che si ispessisce fino a riempire la zona di ossido, (d). Se si continua ad aumentare la tensione, l'intero filamento, dal TE al BE, si ispessirà, non ponendo un limite come nel modello a gap variabile.

L'aspetto interessante di questa rappresentazione è la crescita del CF durante il set. All'inizio il filamento è nullo, quindi termicamente si ha la stessa situazione che nel caso a gap variabile, di conseguenza si ha ancora una temperatura, alla tensione $V = |V_{reset}|$, inferiore al valore critico, diversamente dal modello filamentare nel quale, non essendo mai considerato uno strato di ossido, si ha una temperatura superiore. Durante la crescita, la corrente scorre sia nel CF, sia nell'ossido circostante. Per semplicità, si suppone di avere un unico mezzo omogeneo con resistività ρ e conducibilità termica k_{th} equivalenti date dal parallelo, per ρ , o dalla somma, per k_{th} , dei valori dell'Afnio e dell'ossido pesati per le rispettive aree. L'immissione di ioni avviene sempre dal bordo z_1 , di conseguenza si

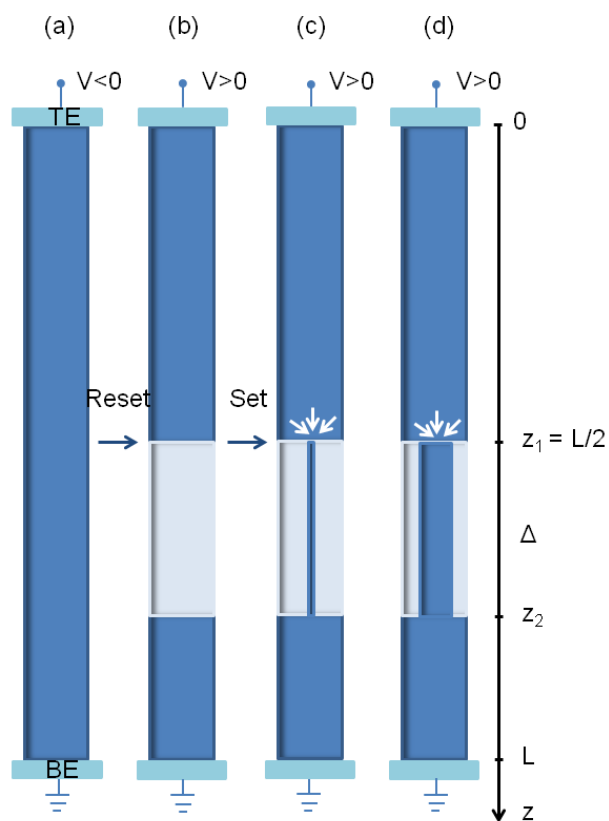


Figura 3.15: Schematizzazione del modello ibrido. In (a) si considera un filamento nello stato di set, interamente metallico. Il reset si ottiene dando una tensione negativa al TE, aprendo un gap, (b). Successivamente si esegue il set, applicando $V > 0$. Inizialmente si avrà la nucleazione di un CF all'interno dell'ossido, (c), seguito da un suo ispessimento, (d).

considera, per il tasso di crescita, una relazione

$$\frac{d\phi}{dt} = Ae^{-\frac{E_{A0}}{kT(z_1)}} \quad (3.6)$$

dove la temperatura è quella calcolata all'estremo z_1 .

Risulta ancora conveniente eseguire uno studio dell'evoluzione temporale del fenomeno. Si faccia riferimento alla Fig. 3.16. Sulla cella, inizialmente nello stato alto resistivo, si applica una rampa di tensione, rappresentata in Fig. 3.16 (a) in rosso. Il diametro ϕ del filamento all'interno dell'ossido è nullo, (b), quindi la resistenza mostrata è elevata, intorno agli $8k\Omega$, dovuta principalmente allo strato dielettrico, (c). Al crescere della rampa V_A , la resistenza decresce a causa della non linearità. Infatti, applicando una tensione, inizia a crearsi un campo elettrico che aumenta la conduzione nell'ossido, abbassandone la resistività. Ciò è rivelabile osservando la riduzione non lineare nel tempo di R. Segue che la corrente cresce non secondo una retta, come si evince da (d). A circa $t = 0.3$ s, la temperatura giunge al valore di soglia, intorno agli 800 K, innescando la reazione positiva di crescita del filamento metallico -positive feedback, PF-. Si osserva la crescita verticale dello spessore del CF e della corrente, dovuta ad un conseguente crollo di R. Poiché $I_c = 1$ mA, la corrente si blocca a tale valore. Ora è presente un sistema di compliance su cui cade parte della tensione V_A applicata, consentendo al filamento di stabilizzarsi intorno a un valore di circa 12 nm a causa della reazione negativa -negative feedback, NF- che mira ad abbassare la temperatura nel CF. Il funzionamento è il solito, se la tensione aumenta, il CF si ispessisce, la sua resistenza diminuisce, una maggior porzione di tensione cade sul selettore in serie, diminuendo la differenza di potenziale sulla cella che, quindi, si raffredda e non cresce più. Giustamente V si attesta intorno agli 0.4 V, pari a V_c nei risultati sperimentali.

Come si osserva da Fig. 3.16 (b), la stabilizzazione avviene entro il diametro iniziale, facendo concludere che, una volta arrivati a regime con le ciclature, solo la parte centrale del filamento subisce un moto di crescita e rottura. In Fig. 3.17 è invece mostrato l'andamento temporale in assenza di una corrente di compliance. Una volta innescata la reazione positiva di crescita, ϕ cresce repentinamente. L'aspetto più interessante è rappresentato dalla temperatura. A una crescita brusca, dovuta al surriscaldamento a causa della presenza dell'ossido, segue un incremento più graduale, parabolico con la tensione e, quindi, con il tempo, come nel modello filamentare.

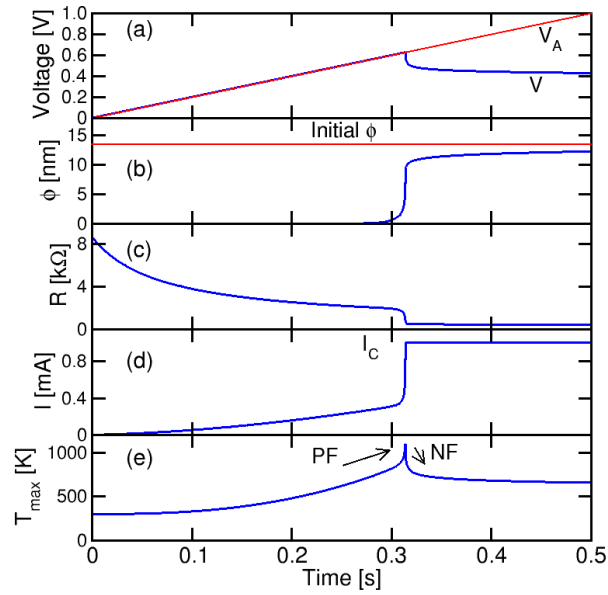


Figura 3.16: Andamenti simulati di V , ϕ , R , I e T_{max} in funzione del tempo. Aumentando la tensione, (a), nulla succede nel filamento, (b), a causa di una temperatura, (e), ancora troppo bassa. La resistenza, (c), diminuisce non linearmente a causa del campo elettrico creatosi nel gap. Arrivati alla soglia $T_{crit} = 800$ K, ϕ subisce una crescita repentina a causa della reazione positiva instauratasi. Una volta che I arriva a I_c , si registra una riduzione della tensione ai capi della cella e una stabilizzazione del diametro ϕ , arrivando a spiegare il comportamento di V_c .

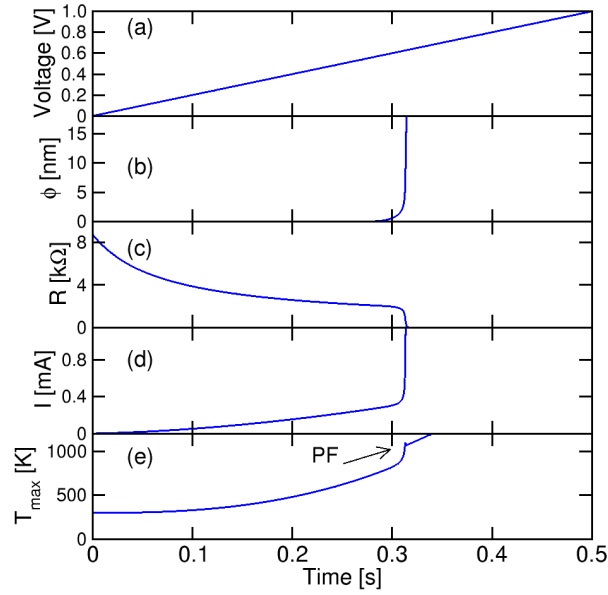
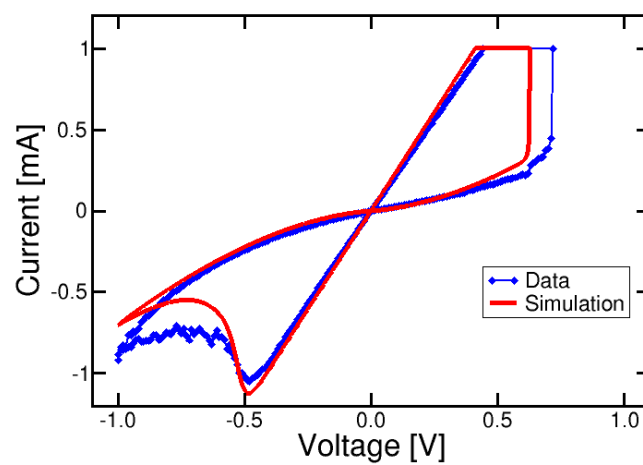


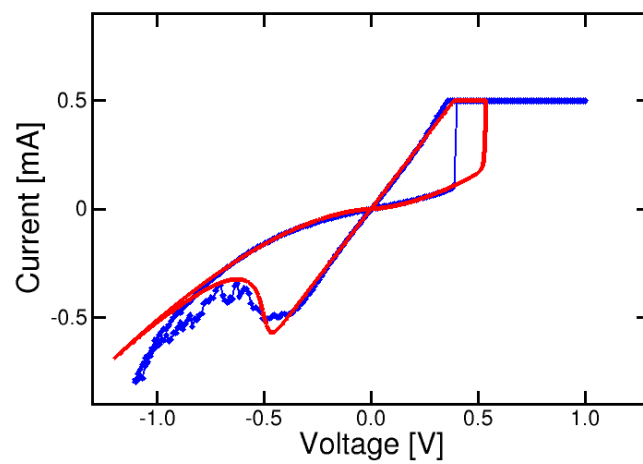
Figura 3.17: Medesimi andamenti temporali di Fig. 3.16. Ora non è presente alcuna limitazione di corrente. Una volta che ϕ è cresciuto fino a riempire tutto lo strato di ossido dentro il CF, questo cresce interamente con la legge esponenziale del modello filamentare.

3.3 Interpolazione dei dati sperimentali

In questa sezione vengono mostrate le interpolazioni compiute dal modello a gap - area variabile su due caratteristiche sperimentali. In Fig. 3.18(a) si mostrano i risultati per una cella da 20 nm con $I_c = 1$ mA, mentre in Fig. 3.18(b) quelli per una da 5 nm con $I_c = 500 \mu\text{A}$. In entrambi i casi il modello predice correttamente lo stato basso resistivo, le tensioni V_c e V_{reset} , nonché l'andamento non lineare dello stato alto resistivo. La simulazione dell'evoluzione del reset è accettabile. E' invece presente un errore nella caratterizzazione della tensione di set. Nella cella da 20 nm si ha, come ci si aspetta, una V_{set} superiore a V_{reset} , mentre non è così in quella da 5 nm, nella quale i due valori sono pressoché uguali. Il modello non considera un'eventualità del genere, dimostrandosi ancora incompleto sotto questo aspetto. In tabella 3.1 si riportano i dati di fitting impiegati.



(a)



(b)

Figura 3.18: Caratteristiche tensione - corrente sperimentali, in blu, e simulate, in rosso, per celle da 20 nm, (a), e 5 nm, (b).

Parametro	Valore
E_{A0}	1.2 eV
A	5 m/s
ρ_{Hf}	280 $\mu\Omega\text{cm}$
k_{th}	23 W/mK
T_0	300 K
γ_{20nm}	65 nm/V
γ_{5nm}	31 nm/V

Tabella 3.1: Parametri utilizzati nel fitting.

Capitolo 4

Modellizzazione dei fenomeni di switching complementare

In questo capitolo si tratta della modellizzazione dei fenomeni di switching complementare, in particolare del CRS -Complementary Resistive Switching- e del CS -Complementary Switching-. Ci si basa sui modelli precedentemente sviluppati, consentendo una miglior comprensione dei meccanismi succitati.

4.1 Complementary Resistive Switching, CRS

Le memorie resistive costituiscono un innovativo e promettente approccio per una nuova categoria di memorie ad alta densità e a bassa dissipazione energetica, in grado di proseguire oltre il limite imposto alle memorie Flash. Un aspetto estremamente vantaggioso risiede nella semplicità con cui si può costruire un array di memoria mediante l'architettura Crossbar. Secondo tale concezione, si depongono, sopra una serie di contatti paralleli tra di loro, uno strato di un materiale in grado di cambiare le sue proprietà resistive. Infine si dispongono, al di sopra, un'altra serie di contatti paralleli, perpendicolari agli elettrodi sottostanti. In Fig. 4.1 si osservano due strati di una memoria crossbar. Interposto tra gli elettrodi, costituiti da lunghe piste metalliche, è presente il mezzo resistivo. In tal maniera, applicando una tensione opportuna ad una coppia di contatti, si riesce a modificare lo stato del materiale posto tra gli stessi. Per evitare una programmazione di più celle contemporaneamente, è bene che la singola memoria non commuti al variare della tensione di un solo elettrodo. Si

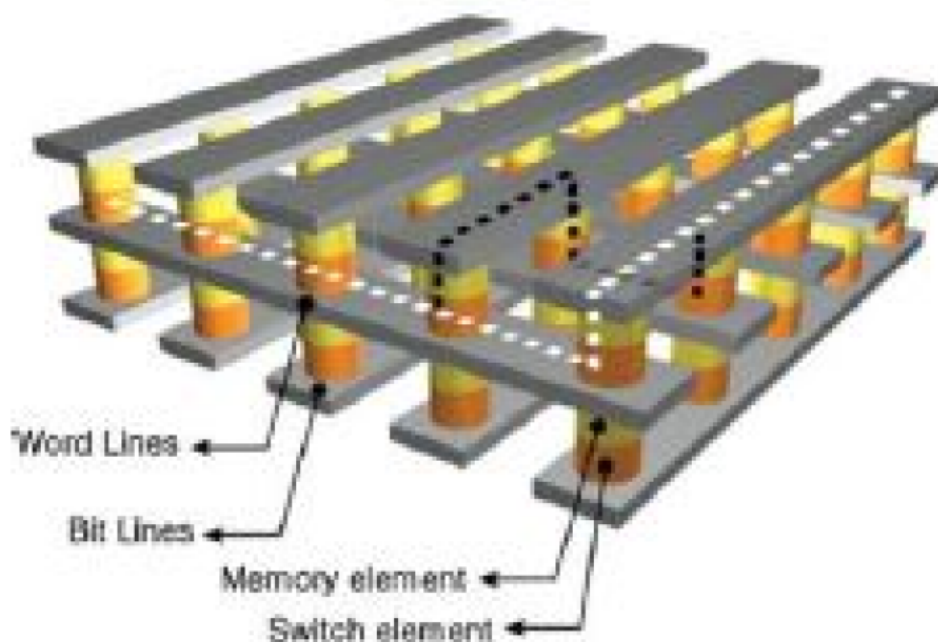


Figura 4.1: Struttura crossbar. Sono mostrati due livelli di memoria, con i relativi contatti e i corrispondenti selettori [22].

dovranno, quindi, studiare i valori delle tensioni di switching, scegliendo opportunamente il mezzo resistivo.

La semplicità della struttura e l'assenza di transistori rende possibile l'ideazione di memorie ad elevata densità, consentendo una dimensione minima della cella pari a $4F^2$, con F indicante la minima dimensione progettabile. Addirittura, impilando n livelli, si può ottenere una densità di integrazione pari a $4F^2/n$. E' però presente un inconveniente nella struttura crossbar, legato alla presenza di percorsi a bassa resistività che portano a falsare la lettura di stati alto resistivi. Facendo riferimento a Fig. 4.2, si immagini di voler leggere la cella rossa, supposta in uno stato alto resistivo. Per fare ciò si deve applicare una tensione e leggere la corrente che scorre. Purtroppo, applicando una differenza di potenziale, questa cadrà anche sulle celle aventi i medesimi elettrodi. Può capitare, come mostrato nel disegno, che esista un percorso a bassa resistività dovuto ad altre celle che fa sì che la corrente letta sia superiore a quella prevista dalla sola cella in esame, arrivando a concludere che era in uno stato basso resistivo, ossia sbagliando la lettura. Per rimediare è necessario porre un elemento rettificante o un transistore in serie, ma questo provoca un limite notevole alla

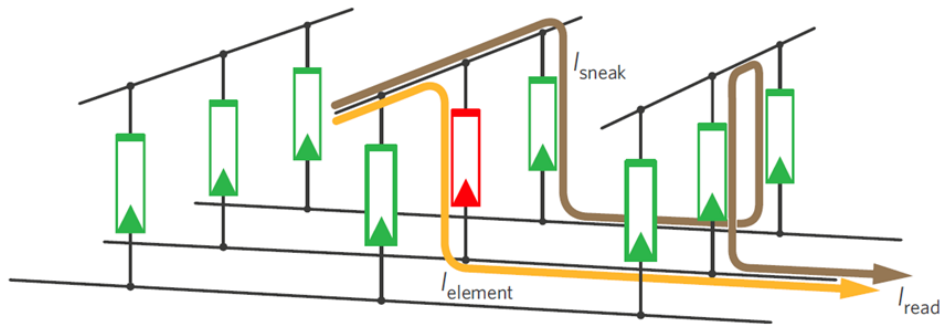


Figura 4.2: Struttura crossbar con il relativo inconveniente dei percorsi a bassa resistenza. Si supponga di voler leggere la cella rossa in uno stato alto resistivo. La presenza di percorsi conduttivi genera una corrente superiore che falsa la lettura del dato.

scalabilità della struttura.

Una soluzione innovativa è quella proposta da E. Linn in [23]. L'idea consiste nel porre due celle resistive connesse antiseriamente, come mostrato in Fig. 4.3. Agli estremi sono presenti due elettrodi inerti, per esempio in platino, mentre al centro, in rosso, è localizzato il contatto attivo, in rame. Sono poi interposti due strati isolanti la cui composizione varia - SiO_2 , GeSe , per citarne alcuni-. Si supponga di essere in Fig. 4.3 (b), caso (1). E' presente un canale conduttivo nella cella superiore (Low Resistance State, LRS), mentre quella inferiore è in condizioni di reset (High Resistance State, HRS). In totale la resistenza è elevata, $\text{LRS} + \text{HRS} \simeq \text{HRS}$, e si definisce tale stato come '1'. Applicando una rampa di tensione, poiché questa si localizza principalmente sulla cella in HRS, si avrà il set della stessa non appena si supera V_{set} , arrivando ad avere due stati LRS, quindi una corrente maggiore. Aumentando ancora la tensione, superando V_{reset} si ha il reset della cella in alto, poiché gli ioni positivi del rame sono respinti dall'elettrodo superiore. Vale ancora $\text{LRS} + \text{HRS} \simeq \text{HRS}$, ma ora il canale si trova in basso, ossia si è memorizzato un altro stato, '0'. Ugualmente, applicando una rampa negativa, si arriva a ristabilire lo stato '1' ricostruendo il filamento superiore. In conclusione, le condizioni '0' e '1' mostrano la stessa alta resistenza, quindi non si presenta più il rischio dei percorsi conduttivi. Il funzionamento è analogo a quello di un invertitore CMOS, nel quale uno dei due transistori MOS risulta spento.

Un inconveniente dello schema descritto risiede nella lettura. Si deve applicare una

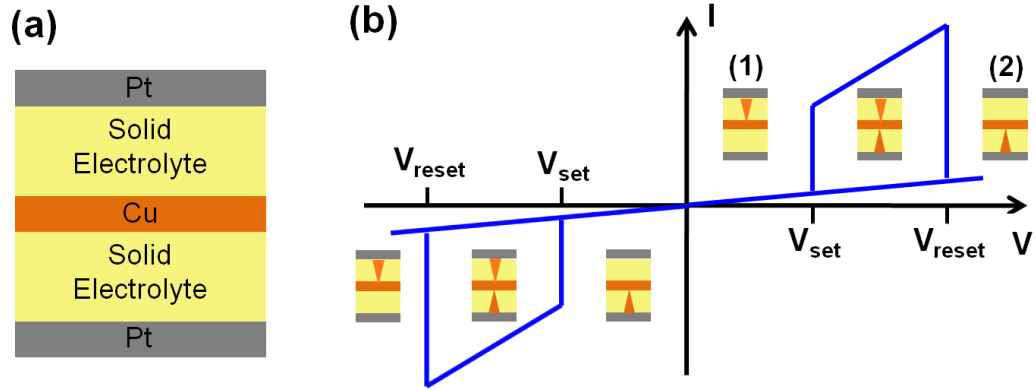


Figura 4.3: Schematizzazione di una cella CRS, (a), e della corrispondente caratteristica IV, (b).

tensione compresa tra V_{set} e V_{reset} , positiva. Se lo stato è '1', allora si passerà allo stato LRS + LRS, leggendo più corrente. Se invece era '0', non si avrà alcuna variazione di corrente, infatti il filamento è in basso e nella cella superiore non succede nulla. Purtroppo, con '1', la lettura è distruttiva, di conseguenza è necessario impostare nuovamente lo stato applicando una tensione più negativa di $-V_{reset}$, rallentando la velocità di lettura. Una soluzione per ridurre il consumo di energia consiste nel leggere applicando una tensione $V > V_{reset}$. Se lo stato è '0' non succede nulla. Se è '1' si passa allo stato '0', ma passando per LRS + LRS, leggendo, quindi, un picco di corrente. Poiché la condizione basso resistiva è solo transitoria, scorre meno corrente, dissipando meno potenza [23]. Un secondo problema esistente riguarda il deterioramento della struttura. Il comportamento descritto si basa sull'impiego di un elettrodo attivo, una CBRAM, le quali mostrano un'elevata variabilità e instabilità, limitando il numero di cicli realizzabile. Tuttavia sono ormai stati dimostrati numerosi esempi di CRS realizzato mediante celle RRAM basate sulla riduzione di un ossido metallico [12].

4.1.1 Logica CRS

Un'interessante applicazione delle celle CRS risiede nel loro impiego in reti logiche, consentendo la realizzazione di reti miste contenenti sia memorie che logica, evitando il trasporto dei dati lungo il chip e la relativa dissipazione energetica. E' stato infatti dimostrato come una cella RRAM riesce a implementare la funzione logica di implicazione [24, 25], la cui tabella delle verità è mostrata in tabella 4.1. La si inizializzi nello stato HRS, definito '1'. Applicando x al TE e y al BE, si otterrà una commutazione nello stato '0', LRS, solo per x

x	y	OUT
0	0	1
0	1	1
1	0	0
1	1	1

Tabella 4.1: Funzione logica $x \text{ IMP } y = \text{OUT}$.

$= 1$, $y=0$. La lettura dello stato viene effettuata mediante l'applicazione di una piccola tensione di lettura. Inizializzando invece nello stato LRS, '0', si ottiene l'implicazione negata. In generale è necessario avere a disposizione un passo per inizializzare le celle, prima di compiere le operazioni logiche. Proseguendo, è possibile estendere le funzioni logiche mediante l'utilizzo di una cella CRS. Similmente, si associa a '1' lo stato LRS nella cella superiore, HRS in quella inferiore, più brevemente LRS/HRS, e lo si utilizzi come condizione iniziale. Solo applicando al TE $x = 1$ e al BE $y = 0$ si avrà la transizione allo stato '0' costituito da HRS/LRS. Per leggere la transizione si osserva la presenza di un picco di corrente. Si ricava la funzione implicazione negata ponendo, come condizione iniziale, '0', HRS/LRS. Ciò che è interessante è osservare come gli stati '0' e '1' siano alto resistivi, consentendo un loro utilizzo negli array di memoria crossbar, senza rischi di percorsi conduttivi. Da qui è possibile implementare tutte le funzioni logiche, combinando opportunamente le celle CRS [25].

4.1.2 Simulazione del CRS

In questa sezione si riportano i risultati inerenti la simulazione di strutture CRS. La modellizzazione è stata eseguita adottando, per entrambe le celle, il modello di switching ibrido descritto nel capitolo 4. Si sono utilizzate due strutture di ossido di Afnio, avendo connesso due celle adiacenti nel modo descritto in Fig. 4.4. Sono mostrate due celle vicine, definite dai contatti di top TE1 e TE2. Il contatto di bottom risulta essere lo stesso per le due strutture. Per ottenere una cella CRS, si considera, come elettrodo superiore, TE1, mentre TE2 diventa l'elettrodo inferiore. Il contatto di bottom viene invece lasciato non polarizzato, libero di muoversi. In questa maniera si ottiene la struttura equivalente indicata a destra, in Fig. 4.4. In Fig. 4.5 si osservano i dati sperimentali, in nero, con la relativa simulazione,

in rosso. Sono ben distinguibili le varie transizioni caratteristiche del CRS, a partire dal set iniziale della cella inferiore, Set 2, conducente ad uno stato più conduttivo, seguito dal reset della struttura superiore, Reset 1, per arrivare allo stato alto resistivo, percorrendo il grafico per tensioni positive. Si notano, tuttavia, sensibili divergenze, sia per quanto riguarda la tensione di set, più piccola nei dati sperimentali, sia per la corrente di reset, molto più elevata nelle misure rispetto a quella calcolata. Sono invece ben approssimati l'andamento non lineare e le correnti di picco. Per comprendere meglio il funzionamento del CRS, è utile affidarsi alle caratteristiche IV delle singole celle, mostrate in Fig. 4.6. In (a) si può osservare il grafico per la cella 1, C1. Il filamento è inizialmente presente, ma, aumentando la tensione, si registra la transizione Reset 1 di Fig. 4.5. Mediante una rampa negativa si ricava la transizione Set 1 di C1, a cui fa seguito la stabilizzazione della tensione al valore $|V_c| = 0.45$ V. In (b) si mostra, invece, l'evoluzione per la cella 2, C2. Ad un iniziale stato alto resistivo segue un set, corrispondente al Set 2 di Fig. 4.5, con conseguente equilibrio della tensione a V_c . Segue infine, sulla polarità negativa della tensione, la transizione Reset 2 di C2. Osservando l'ingrandimento della caratteristica positiva di C2 di Fig. 4.7, si può notare come in A si verifichi il set di C2, mentre in B si abbia una riduzione della corrente a seguito del reset di C1 che arriva a fissare la resistenza totale dell'intero dispositivo. Successivamente si registra un incremento e un decremento di corrente a causa della rampa di tensione che si sta ancora applicando dopo le varie transizioni, prima positiva, in C, quindi negativa, in D. Poiché il CRS prevede un comportamento simmetrico, si osserva il medesimo sviluppo anche sulla polarità negativa, durante il set di C1. Il modello riesce a modellizzare in maniera più che accettabile tale evoluzione. Un sunto dell'evoluzione generale è ricavabile da Fig. 4.8, nel quale vengono analizzati alcuni parametri in funzione del tempo. Applicando un impulso triangolare positivo sull'intera struttura (a), si osserva come prima si verifichi il set di C2, osservabile per una diminuzione della resistenza R_2 (e) e della tensione V_2 (d), quindi il reset di C1, individuabile da un aumento sia di R_1 (c) che di V_1 (b). Sull'impulso negativo di tensione si ha lo stesso comportamento, invertito.

E' interessante notare come, durante lo stato basso resistivo del CRS, si viene a creare un profilo IV pressoché triangolare. La tangente a questo grafico, come si evince da Fig.4.9, non attraversa l'origine, rivelando come non si abbia un semplice resistore, la cui caratteristica passa invece per tale punto. Infatti, come è stato di recente dimostrato [26], questo verifica come il fenomeno di set non sia brusco e concluso dopo la transizione Set 2 di Fig.4.5, bensì prosegua fino a stabilizzarsi a V_c poco prima del reset dell'altra cella, come evidente dalla caratteristica di C2. Ciò fa sì che la tangente intersechi l'asse delle ascisse in corrispondenza

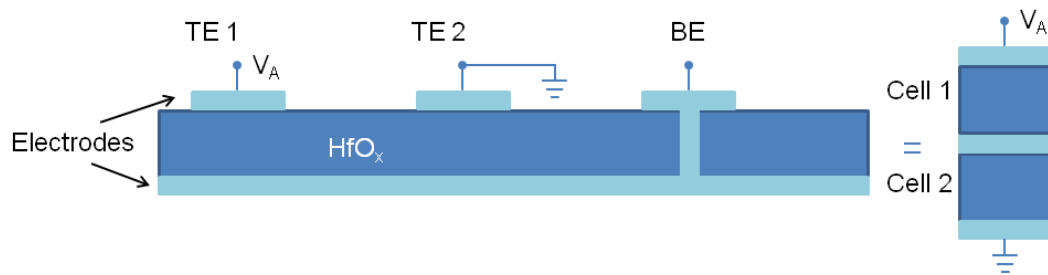


Figura 4.4: Struttura utilizzata per la simulazione del CRS. Sono mostrate due celle RRAM adiacenti, definite dai contatti di top TE1 e TE2. Il contatto di bottom BE è in comune. Per misurare sperimentalmente i dati, si sono connessi gli elettrodi di top all'alimentazione V_A e a massa, lasciando il nodo intermedio libero in tensione. Accanto si mostra la struttura equivalente.

proprio di V_c , come infatti predice il modello, confrontandolo con le caratteristiche di singola cella. A sostegno dell'idea per cui il set non è immediato, si può notare, in Fig.4.8 (e), come la resistenza decresca gradualmente e non repentinamente per Set 2. In tabella 4.2 si riportano i parametri di fitting utilizzati. E' stato necessario variare l'energia di attivazione rispetto al caso della cella singola descritta nel capitolo 3, nonché accorciare leggermente la lunghezza del CF. Ciò è difendibile ricordando come 20 nm fosse lo spessore dell'ossido, non l'effettiva lunghezza del filamento.

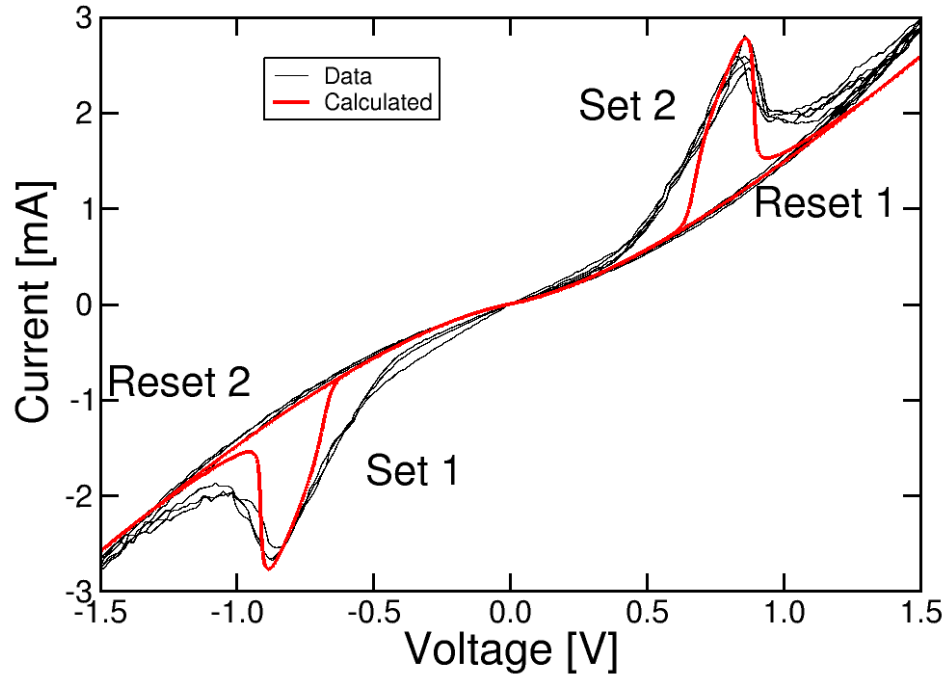


Figura 4.5: Caratteristica IV di una cella CRS. In nero sono mostrati i dati sperimentali, in rosso quelli simulati. Si osservano prima il set della cella 2, seguito dal reset della cella 1. Per tensioni negative si assiste al set di C1, quindi al reset di C2.

Parametro	Valore
E_{A0}	0.83 eV
A	5 m/s
ρ_{Hf}	440 $\mu\Omega\text{cm}$
ρ_{ox0}	1 m Ωcm
k_{th}	23 W/mK
T_0	300 K
L_{CF}	18 nm
γ	31 nm/V

Tabella 4.2: Parametri utilizzati nel fitting CRS.

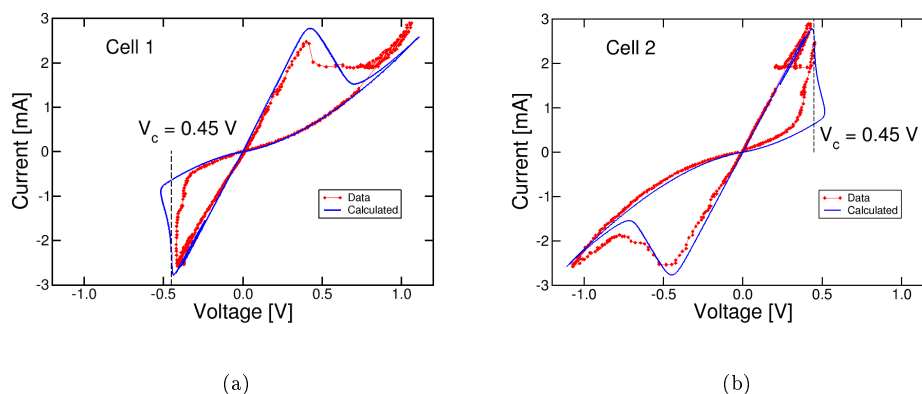


Figura 4.6: Caratteristiche IV misurate, in rosso, e calcolate, in blu, per le singole celle durante il funzionamento in CRS. Si osservano le tensioni V_c a cui si stabilizzano le cadute di potenziale dopo il set.

4.2 Complementary Switching, CS

Come è stato mostrato precedentemente, la struttura CRS consente di evitare i percorsi conduttivi che falsano la lettura di una cella in un array di memoria, riuscendo a immagazzinare il dato ed a mantenere lo stesso stato alto resistivo. Tuttavia, si deve riconoscere come la struttura sia delicata e subisca un rapido deterioramento, soprattutto a causa dell'elettrodo attivo interno. Oltretutto, risulta non semplicissimo sovrapporre correttamente i vari strati metallici e dielettrici. Una soluzione al problema può essere quella del Complementary Switching (CS). È stato dimostrato [27] come, mediante l'utilizzo di strutture in ossido di Afnio, sia possibile memorizzare in una singola cella due stati, entrambi ad alta resistività. In questo modo è possibile progettare memorie crossbar identiche al caso del CRS, ma tramite l'impiego di dispositivi ben più semplici.

Sono state impiegate delle strutture simmetriche costituite da $\text{TiN} - \text{HfO}_x - \text{TiN}$. È infatti necessario, per osservare il fenomeno, avere delle celle non polari. Ciò significa che la concentrazione iniziale di atomi di Afnio deve mantenersi costante lungo tutto lo spessore di ossido tra i due elettrodi, Fig. 4.10. Nella stessa figura si osservano delle caratteristiche tensione - corrente della cella, ottenute senza l'utilizzo di una corrente di compliance. In Fig. 4.11 è invece mostrata la relativa simulazione eseguita mediante il modello numerico COMSOL descritto nel capitolo 2. La spiegazione fisica proposta è la seguente. Ci si ponga

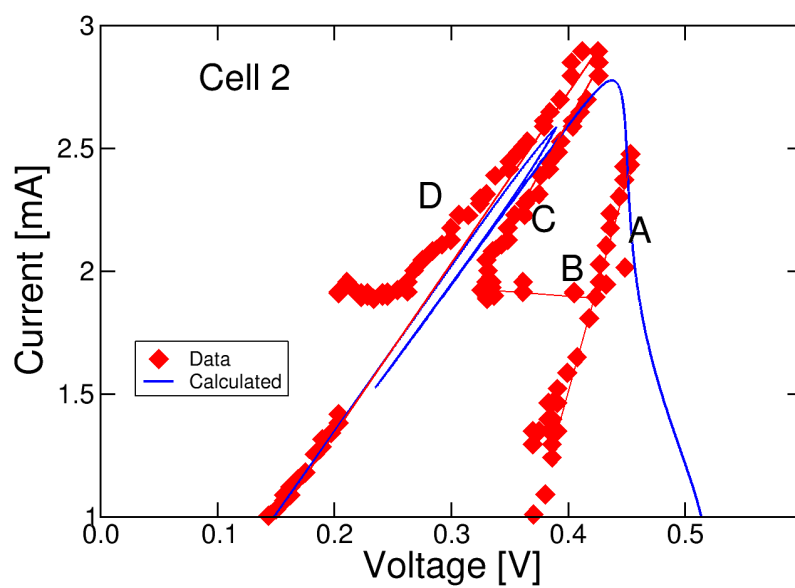


Figura 4.7: Ingrandimento della caratteristica di C2. A seguito del set di C2, A, si osserva una riduzione di corrente a causa del reset di C1. A questo punto la resistenza del CRS è fissata. In C la corrente cresce a causa della rampa positiva di tensione che si sta applicando, seguito da D dove I decresce, per la rampa negativa.

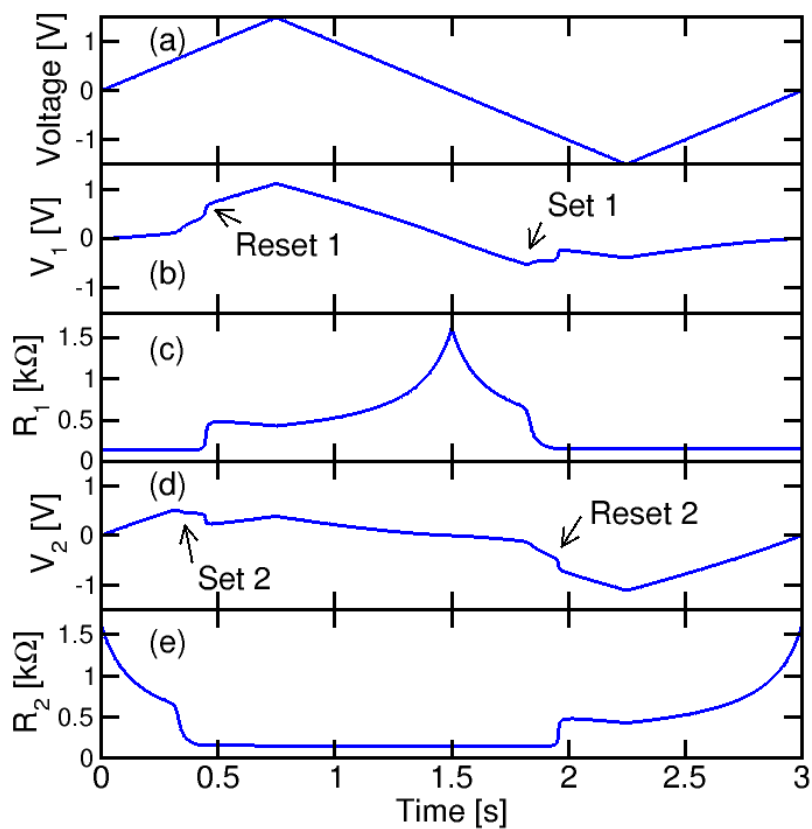


Figura 4.8: Evoluzioni temporali, durante il CRS, della tensione di alimentazione V (a), di quella sulla cella 1 V_1 (b), di R_1 (c), della tensione sulla cella 2 V_2 (d) e di R_2 (e). Applicando due impulsi triangolari sull'intera struttura (a), si osserva dapprima il set di C2, quindi il reset di C1. Sull'altra polarità si presenta inizialmente il set di C1, seguito dal reset di C2. Si osservi come i set non avvengono bruscamente, come rivelato dalla riduzione graduale di R_1 ed R_2 .

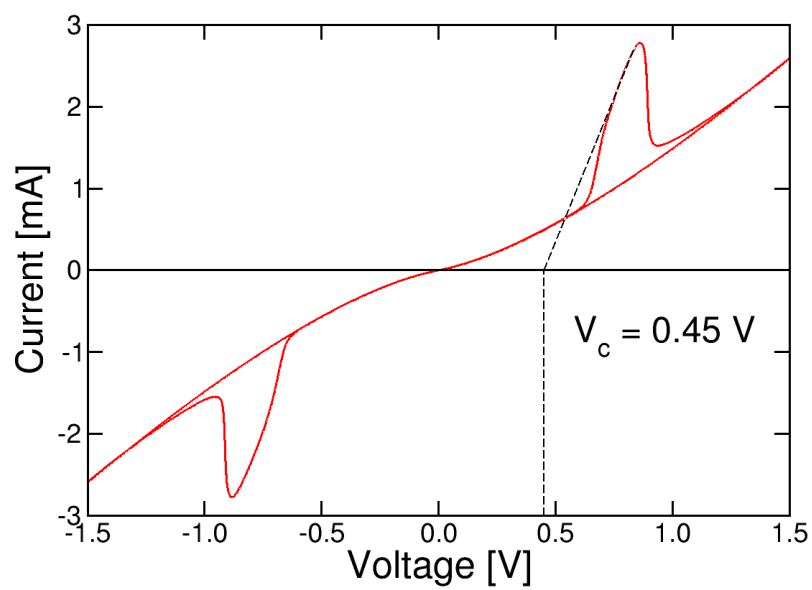


Figura 4.9: Curva IV calcolata. La tangente allo stato basso resistivo interseca l'asse delle tensioni in corrispondenza di $V_c = 0.45 \text{ V}$, in accordo con le caratteristiche di singola cella.

nello stato (I) di Fig. 4.11, gli ioni metallici sono principalmente posti presso il TE, mentre il gap è collocato vicino al BE, facendo mostrare alla cella un'elevata resistenza. Applicando una rampa crescente di tensione, gli ioni iniziano a muoversi guidati dal campo elettrico, una volta superata la tensione di set che li attiva termicamente. Così facendo, la barriera si chiude, portando alla formazione di uno stato basso resistivo, (II). Proseguendo, gli ioni vengono continuamente spinti verso il BE, arrivando a svuotare il filamento in alto e creando un nuovo gap, vicino al TE, (III). Affinché questo fenomeno si verifichi, è necessario che la riserva di ioni al TE sia finita, altrimenti si ha una iniezione continua di atomi che ispessisce solamente il filamento. Questo, infatti, è il motivo per cui non si osservano casi di CS in memorie CBRAM. A questo punto si è riottenuto uno stato alto resistivo, come nel caso (I), tuttavia la diversa collocazione del gap definisce uno stato diverso della cella, quindi un'informazione memorizzata differente. Applicando ora una rampa negativa di tensione, il filamento si svuota in basso poiché gli ioni sono richiamati verso il TE, passando prima per uno stato conduttivo, (IV), quindi tornando al caso iniziale, (V). La simmetria centrale della caratteristica rivela come sia necessaria una cella simmetrica, altrimenti i comportamenti che si avrebbero nelle due polarità sarebbero diversi.

4.2.1 Interpretazione unificata dei modelli di switching

Sperimentalmente si nota come, per celle non polari, sia possibile osservare fenomeni di switching bipolare -BS-, complementare -CS- e unipolare -US-. Facendo riferimento a Fig. 4.12, si supponga di essere nel caso A. Applicando una tensione negativa gli ioni migrano aprendo il gap, caso B. Riapplicando una tensione positiva, si effettua il set, spiegando il comportamento bipolare della caratteristica (a). Se però, in B, si dà una tensione positiva, gli ioni migrano verso il BE, chiudendo il gap, caso C. Come si osserva nel grafico (b), è necessario non utilizzare alcun sistema di compliance, altrimenti si potrebbe limitare il moto degli ioni ed il loro trasferimento. In questa condizione si registra il picco di corrente, come mostrato dalla caratteristica (b). Proseguendo con la tensione positiva, si viene a creare un gap in prossimità del TE, arrivando nel secondo stato del CS, caso D. Questo può essere interpretato come la condizione di reset nello switching unipolare. Come si registra nelle misure sperimentali di (c), il set avviene per tensioni molto elevate, circa pari a 1.6 V, arrivando ad uno stato basso resistivo evidenziato da un CF continuo. Si osservi però come stavolta gli ioni si muovano in direzione opposta a quella dettata dal campo elettrico. Probabilmente la conduzione non è più guidata dal campo, bensì dominata da una diffusione isotropa a causa delle elevate temperature raggiunte. Il gradiente di ioni spinge gli

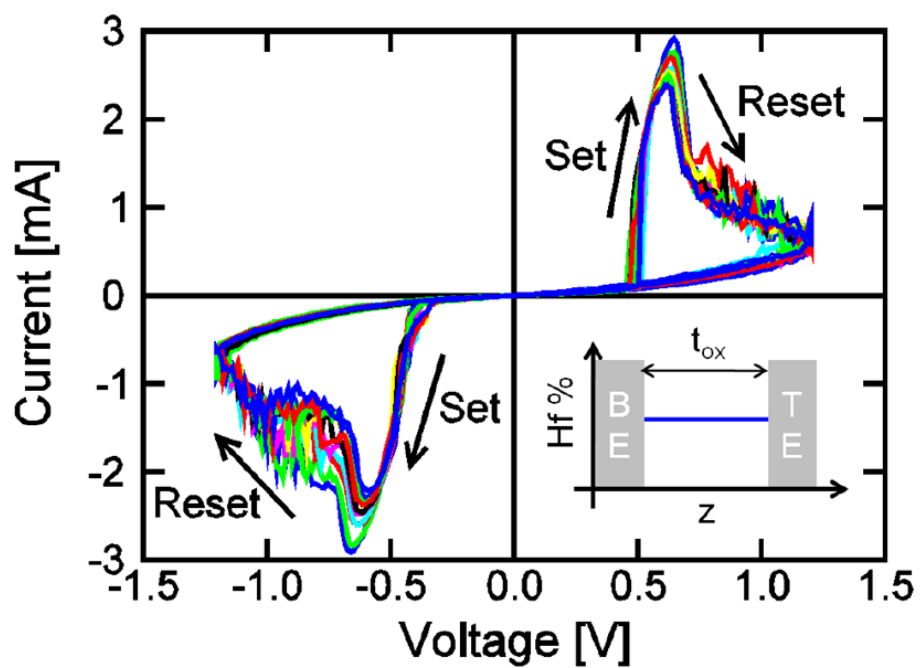


Figura 4.10: Caratteristiche IV misurate per una RRAM simmetrica, in assenza di una limitazione di corrente. E' anche mostrato il profilo costante di Afnio all'interno dell'ossido, tra i due elettrodi.

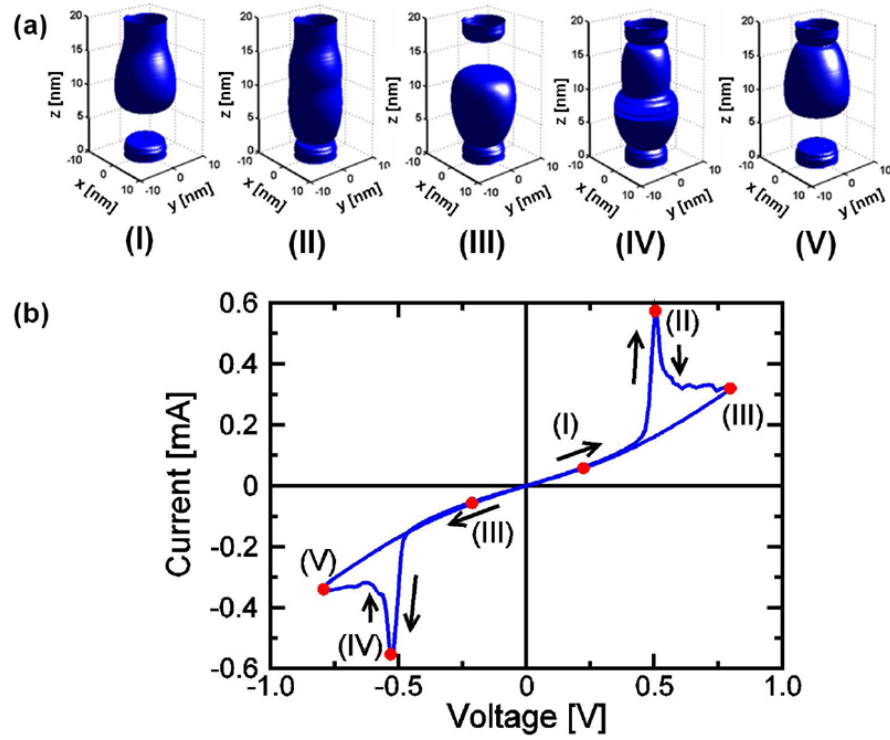


Figura 4.11: Profili spaziali degli ioni (a) simulati a partire dalla caratteristica IV calcolata (b). Ponendosi nel caso (I) e aumentando la tensione applicata, si osserva una chiusura della barriera nel filamento (II) seguita da un'apertura di un nuovo gap nei pressi del TE. Per ritornare alla situazione iniziale è necessario applicare una rampa negativa, passando prima per uno stato conduttivo (IV), poi per quello iniziale (V).

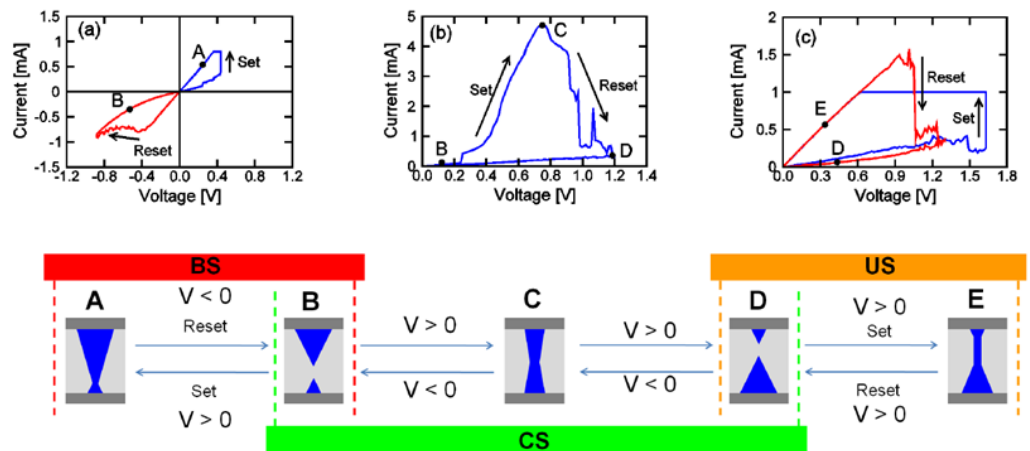


Figura 4.12: Schematizzazione delle transizioni tra i vari fenomeni di switching bipolare BS, complementare CS, unipolare US. In alto sono mostrate le relative caratteristiche IV misurate, dove con le lettere A, B, C, D, E si indicano gli stati spiegati nello schema.

stessi a chiudere la barriera, forse insieme a fenomeni di elettromigrazione dove gli elettroni trasferiscono, mediante urti, il loro momento agli ioni, spostandoli verso il gap. E' infine possibile descrivere il processo inverso applicando tensioni negative, come mostrato nella stessa figura.

4.2.2 Modellizzazione del CS

Si è potuto osservare precedentemente come, mediante il modello COMSOL, sia possibile simulare lo switching complementare di una cella non polare. Tuttavia quest'ultimo presenta degli inconvenienti riguardanti l'efficienza computazionale, essendo il calcolo numerico non immediato. Si vuole, in questa sezione, definire delle linee di principio per poter arrivare ad una modellistica analitica più snella, e per fare ciò è necessario porre delle premesse. Si è spiegato il fenomeno del CS tramite la presenza di due serbatoi finiti di ioni, posti in prossimità dei due elettrodi, e si sono descritte le due transizioni mediante uno svuotamento e riempimento degli stessi, conservando la quantità totale di atomi. Facendo riferimento

a Fig. 4.13, in alto si mostra una pittura dei fenomeni coinvolti simile a quella descritta per Fig. 4.12, nella sezione corrispondente al CS, mentre in basso si ha una raffigurazione schematica del filamento e degli sforzi generati. Inizialmente il serbatoio è al TE, lasciando una barriera di ossido nei pressi del BE (a). Si è voluto modellizzare le varie transizioni mediante il modello filamentare, a causa della sua semplicità e compattezza. In questo non è presente alcun gap, ma solo un assottigliamento o ispessimento del CF, avente una geometria unidimensionale. Come si nota dal caso (a) in basso, si può immaginare di avere un filamento sottile incastonato nell'ossido -nel modello assunto con diametro costante-. Aumentando la tensione, si genera una migrazione di ioni (b) che crea lo stato conduttivo forzando il mezzo circostante ad allargarsi e, quindi, facendo più fatica a generare un CF spesso a causa della compressione subita, rappresentata dalle frecce rosse. Intanto, il serbatoio superiore si sta svuotando, lasciando degli spazi vuoti, in bianco, che vengono occupati dall'ossido, rilassando localmente lo sforzo. Infine si arriva allo stato (c), nel quale si è riempito il serbatoio inferiore e quello al TE si è svuotato, lasciando scoperto un gap. Come prima, si modella tale stato tramite un assottigliamento uniforme del filamento. Gli stati (d - e) mostrano il processo simmetrico per tensioni negative.

Supponendo di avere N_0 atomi a disposizione, si può definire l'energia di attivazione durante il set come

$$E_A = E_{A0} - |\alpha qV| - \text{sign}(V) \frac{N}{N_0} \quad (4.1)$$

dove con $E_{A0} = 2.2$ eV si ha l'energia di attivazione del processo in assenza di polarizzazione, α è il fattore che esprime la frazione della tensione V che cade sulla singola buca di potenziale ed N è la differenza fra il numero di ioni al TE e quello al BE. Poiché quello superiore si svuota, E_A cresce, modellizzando lo sforzo crescente che si viene a creare. Il reset successivo continua il trasferimento atomico, subendo una compressione sempre maggiore. Il valore di N , all'istante discreto k , viene ridotto della quantità

$$\Delta N = |\Delta V| n_d = \frac{\pi}{4} |(\phi(k)^2 - \phi(k-1)^2)| L n_d \quad (4.2)$$

dove ΔV è la variazione di volume, ϕ è il diametro del filamento, L la lunghezza dello stesso ed n_d la densità ionica [cm^{-3}]. Applicando una tensione negativa si ha $N < 0$ all'inizio poiché gli ioni sono pressoché tutti posizionati vicino al BE. In Fig. 4.14(a) si può osservare una caratteristica tensione - corrente simulata. Come ci si aspettava, poiché inizialmente l'energia di attivazione è di 1.2 eV, il set avviene a $V = 0.5$ V, come nel modello classico, mostrato in Fig. 4.14(b). Successivamente, come si evince da Fig. 4.15, trasferendo gli ioni verso il BE, N diminuisce, aumenta lo sforzo subito dal CF, modellizzato da un'energia E_A sempre

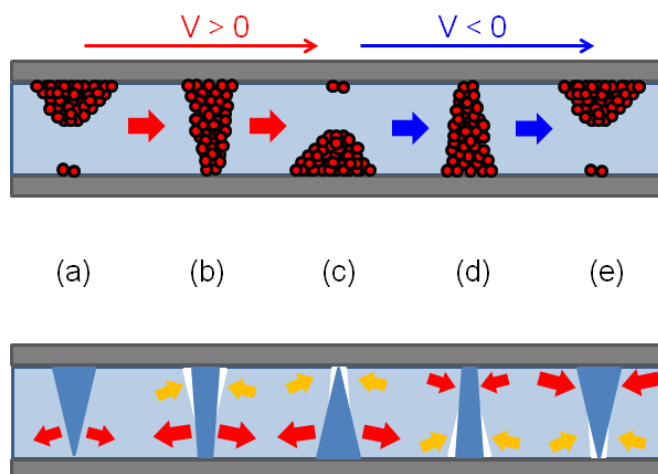


Figura 4.13: Rappresentazione schematica della disposizione degli atomi di Hf durante il CS, in alto, e rispettiva raffigurazione delle compressioni, in basso. All'inizio (a) si ha uno stato alto resistivo. Applicando una tensione positiva si giunge (b) ad uno stato conduttivo. Il moto degli ioni ha provocato uno sforzo nell'ossido circostante, rappresentato dalle frecce rosse, mentre lo svuotamento del serbatoio superiore ha lasciato degli spazi liberi che vengono rioccupati, frecce arancioni. In (c) si ha la creazione del serbatoio inferiore e lo svuotamento del superiore. Mediante una rampa di tensione negativa si ritorna allo stato iniziale tramite (d) un nuovo set, seguito da un reset (e).

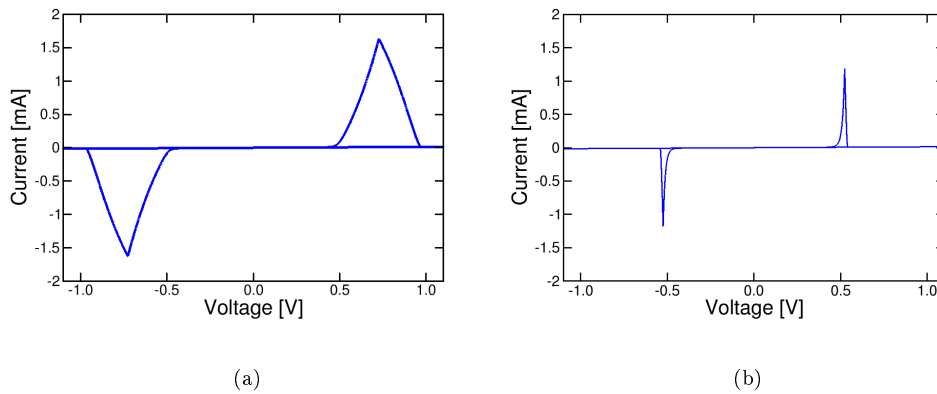


Figura 4.14: Caratteristiche IV simulate, secondo il modello (a) utilizzando il concetto di sforzo e secondo il semplice modello filamentare (b).

superiore, che ne rallenta l'evoluzione. Segue, quindi, il reset per $N < 0$, ancor più rallentato a causa della continua crescita della compressione. Infatti, a differenza del modello classico in cui tale transizione era esponenziale, qui il fenomeno viene molto decelerato, arrivando ad un'energia di attivazione $E_A = 3.2$ eV. Passando alla tensione negativa, si registra un comportamento simmetrico, come ci si aspetta dai dati sperimentali. In Fig. 4.14(b) si mostra, invece, la simulazione condotta senza considerare gli sforzi ed i loro effetti, bensì mediante il solo modello filamentare e l'utilizzo dei due serbatoi di ioni. E' evidente come la simulazione sia insoddisfacente.

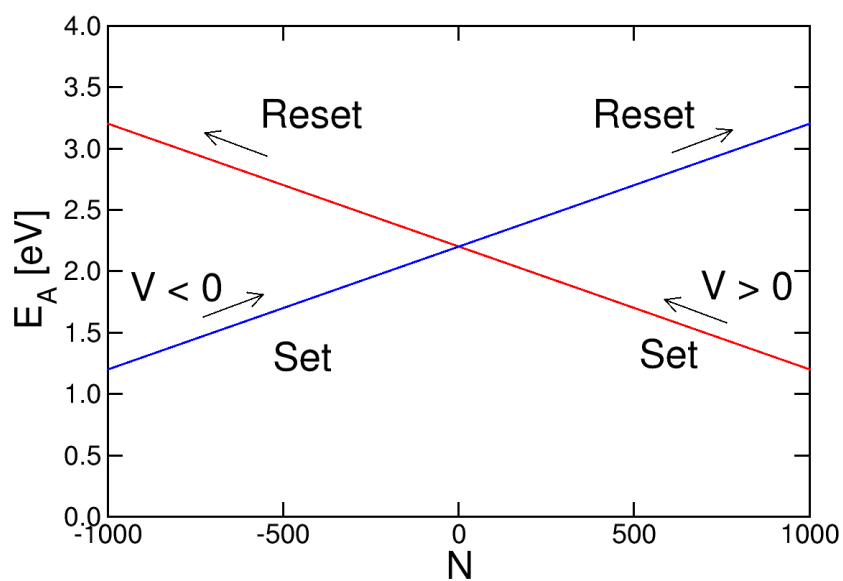


Figura 4.15: Dipendenza dell'energia di attivazione dalla differenza N tra il numero di ioni presente al Top Electrode e al Bottom Electrode, per tensioni positive e negative. Non si considera qui la dipendenza dalla tensione dell'energia. Analizzando il caso $V > 0$, si ha il set per $N > 0$ ed il reset per $N < 0$. Si ricava l'analogo, invertito, per $V < 0$.

Capitolo 5

Modellizzazione di celle CBRAM

I: asimmetria di set/reset

Nel seguente capitolo verrà presentato uno studio delle memorie CBRAM. Nella prima parte verrà compiuta una caratterizzazione delle celle nella struttura 1R, ossia leggendo la tensione direttamente sul dispositivo, in condizioni statiche. Nella seconda parte si svolgerà invece un'analisi delle celle nella struttura 1T1R, in altre parole con un transistor in serie. Le conclusioni sperimentali qui trovate porteranno a sviluppare il modello a stress e rilassamento esposto nel capitolo seguente.

5.1 Principio di funzionamento di una memoria CBRAM

Una memoria CBRAM è un dispositivo costituito, nella sua forma minima, da tre strati di materiali diversi. Il primo è anche impiegato come elettrodo ed è composto da un metallo inerte, nel nostro caso Tungsteno. Il secondo è un ossido isolante e può essere un calcogenuro, per esempio del Solfuro di Germanio, GeS_2 , con uno spessore di 60 nm e un'area di contatto di $1\mu\text{m}^2$ nel caso in esame [6]. Infine il terzo livello è anch'esso un metallo, svolgendo, quindi, la funzione di elettrodo superiore. Nei campioni analizzati è costituito da argento e, in generale, deve essere un metallo attivo. Per attivo si intende che deve essere in grado di penetrare la barriera di ossido arrivando a creare un filamento conduttivo fino all'elettrodo inerte. Un semplice modello per la spiegazione fisica di questo fenomeno può essere una migrazione ionica attivata dall'applicazione di una tensione positiva all'elettrodo attivo, ossia il modello filamentare descritto precedentemente. In Fig. 5.1 (a) la tensione applicata

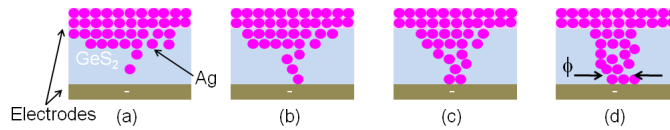


Figura 5.1: Rappresentazione schematica della crescita del CF durante il set in una CBRAM. Applicando una tensione positiva all'elettrodo superiore in argento, gli ioni iniziano a migrare verso l'elettrodo inferiore (a), provocando prima una nucleazione (b), quindi una crescita del diametro ϕ del CF (c). La transizione di reset è il processo inverso, ottenuto con una tensione negativa all'elettrodo superiore [10].

genera un trasporto per repulsione elettrostatica degli ioni positivi di argento, proiettandoli all'interno dell'ossido e generando una nucleazione del CF, come mostrato in Fig. 5.1 (b), a cui fa seguito una crescita, Fig. 5.1 (c). Per il reset il funzionamento è l'opposto. Una tensione negativa all'elettrodo attivo provoca un richiamo degli ioni, rompendo il CF. Si deve osservare come, avendo a disposizione un'elevata quantità di ioni poiché l'elettrodo è ricco di metallo, non è possibile osservare dei fenomeni di complementary switching, come descritti nel capitolo precedente, poiché la riserva ionica stavolta è virtualmente infinita.

5.2 Caratterizzazione statica di celle 1R

In questa sezione si analizzerà la caratterizzazione statica delle celle CBRAM in configurazione 1R. Questo vuol dire che la rampa di tensione che si applica per studiare il comportamento del dispositivo cade interamente sulla cella di memoria. Con l'aggettivo statico si intende che la rampa varia molto lentamente, in maniera quasi - statica, non evidenziando così possibili effetti dinamici, come risulterà invece in seguito. Nel caso in esame si sono utilizzate rampe dell'ordine del secondo. In Fig. 5.2 si osservano delle caratteristiche VI misurate, aventi una corrente di limitazione I_c pari a 1 mA. Si evidenzia subito un'elevata fluttuazione dei parametri, principalmente per quanto riguarda V_c e V_{set} .

Come si può facilmente apprezzare, le correnti di compliance I_c e quelle di reset I_{reset} sono diverse, più precisamente la prima è sensibilmente maggiore della seconda. Le medesime considerazioni possono essere fatte per V_{set} e V_{reset} . Per poter modellizzare in una maniera semplice il fenomeno fisico, si è utilizzato il modello filamentare, caratterizzato da un tasso

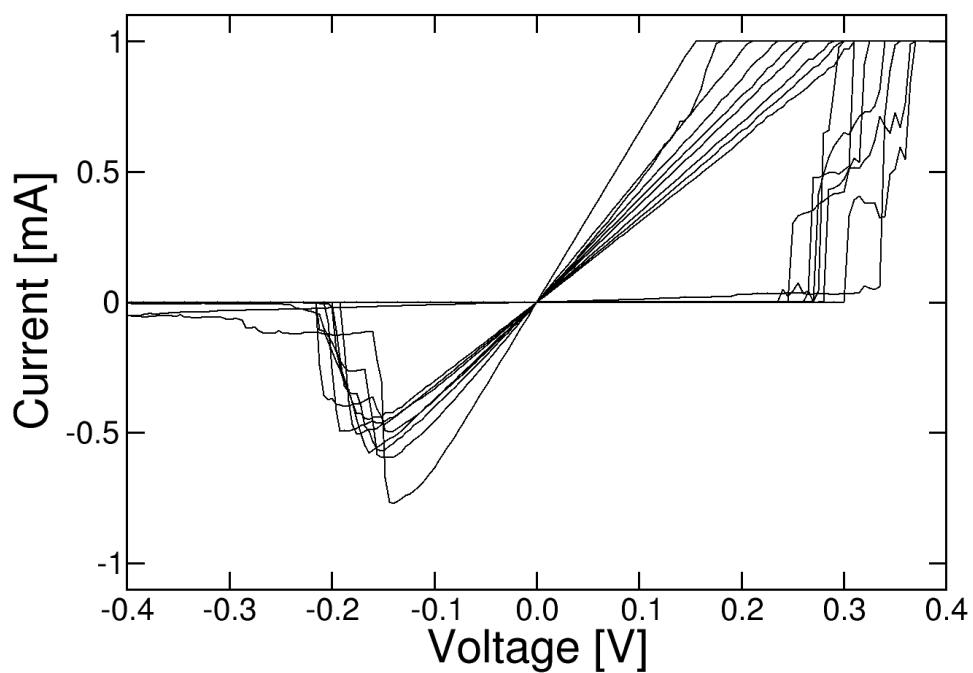


Figura 5.2: Caratteristiche tensione - corrente misurate di una cella CBRAM in configurazione 1R con I_c pari a 1mA.

Parametro	Valore
E_{Aset}	0.64 eV
E_{Areset}	0.5 eV
A	29 mm/s
ρ_{Ag}	13.7 $\mu\Omega\text{cm}$
k_{th}	429 W/mK
T_0	300 K
α	0.3

Tabella 5.1: Parametri utilizzati nel fitting 1R.

di crescita del diametro ϕ del CF espresso dalla nota relazione. Per sottolineare la diversità tra i fenomeni di set e reset si sono adottate due diverse energie di attivazione per i due processi, $E_{Aset} = 0.64$ eV, $E_{Areset} = 0.5$ eV. Infatti, più la barriera è piccola, minore è la tensione necessaria ad avviare la crescita o la riduzione del diametro del CF. In tabella 5.1 sono riassunti gli altri parametri utilizzati, mentre in Fig. 5.3 si possono osservare le caratteristiche misurate al variare di I_c e le relative simulazioni. Da notare come, diminuendo la I_c , ossia il diametro del CF, la differenza fra le correnti di set e reset diventi via via più marcata, con addirittura una corrente di reset che, nel caso di $I_c = 1$ nA, arriva ad essere circa cinque volte inferiore a I_c .

Come si osserva in Fig.5.3, il set simulato è piuttosto brusco, nonostante si sia impegnato il modello filamentare che, come dimostrato precedentemente, genera una crescita esponenziale, più graduale. Si è infatti impiegato un piccolo accorgimento. Poiché si sa, dal modello a gap variabile, che è necessaria una tensione di set superiore a quella di reset per far avviare la transizione, si è qui bloccata la crescita del diametro del CF fino alla tensione V_{set} , ricavabile dai dati sperimentali e pari a 0.3 V. Si sa infatti che nel modello filamentare le tensioni di set e reset sono uguali, in questo modo invece si rimedia diversificandole. Inoltre, essendo il diametro costante e fisso al valore iniziale, quando gli si consente la crescita, questa sarà molto più brusca poiché la temperatura sviluppata sarà tale da provocare un repentino aumento del diametro e, quindi, della corrente. Ciononostante, alla fine il filamento avrà lo stesso diametro che nel caso classico poiché il profilo di temperatura, al variare della tensione, è sempre lo stesso, indipendente dal diametro, come infatti è mostrato nella formula

$$T_{max} = T_0 + \frac{V^2}{8k_{th}\rho} \quad (5.1)$$

In Fig. 5.4(a) si vedono i dati e le simulazioni nel caso in cui si mantenga la stessa energia di attivazione per il set ed il reset, mentre in Fig. 5.4(b) si può osservare il confronto con la simulazione a 1 mA. E' evidente la necessità di porre diverse energie per i due processi, ma i riscontri sperimentali proseguono. Si osservi, ora, il grafico di Fig. 5.5. Si mostrano i dati sperimentali e le funzioni simulate per tre tensioni caratteristiche, V_{set} , V_c , V_{reset} , in funzione della corrente I_c . I dati sono stati ottenuti come valori medi di una serie di misure. Si nota come l'andamento di V_{set} sia all'incirca una costante intorno al valore 0.3 V, proprio per questo scelta come tensione a cui sbloccare la crescita del diametro del CF. V_c aumenta leggermente al crescere della corrente massima, testimoniando una sottile dipendenza dalla I_c . Infine V_{reset} aumenta in modulo all'aumentare di I_c .

Si analizzi innanzitutto la relazione tra V_c e V_{reset} , facendo riferimento al grafico di

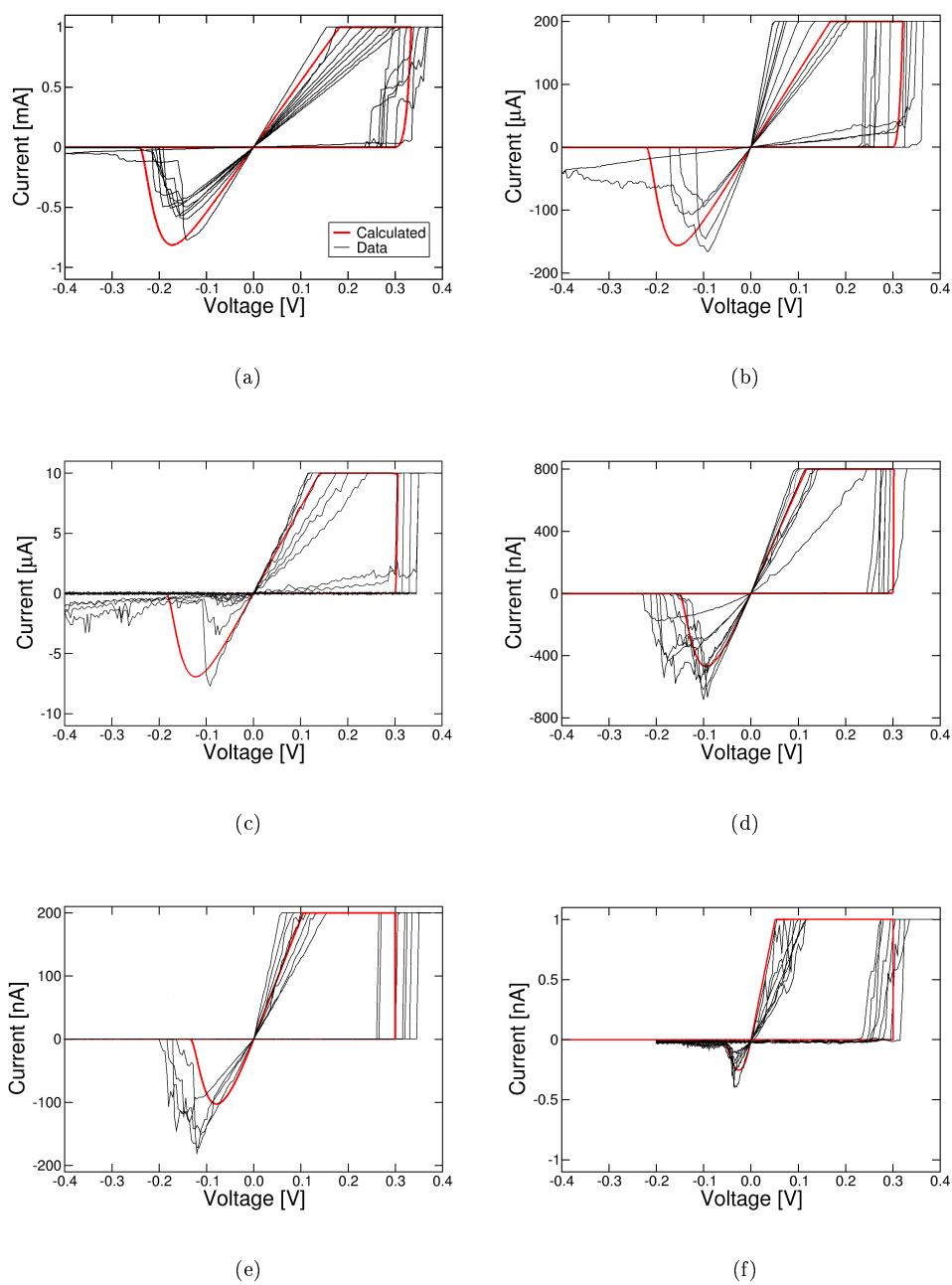


Figura 5.3: Caratteristiche tensione - corrente misurate, in nero, e simulate, in rosso, per I_c rispettivamente pari a 1 mA, 200 μ A, 10 μ A, 800 nA, 200 nA, 1 nA.

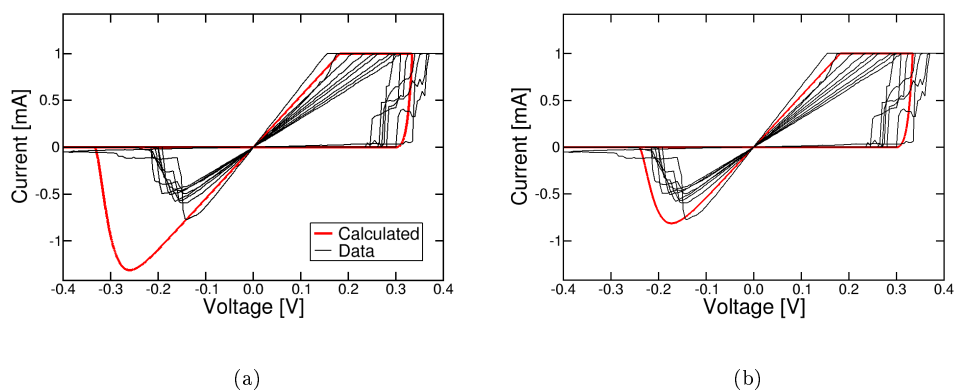


Figura 5.4: Caratteristiche tensione - corrente misurate, in nero, e simulate, in rosso, per I_c pari a 1 mA. In (a) si osservano i risultati di una simulazione con medesime energie di attivazione per il set ed il reset, mentre in (b) si ha la simulazione a diverse E_{Aset} , E_{Areset} .

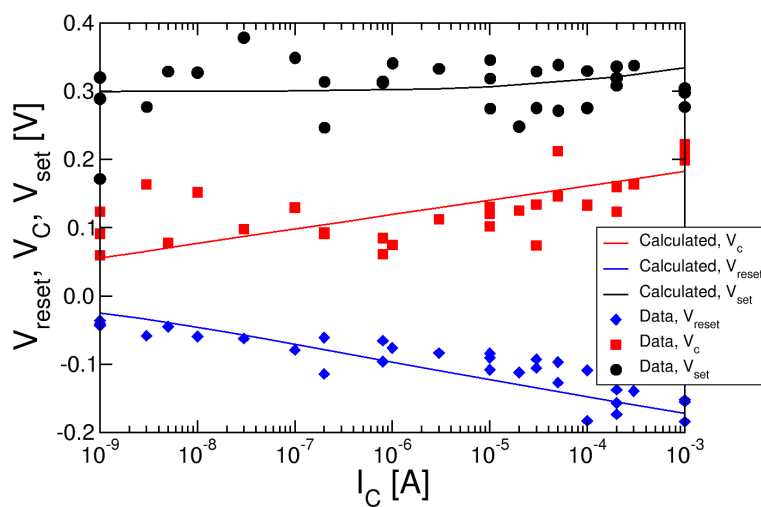


Figura 5.5: Valori sperimentali e andamenti simulati per V_{set} , in nero, V_C , in rosso, V_{reset} , in blu, in funzione di I_C .

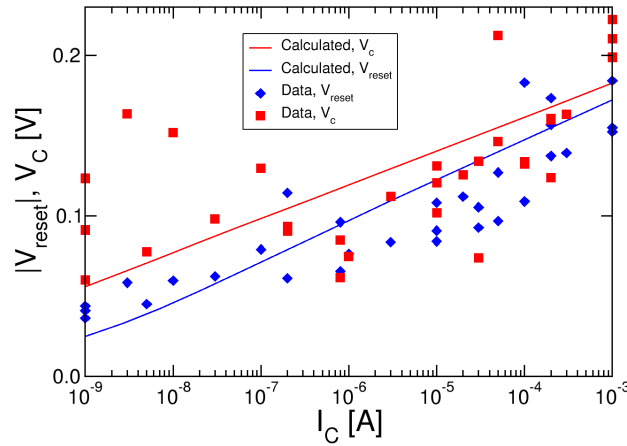


Figura 5.6: Valori sperimentali e andamenti simulati per V_c , in rosso, e $|V_{reset}|$, in blu, in funzione di I_c .

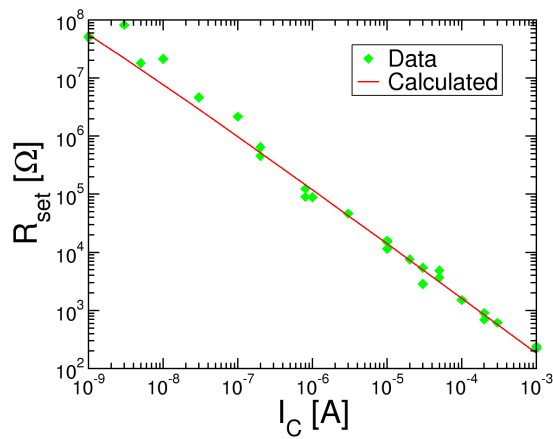
Fig. 5.6 che altro non è che lo stesso di prima, prendendo i valori assoluti delle tensioni. Dalla spiegazione teorica si sa che V_c , in rosso, è un parametro caratterizzante il set, infatti rappresenta la tensione a cui, per reazione negativa, il diametro del filamento si assesta in presenza di un sistema di limitazione della corrente -presente anche nel caso 1R, altrimenti si avrebbe una crescita disordinata del filamento-. Esso dipende in larga parte dai parametri fisici del CF. Invece V_{reset} , in blu, è il valore distintivo del reset, la tensione per cui la temperatura sviluppatasi nel CF provoca la dissoluzione dello stesso. Dal raffronto dei dati è apprezzabile una differenza tra i due valori, con $V_c > V_{reset}$ pressoché sempre. Questo costituisce un chiaro esempio del fatto che l'energia di attivazione del set sia superiore a quella del reset. Difatti, dalla teoria si sa che, per uguali energie, $V_c \simeq |V_{reset}|$, ma, in questo caso, tale relazione non è soddisfatta.

Ora invece si analizzino le relazioni che intercorrono tra V_c , V_{reset} con I_c e per far ciò si tenga, come riferimento, le Fig. 5.7(a) e 5.7(b). Ancora una volta compaiono i dati sperimentali mediani e le relative interpolazioni simulate. Come si può osservare in Fig. 5.7(a), il prodotto tra la resistenza ottenuta nello stato di ON e la relativa I_c , ossia la tensione V_c , è circa una costante pari a 0.2 V per correnti dell'ordine del mA, 0.1 V per correnti inferiori. Il fatto che tale valore sia all'incirca costante è la testimonianza che il fenomeno di crescita del CF è guidato dalla tensione, infatti è tramite essa che si

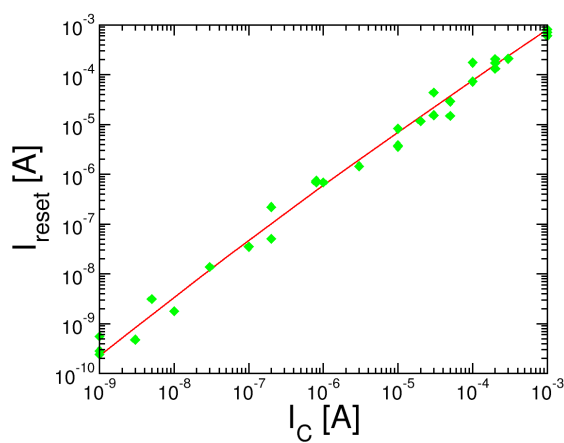
decide la temperatura del filamento e la conseguente cinetica ionica. Invece, osservando la Fig. 5.7(b), si può arrivare alla medesima conclusione antecedente. Per elevate I_c , I_{reset} è pressoché uguale alla corrente di compliance, mentre, per piccole I_c , I_{reset} diventa inferiore, supportando la scelta di una energia di attivazione inferiore per il reset rispetto al set.

Facendo riferimento alla Fig. 5.8, si può trarre una spiegazione della leggera dipendenza di V_c da I_c , come già visto per le celle in Afnio. Si osservano quattro simulazioni di set di una cella CBRAM, condotte con quattro diverse correnti di compliance I_c . Si immagini di poter fotografare il set agli istanti temporali successivi t_1 , t_2 , t_3 . Come si osserva, più la corrente I_c è elevata, maggiore è il tempo necessario affinché la corrente aumenti fino al livello massimo. Questo è plausibile perché, secondo la visione filamentare già descritta, il filamento mostra una crescita veloce, esponenziale, ma non istantanea, ossia gli ioni metallici necessitano di un certo tempo per potersi spostare. Questo provoca un ritardo temporale dell'istante d'inizio della reazione negativa che fissa il diametro del CF e, quindi, V_c . La curva con I_c inferiore spende un lasso di tempo maggiore a stabilizzare le dimensioni del CF e di conseguenza a ridurre V_c . Poiché la crescita è esponenziale, la relazione tra V_c e I_c è logaritmica, giustificando il perché la dipendenza sia non marcata.

L'ultima relazione da esaminare è quella tra V_{reset} e I_c . Come si vede in Fig. 5.5, al crescere di I_c si registra un aumento in modulo di V_{reset} . Il motivo è semplice, al crescere di I_c cresce anche il diametro del CF ottenuto dopo il set, di conseguenza è necessaria una tensione più elevata per poter estrarre tutti gli ioni di argento che formano il CF.



(a)



(b)

Figura 5.7: Dati sperimentali, in verde, e relative interpolazioni, in rosso, delle resistenze di set R_{set} , e delle correnti di reset I_{reset} in funzione di I_C .

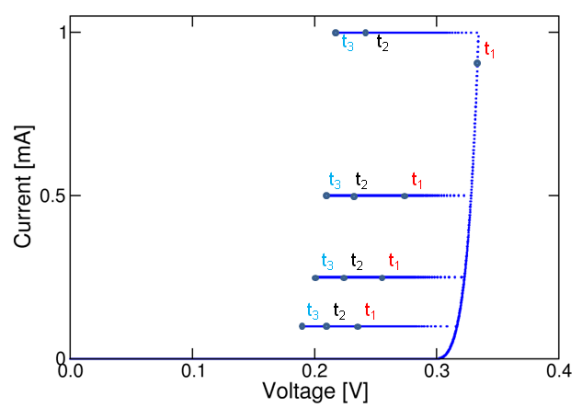


Figura 5.8: Simulazione del set di una cella CBRAM, per diverse correnti di compliance I_c , a diversi istanti temporali. Si osserva come, a t_1 , la corrente della cella con I_c superiore non sia ancora giunta al valore massimo, mentre, per I_c inferiori, la reazione negativa generata dal sistema di limitazione della corrente sia già stato avviato. Durante i tempi successivi, le tensioni si dispongono lungo la prevista curva esponenziale.

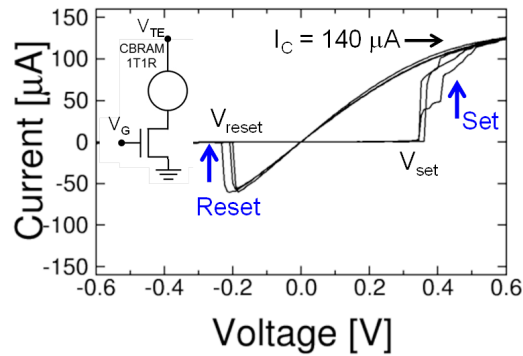


Figura 5.9: Curve tensione - corrente misurate per una struttura 1T1R con una corrente di compliance $I_c = 140 \mu\text{A}$. Nel riquadro interno è rappresentata la struttura 1T1R.

5.3 Caratterizzazione statica di celle 1T1R

In questa sezione si mira ad analizzare la risposta di una cella CBRAM, in condizioni quasi - statiche e nella configurazione 1T1R, come mostrato in Fig. 5.9. La struttura 1T1R comporta la presenza di un limitatore della massima corrente in serie al dispositivo. Tale compito è svolto da un transistor MOS che evita le sovraelongazioni di corrente a causa delle capacità parassite in parallelo alla cella. Queste, infatti, mantenendo la tensione costante ai capi del dispositivo, inibiscono la reazione negativa che blocca la crescita del CF, provocando la riduzione della resistenza mostrata e il conseguente picco di corrente. Come si evince, V_{set} è circa pari a 0.4 V, mentre V_{reset} si attesta sugli 0.2 V. La massima corrente che può fluire è I_c ed è circa pari a $140 \mu\text{A}$. Ne consegue che la resistenza di set vale il rapporto tra l'intersezione della tangente all'origine dello stato basso resistivo con I_c e la stessa I_c , pari a circa $2.5 \text{ k}\Omega$. La I_{reset} misura $60 \mu\text{A}$ [17].

Dai grafici di Fig. 5.10 si evince che, al ridursi della corrente I_c , le tensioni di set e reset si riducono, mentre le corrispondenti resistenze di set aumentano, in accordo con le conclusioni del modello filamentare - minore è I_c , minore è il diametro del CF, maggiore è la resistenza di ON-. Si ricorda che le caratteristiche ora mostrate corrispondono alla tensione totale sia sulla CBRAM che sul transistor, mentre nelle strutture 1R si guardava solo la tensione sulla cella di memoria.

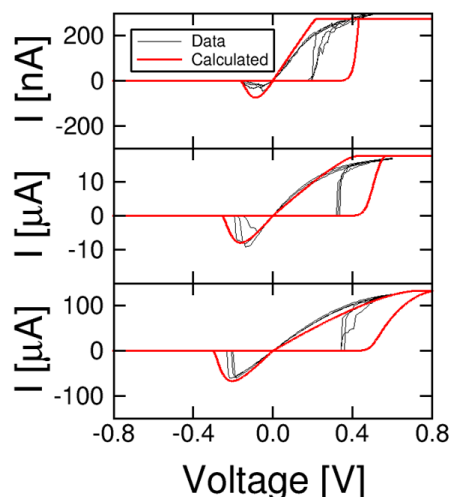


Figura 5.10: Curve tensione - corrente misurate, in nero, per una struttura 1T1R con correnti di compliance I_c pari a 275 nA, 18 μ A e 140 μ A. In rosso sono invece mostrati i risultati delle simulazioni.

In Fig. 5.11 (a) si possono osservare, come nel caso 1R, gli andamenti simulati della resistenza ottenuta dopo il set ed i corrispondenti valori sperimentali con le relative barre d'errore. Ancora una volta si può apprezzare come la tensione V_c , pari al prodotto tra la resistenza di set e la relativa corrente I_c , sia pressoché costante, pari a 0.2 V, testimonianza del fatto che la crescita del CF è un fenomeno guidato dalla tensione. Dalla Fig. 5.11 (b) si evince invece come la corrente I_{reset} cresca al crescere di I_c . Si osserva però come I_{reset} sia sempre inferiore a I_c , essendo compresa tra il 10 ed il 50 % di I_c , sostenendo l'ipotesi di due diverse barriere di attivazione per il set ed il reset. Tale asimmetria diventa sempre più marcata al diminuire di I_c , come si può apprezzare meglio concedendo uno sguardo alla Fig. 5.12. Qui è rappresentato il rapporto tra I_{reset} e I_c in funzione della resistenza di set, che altro non è se non un modo per esprimere il rapporto in funzione di I_c . Si scorge immediatamente la discrepanza crescente tra le due correnti, evidenziando come $E_{Areset} < E_{Aset}$ ancora una volta.

In conclusione, il modello filamentare con due diverse energie di attivazione riesce a spiegare l'andamento delle due correnti, consentendo di affermare che lo stato di set è uno stato con un'energia libera ΔG , ossia un'energia di attivazione superiore a quella del reset.

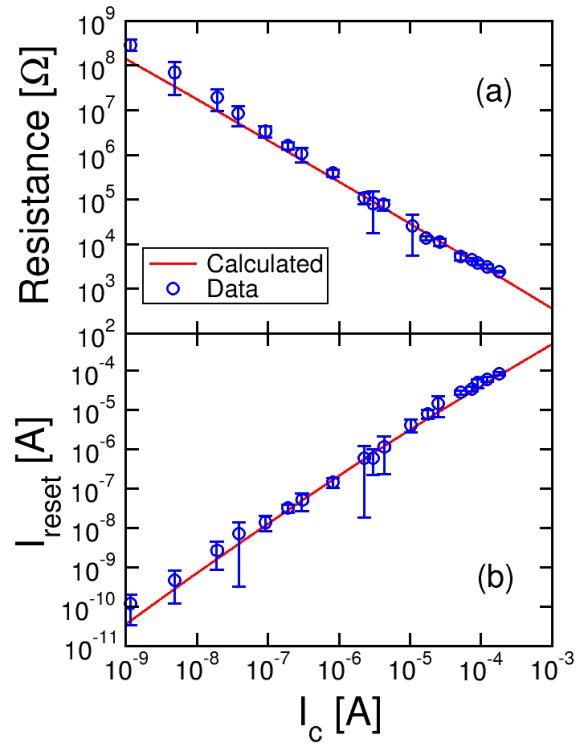


Figura 5.11: Dati sperimentali, in blu, e relative interpolazioni secondo il modello, in rosso, della resistenza dopo il set, in (a), e della corrente di reset, in (b), in funzione di I_c . La resistenza decresce all'aumentare di I_c secondo la legge $R = V_c/I_c$, con V_c circa pari a 0.2 V. I_{reset} aumenta al crescere di I_c , mantenendo sempre valida la condizione $I_{reset} \leq 0.5I_c$.

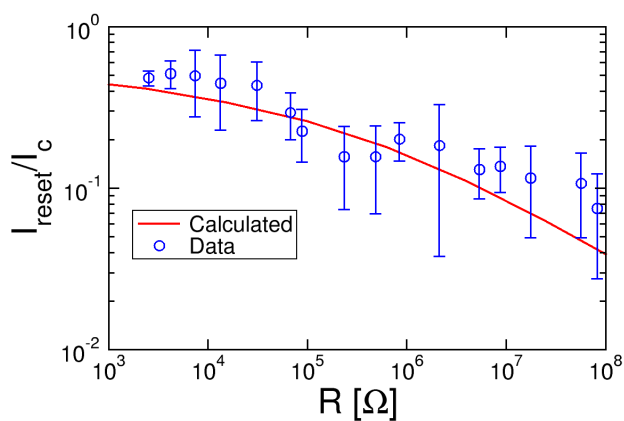


Figura 5.12: Dati sperimentali, in blu, e relative interpolazioni secondo il modello, in rosso, del rapporto I_{reset}/I_c , in funzione della resistenza di set. I_{reset} è sempre inferiore a I_c e la differenza tra le due correnti aumenta al ridursi della I_c , sostenendo la tesi per cui $E_{Areset} < E_{Aset}$.

Ciò significa che lo stato di set è più instabile di quello di reset, come si constata osservando la schematizzazione di Fig. 5.13. Questo comporta importanti conseguenze sulla stabilità del dato memorizzato nello stato di set. Sapremo, infatti, che la ritenzione risulterà peggiore per lo stato di set rispetto a quello di reset, essendo più facile passare dallo stato alto resistivo a quello basso resistivo rispetto al viceversa.

In tabella 5.3 sono mostrati i valori assunti nelle simulazioni. Si tenga conto che E_{Areset} è calcolato per un tempo di set di 1s.

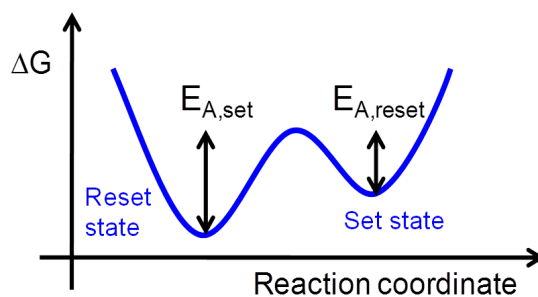


Figura 5.13: Schema dell'energia libera per i processi di set e reset. Il fatto che $E_{A,reset} < E_{A,set}$ comporta una maggiore stabilità dello stato di reset.

Parametro	Valore
$E_{A,set}$	0.7 eV
$E_{A,reset}$	0.5 eV
A	70 mm/s
ρ_{Hf}	53.7 $\mu\Omega\text{cm}$
k_{th}	429 W/mK
T_0	300 K
α	0.3

Tabella 5.2: Parametri utilizzati nel fitting 1T1R.

Capitolo 6

Modellizzazione di celle CBRAM

II: modello dinamico di switching

In questo capitolo si spiega, mediante l'utilizzo di un nuovo modello basato su un feedback negativo meccanico, l'asimmetria dei processi di set e reset in memorie CBRAM. Partendo dalle considerazioni svolte nel capitolo precedente, si sviluppa il concetto di stress e rilassamento indotti dall'ossido sul filamento conduttivo esistente. Segue, infine, la validazione del modello ed il suo confronto con i dati sperimentali.

6.1 Il modello

In questa sezione si introduce un nuovo modello il cui scopo è quello di spiegare l'asimmetria tra gli stati di set e di reset. Per fare ciò si introduce il concetto di stress e rilassamento esercitati sul CF dallo spessore di ossido circostante [28, 29]. Si faccia riferimento alla Fig. 6.1. Si supponga di essere nello stato di reset, ossia il CF è assente. Applicando una tensione positiva all'elettrodo attivo, gli ioni iniziano a migrare verso l'elettrodo inerte, guidati dal campo elettrico e accelerati dal locale innalzamento di temperatura per effetto Joule. In questo modo, gli ioni si aprono un varco all'interno del calcogenuro, comprimendolo e venendo a loro volta schiacciati. Per maggior chiarezza, si osservi la Fig. 6.1 (b), caso 1: Il CF è assente, la barriera E_A è abbassata dal campo elettrico del fattore αqV , dove α descrive la frazione di tensione che cade sulla singola barriera. In totale si può scrivere che

$$E_A = E_{A0} - \alpha qV \quad (6.1)$$

Continuando nel processo di set, gli ioni iniziano a subire lo stress compressivo dovuto all'ossido, facendo quindi sempre più fatica a penetrare e ad allargare il CF, Fig. 6.1 (a). Questo meccanismo costituisce una reazione negativa meccanica che ostacola la scrittura della cella. Per tenere in conto ciò, si considera un innalzamento della barriera, vista dagli ioni, di una certa energia potenziale U , come mostrato in Fig. 6.1 (b), caso 2. Ora la barriera misura

$$E_A = E_{A0} - \alpha qV + U \quad (6.2)$$

Si deve notare come E_A sia, comunque, sempre inferiore al valore a riposo E_{A0} , altrimenti non si avrebbe la migrazione che genera il CF. Una volta terminato il set, ossia la programmazione, la tensione viene spenta, facendo sì che la barriera vista dagli ioni per tornare all'elettrodo attivo sia

$$E_A = E_{A0} - U \quad (6.3)$$

in altre parole, lo stress genera una forza di richiamo degli ioni verso l'elettrodo attivo, causando una dissoluzione del CF anche in assenza di una tensione negativa di reset, come spiegato in Fig. 6.1 (b), caso 3. Viene, invece, fortemente inibita la prosecuzione del CF verso l'elettrodo inerte poiché ora la barriera vista è $E_A = E_{A0} + U$. Questo modello rende conto del perché sperimentalmente si osservi $E_{Areset} < E_{Aset}$ e, quindi, del perché $I_{reset} < I_c$, grazie all'introduzione dell'energia potenziale U per stress compressivo. Secondo tale pittura, ancora incompleta, più un CF è spesso, più sarà lo sforzo subito e, quindi, minore sarà il tempo di ritenzione del dato. Tale spiegazione è chiaramente non realistica, si deve infatti introdurre il concetto di rilassamento strutturale plastico dell'ossido circostante [30]. Secondo tale idea, la struttura della materia si riordina, in uno stato amorfo, permettendo ai nuovi atomi di argento che migrano di trovare uno spazio fisico che li contenga, consentendo una diminuzione dello sforzo subito dal CF. Il rilassamento è accelerato dall'innalzamento della temperatura locale, ma non è istantaneo, bensì necessita di un certo lasso di tempo per avvenire. Un semplice sommario di tale evoluzione è mostrato in Fig. 6.1 (c). All'inizio lo sforzo cresce poiché l'ossido non si è ancora riaccomodato. Successivamente tale sforzo viene alleggerito grazie alla ristrutturazione degli atomi circondanti il CF, consentendo una maggiore stabilità dello stesso. Il rilassamento termina sostanzialmente alla fine del set poiché, spegnendo la tensione applicata, la temperatura si abbassa e l'ossido si stabilizza nello stato raggiunto.

Per convalidare il suddetto modello sono state effettuate delle misure tempo - risolte delle transizioni di set e reset. Il setup sperimentale utilizzato è quello mostrato in Fig. 6.2. In ingresso sono stati applicati degli impulsi triangolari. Il primo, positivo e di durata

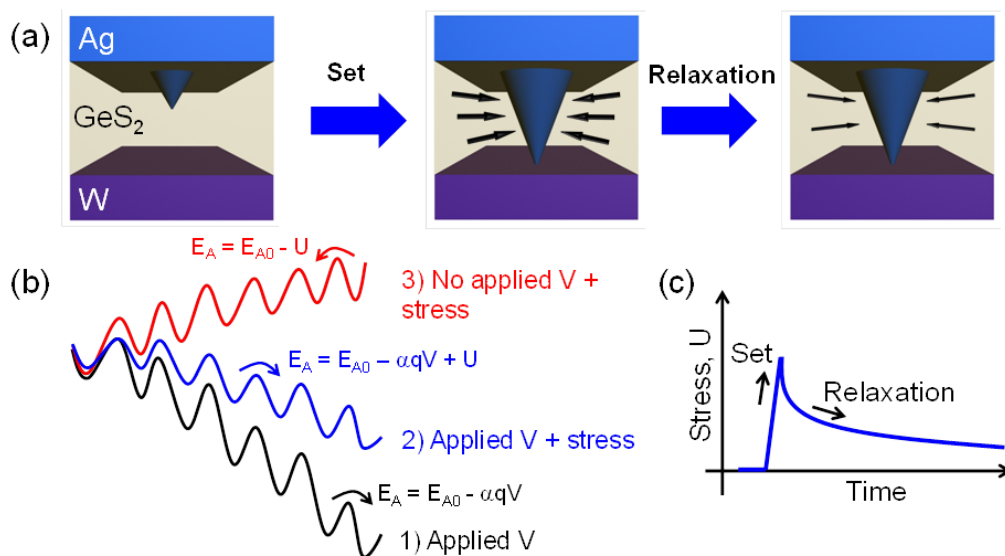


Figura 6.1: Descrizione schematica del modello che descrive la formazione dello stress e il conseguente rilassamento strutturale durante il set ed il reset. Durante la transizione di set, il CF cresce a seguito dell'applicazione di una tensione positiva. Questo provoca uno stress compressivo sul CF, ridotto mediante un rilassamento plastico della struttura dell'ossido circostante, come mostrato in (a). In (b) si vede come l'energia potenziale U agisce sull'altezza della barriera di potenziale, incrementandola nel set (caso 2) ed abbassandola nel reset (caso 3). Lo stress è parzialmente ridotto durante il set mediante un rilassamento, accelerato dal locale incremento di temperatura, del calcogenuro, causando infine un decremento di U dipendente dal tempo di set, come mostrato in (c).

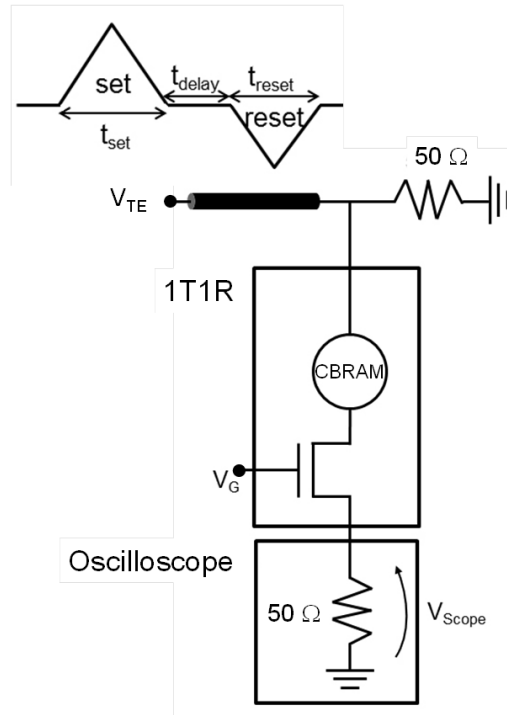


Figura 6.2: Set - up sperimentale impiegato per le misure tempo - risolte di tensioni e correnti nel set e reset. La corrente che scorre attraverso la struttura 1T1R è monitorata tramite la tensione sviluppata sulla resistenza d'ingresso da 50Ω dell'oscilloscopio.

t_{set} , genera la prima transizione della cella. A questo fa seguito un tempo t_{delay} e un altro impulso triangolare, negativo e di durata t_{reset} , volto a generare la transizione di reset. La corrente che fluisce nella struttura 1T1R viene letta da un oscilloscopio come la tensione che si sviluppa sulla resistenza di ingresso da 50Ω . In Fig. 6.3 si può osservare una tipica misura di corrente a seguito dell'applicazione degli impulsi triangolari, con una scelta dei tempi usuale, $t_{set} = t_{delay} = t_{reset} = 1$ ms. Successivamente si ricavano i parametri sensibili per lo studio, ossia V_{set} , V_{reset} , I_{reset} ed $R = V_{reset} / I_{reset}$ dall'osservazione degli istanti in cui la corrente subisce un rapido aumento, nel set, o una diminuzione, nel reset. Infine si sono studiate le dipendenze tra V_{reset} e i tempi t_{set} e t_{reset} .

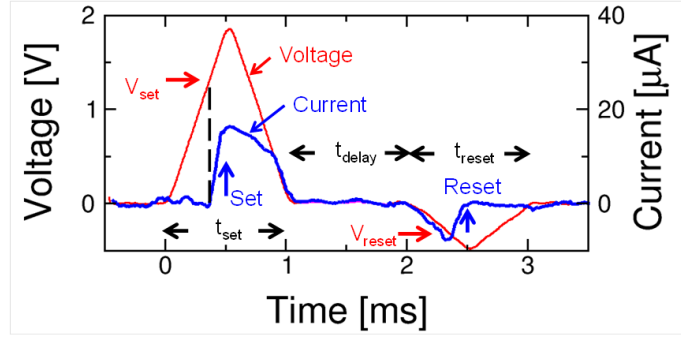


Figura 6.3: Misure di tensione e corrente per una struttura 1T1R con $I_c = 20 \mu\text{A}$, in funzione del tempo. Le transizioni di set e di reset sono evidenziate da un improvviso aumento o crollo di corrente, consentendo in tal maniera di ricavare V_{reset} , I_{reset} ed $R = V_{reset} I_{reset}$.

6.2 Dipendenza da t_{reset}

In questa sezione si analizza la dipendenza di V_{reset} dal tempo di reset. Si supponga di avere una transizione di set compiuta mediante un impulso triangolare sempre uguale e di durata 1 ms. Ciò comporta la presenza dello stesso filamento come condizione iniziale per i reset successivi. Successivamente si applica un impulso triangolare negativo per il reset, la cui ampiezza massima è sempre costante, ma la cui durata varia tra 10 ms fino a 1 μs . Si faccia riferimento alla Fig. 6.4. In essa si osservano i dati sperimentali e le corrispondenti simulazioni di $|V_{reset}|$ in funzione di t_{reset} . Come si evince dal grafico, al ridursi del tempo di reset, aumenta sensibilmente la tensione di reset. Tale fenomeno è interpretabile ricordando che il reset è un processo attivato e portato a termine grazie ad un riscaldamento locale del CF. Più la tensione applicata permane nel tempo, più la temperatura si mantiene, consentendo il reset. Se, però, l'impulso di tensione diventa molto breve, per compensare la esigua durata del processo si deve aumentare la temperatura, ossia la tensione da applicare cresce [31]. Nel grafico si mostra il fitting migliore ottenuto con un'energia $E_{Areset} = 0.38$ eV, mentre si mostrano altre due simulazioni con barriere diverse, per un facile confronto. Da notare come ora E_{Areset} sia inferiore agli 0.5 eV di prima, infatti ora t_{set} ha una durata di 1 ms e non più di 1 s. Il rilassamento strutturale è inferiore e lo stress compressivo è

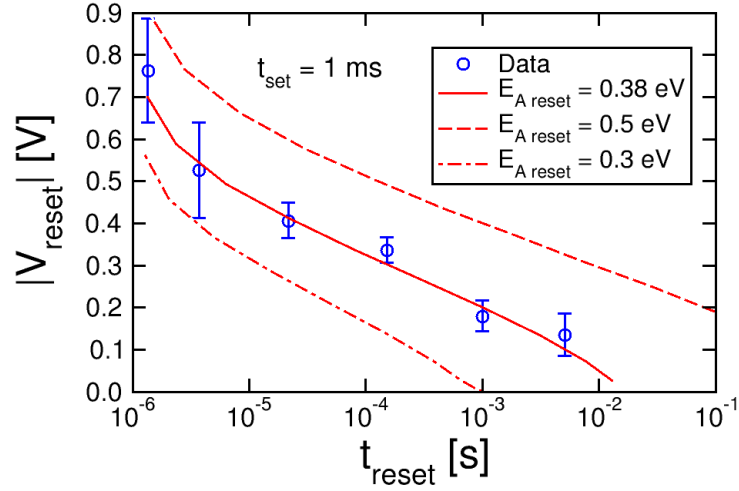


Figura 6.4: Misure e simulazioni di $|V_{reset}|$ in funzione di t_{reset} , con $t_{set} = 1\text{ms}$. La tensione di reset cresce al diminuire di t_{reset} , passando dal regime quasi - statico a quello dinamico.

superiore, quindi il reset avviene più facilmente.

6.3 Dipendenza da t_{set}

Lo studio della dipendenza dei parametri da t_{set} consente di convalidare ulteriormente il modello prima proposto. In Fig. 6.5 si possono apprezzare gli andamenti del modulo di V_{reset} , (a), e della resistenza di set, (b), in funzione del tempo di set. Stavolta si è supposto costante $t_{reset} = 1\text{ms}$, $I_c = 20\text{ }\mu\text{A}$. All'aumentare del tempo di set, la resistenza finale si riduce leggermente, seguendo la crescita del diametro del CF. A questa piccola variazione ne corrisponde, però, una notevole nella tensione di set. Questa varia infatti di un fattore 5 in sei decadi. Una spiegazione di tale incremento non può esaurirsi chiamando in causa l'aumento del diametro dopo il set, poiché questo provocherebbe una variazione inferiore di V_{reset} . E' necessario considerare lo sforzo che subisce il CF, crescente al diminuire di t_{set} . Più questo aumenta, maggiore è il tempo concesso al calcogenuro per compiere il rilassamento strutturale che consente di diminuire lo sforzo applicato sul CF, rendendo, quindi, necessaria una tensione di reset superiore per dissolverlo. In assenza di rilassamenti, lo sforzo rende il reset molto più agevole, richiedendo di conseguenza una tensione inferiore.

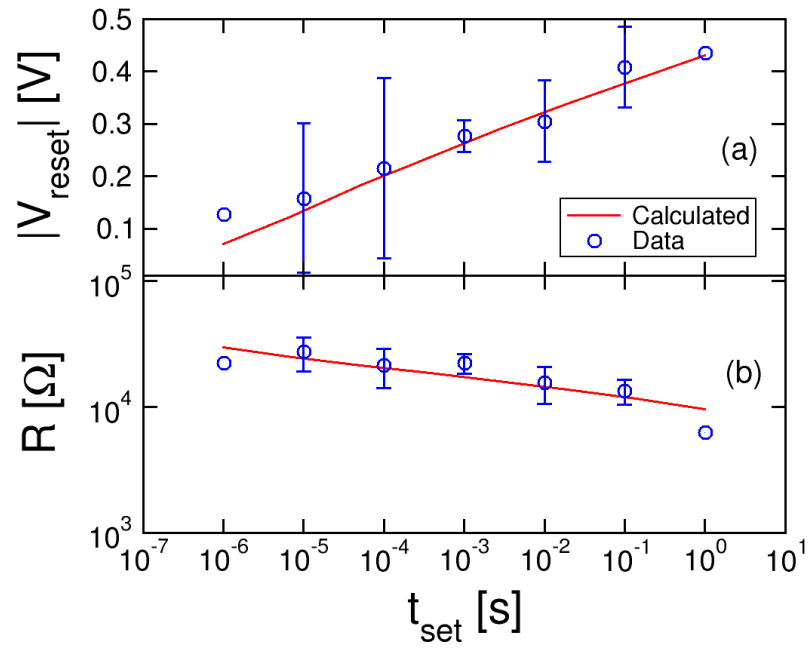


Figura 6.5: Misure e simulazioni di $|V_{reset}|$ (a), e di R (b), in funzione di t_{set} . Il deciso incremento di $|V_{reset}|$ rispetto alla leggera diminuzione di R al crescere di t_{set} supporta il modello di rilassamento dello sforzo.

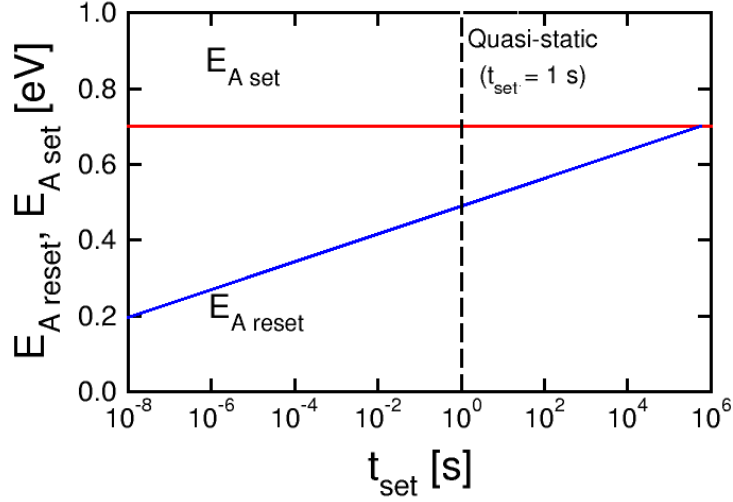


Figura 6.6: Barriere di energia per il set ed il reset, in funzione del tempo di set, assunte nel modello dinamico di switching.

Il modello di rilassamento impiegato è schematizzato in Fig. 6.6. Si è assunta un'energia E_{Aset} costante, come si verifica sperimentalmente, mentre E_{Areset} mostra un andamento logaritmico con il tempo di set, come si prevede nel modello di rilassamento strutturale. La scelta delle energie è tale per cui, con $t_{set} = 1$ s, si abbia $E_{Areset} = 0.5$ eV -come indicato in figura-, mentre, per $t_{set} = 1$ ms, $E_{Areset} = 0.38$ eV. Inoltre questa scelta è stata quella che ha consentito un'interpolazione accettabile in tutti i grafici sopra descritti, prevedendo sia il comportamento statico che quello dinamico. In particolare si approssimano bene gli andamenti di V_{reset} con t_{reset} , Fig. 6.4, e con t_{set} , Fig. 6.5 (a). Si ricorda come il rilassamento di E_{Areset} avviene solamente durante il set. Una volta terminato, non si apprezza più alcuna variazione a causa del raffreddamento del CF.

Un'ulteriore evidenza per convalidare il modello arriva da Fig. 6.7. In questa si sono posti i dati sperimentali di V_{reset} in funzione della resistenza di set. Come valori si sono presi quelli di Fig. 5.11 per il caso statico, rappresentati in rosso e indicanti $|V_{reset}| = RI_{reset}$ al variare di I_c . Per il caso dinamico sono stati scelti i risultati di Fig. 6.5, ottenuti al variare di t_{set} . Si evince facilmente la presenza di due differenti correlazioni, una più leggera e dipendente dalla variazione del diametro del CF a causa delle diverse I_c , un'altra

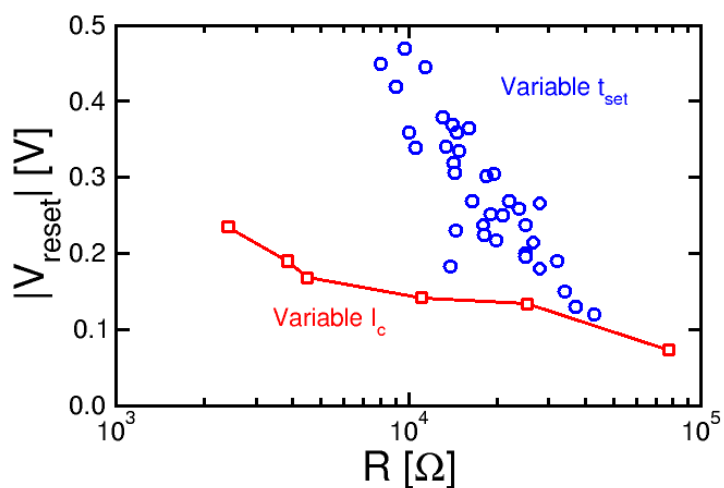


Figura 6.7: Correlazione tra la resistenza di set e $|V_{reset}|$ per t_{set} variabile, in blu, e I_c variabile, in rosso. I due diversi comportamenti riflettono la dipendenza dagli effetti di stress e dal diametro del CF, rispettivamente.

più marcata e dipendente dalle diverse condizioni di stress incontrate al variare del tempo di set. Tali considerazioni supportano ancora una volta la validità del modello proposto. Da questo studio si può supporre che, mediante una opportuna scelta degli impulsi di tensione applicati al dispositivo, si possa ottenere una miglior stabilità del CF. Sarà, quindi, necessario approfondire le implicazioni dovute allo stress meccanico per ottenere una miglior ritenzione del dato programmato.

Conclusioni

Questo lavoro di tesi discute e modella lo switching resistivo in tecnologie RRAM e CBRAM, contribuendo a chiarire il ruolo degli effetti meccanici e termici nella crescita, dissoluzione e stabilità del filamento. Tali dispositivi costituiscono una possibile alternativa per la realizzazione di strutture ad elevata densità, oltre la barriera dei 10 nm, insormontabile per l'attuale tecnologia Flash. Costituite, nella versione più semplice, dalla sovrapposizione di tre strati -un isolante interposto tra due elettrodi metallici- basano il loro funzionamento sulla possibilità di essere programmate in due stati stabili. Tuttavia, per poter scalare tale tecnologia, è necessario comprendere in maniera più approfondita i meccanismi insiti nel dispositivo. Per far ciò è fondamentale ricorrere a modelli numerici o, meglio, analitici, in vista di una maggior efficienza computazionale.

La prima parte di questa tesi si concentra sullo studio dei fenomeni di reazione termica presenti in memorie RRAM. La tecnologia considerata è quella dell'Afnio, nella quale si hanno due elettrodi in TiN separati da HfO_x . Partendo dall'idea che le transizioni di set e di reset sono dovute alla migrazione di ioni Hf^+ termicamente attivati e guidati dal campo elettrico, che ne causa la bipolarità, si è sviluppato un modello analitico che individua il set come conseguenza di una reazione termica positiva, mentre il reset viene guidato ancora da una reazione termica, ma negativa. Partendo infatti dalle conclusioni tratte tramite il precedente modello numerico basato sulla migrazione ionica, si associa lo stato alto resistivo ad un filamento conduttivo metallico -CF- in cui è presente un'interruzione composta da un ossido. L'applicazione di una tensione ai capi del filamento così descritto porta allo scorrimento di una corrente che riscalda, per effetto Joule, l'intera geometria. Tuttavia, l'ossido riduce l'efficienza nel trasferimento di calore, rendendo necessaria una tensione maggiore per attivare il set. Una volta azionato, la chiusura del gap provoca una maggiore efficienza, comportando un ulteriore riscaldamento che accelera il set, reazionandolo positivamente. Analogamente, il reset è visto come l'apertura di una barriera nel filamento formato. La presenza dell'ossido provoca un raffreddamento, spegnendo il reset. Solo aumentando la ten-

sione si registra un avanzamento del fenomeno, consentendo un comportamento graduale, analogico, come evidenziato sperimentalmente.

Nella seconda parte della tesi ci si è invece soffermati sui fenomeni di reazione meccanica in memorie CBRAM, costituite da uno strato di calcogenuro interposto tra un elettrodo inerte, di Platino, ed uno attivo, di argento, il cui scopo è di penetrare all'interno dell'isolante formando un filamento conduttivo. La migrazione ionica è anche qui attivata termicamente e guidata dal campo elettrico, in maniera analoga alle memorie RRAM. Tuttavia, poiché l'iniezione di ioni avviene da un unico serbatoio, ossia l'elettrodo attivo, il filamento subisce uno sforzo compressivo, causato dal calcogenuro, che tende a respingere indietro gli ioni. In altre parole, applicando una tensione positiva il filamento cresce, quindi anche lo sforzo che ne blocca l'avanzamento aumenta, reazionando negativamente il processo di scrittura. A conseguenza di ciò si registra come lo stato di set sia più instabile di quello di reset, comportando una minor ritenzione del dato memorizzato. Tuttavia, al concetto di stress è stato necessario associare anche quello di rilassamento. A seguito della nascita di uno sforzo, la struttura del calcogenuro tende a riassetarsi, riducendo la compressione e migliorando la stabilità del CF. Tale rilassamento viene accelerato dal riscaldamento Joule, arrivando a concludere che più il tempo di set in cui si applica una tensione positiva è lungo, più il CF sarà stabile nel tempo, richiedendo una V_{reset} superiore per cancellare il dato. Ad una prima analisi statica, ossia mediante l'utilizzo di tensioni lentamente variabili nel tempo, si è passati ad una dinamica, studiando gli andamenti di parametri come V_{reset} , R_{set} , in funzione dei tempi di set e reset, mediante analisi in impulsata, validando così il modello.

Grazie alla comprensione di tali meccanismi di reazione è stato possibile interpretare alcuni concetti di switching recentemente introdotti. Si è infatti proposto un modello basato sui feedback termici per una struttura composta da due celle connesse antiseriamente, il cui comportamento è nominato Complementary Resistive Switching. La comprensione di questo processo risulta cruciale per la realizzazione di memorie crossbar ad elevata densità. Mediante i feedback meccanici si è invece tentato di comprendere più a fondo il Complementary Switching, promettente candidato a sostituire il CRS, la cui struttura risulta complessa [27], nell'ottica della progettazione di architetture ancora più compatte. Nella pittura di principio presentata, il CS è dovuto al trasferimento di un numero finito di ioni dal TE al BE, consentendo la programmazione di due stati alto resistivi, ma differenti a causa della diversa posizione del serbatoio ionico. Il moto degli atomi subisce però una compressione dovuta all'ossido circostante, rendendo la migrazione sempre più difficile. Solo un successivo riassetamento strutturale rilassa lo sforzo creatosi. Questa visione estende, quindi, il

modello di stress e rilassamento dalle CBRAM alle RRAM.

Lo studio compiuto delle reazioni meccaniche e termiche ha consentito un'interpretazione più unitaria dei meccanismi di switching in memorie resistive. I modelli analitici presentati hanno inoltre fornito degli strumenti più snelli, in vista dell'efficienza computazionale, rispetto ai modelli numerici. Rimangono ancora aperti degli interrogativi riguardanti la precisa modellizzazione del CS, probabilmente dovuto ad entrambi i fenomeni di feedback, nonché concernenti l'analisi del CRS, essenziale anche per lo sviluppo di nuove logiche ad elevata densità.

Bibliografia

- [1] N. Derhacobian, S. C. Hollmer, N. Gilbert, and M. N. Kozicki. Power and energy perspectives of nonvolatile memory technologies. *IEEE, Proceedings of the*, 98:283–298, 2010.
- [2] M. Waser and M. Aono. Nanoionics-based resistive switching memories. *Nature Materials*, 6(11):833–840, 2007.
- [3] T. W. Hickmott. Low-frequency negative resistance in thin anodic films. *J. Appl. Phys.*, 33:2669–2682, 1962.
- [4] Jung-Bin Yun, Sejin Kim, Sunae Seo, Myoung-Jae Lee, Dong-Chul Kim, Seung-Eon Ahn, Yongsoo Park, Jiyoung Kim, and Hyunjung Shin. Random and localized resistive switching observation in Pt/NiO/Pt. *Phys. Stat. Sol.*, 6:280–282, 2007.
- [5] U. Russo, D. Ielmini, C. Cagli, and A.L. Lacaita. Filament conduction and reset mechanism in NiO-based resistive-switching memory (rram) devices. *Electron Devices, IEEE Transactions on*, page 56(2):186 –192, 2009.
- [6] C. Gopalan, Y. Ma, T. Gallo, J. Wang, E. Runnion, J. Saenz, F. Koushan, P. Blanchard, and S. Hollmer. Demonstration of conductive bridging random access memory CBRAM in logic CMOS process. *Solid-State Electronics*, 58:54–61, 2011.
- [7] Ximeng Guan, Shimeng Yu, and H.-S. Philip Wong. On the switching parameter variation of metal-oxide RRAM - Part I: Physical modeling and simulation methodology. *Electron Devices, IEEE Transactions on*, 59:1172–1182, 2012.
- [8] Ximeng Guan, Shimeng Yu, and H.-S. Philip Wong. On the switching parameter variation of metal-oxide RRAM - Part II: Model corroboration and device design strategy. *Electron Devices, IEEE Transactions on*, 59:1183–1188, 2012.

-
- [9] R. Degraeve, A. Fantini, S. Clima, B. Govoreanu, L. Goux, Y. Y. Chen, D. J. Wouters, P. Roussel, G. S. Kar, G. Pourtois, S. Cosemans, J. A. Kittl, G. Groeseneken, M. Jurczak, and L. Altimime. Dynamic 'hour glass' model for SET and RESET in HfO₂ RRAM. *Symposium on VLSI Tech. Dig. of Technical Papers*, pages 75–76, 2012.
- [10] D. Ielmini. Modeling the universal set/reset characteristics of bipolar RRAM by field - and temperature driven filament growth. *Electron Devices, IEEE Transactions on*, 58:4309–4317, 2011.
- [11] H. Y Lee, P. S. Chen, T. Y. Wu, Y. S. Chen, C. C. Wang, P. J. Tzeng, C. H. Lin, F. Chen, C. H. Lien, and M. J. Tsai. Low power and high speed bipolar switching with a thin reactive ti buffer layer in robust HfO₂ based rram. *IEDM Tech. Dig.*, pages 297–300, 2008.
- [12] Joonmyoung Lee, Jungho Shin, Daeseok Lee, Wootae Lee, Seungjae Jung, Minseok Jo, Jubong Park, Kuyyadi P. Biju, Seonghyun Kim, Sangsu Park, and Hyunsang Hwang. Diode-less nano-scale ZrO_x/HfO_x RRAM device with excellent switching uniformity and reliability for high-density cross-point memory applications. *IEDM Tech. Dig.*, pages 452 – 455, 2010.
- [13] J. Park, S. Jung, J. Lee, W. Lee, S. Kim, J. Shin, and H. Hwang. Resistive switching characteristics of ultra-thin TiO_x. *Microelectron. Eng.*, 88:1136–1139, 2011.
- [14] F. Nardi, D. Ielmini, M. Fanciulli L. Goux C. Cagli, S. Spiga, and D.J. Wouters. Control of filament size and reduction of reset current below 10 μ a in NiO resistance switching memories. *Solid-State Electronics*, 58(1):42 – 47, 2011.
- [15] K. Kinoshita, K. Tsunoda, Y. Sato, H. Noshiro, S. Yagaki, M. Aoki, and Y. Sugiyama. Reduction in the reset current in a resistive random access memory consisting of NiO_x brought about by reducing a parasitic capacitance. *Appl. Phys. Lett.*, 93:033 506, 2008.
- [16] K. Tsunoda, K. Kinoshita, H. Noshiro, Y. Yamazaki, T. Iizuka, Y. Ito, A. Takahashi, A. Okano, Y. Sato, T. Fukano, M. Aoki, and Y. Sugiyama. Low power and high speed switching of Ti-doped NiO ReRAM under the unipolar voltage source of less than 3 V. *IEDM Tech. Dig.*, pages 767–770, 2007.
- [17] D. Ielmini. Filamentary-switching model in RRAM for time, energy and scaling projections. *IEDM Tech. Dig. IEEE International*, 2011.
-

-
- [18] F. Nardi, S. Larentis, S. Balatti, D. Gilmer, and D. Ielmini. Resistive switching by voltage-driven ion migration in bipolar RRAM - Part I: experimental study. *Electron Devices, IEEE Transactions on*, 59:2461–2467, 2012.
- [19] S. Larentis, F. Nardi, S. Balatti, D. Gilmer, and D. Ielmini. Resistive switching by voltage-driven ion migration in bipolar RRAM - Part II: modeling. *Electron Devices, IEEE Transactions on*, 59:2468–2475, 2012.
- [20] V. V. Zhirnov, R. K. Cavin, S. Menzel, E. Linn, S. Schmelzer, D. Brauhaus, C. Schindler, and R. Waser. Memory devices: Energy - space - time tradeoffs. *Proceedings of the IEEE*, page 2185–2200, 2010.
- [21] M. A. Panzer, M. Shandalov, J. A. Rowlette, Y. Oshima, and Yi Wei Chen P. C. McIntyre K. E. Goodson. Thermal properties of ultrathin hafnium oxide gate dielectric films. *Electron Device Letters, IEEE*, 12:1269–1271, 2009.
- [22] Myoung-Jae Lee, Youngsoo Park, Bo-Soo Kang, Seung-Eon Ahn, Chang bum Lee, Kihwan Kim, Wenxu Xianyu, G. Stefanovich, Jung-Hyun Lee, Seok-Jae Chung, Yeon-Hee Kim, Chang-Soo Lee, Jong-Bong Park, In-Gyu Baek, and In-Kyeong Yoo. 2-stack 1D-1R cross-point structure with oxide diodes as switch elements for high density resistance RAM applications. *IEDM Tech. Dig.*, pages 771–774, 2007.
- [23] Eike Linn, Roland Rosezin, Carsten Kuegeler, and Rainer Waser. Complementary resistive switches for passive nanocrossbar memories. *Nature Materials*, 9:403–406, 2010.
- [24] J. Borghetti, G. Snider, P. Kuekes, J. Joshua Yang, D. R. Stewart, and R. S. Williams. 'memristive' switches enable 'stateful' logic operations via material implication. *Nature Letters*, 464:873–876, 2010.
- [25] R. Rosezin, E. Linn, C. Kuegeler, R. Bruchhaus, and R. Waser. Crossbar logic using bipolar and complementary resistive switches. *Electron Devices Letters, IEEE*, 32:710–712, 2011.
- [26] D. J. Wouters, L. Zhang, A. Fantini, R. Degraeve, L. Goux, Y. Y. Chen, B. Govoreanu, G. S. Kar, G. V. Groeseneken, and M. Jurczak. Analysis of complementary RRAM switching. *Electron Device Letters, IEEE*, pages 1186–1188, 2012.
- [27] F. Nardi, S. Balatti, S. Larentis, and D. Ielmini. Complementary switching in metal oxides: toward diode-less crossbar RRAMs. *IEDM Tech. Dig.*, 2011.
-

- [28] Y. Yang, P. Gao, S. Gaba, T. Chang, X. Pan, and W. Lu. Observation of conducting filament growth in nanoscale resistive memories. *Nature Communications*, 3, 2012.
- [29] I. Valov, R. Waser, J. R. Jameson, and M. N. Kozicki. Electrochemical metallization memories - fundamentals, applications, prospects. *Nanotechnology*, 22, 2011.
- [30] D. Fugazza, D. Ielmini, G. Montemurro, and A. L. Lacaita. Temperature- and time-dependent conduction controlled by activation energy in PCM. *IEDM Tech. Dig.*, page 652, 2010.
- [31] C. Cagli, F. Nardi, and D. Ielmini. Modeling of Set/Reset operations in NiO - based resistive switching memory devices. *Electron Devices, IEEE Transactions on*, 56:1712, 2009.

Ringraziamenti

Giunti alla fine della tesi, è doveroso porgere dei sentiti ringraziamenti verso coloro che mi hanno aiutato a realizzare questo lavoro.

Il primo e più importante ringraziamento va indubbiamente al Prof. Daniele Ielmini. L'attenzione e la pazienza continue dimostratemi durante tutti questi mesi mi hanno veramente aiutato ad entusiasarmi per la materia e per il modo in cui affrontarla. La mia più profonda gratitudine va quindi a questa persona geniale e gentilissima al tempo stesso.

Ringrazio sinceramente i dottorandi Simone e Nicola. L'accoglienza che mi hanno dimostrato, la quantità di consigli forniti e la disponibilità in ogni momento della giornata sono stati un aiuto indispensabile.

Ringrazio infine il dottorando Giovanni e Halid per le giornate passate in laboratorio, rendendole più divertenti e meno faticose.

Infine, un ringraziamento a Emmanuela, Simona, Andrea e Federico, amici di tutti i giorni, che non devono leggerlo per sapere cosa penso di loro.