



Electronică, Telecomunicații și Tehnologii Informaționale

# **TEZĂ DE DOCTORAT**

## **- REZUMAT -**

**De la senzori spintronici bazați pe efectul magnetorezistiv gigant  
la noi funcționalități în dispozitivele spintorbitronice**

**Student - doctorand:**  
**Elena-Mirela ȘTEȚCO**

**Conducător științific:**  
**Prof. dr. ing. Ovidiu Aurel POP**

**Comisia de evaluare a tezei de doctorat:**

Președinte:

Prof. dr. ing. **Dorin PETREUȘ** – Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca;

Conducător științific:

Prof. dr. ing. **Ovidiu Aurel POP** – Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca;

Referenți:

Dr. **Lucian PREJBEANU** – University of Grenoble Alpes, CEA, CNRS,  
Grenoble-INP, SPINTEC;

Prof. dr. **Mihai DIMIAN** – Universitatea “Ștefan cel Mare” din Suceava;

Dr. **Adrian DINESCU** – Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru  
Microtehnologie, București;

Conf. dr. **Mihai GABOR** – Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca.

**- Cluj-Napoca -**  
**2024**



## CUPRINS TEZĂ

ABREVIERI.....	9
INTRODUCERE.....	11
STADIUL ACTUAL.....	13
1. Spintronica. Concepte generale.....	13
1.1 Energiile unui sistem feromagnetic.....	14
1.2 Pereți de domeniu în structurile cu anizotropie magnetică perpendiculară.....	23
1.3 Dinamica pereților de domeniu.....	26
1.4 Deplasarea pereților de domeniu indusă de un câmp magnetic.....	27
1.4.1 Ecuația Landau Lifshitz Gilbert (LLG).....	27
1.4.2 Deplasarea pereților de domenii indusă de câmp. Influența cuplurilor care acționează asupra magnetizării.....	28
1.4.3 Regimul flow de deplasare a pereților de domeniu.....	29
1.4.4 Regimul creep de deplasare a pereților de domeniu.....	31
1.5 Deplasarea pereților de domeniu indusă de curentul de spin.....	32
1.5.1 Curent se sarcină și curent de spin.....	33
1.5.2 Cuplajul spin-orbită. Efectul Hall de spin.....	35
1.5.3 Influența curentului de spin asupra magnetizării peretelui de domeniu.....	37
1.5.4 Interacțiunea Dzyaloshinskii-Moriya. Pereți de domeniu chirali.....	38
1.5.5 Deplasarea pereților de domeniu indusă de cuplurile datorate curentului de spin.....	42
1.6 Efecte magnetorezistive.....	46
1.6.1 Efectul de magnetorezistență gigant.....	46
1.6.2 Efectul de magnetorezistență tunel.....	50
1.6.3 Efectul de magnetorezistență anizotropă.....	53
1.6.4 Efectul Hall extraordinar.....	54
1.7 Concluzii.....	56
2. Metode experimentale și numerice pentru fabricarea și simularea dispozitivelor magnetice.....	57
2.1 Procesul de microfabricare a structurilor.....	57
2.1.1 Creșterea filmelor subțiri.....	57
2.1.2 Caracterizare magnetică.....	59
2.1.3 Procesul de microstructurare.....	60
2.1.4 Gravură cu fascicul de ioni.....	65
2.1.5 Microscopie de forță atomică (AFM).....	67

2.2 Simulări micromagnetice.....	68
2.3 Analiza proprietăților magnetice prin microscopie magneto-optică cu efect Kerr .....	69
2.3.1 Microscopia magneto-optică cu efect Kerr a pereților de domeniu.....	70
2.4 Determinarea deplasării pereților de domeniu cu ajutorul microscopiei Kerr .....	73
2.4.1 Procedură de măsurare a deplasării pereților de domeniu în prezența unui câmp magnetic în plan .....	73
2.4.2 Procedură de măsurare a deplasării pereților de domeniu în prezența unui curent electric.....	75
2.5 Rezumat.....	77
3. Fabricarea, caracterizarea și proiectarea modelului de simulare pentru un senzor de curent bazat pe o microstructură magnetorezistivă cu valvă de spin .....	79
3.1 Creșterea și microstructurarea probelor .....	80
3.2 Caracterizarea magneto-electrică a probelor depuse.....	83
3.3 Tratamente termice la diferite temperaturi .....	87
3.4 Principiul de funcționare al senzorului de curent.....	91
3.5 Model PSpice al unui traductor de curent bazat pe structuri de tip valvă de spin.....	92
3.5.1 Metode de modelare cu Look-Up table.....	94
3.5.2 Metodă de modelare analitică .....	99
3.5.3 Rezultatele simulărilor .....	107
3.6 Rezumat.....	109
4. Funcționalități de diodă și rutare selectivă în dispozitive cu pereți de domeniu magnetic acționate de cuplurile induse de curentul de spin .....	111
4.1 Introducere.....	111
4.2 Dinamica magnetizării pereților de domeniu în modelul de interacțiune SOT-DMI..	115
4.3 Simulări micromagnetice.....	121
4.4 Creșterea și microstructurarea dispozitivelor .....	127
4.4.1 Creșterea filemlor subțiri.....	127
4.4.2 Procesul de microstructurare a dispozitivului .....	134
4.5 Dispozitive funcționale cu pereți de domeniu magnetic acționați de cuplurile datorate curentului de spin .....	145
4.5.1 Dispozitiv cu conductă dreaptă cu pereți de domeniu magnetic .....	145
4.5.2 Dispozitiv cu conductă înclinată cu pereți de domeniu magnetic.....	148
4.5.3 Dispozitiv selector de pereți de domeniu.....	154
4.6 Rezumat.....	156
5. Concluzii generale și perspective .....	159
REFERINȚE.....	165

LISTĂ DE FIGURI .....	183
LIST DE TABELE .....	194
ANEXA1 .....	195
LISTA DE PUBLICAȚII .....	196

## INTRODUCERE

În contextul socio-ecologic actual există o cerere din ce în ce mai mare pentru stocarea eficientă a datelor și procesarea rapidă a informațiilor combinată cu necesitatea unui consum redus de energie. Deși aceste cerințe sunt contradictorii, spintronica apare ca un domeniu ce oferă soluții viabile. Aceasta are potențialul de a aborda provocările asociate cu următoarea generație de dispozitive de tip CMOS (complementaty metal-oxid-semiconductor).

Spre deosebire de electronica clasică, care se bazează pe sarcina electrică a electronilor, spintronica exploatează atât sarcina electrică, cât și gradul suplimentar de libertate al electronului - momentul său magnetic sau spinul. Dezvoltarea dispozitivelor spintronice a transformat modul în care informațiile sunt stocate și procesate, oferind îmbunătățiri semnificative ale capacităților de procesare a datelor. Descoperirea magnetorezistenței gigant (GMR) în 1988, un rezultat pentru care Albert Fert și Peter Grünberg au primit premiul Nobel pentru fizică, a dat startul domeniului spintronicii. În 1997, IBM a introdus capetele de citire pentru hard disk-uri bazate pe efectul GMR, îmbunătățind într-o prima fază cu mai mult de un ordin de mărime capacitatea și performanța dispozitivelor de stocare. De atunci, toate capetele de citire pentru HDD sunt de tip spintronic. În 2012, Everspin Technologies a lansat pe piață primele memorii magnetice nonvolatile de acces aleator STT-MRAM. Aceste memorii combină viteza mare de acces cu durabilitatea și consumul redus de energie, devenind o alternativă atractivă la memoriile flash și RAM tradiționale [1]. În ultimele decenii, au fost dezvoltate mai multe generații de MRAM, fiecare folosind un mecanism diferit de scriere. Acestea includ dispozitive MRAM cu comutare controlată de un câmp magnetic extern și MRAM bazată pe cuplu de transfer de spin (STT) care este utilizată în prezent în aplicații de memorie integrate [2]. Cea mai recentă generație, MRAM bazată pe cuplurile datorate curentului de spin, este deosebit de promițătoare datorită densității reduse de curent și a vitezei de procesare foarte ridicate [2-3]. Pe lângă stocarea informațiilor, MRAM poate fi integrat în rețele neuronale folosind o structură de tip grilă, așa cum a demonstrat recent Samsung [4]. În ciuda progreselor în integrare, MRAM se confruntă cu provocări legate de scalabilitate, în special în procesul de fabricație. Probleme precum defectele de material și defectele de cip afectează densitatea de stocare a datelor, timpul de retenție a datelor și eficiența.

În 2022, Samsung Electronics a demonstrat conceptul de calcul în memorie, care permite atât stocarea, cât și procesarea datelor direct în rețeaua de memorie. Această tehnologie promite să reducă substanțial consumul de energie și să îmbunătățească eficiența de calcul.

Cercetările din această teză de doctorat sunt motivate de necesitatea de a depăși limitările tehnologiei CMOS convenționale și de a dezvolta soluții de calcul mai eficiente și mai puternice. Înțelegerea relației dintre răspunsurile structurilor magnetorezistive și comportamentul inversării magnetizării în diferite sisteme spintronice este esențială. Această înțelegere poate fi utilizată pentru a optimiza proiectarea dispozitivelor spintronice și pentru a le îmbunătăți funcționalitatea și eficiența. Prin explorarea tehnologiilor bazate pe spinul electronului, cercetarea urmărește să contribuie la dezvoltarea sistemelor de calcul eficiente din punct de vedere energetic, abordând provocările critice generate de creșterea exponențială a datelor și de cererea tot mai mare pentru calcul de înaltă performanță.

# 1. Spintronica. Concepte generale

Obiectivul primului capitol este de a introduce conceptele fundamentale legate de pereții de domenii magnetice (DW) și de efectele magnetorezistive. Capitolul începe cu o prezentare generală a diferitelor tipuri de contribuții energetice și a rolului lor în formarea domeniilor magnetice și a pereților de domeniu, urmată de o abordare detaliată a diferitelor structuri magnetice [6-7]. Accentul se pune apoi pe dinamica magnetizării și deplasarea pereților de domeniu. Pereții de domeniu pot fi deplasați prin intermediul unui câmp magnetic extern, aplicat perpendicular pe plan (axa Oz) sau prin intermediul unui curent de spin.

Dinamica magnetizării este guvernată de ecuația Landau Lifshitz Gilbert (LLG) care este utilizată în modelele micromagnetice pentru a determina evoluția în timp a momentelor magnetice și înțelegerea propagării pereților de domeniu [8-9].

Deplasarea pereților de domeniu indusă de un câmp magnetic extern în nanofirele ideale, care nu prezintă defecte de material, prezintă două regimuri distincte de deplasare: un regim de stabilizare (eng. steady regime) și un regim oscilator sau turbulent (eng. oscillation regime). La câmpuri magnetice mici, deplasarea pereților de domeniu corespunde regimului staționar, în timp ce la câmpuri magnetice mari, deplasarea corespunde unui regim turbulent. În sistemele reale, care prezintă defecte de material, deplasarea pereților de domeniu este definită în trei regimuri distincte: creep (târâre), depinning (dezancorare) și flow (curgere) [10-11].

Deplasarea pereților de domeniu în prezența unui curent electric se datorează efectelor de transfer de spin. Spinii electronilor de conducție interacționează cu magnetizarea locală și transferă impuls. În această situație, deplasarea pereților de domeniu este unidirecțională. La aplicarea unui curent electric, cuplul datorat transferului de impuls unghiular va acționa asupra pereților de domeniu și îi va deplasa în aceeași direcție, de-a lungul firului și fără ca pereții de domeniu să se extindă sau să se micșoreze.

Majoritatea dispozitivelor spinorbitronice au la bază un bistrat format dintr-un material metal greu non-magnetic cum e platina și un film ultra subțire feromagnetic care este magnetizat perpendicular. Într-un astfel de sistem, datorită interacțiunii Dzyaloshinskii-Moriya (DMI) pereții de domeniu sunt așa numiții pereți Neel, în care magnetizarea se rotește de la o direcție la cealaltă în același plan. Când trecem un curent electric prin această structură, în platină apare efectul Hall de spin. Efectul Hall de spin constă în conversia unui curent de sarcină în curent de spin datorită împrăștiilor asimetrice ale electronilor. Dacă trecem un curent electric printr-un material de tipul metal greu, transversal la direcția curentului electric o să avem un curent de spin care pătrunde în stratul feromagnetic adiacent și va da naștere la două tipuri de cupluri care acționează asupra magnetizării filmului. În acest caz ecuația Landau-Lifshitz-Gilbert care guvernează dinamica magnetizării este modificată prin adăugarea a doi termeni suplimentari: cuplul de anti-amortizare sau Damping Like torque și cuplul de tip field-like torque. Cel mai important este cuplul de anti-amortizare care este echivalent cu un câmp magnetic care este tot timpul perpendicular pe magnetizare și care este eficient în manipularea texturii magnetice. Acesta poate să inverseze magnetizarea stratului feromagnetic sau poate să ducă la deplasarea pereților de domeniu.

În mecanismul format de interacțiunea DMI și cuplul de anti-amortizare, viteza pereților de domeniu prezintă două regimuri distincte. La valori scăzute ale densității de curent, viteza crește liniar cu densitatea de curent, fiind proporțională cu câmpul efectiv de anti-amortizare. Cu toate acestea, la densități de curent mai mari, viteza tinde să se satureze la o valoare proporțională cu interacțiunea DMI [12].

Secțiunea finală a primului capitol descrie efectele de magnetorezistență care rezultă din interacțiunea dintre spinii electronilor și alinierea acestora cu momentele magnetice locale. De

asemenea, sunt comparate diferite tehnici pentru detectarea pereților de domeniu, cum ar fi magnetorezistența gigant (GMR), magnetorezistența tunel (TMR), magnetorezistența anisotropă (AMR) și efectul Hall extraordinar (EHE). În structurile multistrat, efectul GMR este utilizat pentru a detecta comutarea magnetizării, oferind informații despre poziția pereților de domeniu de-a lungul unui nanofir. Din punct de vedere al aplicațiilor, efectul GMR este frecvent utilizat în senzori magnetici și în capetele de citire pentru unitățile de hard disk, unde un raport GMR mai mare indică o detecție mai eficientă a comutării magnetizării. Efectul AMR este utilizat în principal pentru identificarea prezenței pereților de domeniu fără a oferi date precise despre poziția lor. EHE este de obicei folosit pentru a caracteriza deplasarea pereților de domeniu în nanostructuri cu anizotropie magnetică perpendiculară [13].

## **2. Metode experimentale și numerice pentru fabricarea și simularea dispozitivelor magnetice**

Capitolul al doilea prezintă o descriere detaliată a tehnicilor experimentale utilizate în această teză. Acesta include o prezentare generală a metodelor folosite pentru creșterea filmelor, fabricarea acestora și tehnicile de măsurare utilizate pentru a detecta deplasarea pereților de domeniu.

Probele au fost crescute folosind tehnica pulverizării catodice, care implică bombardarea unui material țintă cu plasmă, expulzarea atomilor din materialul țintă și depunerea lor ulterioară pe un substrat. Pentru a analiza proprietățile magnetice ale probelor depuse, am utilizat magnetometria cu probă vibrantă (VSM). VSM determină buclele de histerezis la aplicarea unui câmp magnetic paralel sau perpendicular pe suprafața probei, permițându-ne astfel să determinăm proprietăți magnetice esențiale precum coercitivitatea, remanența și valoarea magnetizării la saturație [14].

Fabricarea dispozitivelor micro/nanometrice implică utilizarea unor tehnici și procese specializate pentru a crea astfel de structuri la scară micro/nanometrică. Litografia optică este un proces de fabricație care utilizează tehnici fotolitografice pentru a transpune pe sistemul care urmează a fi microstructurat un motiv construit dintr-un material fotosensibil care va fi ulterior folosit pentru structurarea prin gravură cu fascicul de ioni (Ion Beam Etching) a elementului dorit. Procesul de fotolitografie UV implică mai mulți pași esențiali. Mai întâi, un strat de fotorezist este aplicat pe suprafața probei. Rezistul este apoi expus la lumină UV printr-o fotomască ce conține modelul dorit. După expunere, substratul este dezvoltat pentru a elimina regiunile solubile ale fotorezistului, lăsând un strat de fotorezist modelat care definește geometria dispozitivului. Acest model acționează ca o mască în timpul procesului de gravare cu ioni de argon, care îndepărtează zonele neprotejate ale substratului pentru a defini geometria dispozitivului. După modelare, microscopia cu forță atomică (AFM) este utilizată pentru a caracteriza morfologia suprafeței prin vizualizarea directă a probelor la scară nanometrică, oferind o perspectivă detaliată asupra proprietăților lor topografice [14].

Pentru a analiza calitativ dinamica pereților de domeniu și a explora potențialul lor în proiectarea dispozitivelor cu pereți de domeniu, folosim un model simplificat implementat în MuMax<sup>3</sup>. Acest simulator rezolvă ecuația LLG, luând în considerare factori precum interacțiunile magnetostatice, de schimb și anizotropie, precum și efectele termice și cuplurile datorate curentului de spin. Folosind metoda elementelor finite (FEM), simulatorul ne permite să observăm evoluția magnetizării în timp și spațiu la scară nanometrică. Simulările micromagnetice cu MuMax<sup>3</sup> sunt utilizate pentru a identifica parametrii care permit controlul optim al mișcării pereților de domeniu într-un film feromagnetic cu magnetizare perpendiculară.



În această teză, deplasarea pereților de domeniu indusă de curent (CIDWM) a fost studiată utilizând tehnica de imagistică prin microscopie cu efect Kerr magneto-optic (MOKE) [15]. Configurația experimentală utilizează efectul Kerr polar (PMOKE) și a fost dezvoltată pas cu pas de echipa de cercetare din cadrul laboratorului C4S. Un program LabVIEW personalizat, dezvoltat în cadrul tezei, automatizează configurația experimentală prin controlul eficient al diferiților parametri ai standului experimental. Domeniile magnetice sunt vizualizate ca semnale magnetice sau contraste, caracterizate prin diferențe de luminozitate, fie luminoase, fie întunecate. Intensitatea semnalului este influențată de factori precum magnetizarea, reflectivitatea suprafeței, intensitatea luminii incidente, lungimea de undă și alinierea relativă între polarizor și analizor. Pentru a crește sensibilitatea, utilizăm modul diferențial de formare a imaginii al microscopului, în care o imagine luată înainte de excitare, cum ar fi un curent electric sau un impuls de câmp magnetic este scăzută din imaginea luată după excitare. Contrastul magnetic se observă numai în zonele în care magnetizarea s-a inversat, indicând fie nuclearea unui domeniu magnetic, fie deplasarea unui perete de domeniu. În cazul pereților de domeniu, contrastul magnetic - întunecat sau luminos - depinde de tipul de perete de domeniu, sus/jos sau jos/sus și de direcția în care acestea se deplasează. În această teză, un contrast întunecat (luminos) semnifică o inversare a magnetizării de la starea jos (sus) la starea sus (jos).

Viteza peretelui de domeniu în structuri cu anizotropie magnetică perpendiculară a fost măsurată folosind metoda cvasi-statică ilustrată în figura 2.1. Acest proces implică aplicarea unei serii de impulsuri de câmp magnetic și captarea de imagini înainte respectiv după aplicarea impulsurilor, așa cum se arată schematic în figura 2.1 (i). Inițial, proba este saturată cu un impuls lung de câmp magnetic negativ. Se aplică apoi un impuls de câmp magnetic pozitiv scurt, cu amplitudine mare, pentru a nuclea un domeniu. Prima imagine este captată așa cum este reprezentat în figura 2.1 (ii), unde domeniul nucleat apare în gri deschis. Se aplică apoi un impuls de măsurare, care creează un câmp magnetic în aceeași direcție ca și domeniul nucleat, determinând extinderea acestuia. Se realizează o a doua imagine, așa cum se arată în figura 2.1 (iii), care ilustrează extinderea domeniului inițial. Distanța parcursă de peretele de domeniu este determinată prin obținerea unei imagini diferențiale: *Imaginea 2 - Imaginea 1*, așa cum se poate observa în figura 2.1 (iv). Zona gri reprezintă acum distanța  $L$  parcursă de peretele de domeniu, care poate fi calculată din raza acestuia. Viteza peretelui de domeniu este calculată folosind ecuația 2.1

$$v_{DW} = \frac{L}{t_{pulse}}, \quad (2.1)$$

în care  $t_{pulse}$  reprezintă durata trenului de impulsului aplicat.

Figura 2.2 prezintă configurația experimentală pentru injectarea impulsurilor de curent electric în probe. Proba este fixată într-un suport echipat cu două lamele de cupru, iar conexiunile sunt realizate prin lipire cu pastă de argint. Generatorul de impulsuri permite reglarea a doi parametri: durata impulsului și amplitudinea acestuia. Alegerea duratei impulsului depinde de amplitudinea impulsului, deoarece duratele mai lungi pot provoca supraîncălzire, ducând la evenimente de nucleație sau la deteriorarea probei. Viteza peretelui de domeniu este determinată prin analiza unei secvențe de imagini Kerr, valoare ei fiind obținută prin medierea măsurătorilor din mai multe imagini captate în aceleași condiții de durată și amplitudine a impulsului.

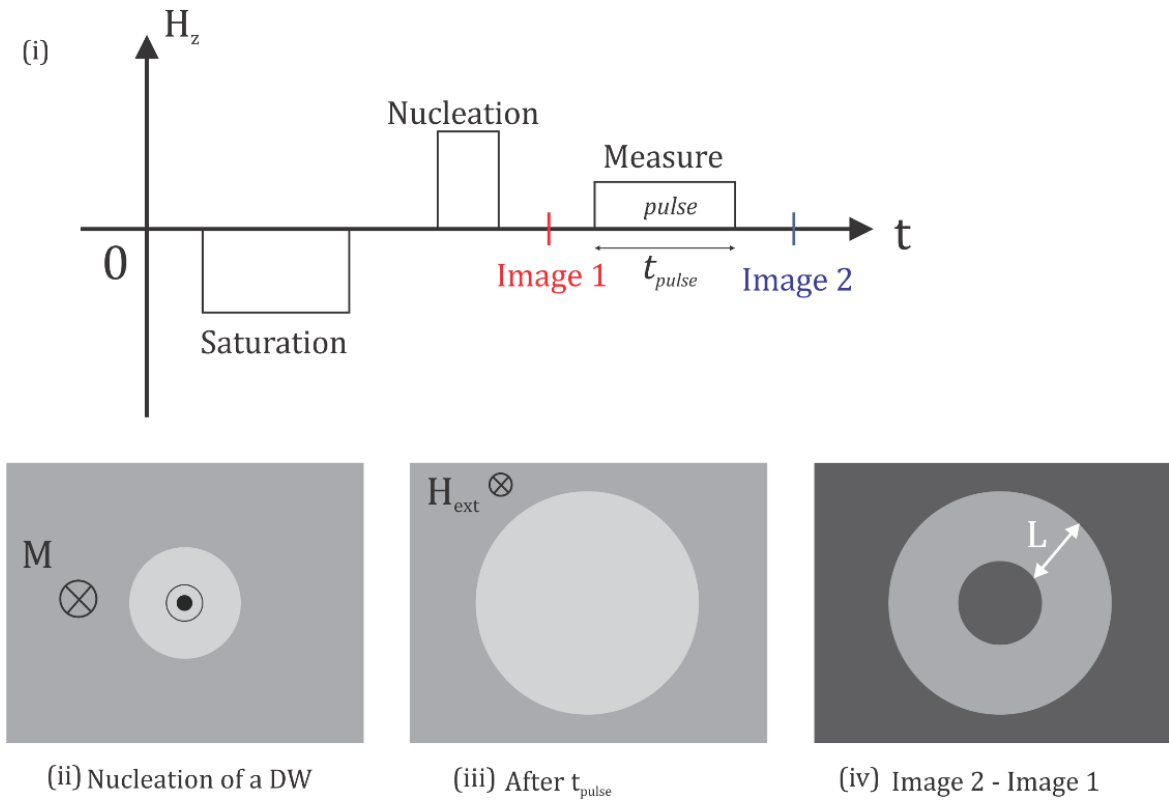


Fig. 2.1 Protocolul de măsurare a deplasării pereților de domeniu (i). În prima etapă, proba este saturată cu un impuls lung de câmp negativ. Apoi, se aplică un impuls scurt de câmp pozitiv pentru a nuclea un domeniu. Prima imagine, așa cum se arată la punctul (ii), este obținută în această etapă. Se aplică apoi un impuls de măsurare cu amplitudine și durată reglabile. După acest impuls, se obține o a doua imagine, așa cum se arată la punctul (iii). (ii) Imagine obținută după nuclearea domeniului, corespunzătoare imaginii 1 din (i). (iii) Imagine luată după impulsul de măsurare, corespunzătoare imaginii 2 din (i). (iv) Diferența dintre Imaginea2 - Imaginea 1. Zona umbrită în gri indică distanța  $L$  parcursă de DW în timpul impulsului de măsurare. Această distanță poate fi dedusă din rază. Viteza DW este apoi calculată prin împărțirea  $L$  la durata impulsului ( $t_{pulse}$ ).

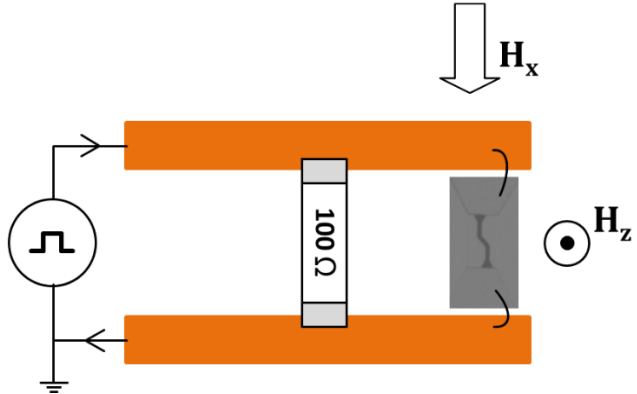


Fig. 2.1 Diagramă care descrie configurația experimentală pentru injectarea impulsurilor de curent. Pentru adaptare de impedanță, o rezistență de 100 Ohm este conectată în paralel.

### **3. Fabricarea, caracterizarea și proiectarea modelului de simulare pentru un senzor de curent bazat pe o microstructură magnetorezistivă cu valvă de spin**

Al treilea capitol descrie proiectarea și caracterizarea senzorilor micrometrici de câmp magnetic bazați pe efectul de magnetorezistență gigant (GMR) folosind structuri multistrat cu valve de spin (SV) [16-17]. GMR este un efect magnetorezistiv cuantic observat în structuri cu filme subțiri compuse din straturi alternative de materiale feromagnetice și nemagnetice. Acesta implică o creștere semnificativă a rezistenței electrice a structurii cauzată de alinierea momentelor magnetice din straturile feromagnetice (FM) atunci când este aplicat un câmp magnetic extern [13]. Structurile de tip valvă de spin constau din două straturi feromagnetice separate de un strat separator nemagnetic. Unul dintre straturile feromagnetice este fixat, ceea ce înseamnă că direcția magnetizării sale este fixă, în timp ce celălalt strat este liber să își schimbe direcția magnetizării ca răspuns la un câmp magnetic extern [18]. Procesul de fabricare a valvelor de spin include creșterea structurii multistrat, microstructurarea prin litografie UV, caracterizarea dispozitivelor și optimizarea lor. Sunt analizați parametri cheie precum raportul magnetorezistiv, sensibilitatea și liniaritatea.

De asemenea, acest capitol introduce două modele PSpice dezvoltate pentru a modela și simula un senzor de curent bazat pe microstructuri GMR cu valve de spin [13]. Modelele PSpice propuse în această teză sunt aplicate și validate pentru microstructuri cu valve de spin în formă de meandru.

#### **3.1. Creșterea și microstructurarea probelor**

Componenta activă a microstructurii GMR cuprinde două straturi feromagnetice (CoFe) separate de un strat intermediar nemagnetic (Cu).

Structurile multistrat sunt crescute prin pulverizare catodică și au următoarea arhitectură: Si//Ta(2.3nm)/NiFe(4.0nm)/CoFe(1.0nm)/Cu(2.0nm)/CoFe(2.0nm)/IrMn(8.0nm)/Ta(2.3nm). În partea activă a structurii de tip valvă de spin, stratul liber este compus din CoFe/NiFe: stratul de CoFe a fost ales pentru că are polarizare de spin mare, iar stratul de NiFe pentru că este un material feromagnetic moale a cărui magnetizare se aliniază cu ușurință la aplicarea unui câmp magnetic extern. Stratul separator este un strat de 2nm de Cu. Stratul fixat este format dintr-un strat de 2nm de CoFe și este blocat pe o anumită direcție prin intermediul cuplajului de schimb cu un strat antiferomagnetic de IrMn de 8nm. Aceasta se realizează prin încălzirea structurii peste temperatura Neel și răcirea acesteia într-un câmp magnetic exterior. În plus, structura cuprinde un strat de aderență de Ta și un strat protector de Ta deasupra.

Procesul de fabricare a microstructurilor magnetorezistive implică litografia UV. Waferul care conține structurile multistrat este supus unui proces de curățare cu solvenți, urmat de depunerea prin centrifugare a fotorezistului SHIPLEY S1813 la o viteză de 5000 rpm timp de 60 de secunde. După depunerea prin centrifugare, waferul este transferat imediat pe o plită încălzită și tratat termic la 115 °C timp de 1 minut. După această etapă, waferul este transferat într-un sistem MJB4, care aliniază masca proiectată cu waferul, asigurând un contact direct și ferm între cele două. Fotorezistul aplicat pe wafer este expus la lumină UV timp de 4 secunde. Waferul este apoi imersat într-o soluție de developare (MF319) timp de 45 de secunde. Odată ce modelul valvei de spin este definit, următorul pas este procesul de gravare realizat cu ajutorul unui fascicul de ioni de Ar. După gravura cu fascicul de ioni (IBE), contactele electrice din Ti/Au sunt realizate printr-un proces de lift-off. Figura 3.1 prezintă imagini

reprezentative de microscopie optică după cei mai importanți pași de modelare pentru structura valvă de spin de tip meandru cu 8 segmente [17].

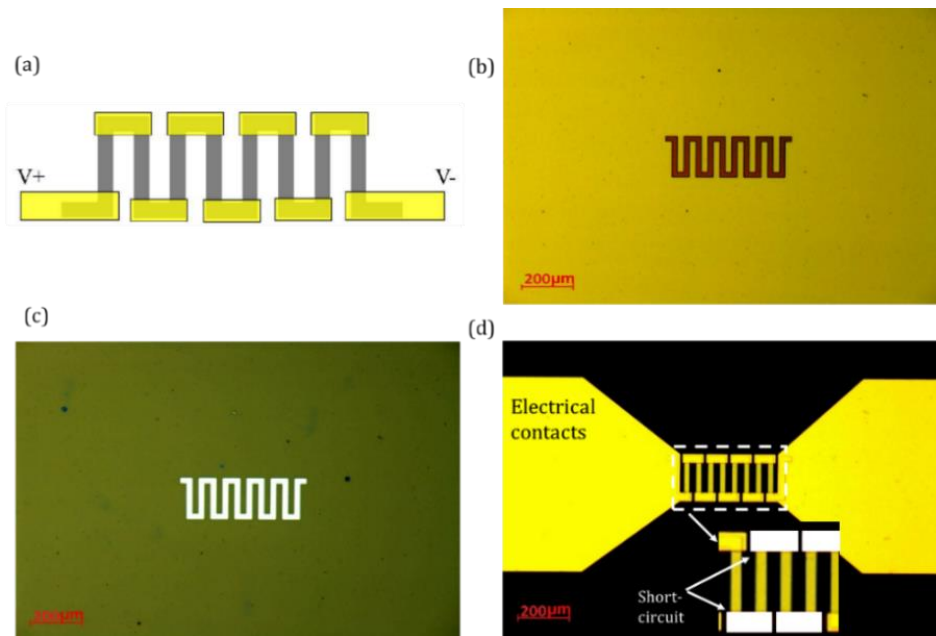


Fig. 3.1 (a) Reprezentare schematică a unei structuri valvă de spin bazată pe GMR de tip meandru. Zonele scurtcircuitate sunt evidențiate în galben. Imagini de microscopie optică care arată (b) motivul fotolitografic al elementului de tip meandru, (c) elementul GMR după IBE și îndepărtarea fotorezistului, (d) elementul GMR după depunerea contactelor electrice Ti / Au.

### 3.2. Caracterizarea magneto-electrică a probelor depuse

Proprietățile magneto-electrice ale elementului sensibil de tip valvă de spin sunt evaluate prin măsurarea rezistenței sale electrice ca răspuns la variația câmpurilor magnetice aplicate. Probele au fost depuse prin pulverizare catodică la temperatura camerei. Deși neașteptat, acestea prezintă deja cuplaj de schimb datorită câmpului magnetic al magnetronului, chiar și fără tratament termic. Astfel, am caracterizat mai întâi structurile așa cum au fost depuse.

Procesul de caracterizare implică supunerea elementului de tip valvă de spin la diferite intensități ale câmpului magnetic și măsurarea precisă a modificărilor rezultate în rezistența electrică. Cea mai utilizată tehnică pentru caracterizarea rezistenței electrice a acestor structuri este metoda în patru puncte, care asigură măsurători precise prin eliminarea influenței rezistențelor de contact [131]. Rezistența electrică a structurii este apoi determinată prin aplicarea legii lui Ohm, exprimată ca  $R = \frac{V}{I}$  unde R este rezistența, V este diferența de potențial măsurată, iar I este curentul injectat.

Magnetorezistența structurii este definită de următoarea ecuație:

$$GMR = \frac{\Delta R}{R} = \frac{R_{max} - R_{min}}{R_{min}} \cdot 100\% , \quad (3.1)$$

în care  $R_{max}$  corespunde situației în care magnetizările celor două straturi FM sunt orientate antiparalele, iar  $R_{min}$  corespunde magnetizărilor orientate paralele.

Figura 3.2 prezintă răspunsul sensorului de tip valvă de spin la variații ale câmpului magnetic aplicat paralel cu direcția de polarizare de schimb. Microstructura are o lățime de 4µm, o lungime de 24µm și constă din 8 segmente. Inițial, la un câmp magnetic negativ relativ

ridicat, magnetizările celor două straturi feromagnetice sunt aliniate paralel, rezultând o rezistență scăzută. Pe măsură ce câmpul se inversează, magnetizarea stratului feromagnetic liber se inversează, făcând ca cele două magnetizări să fie orientate antiparalele, iar rezistența structurii să devină maximă. Pe măsură ce câmpul magnetic continuă să crească, acesta devine suficient de puternic pentru a roti magnetizarea stratului feromagnetic fix, făcând ca magnetizările să fie din nou paralele. Valoarea GMR este de aproximativ 5%, o valoare tipică pentru astfel de structuri.

Figura 3.3 prezintă răspunsul magnetorezistenței microstructurii valvei de spin atunci când este supusă unui câmp magnetic extern orientat perpendicular pe direcția de polarizare de schimb. La câmp magnetic zero, magnetizările straturilor feromagnetice sunt paralele, rezultând o rezistență minimă. Pe măsură ce câmpul magnetic crește, magnetizarea stratului feromagnetic liber se rotește în direcția câmpului până când atinge un unghi de  $90^\circ$  față de stratul feromagnetic fix, unde rezistența este maximă. Pe măsură ce câmpul magnetic continuă să crească, acesta devine suficient de puternic pentru a roti și magnetizarea stratului feromagnetic fix, iar rezistența valvei de spin începe să scadă.

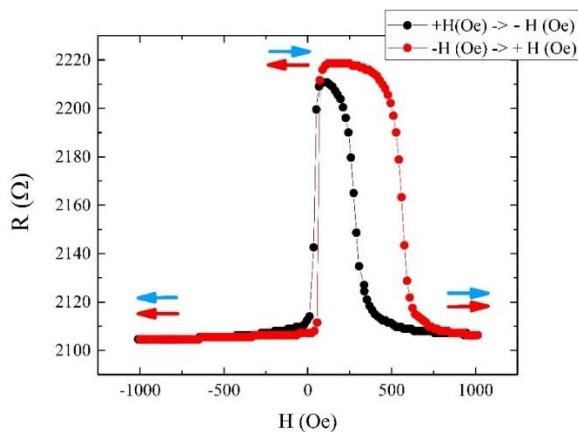


Fig. 3.2 Răspunsul unei structuri de tip meandru la variații ale câmpului magnetic extern aplicat paralel cu direcția polarizării de schimb. Săgeata albastră corespunde magnetizării stratului FM liber, în timp ce săgeata roșie corespunde magnetizării stratului FM fixat.

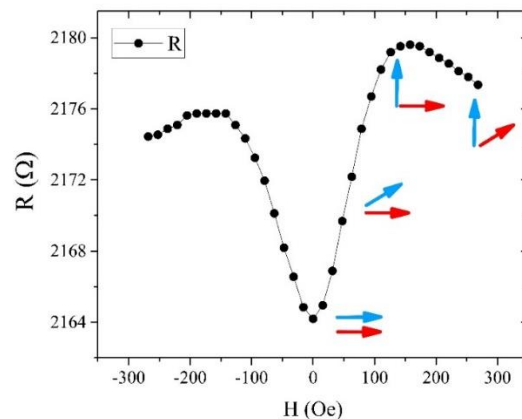


Fig. 3.3 Răspunsul unei structuri de tip meandru la variații ale câmpului magnetic extern aplicat perpendicular pe direcția polarizării de schimb. Săgeata albastră corespunde magnetizării stratului FM liber, în timp ce săgeata roșie corespunde magnetizării stratului FM fixat.

### 3.3. Tratamente termice la diferite temperaturi

Pentru a obține proprietăți magnetorezistive optime este esențial ca unul dintre straturile magnetice ale structurii de tip valvă de spin să aibă magnetizarea fixată într-o anumită direcție. În scenariul nostru, acest lucru se realizează prin intermediul cuplajului de schimb (exchange bias - EB) cu un strat antiferomagnetic de IrMn. Deși probele prezintă deja cuplaj de schimb datorită câmpului magnetic al magnetronului, pentru a îmbunătăți proprietățile de cuplaj de schimb [19] și pentru a optimiza magnetorezistența, probele sunt supuse unui tratament termic suplimentar în câmp la diferite temperaturi:  $250^\circ\text{C}$ ,  $275^\circ\text{C}$ ,  $300^\circ\text{C}$  și  $325^\circ\text{C}$  în vid, timp de 1 oră. Cel mai bun cuplaj de schimb a fost obținut la tratarea cu temperaturi mai mari de  $275^\circ\text{C}$ . Se observă o valoare a magnetorezistenței de aproximativ 5% pentru probele tratate termic la  $275^\circ\text{C}$ . Figura 3.4 prezintă variația rezistenței electrice cu câmpul magnetic aplicat și ciclurile de magnetizare (variația momentului magnetic în câmp magnetic), măsurate cu câmpul magnetic extern aliniat de-a lungul direcției polarizării de

schimb. Inițial la un câmp magnetic negativ relativ mare magnetizările celor două straturi feromagnetice sunt aliniate paralel și rezistența este mică. Odată cu inversarea câmpului, magnetizarea stratului feromagnetic liber se inversează, cele două magnetizări devin antiparalele, avem platou antiferomagnetic, iar rezistența structurii este maximă. Pe măsură ce câmpul magnetic crește în continuare, devine suficient de puternic încât să rotească și magnetizarea stratului feromagnetic fix, iar cele două magnetizări devin din nou paralele.

Obținerea unor valori ridicate ale magnetorezistenței nu este suficientă pentru ca o structură magnetorezistivă să funcționeze eficient ca senzor. Principalul indicator de performanță pentru un senzor magnetorezistiv este sensibilitatea sa. Sensibilitatea elementului GMR, definită ca  $S = \frac{\Delta R}{\Delta H} \Omega/Oe$  reprezintă variația relativă a rezistenței pe unitatea de câmp magnetic, corespunzătoare pantei răspunsului  $R(H)$ . Figura 3.5 prezintă sensibilitatea măsurată pentru structura de tip valvă de spin tratată termic la 275 °C ( $w = 4\mu m, L = 24\mu m, N = 8, d = 25\mu m$ ) la aplicarea câmpului magnetic extern perpendicular pe direcția de polarizare de schimb. O sensibilitate de 80  $m\Omega/Oe$  este obținută la un câmp magnetic de 50  $Oe$ .

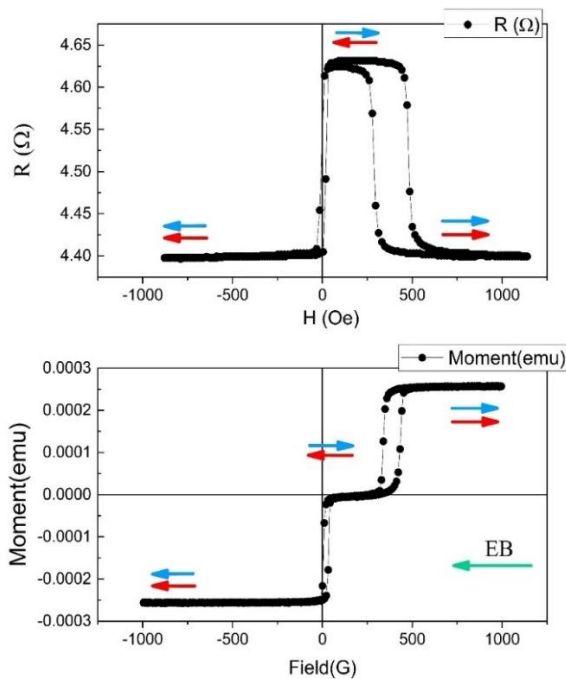


Fig. 3.4 Ciclul de magnetorezistență și magnetizare pentru o probă tratată termic la temperatura 275 °C.

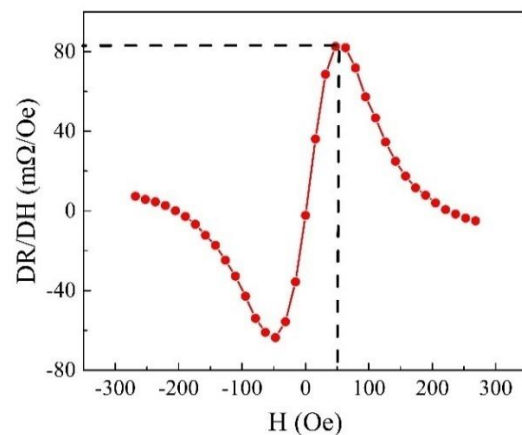


Fig. 3.5 Sensibilitatea senzorului magnetorezistiv pentru structura de tip meandru cu dimensiunile  $w=4\mu m, L=24\mu m, N=8, d=25\mu m$ , la aplicarea unui câmp magnetic perpendicular pe direcția magnetizării stratului fix.

### 3.4. Principiul de funcționare al senzorului de curent

Elementul sensibil al senzorului și anume valva de spin (eng. Spin Valve - SV) este plasată în câmpul magnetic generat de un curent electric care trece printr-un conductor, astfel încât valoarea magnetorezistenței să depindă de valoarea curentului care generează câmpul magnetic, conform legii lui Ampère,  $B = \mu_0 \cdot \frac{I}{2\pi d} [T]$ , în care  $\mu_0$  reprezintă permeabilitatea

magnetică a vidului,  $I$  este curentul care trece prin firul conductor și  $d$  reprezintă distanța dintre firul conductor și senzorul de curent GMR.

Figura 3.6 prezintă o schemă a principiului de funcționare a senzorului de curent. Este important de observat că direcția în care este fixat stratul feromagnetic dur (FM) este direcția meandrului (direcția de polarizare de schimb). Acest lucru asigură faptul că în senzorul nostru câmpul magnetic generat de curent este perpendicular pe direcția de polarizare de schimb.

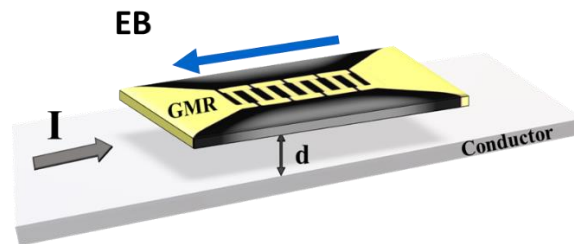


Fig. 3.6 Principiul de funcționare al senzorului de curent bazat pe microstructuri magnetorezistive cu valve de spin GMR, conform legii lui Ampère.

### 3.5. Model PSpice al unui traductor de curent bazat pe structuri de tip valvă de spin

Una dintre aplicațiile dispozitivului GMR bazat pe valve de spin este utilizarea acestuia la măsurarea curentului electric care trece printr-un fir amplasat la o anumită distanță față de senzor. În acest context, am abordat o problemă care există la aceste tipuri de dispozitive (față de alți senzori magnetici) și anume lipsa modelelor electrice dedicate simulatoarelor precum PSpice. Astfel, am propus în această teză două modele de simulare care să poată fi incluse în bibliotecile Orcad și care să fie folosite ca și componente de sine stătătoare în simularea circuitelor electronice mai complexe care conțin astfel de dispozitive. În plus, metodele propuse pot fi folosite la implementarea de modele PSpice și pentru alte variante sau tipuri de senzori la care este cunoscută caracteristica de funcționare. Modelele electrice sunt implementate în Cadence, utilizând biblioteca ABM (eng. Analogue Behavioral Model) a pachetului software SPICE. Blocurile ABM sunt utilizate pentru a descrie comportamentul dispozitivelor electronice prin modelarea funcției de transfer sau cu ajutorul unui tabel de corespondență – Look-Up Table, care permite o abordare bazată pe tabel a modelării empirice [20-21].

#### Metode de modelare cu Look-Up table

Primul model, prezentat în Fig. 3.7, este implementat folosind metoda Look-Up Table (LUT), o tehnică de modelare empirică. Această abordare se concentrează pe dispozitivul ETABLE, care acționează ca o sursă controlată de tensiune. În această configurație, relația dintre tensiunea de intrare și tensiunea de ieșire este definită de o serie de valori pereche enumerate în tabelul de căutare. În special pentru senzorul de curent bazat pe microstructuri de tip valvă de spin, dispozitivul ETABLE mapează aceste valori pereche pentru a defini dependențele dintre curentul de intrare și magnetorezistența rezultată. Mărimea fizică returnată de ETABLE este exprimată ca tensiune. Pentru a putea multiplica această valoare cu valoarea curentului de polarizare a senzorului a fost necesară trecerea acestuia printr-o sursă de tensiune comandată în curent, în acest fel cele două mărimi fizice sunt de aceeași natură, deci pot fi multiplicare. Tensiunea obținută este folosită pentru controlul unei componente de tip

rezistor controlat în tensiune, în acest fel a putut fi modelat comportamentul rezistiv al senzorului real.

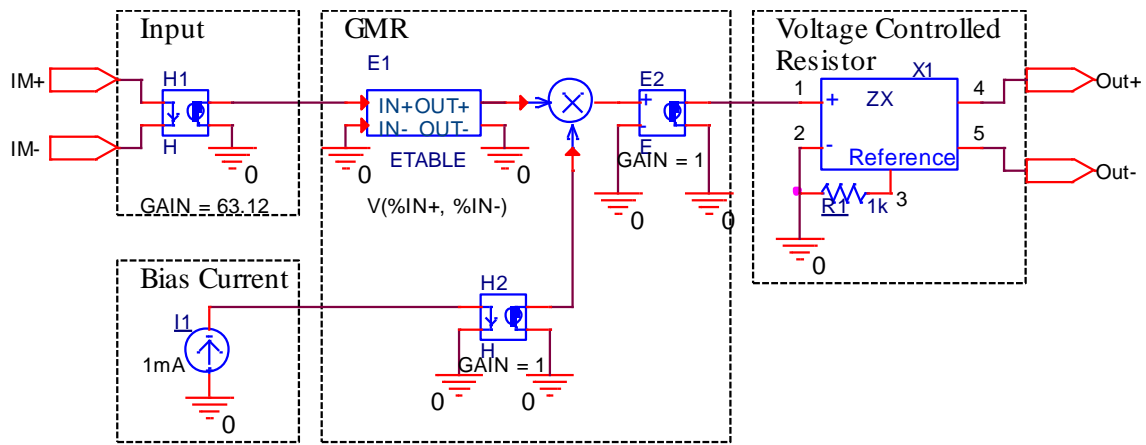


Fig. 3. 7 Modelul PSpice al senzorului de curent GMR.

### Metode de modelare analitică

O altă metodă de implementare a modelului PSpice pentru senzorul de curent GMR constă în descrierea analitică a caracteristicii acestuia și implementarea polinomului de ordin superior în PSpice [22]. Polinomul care descrie matematic caracteristica de transfer a senzorului s-a obținut în MATLAB. Valorile inițiale au fost definite prin intermediul a doi vectori corespunzători celor două mărimi – câmp magnetic, respectiv rezistență electrică. Având în vedere sensibilitatea senzorului la valori foarte mici ale câmpului magnetic, curba caracteristică a fost împărțită în două segmente distincte la 0 Oe pentru a îmbunătăți acuratețea modelului în jurul acestui punct. Un polinom separat a fost generat pentru fiecare segment. A fost necesară adoptarea unui compromis între ordinul polinomului și limitările pe care la impune programul OrCAD. Pentru a evita erorile de convergență și a reduce timpul de simulare, au fost alese polinoame de ordinul patru, care au aproximat în mod satisfăcător ambele segmente ale curbei. Simulările MATLAB, prezentate în Fig. 3.8 și Fig. 3.9, demonstrează că polinomul de gradul 4 oferă cea mai precisă aproximare atât pentru al doilea cât și pentru primul cadran al curbei.

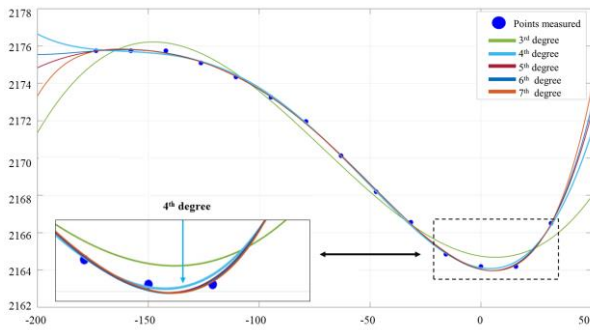


Fig. 3.8 Aproximări succesive cu polinoame de grad superior a caracteristicii senzorului GMR din cadranul II.

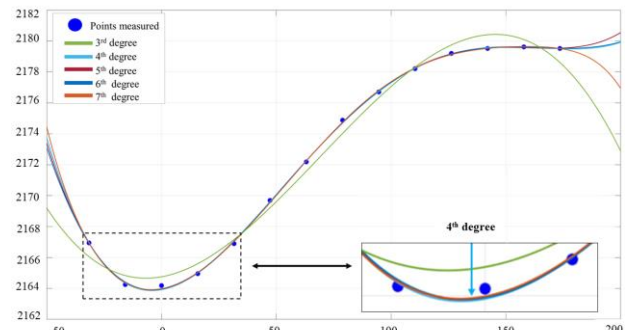


Fig. 3.9 Aproximări succesive cu polinoame de grad superior a caracteristicii senzorului GMR din cadranul I.



Ecuția de gradul 4 care reprezintă curba din cadranul II este definită în ecuația 3.2.

$$y = 4.310 \cdot 10^{-8}x^4 + 1.841 \cdot 10^{-5}x^3 + 0.002175x^2 - 0.01915x + 2164 \quad (3.2)$$

Ecuția de gradul 4 care reprezintă curba din cadranul I este definită în ecuația 3.3.

$$y = 5.827 \cdot 10^{-8}x^4 - 2.556 \cdot 10^{-5}x^3 + 0.003051x^2 - 0.02521x + 2164 \quad (3.3)$$

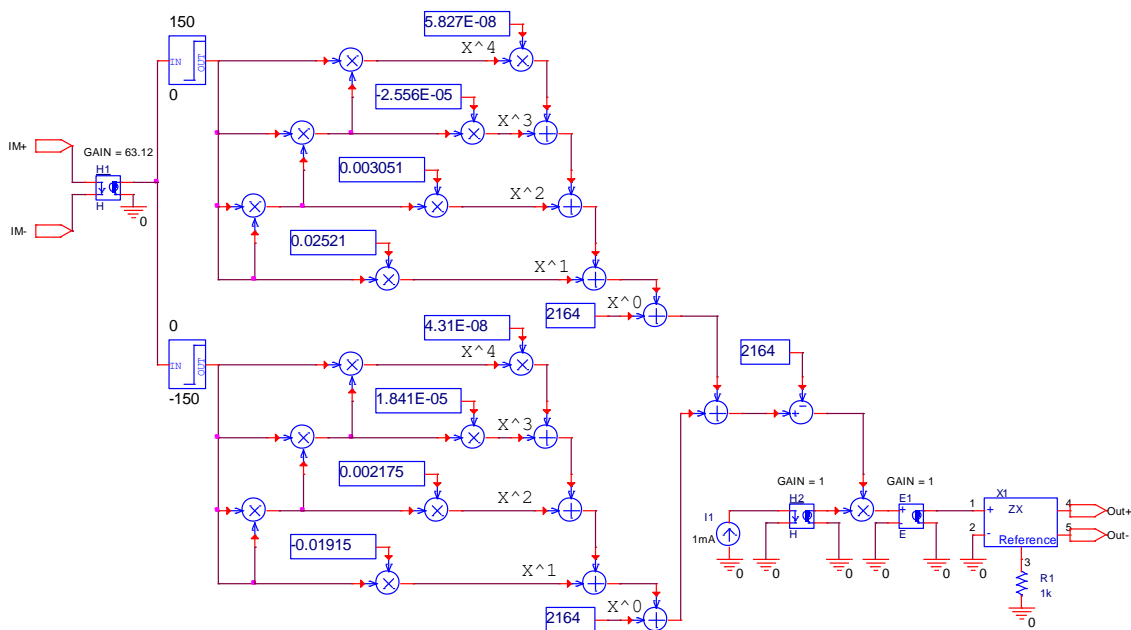


Fig. 3.10 Implementarea cu blocuri ABM a polinoameor de aproximare a caracteristicii senzorului GMR.

### Rezultatele simulărilor

Caracteristicile obținute cu cele două modele propuse - modelul analitic și modelul LUT (Look-Up Table) - au fost comparate cu caracteristica originală a senzorului. Rezultatele arată o corelație semnificativă între comportamentul celor două modele propuse și caracteristica reală a senzorului de curent GMR cu valvă de spin de tip meandru. Observarea rezultatelor arată că ambele modele propuse au un grad de acuratețe ridicat în aproximarea caracteristicilor experimentale ale senzorului. Eroarea absolută maximă identificată este de numai 0,4  $\Omega$ , ceea ce se traduce printr-o eroare relativă față de valoarea rezistenței electrice la câmp zero de aproximativ 0,014%. Aceasta reprezintă o potrivire optimă între comportamentul anticipat al modelelor și performanța reală a senzorului.

Pentru o aplicație specifică, alegerea între cele două metode depinde de cerințele și constrângerile specifice ale aplicației. Abordarea bazată pe tabele este avantajoasă pentru utilizarea directă a datelor experimentale, asigurând o fidelitate ridicată față de comportamentul senzorilor reali. În schimb, metoda analitică oferă mai multă flexibilitate și eficiență, fiind potrivită pentru scenariile în care adaptabilitatea și ușurința modificării sunt importante.

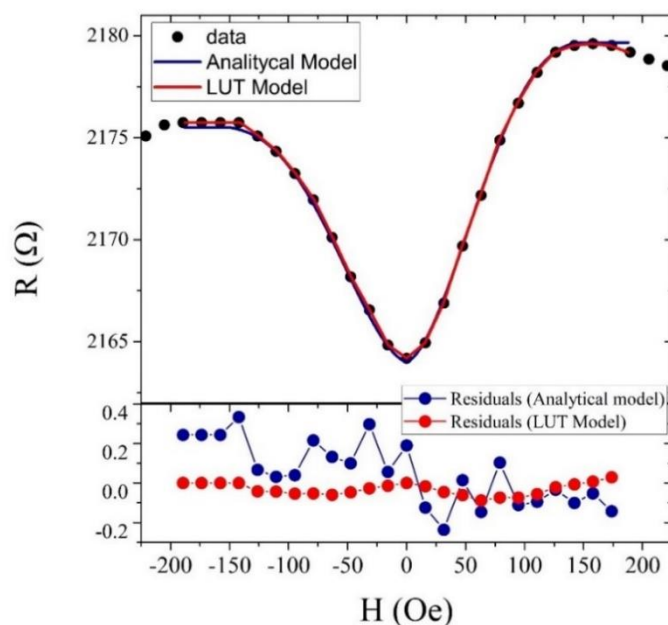


Fig. 3.11 Comparație între rezultatele simulărilor folosind cele două modele și caracteristica reală a senzorului GMR cu valvă de spin de tip meandru. Curba neagră punctată reprezintă caracteristica reală a senzorului, curba roșie reprezintă curba simulată corespunzătoare modelului Pspice bazat pe LUT, iar curba albastră corespunde simulării modelului analitic Pspice.

Importanța acestui capitol nu constă doar în metodele specifice de modelare prezentate. Prin propunerea a două abordări diferite, implementarea modelului comportamental pentru senzorii de curent GMR poate fi extrapolată și la alte medii de simulare. Această adaptabilitate crește versatilitatea modelelor, făcându-le instrumente valoroase pentru cercetătorii și inginerii care lucrează în diferite domenii.

Rezultatele obținute în acest capitol au fost validate și confirmate ulterior prin publicarea lor în *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 12, no. 3, Martie 2022.

1. **E. M. Stetco**, O. A. Pop, A. Grama, D. Pitica and M. S. Gabor, "Manufacturing, Characterization, and Simulation Model Design for a Current Sensor Based on a Spin-Valve Magnetoresistive Microstructure," in **IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology**, vol. 12, no. 3, pp. 422-428, March 2022, doi: 10.1109/TCPMT.2022.3151952.

De asemenea, au fost publicate alte trei lucrări la conferințe internaționale de prestigiu:

1. **E.M. Stetco**, O. A. Pop, C. A. Davidas, T. Petrisor Jr., and M. S. Gabor, Design and Characterization of a Micrometric Magnetoresistive Sensor, IEEE 25<sup>th</sup> International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), 2019, Cluj-Napoca, România, ISSN: 2642-7036, DOI: 10.1109/SIITME47687.2019.8990875, WOS:000564733700009.
2. **E.M. Stetco**, O. A. Pop, M. S. Gabor, A. Grama, and D. Pitica, PSpice Model for a Current Sensor Based on Spin-Valve Magnetoresistive Microstructure, Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC), 2020, Vestfold, Norway, ISBN:978-1-7281-6294-2, DOI: 10.1109/ESTC48849.2020.9229833, WOS:000631824100095.
3. **E. M. Stetco**, O. A. Pop, and A. Grama, Simulation Model of a GMR Based Current Sensor, IEEE 26<sup>th</sup> International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), 2020, Pitesti, Romania, ISBN: 978-1-7281-7507-2, DOI:10.1109/SIITME50350.2020.9292159, WOS:000651085100001.

## **4. Funcționalități de diodă și rutare selectivă în dispozitive cu pereți de domeniu magnetic acționate de cuplurile induse de curentul de spin**

### **4.1. Introducere**

Cercetările privind manipularea electrică a texturilor magnetice, cum ar fi pereții de domeniu și skyrmioni, prezintă un potențial ridicat pentru dezvoltarea următoarei generații de dispozitive de stocare a datelor, dispozitive logice și de calcul în memorie [4, 24-28]. Progresele recente în domeniul tehnologiilor de memorie magnetică includ dezvoltarea memoriilor magnetice cu acces aleatoriu cu cuplu de transfer de spin (eng. Spin Transfer Torque Magnetic Random Access Memory - STT-MRAM) și a memoriilor magnetice cu acces aleatoriu cu cuplu spin-orbită (eng. Spin Orbit Torque MRAM - SOT-MRAM). STT-MRAM utilizează curenți polarizați de spin pentru a comuta stările magnetice ale celulelor de memorie, combinând viteza și durabilitatea RAM-ului dinamic (DRAM) cu non-volatilitatea memoriei flash. Acest lucru o face ideală pentru aplicații robuste de stocare a datelor. Everspin Technologies a lansat comercial STT-MRAM în 2012, iar Samsung Electronics a demonstrat conceptul de calcul în memorie bazat pe STT-MRAM în 2022, reducând consumul de energie prin integrarea stocării și procesării datelor.

SOT-MRAM, pe de altă parte, utilizează cuplurile spin-orbită pentru a obține viteze de comutare mai rapide și o durabilitate mai mare prin generarea unui curent de spin suplimentar prin intermediul unui strat adiacent de metal greu. Acest lucru separă căile de citire și de scriere, reducând stresul asupra barierei tunel și crescând fiabilitatea și durata de viață a dispozitivului. Cu arhitectura sa cu trei terminale, SOT-MRAM permite o comutare mai rapidă și mai eficientă din punct de vedere energetic, ceea ce o face potrivită pentru aplicațiile informatice de înaltă performanță.

În 2008, Parkin et al. au introdus memoria racetrack, un concept inovator în stocarea datelor [25]. În aceste dispozitive, datele sunt stocate în domenii magnetice separate prin pereți de domeniu în cadrul unui nanofir feromagnetic, numit racetrack. Prin aplicarea unor impulsuri de curent polarizate de spin, pereții de domeniu pot fi mutați cu precizie de-a lungul pistei, trecând pe lângă senzorul de citire al joncțiunii tunel magnetice. Această deplasare precisă permite stocarea eficientă a datelor în nanofirul feromagnetic. În plus, deplasarea coerentă a pereților de domeniu poate fi utilizată pentru procesarea datelor, permițând crearea de porți logice precum porțile NOT, NAND și NOR, care sunt componente fundamentale ale circuitelor logice mai complexe [25-30].

Aceste aplicații se bazează pe rezultatele lui Miron și colab. care au obținut o viteză mare de deplasare a pereților de domeniu magnetic chirali determinată de cuplurile spin-orbită induse de curent în nanofire magnetizate perpendicular [31]. În aceste nanofire datorită cuplajului spin-orbită (spin-orbit coupling - SOC) puternic și a ruperii simetriei, unui curent electric aplicat în planul unui strat de metal greu (HM) generează atât cupluri de amortizare (DL), cât și de câmp (FL) asupra magnetizării stratului feromagnetic.

În nanofirele drepte, deplasarea pereților de domeniu indusă de impulsuri de curent cu polaritate opusă are loc într-un mod sincronizat, în trepte. Această deplasare este controlată cu precizie de polaritatea și amplitudinea impulsurilor de curent, permițând deplasări coerente și repetabile. Inversarea direcției curentului duce la deplasarea simetrică și opusă a pereților de domeniu. Această deplasare sincronizată este esențială pentru circuitele logice cu pereți de domeniu și de memorie racetrack, unde controlul precis al deplasării pereților de domeniu este necesar pentru stocarea datelor și pentru operațiile logice. Deplasarea treptată asigură că toți

pereții de domeniu se deplasează simultan, prevenind coliziunile și asigurând integritatea datelor stocate în domeniile magnetice.

Introducerea asimetriei în deplasarea pereților de domeniu cu polaritate opusă în memoriile racetrack și dispozitivele logice permite un control suplimentar al deplasării induse de curent. Impulsurile de curent mai lungi pot face ca pereții de domeniu să se încline din cauza înclinării magnetizării lor, afectând semnificativ dinamica acestora [32]. Această proprietate poate fi exploatată în joncțiuni curbate, înclinate sau în formă de „Y” pentru a crea o deplasare asimetrică a pereților de domeniu cu polarități opuse [33-35].

În acest capitol, arătăm cum separarea unei conducte magnetice de o bandă de curent și ajustarea unghiului dintre conducta cu perete de domeniu și direcția la care este aplicat curentul pot fi utilizate pentru a controla deplasarea pereților de domeniu indusă de curent pentru impulsuri scurte în care nu se așteaptă o înclinare semnificativă a pereților de domeniu. Prin proiectarea formei conductei cu perete de domeniu și optimizarea interacțiunii Dzyaloshinskii-Moriya, obținem o funcționalitate de tip diodă. În această configurație, pereții de domeniu se deplasează unidirecțional sub influența curentului, în timp ce deplasarea în direcția opusă este semnificativ redusă sau complet blocată.

De asemenea, demonstrăm utilizarea conductelor cu pereți de domeniu în formă de „Y” ca routere selective de pereți de domeniu. În aceste dispozitive, pereții de domeniu cu o anumită polaritate sunt direcționați de-a lungul unei ramuri a joncțiunii, în timp ce pereții de domeniu cu polaritate opusă urmează cealaltă ramură. Această rutare selectivă este realizată prin proiectarea geometrică a conductei și manipularea interacțiunilor interfeței pentru a asigura rutarea precisă în funcție de polaritatea pereților de domeniu. Progresele în proiectarea conductelor cu pereți de domeniu și în ingineria interfețelor îmbunătățesc considerabil controlul și eficiența dispozitivelor logice și de memorie bazate pe pereți de domeniu. Controlul precis al deplasării pereților de domeniu permite proiectarea unor arhitecturi de calcul în memorie mai complexe și mai fiabile, care sunt esențiale pentru tehnologiile de stocare și procesare a datelor din generația următoare.

## **4.2. Dinamica magnetizării pereților de domeniu în modelul de interacțiune SOT-DMI**

În centrul deplasării pereților de domeniu indusă de curent (CIDWM) se află mecanismul format de interacțiunea Dzyaloshinskii-Moriya (DMI) și cuplul de antiamortizare. Pentru a înțelege calitativ acest fenomen și potențialele sale aplicații în proiectarea dispozitivelor cu pereți de domeniu chirali, folosim un model simplificat. Acest model ne permite să studiem dependența unghiulară a deplasării unui perete de domeniu și să optimizăm configurațiile dispozitivelor pentru a exploata eficient acest efect. Safeer et al. în [36] au arătat că deplasarea pereților de domeniu chirali indusă de curent într-o structură de tip metal greu/feromagnet (HM/FM) este influențată de unghiul dintre orientarea conductei magnetice cu pereți de domeniu și direcția curentului aplicat.

Să luăm în considerare un perete de domeniu sus/jos aliniat de-a lungul axei  $Oy$  într-o structură de tipul HM/FM care prezintă anizotropie magnetică perpendiculară, așa cum este ilustrat în Fig. 4.1. Curentul de sarcină ( $J_c$ ) este aplicat în planul  $XY$  la un unghi  $\beta$  față de axa  $Ox$ .

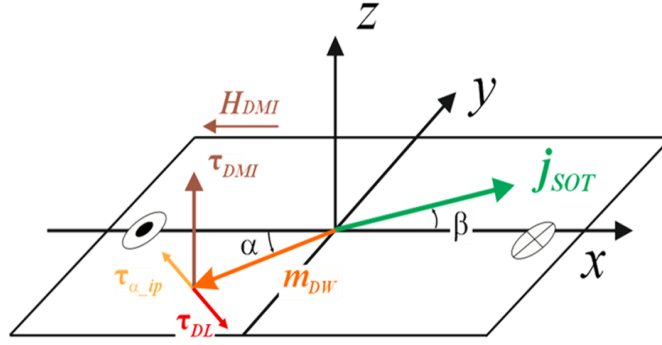


Fig. 4.1 Reprezentare schematică a cuplurilor datorate curentului de spin care acționează asupra magnetizării peretelui de domeniu.

Dinamica magnetizării este guvernată de ecuația Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) care încorporează cuplurile datorate curentului de spin [35-38]:

$$\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{m} \times \mathbf{H}_{eff} + \alpha_G \mathbf{m} \times \frac{\partial \mathbf{m}}{\partial t} + \boldsymbol{\tau}_{DL} + \boldsymbol{\tau}_{FL}, \quad (4.1)$$

unde  $\mathbf{m}$  reprezintă magnetizarea peretelui de domeniu normalizată,  $\gamma$  este factorul giromagnetic și  $\alpha_G$  reprezintă constanta de amortizare Gilbert. Câmpul magnetic efectiv,  $\mathbf{H}_{eff} = -\frac{1}{\mu_0 M_s} \frac{\delta E}{\delta \mathbf{m}}$  este câmpul magnetic efectiv în jurul căruia precesează momentul magnetic (include câmpul magnetic extern aplicat, câmpul de demagnetizare, câmpul de anizotropie, câmpul datorat DMI). În ecuația LLG, al treilea și al patrulea termen corespund cuplului de anti-amortizare și cuplului field-like. Cuplul de anti-amortizare este definit ca  $\boldsymbol{\tau}_{DL} = -\gamma a_j \mathbf{m} \times (\mathbf{m} \times \mathbf{p})$ , iar câmpul field-like este definit ca  $\boldsymbol{\tau}_{FL} = -\gamma b_j \mathbf{m} \times \mathbf{p}$ . În aceste ecuații,  $\mathbf{p} = \text{sign}(\theta_{SHE}) \mathbf{e}_j \times \mathbf{n}$  reprezintă vectorul unitate de polarizare a curentului de spin. Acest vector este ortogonal atât direcției densității curentului de sarcină  $\mathbf{e}_j = \mathbf{J}_c / J_c$ , cât și normalei la suprafață  $\mathbf{n} = (0,0,1)$ . Termenul  $\mu_0 a_j = \left| \frac{\hbar \theta_{SHE} J_c}{2e M_s t_{FM}} \right|$  reprezintă intensitatea câmpului efectiv datorat cuplului de anti-amortizare. Aici,  $\mu_0$  este permeabilitatea magnetică a vidului,  $\hbar$  este constanta Planck redusă,  $e$  este sarcina electrică elementară,  $t_{FM}$  este grosimea stratului FM. Pentru un set dat de parametri de material, intensitatea câmpului efectiv datorat cuplului de anti-amortizare este proporțională cu densitatea curentului de sarcină  $J_c$ . Intensitatea câmpului efectiv datorat cuplului field-like este definită ca  $\mu_0 b_j = \xi \mu_0 a_j$  [40]. În aceste relații,  $\theta_{SHE}$  este unghiul spin-Hall, iar  $\xi$  este raportul dintre câmpurile efective datorate cuplurilor care acționează asupra magnetizării peretelui de domeniu induse de curent. Datorită simetriei acestor cupluri, câmpul magnetic efectiv datorat cuplului de anti-amortizare  $\mathbf{H}_{DL} = a_j \mathbf{m} \times \mathbf{p}$  este întotdeauna perpendicular pe direcția magnetizării peretelui de domeniu și este responsabil cu inducerea dinamicii magnetizării. Câmpul magnetic efectiv datorat cuplului field-like  $\mathbf{H}_{FL} = b_j \mathbf{p}$  este perpendicular pe direcția curentului de sarcină.

Cu alte cuvinte, în acest model simplificat, efectul curentului asupra magnetizării peretelui de domeniu este acela de a roti magnetizarea în plan cu un unghi  $\alpha$ . În plus, datorită prezenței interacțiunii DMI, curentul va roti magnetizarea în afara planului, ducând la deplasarea peretelui de domeniu. Cuplul datorat interacțiunii DMI,  $\boldsymbol{\tau}_{DMI} = -\gamma \mathbf{m} \times \mathbf{H}_{DMI}$  este influențat de amplitudinea interacțiunii și de unghi. Cuplul disipativ legat de deplasarea peretelui de domeniu este  $\boldsymbol{\tau}_\alpha = -\gamma \mathbf{m} \times \mathbf{H}_\alpha$ , în care  $H_\alpha = -(\alpha_G / \gamma) (\partial \mathbf{m} / \partial x)$ . Peretele de domeniu se deplasează datorită efectelor combinate ale cuplurilor  $\boldsymbol{\tau}_{DL}$ ,  $\boldsymbol{\tau}_{FL}$  și  $\boldsymbol{\tau}_{DMI}$ . Componenta în plan a

cuplului disipativ este definită ca  $\tau_{\alpha_{ip}} = \alpha_G \gamma [H_{DMI} \sin \alpha - b_j \cos(\alpha - \beta)] [-\sin \alpha \mathbf{i} + \cos \alpha \mathbf{j}]$ . Aceasta se opune cuplului de anti-amortizare, iar atunci când cele două cupluri sunt egale  $\tau_{DL} = \tau_{\alpha_{ip}}$ , ele se anulează reciproc stabilind un unghi  $\alpha$  fixat pentru magnetizare. Pentru un set de parametri de material dat, unghiul  $\alpha$  depinde de densitatea curentului de sarcină  $J_c$  și de unghiul  $\beta$  la care este aplicat curentul. Dacă cuplul field-like este mult mai mic decât cuplul de anti-amortizare ( $\xi \approx 0$ ), relația de mai sus devine:  $\cos(\alpha - \beta) = \frac{\alpha_G H_{DMI}}{a_j} \sin \alpha$ . Astfel, viteza peretelui de domeniu depinde atât de unghiul la care este aplicat curentul, cât și de unghiul în plan al magnetizării, care, la rândul său, depinde de densitatea curentului și de interacțiunea DMI. Prin urmare, prin controlul interacțiunii DMI și al unghiului curentului, putem controla eficient viteza peretelui de domeniu.

### 4.3. Simulări micromagnetice

Simulările micromagnetice au fost efectuate folosind MuMax<sup>3</sup>. Stratul feromagnetic este discretizat în celule de  $2 \text{ nm} \times 2 \text{ nm} \times 0,6 \text{ nm}$  și este amplasat deasupra unui strat de metal-greu. Folosim următorii parametri tipici pentru o structură dublu-strat de tipul Pt/CFB care corespund rezultatelor noastre experimentale: magnetizarea la saturație  $M_s = 1.37 \times 10^6 \text{ A/m}$ , constanta de schimb  $A = 10 \times 10^{-12} \text{ J/m}$ , constanta de anizotropie uniaxială perpendiculară  $K_u = 1.525 \times 10^6 \text{ J/m}^3$ , factorul de amortizare Gilbert  $\alpha_G = 0.6$ , unghiul Hall de spin  $\theta_{SHE} = 0.07$  și raportul dintre cuplurile datorate curentului de sarcină  $\xi = 0.2$  [41].

Figura 4.2(a) arată viteza unui perete de domeniu sus/jos calculată folosind simulări micromagnetice pentru o structură ideală, fără defecte de material. Structura este supusă unui tren de impulsuri de curent cu densitatea de curent de până la  $2 \times 10^{12} \text{ A/m}^2$  și durată a pulsurilor de 10ns. Impulsurile de curent sunt aplicate la unghiurile de  $45^\circ$ ,  $0^\circ$  și  $-45^\circ$  față de axa  $Ox$ . Considerăm o valoare a constantei DMI de  $|D| = 1,1 \text{ mJ/m}^2$ . Inițial, în lipsa curentului electric și pentru o valoare a constantei DMI suficient de mare, magnetizarea peretelui de domeniu  $\mathbf{m}$  se aliniază pe direcția câmpului efectiv datorat interacțiunii DMI ( $\mathbf{H}_{DMI}$ ), orientat pe axa  $Ox$  negativă, după cum se indică schematic în Fig.4.2(b)-i. La aplicarea unui curent de sarcină prin metalul greu, cuplul de anti-amortizare  $\tau_{DL} = -\gamma a_j \mathbf{m} \times (\mathbf{m} \times \mathbf{p})$  acționează asupra magnetizării peretelui de domeniu prin rotirea acesteia cu un unghi  $\alpha$  în plan, după cum se poate observa în Fig. 4.2(b)-ii. Cuplul asociat interacțiunii DMI  $\tau_{DMI} = -\gamma \mathbf{m}_{DW} \times \mathbf{H}_{DMI} = \gamma H_{DMI} (\sin \alpha) \mathbf{k}$  rotește magnetizarea peretelui de domeniu în afara planului cauzând deplasarea peretelui de domeniu. În principiu, viteza peretelui de domeniu depinde de densitatea curentului de sarcină și de proiecția magnetizării peretelui de domeniu în direcția curentului de sarcină, conform ecuației  $v \propto J_c \cos(\alpha - \beta)$ . Prin urmare, prin aplicarea unui curent de sarcină la diferite unghiuri  $\beta$  în raport cu direcția planului metalului greu, este posibil să creștem sau să scădem viteza peretelui de domeniu. La un curent relativ scăzut, cuplul de anti-amortizare este mic, rezultând un unghi de rotație al magnetizării mic, cu o valoare aproape de zero.

După cum este ilustrat în Fig. 4.2 (a), cea mai mare viteză este observată atunci când curentul este orientat în direcția  $Ox$  ( $\beta=0$ ), unde direcția curentului și magnetizarea peretelui de domeniu sunt cel mai bine aliniată în comparație cu celelalte unghiuri ( $\beta = 45^\circ$  și  $\beta = -45^\circ$ ). La densități de curent mai mari, unghiul de rotație al magnetizării  $\alpha$  devine mai mare. De exemplu, pentru impulsuri de curent cu densitatea egală cu  $1.6 \times 10^{12} \text{ A/m}^2$ , unghiul de rotație  $\alpha$  al magnetizării peretelui de domeniu, așa cum este prezentate în Fig. 4.2 (b)ii-iv, arată că la  $\beta = 45^\circ$ , direcția curentului și magnetizarea peretelui de domeniu sunt aliniată, ceea ce duce la obținerea unei viteze maxime. Cu toate acestea, atunci când curentul este aplicat de-a lungul axei  $Ox$  ( $\beta=0$ ), alinierea dintre direcția curentului și magnetizarea peretelui de domeniu este

redușă, ducând la o viteză mai mică. La  $\beta = -45^\circ$ , alinierea dintre direcția curentului și magnetizarea DW este cea mai mică, ceea ce conduce la viteza minimă. Datorită simetriei, comportamentul se inversează pentru un perete de domeniu jos/sus la aceeași densitate de curent: viteza este cea mai mare la  $\beta = -45^\circ$  și cea mai mică la  $\beta = 45^\circ$ , în timp ce la  $\beta = 0$  viteza este aceeași cu cea a DW sus/jos [fig. 4.2 (c) și (d)].

Pe baza acestor rezultate, observăm o asimetrie între viteza peretelui de domeniu atunci când curentul este aplicat la  $\beta = 45^\circ$  și atunci când este aplicat la  $\beta = -45^\circ$  față de direcția nanofirului. Această proprietate poate fi utilizată pentru a crea dispozitive în care există o asimetrie în deplasarea pereților de domeniu cu polaritate opusă. Ideea este de a proiecta un dispozitiv în care unghiul dintre curent și magnetizare este de  $45^\circ$  pentru a profita de această asimetrie.

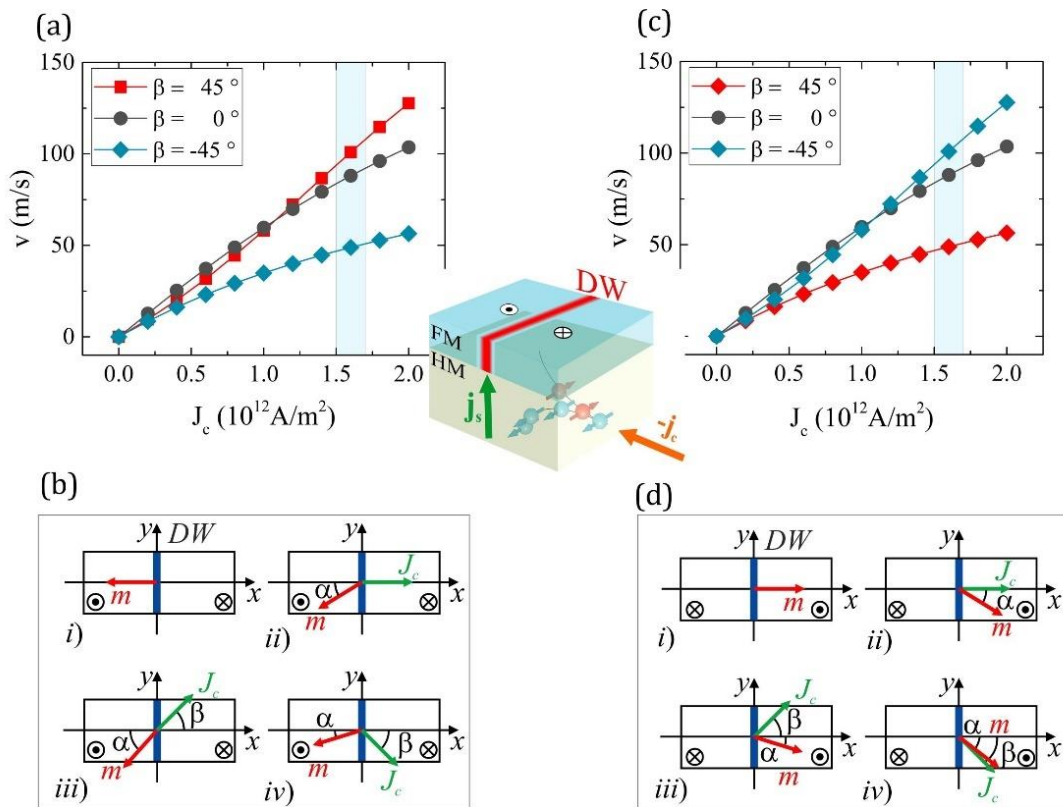


Fig. 4.2 (a) Viteza peretelui de domeniu sus/jos obținută din simulările micromagnetice pentru un nanofir ideal supusă unor impulsuri de curent cu lățimea de 10 ns și amplitudini de până la  $2 \times 10^{12}$  A/m $^2$ , considerând o valoare a constantei DMI de 1.1 mJ/m $^2$ . Impulsurile de curent sunt aplicate la  $\beta = 45^\circ, 0^\circ$  și  $-45^\circ$  relativ la axa Ox. Pentru impulsuri de curent cu amplitudinea mai mare decât  $1 \times 10^{12}$  A/m $^2$  viteza peretelui de domeniu este maximă dacă curentul este aplicat la  $\beta = 45^\circ$  și minimă dacă curentul este aplicat la  $\beta = -45^\circ$ . (b) Reprezentare schematică a magnetizării peretelui de domeniu în raport cu direcția curentului de sarcină pentru impulsurile de curent indicate de zona umbră în (a). În absența curentului, magnetizarea este aliniată cu câmpul DMI. La aplicarea curentului, cuplul de anti-amortizare rotește magnetizarea în sens trigonometric. Pentru un unghi al curentului  $\beta = 45^\circ$ ,  $J_c$  și  $m$  sunt relativ bine aliniate având în această situație o viteză maximă de deplasare. Pentru  $\beta = 0^\circ$ , alinierea este redusă, iar viteza peretelui de domeniu scade, în timp ce pentru  $\beta = -45^\circ$ , alinierea dintre curentul de sarcină și magnetizarea peretelui de domeniu este minimă, astfel că și viteza este minimă. (c) Viteza unui perete de domeniu jos/sus calculată în aceleași condiții ca în (a). Spre deosebire de (a), pentru impulsuri de curent de peste  $1 \times 10^{12}$  A/m $^2$ , viteza peretelui de domeniu este maximă dacă  $\beta = -45^\circ$  și minimă pentru  $\beta = 45^\circ$ . (d) Reprezentare schematică a magnetizării peretelui de domeniu  $m$  în raport cu direcția curentului de sarcină  $J_c$  pentru impulsurile de curent indicate de zona umbră din (c). În absența curentului,  $m$  se aliniază de-a lungul axei DMI. Atunci când se aplică curent, cuplul de anti-amortizare înclină magnetizarea peretelui de domeniu în sensul acelor de ceasornic. La  $\beta = -45^\circ$ ,  $J_c$  și  $m$  sunt relativ bine aliniate, rezultând o viteză maximă a peretelui de domeniu. La  $\beta = 0^\circ$ , alinierea este redusă și viteza scade, în timp ce la  $\beta = 45^\circ$ , alinierea minimă conduce la o viteză minimă.

#### 4.4. Creșterea și microstructurarea dispozitivelor

Din punct de vedere experimental, deoarece DMI este important, am creat două tipuri de probe: una cu DMI scăzut și alta cu DMI mare. Valoarea interacțiunii DMI a fost modificată prin ecranarea DMI indusă de stratul superior de platină prin introducerea unui strat de paladiu cu o grosime variabilă între 1 și 3 planuri atomice. Atât structura cu DMI scăzut compusă (LD – low DMI) din Si/SiO<sub>2</sub>/Ta(25)/Pt(60)/CFB(7)/Pd(2)/Pt(16), cât și structura cu DMI mare (HD- high DMI) compusă din Si/SiO<sub>2</sub>/Ta(25)/Pt(60)/CFB(6)/Pd(6)/Pt(12) au fost depuse pe substraturi de siliciu oxidate termic. Numerele din paranteze reprezintă grosimea fiecărui strat în angstromi, CFB indicând aliajul Co<sub>60</sub>Fe<sub>20</sub>B<sub>20</sub>.

Pentru a efectua experimentele cu impulsuri de curent, probele au fost microstructurate în conducte cu pereți de domeniu de 3 μm lățime, poziționate pe conducte de platină (Pt) de 26 μm lățime (a se vedea figura 4.3).

Procesul de microstructurare a implicat utilizarea fotolitografiei UV și gravura în fascicul de ioni de argon. În prima etapă de microstructurare a fost litografiat dispozitivul care conține atât linia de curent cât și partea activă magnetică, folosind un proces care presupune un dublu strat de polimer (LOR3A/Shibley 1813). Rolul stratului dublu de polimer este de a crea o adâncitură (undercut) în masca de fotorezist care îmbunătățește rugozitatea marginii și reduce la minimum redepunerile în timpul procesului de gravură. Pe urmă, prin corodare în fascicul de ioni de Ar și folosind o mască de titan de 1,5nm se elimină partea magnetică, aceasta păstrându-se doar în zona de interes. Structura magnetică a fost litografiată în diferite geometrii, iar una dintre ele proiectată în așa fel încât să avem un unghi de 45 de grade între conducta magnetică și linia de curent. La final au fost depuse contactele electrice prin tehnica lift-off.

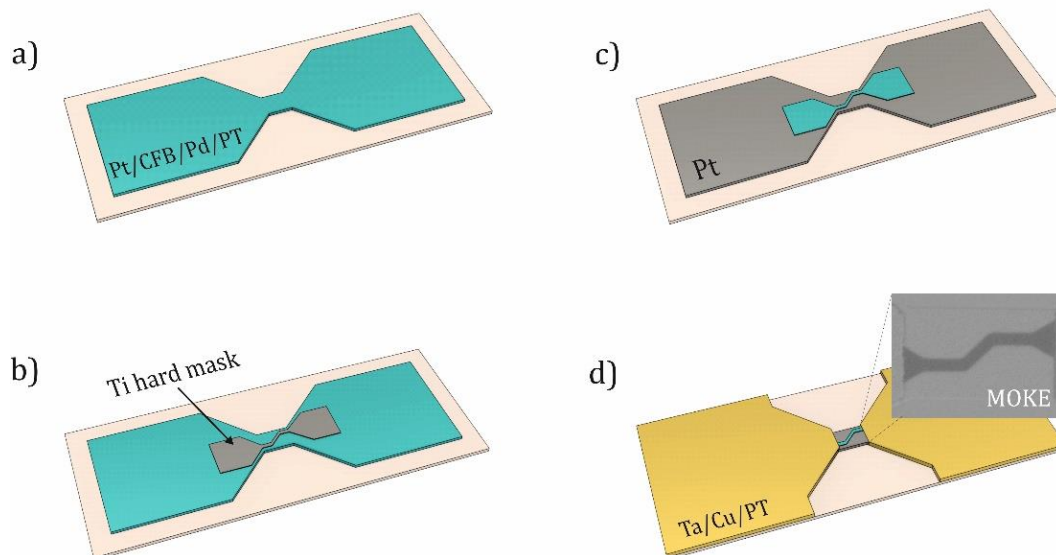


Fig. 4.31 Reprezentare schematică a principalelor etape de microstructurare a dispozitivului. (a) Structura Pt/CFB/Pd/Pt după gravare în fascicul de ioni de Ar, (b) depunerea măștii de Ti de 1,5 nm pentru a defini conducta magnetică, (c) Conducta cu pereți de domeniu după gravură în fascicul de ioni de Ar, (d) depunerea contactelor electrice Ta/Cu/Pt. Inserție: Imagine de microscopie MOKE a conductei cu pereți de domeniu modelată deasupra benzii de curent de Pt.



## 4.5. Dispozitive funcționale cu pereți de domeniu magnetic acționați de cuplurile datorate curentului de spin

### 4.5.1. Dispozitiv cu conductă dreaptă cu pereți de domeniu magnetic

Mai întâi, am analizat deplasarea pereților de domeniu indusă de curent într-un conductor drept. Domeniile magnetice au fost nucleate, iar pereții de domeniu au fost plasați în poziția lor inițială printr-o serie de impulsuri de câmp magnetic aplicat perpendicular, vezi Fig. 4.4 (a)-sus. În Fig. 4.4(a) - jos este reprezentată viteza peretelui de domeniu în funcție de amplitudinea impulsului de curent. Putem observa că atât probele cu DMI mic (LD), cât și cele cu DMI mare (HD) prezintă un comportament similar.

În mod explicit, odată ce amplitudinea impulsului de curent depășește o anumită valoare de prag, există o creștere semnificativă a vitezei, indicând o trecere de la regimul de creep, în care deplasarea peretelui de domeniu este determinată de activarea termică, la regimul de flow caracterizat prin mișcarea în regim staționar a peretelui de domeniu [11]. În plus, se observă debutul saturației vitezei peretelui de domeniu. Saturarea vitezei peretelui de domeniu are loc la o valoare mai mare pentru proba cu DMI mare - HD comparativ cu proba cu DMI mic - LD, ceea ce confirmă ipotezele legate de mecanismul format de interacțiunea DMI și cuplul de anti-amortizare.

În conductorul de Pt au fost aplicate impulsuri de tensiune cu amplitudine variabilă și durată de 2,75 ns, iar deplasarea peretelui de domeniu rezultată a fost observată cu ajutorul microscopiei magneto-optice cu efect Kerr (a se vedea Fig. 4.4 (b)-(e)). Pereții de domeniu prezintă un comportament clasic, se deplasează începând de la o anumită tensiune de prag după care ating o viteză de saturație. Pentru proba cu DMI mare, viteza se saturează la o valoare mai mare, în timp ce pentru proba cu DMI scăzut, viteza se saturează la o valoare mai mică. După cum era de așteptat, peretele de domeniu se deplasează în direcția curentului, deplasându-se într-o direcție pentru impulsurile pozitive respectiv în direcția opusă pentru impulsurile negative.

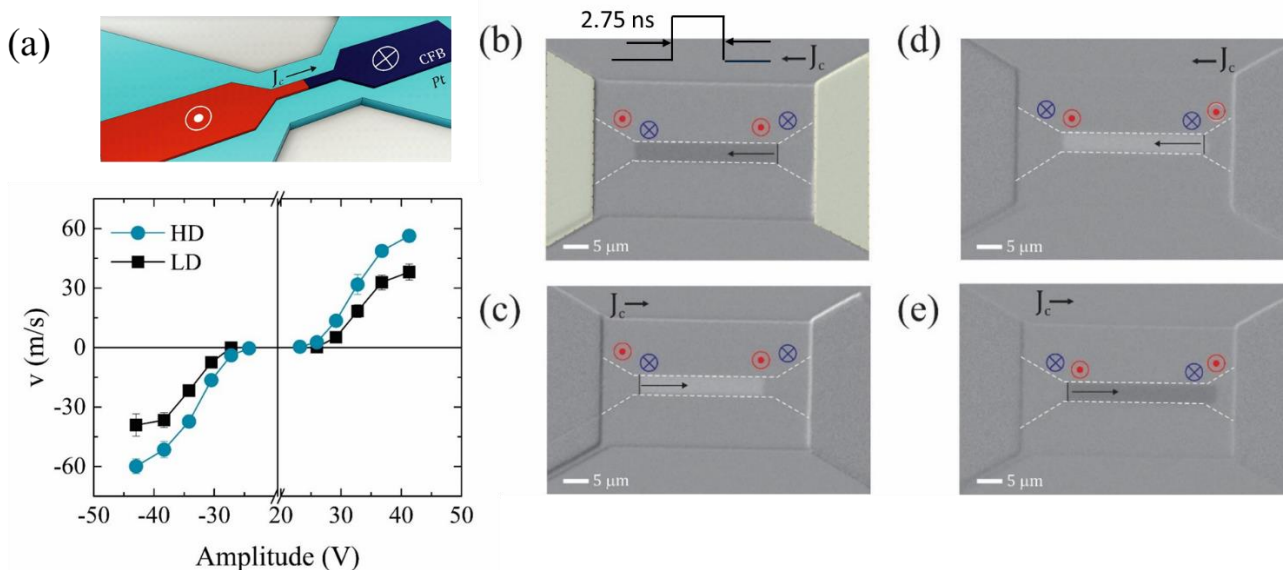


Fig. 4.4 (a) Viteza pereților de domeniu în funcție de amplitudinea impulsului pentru probele cu DMI mare și DMI mic. (b)-(e) Imagini diferențiale MOKE care arată propagarea pereților de domeniu după aplicarea impulsurilor de tensiune. Pereții de domeniu se deplasează în direcția curentului aplicat, în concordanță cu simulările micromagnetice.

#### 4.5.2. Dispozitiv cu conductă înclinată cu pereți de domeniu magnetic

În a doua etapă, conducta cu pereți de domeniu a fost proiectată astfel încât să includă o secțiune care formează un unghi de  $\pm 45^\circ$  față de direcția la care este aplicat curentul. Această configurație permite observarea deplasării peretelui de domeniu în cadrul aceleiași probe atunci când curentul este aplicat fie paralel cu conducta, fie la un unghi de  $\pm 45^\circ$  față de aceasta, așa cum este ilustrat schematic în figura 4.5. Un perete de domeniu jos/ sus este nucleat în partea stângă inferioară a structurii cu DMI scăzut - LD [figura 4.5 (a) - sus]. Atunci când se aplică o serie de  $N = 280$  de impulsuri pozitive, peretele de domeniu se deplasează prin întreaga conductă până la partea superioară a structurii. Aplicând același număr de impulsuri în direcție negativă, peretele domeniului se blochează în regiunea de  $45^\circ$  a conductei și nu revine la poziția inițială [fig. 4.5 (a)-(mijloc)]. Pentru a verifica dacă deplasarea peretelui de domeniu este într-adevăr blocată, a fost aplicat un număr de impulsuri de zece ori mai mare. Nu se observă nicio deplasare suplimentară a peretelui de domeniu [Fig. 4.5 (a)-jos]. Pentru a observa mai bine deplasarea peretelui de domeniu, am stabilit un interval de  $100\text{ ms}$  între impulsuri. Un comportament similar apare pentru un perete de domeniu cu polaritate opusă dacă direcția curentului este inversată (Fig. 4.5 (b)).

În cazul structurilor cu DMI mare, comportamentul pereților de domeniu este diferit. Figura 4.6 prezintă viteza peretelui de domeniu în zona de  $45^\circ$  normalizată la viteza din zona dreaptă atât pentru structura LD, cât și pentru structura HD. În cazul structurii LD, un perete de domeniu de tip jos/sus care se deplasează spre dreapta sau un perete de domeniu sus/jos care se deplasează spre stânga prezintă o viteză ușor mai mare în zona de  $45^\circ$  în comparație cu zona dreaptă. În schimb, în zona de  $45^\circ$ , un perete de domeniu jos/sus care se deplasează spre stânga sau un perete de domeniu sus/jos care se deplasează spre dreapta este întotdeauna blocat. În cazul probelor HD, viteza unui perete de domeniu jos/sus care se deplasează la dreapta sau a unui perete de domeniu sus/jos care se deplasează la stânga în zona de  $45^\circ$  este aproximativ egală cu viteza din zona dreaptă. Cu toate acestea, viteza unui perete de domeniu jos/sus care se deplasează spre stânga sau a unui perete de domeniu sus/jos care se deplasează spre dreapta este în medie de aproximativ zece ori mai mică decât viteza sa în zona dreaptă. În zona de  $45^\circ$ , viteza normalizată a unui perete de domeniu jos/sus care se deplasează spre dreapta sau a unui perete de domeniu sus/jos care se deplasează spre stânga este ușor mai mare în proba LD comparativ cu HD. Această observație este în concordanță cu modelul simplificat și cu simulările micromagnetice, care arată o asimetrie mai mare a vitezei pentru probele cu DMI mic la aceeași densitate de curent. Atunci când se ia în considerare un perete de domeniu jos/sus care se deplasează spre stânga sau un perete de domeniu sus/jos care se deplasează spre dreapta, forța care stă la baza deplasării peretelui de domeniu scade, făcând ca viteza peretelui de domeniu să depindă în principal de procesele de activare termică [61, 154, 176].

În proba LD cu DMI mai mic, scăderea forței care stă la baza deplasării peretelui de domeniu este atât de pronunțată încât nu este detectabilă nicio deplasare a peretelui de domeniu, chiar și după aplicarea unui număr de impulsuri de  $10 \times N$ . În schimb, în proba cu DMI mai mare, peretele de domeniu trece repede peste defectele de material, dar prezintă întâzieri mai lungi la fiecare defect, rezultând într-o scădere generală a vitezei cu un ordin de mărime. Acest fenomen, în care un perete de domeniu poate să se miște fără obstacole într-o direcție, în timp ce este împiedicat sau complet blocat în direcția opusă, demonstrează eficient funcționalitatea de diodă a dispozitivului cu perete de domeniu.

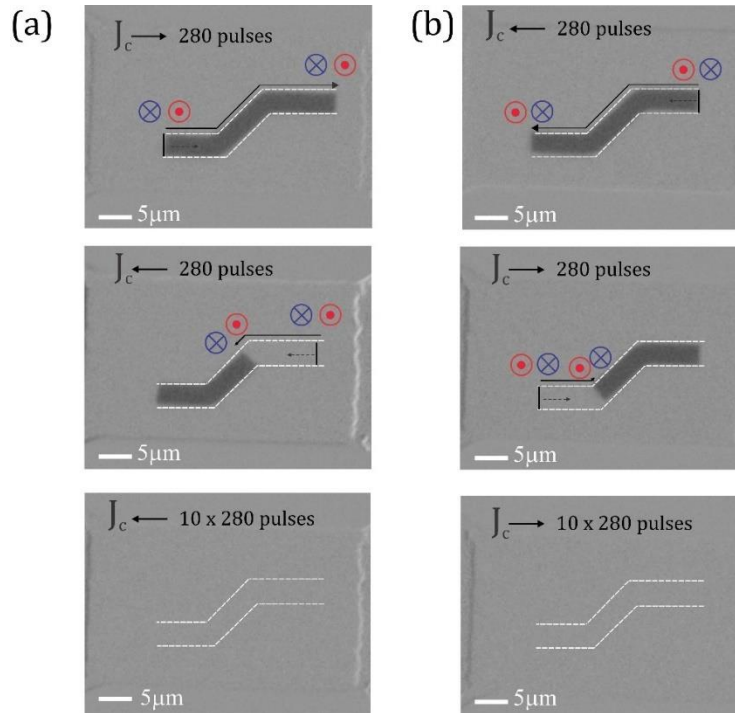


Fig. 4.5 În cazul structurii LD. (a) Un perete de domeniu jos/sus care se deplasează sub acțiunea a  $N = 280$  impulsuri pozitive (imaginea de sus) și negative (imaginea din mijloc). În cazul impulsurilor pozitive, peretele de domeniu se deplasează prin întreaga structură, iar în cazul impulsurilor negative mișcarea este blocată în zona de  $45^\circ$ , chiar și după aplicarea suplimentară a  $10 \times N$  impulsuri (imaginea de jos). (b) Un perete de domeniu sus/jos care se deplasează sub acțiunea a  $N = 280$  de impulsuri negative (imaginea de sus) și pozitive (imaginea din mijloc), cu un comportament similar celui din (a).

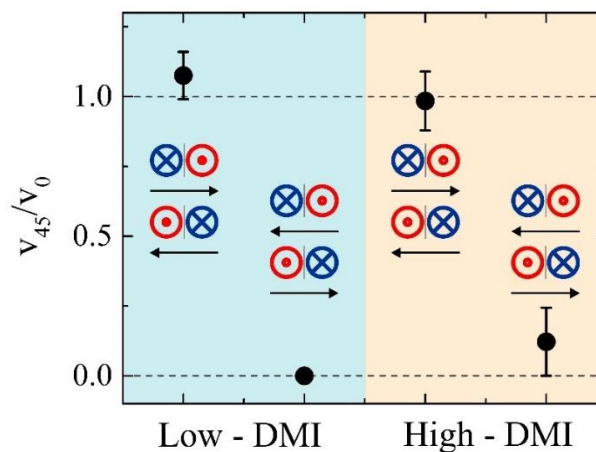


Fig. 4.6 Viteza peretelui de domeniu în zona de  $45^\circ$  normalizată la viteza în zona dreaptă pentru probele LD și HD. Punctele reprezintă valori medii, cu bare de eroare care se extind până la cele mai îndepărtate valori aberante.

### 4.5.3. Dispozitiv selector de pereți de domeniu

Asimetria vitezei corespunzătoare deplasării pereților de domeniu sus/jos și jos/sus în zona de  $45^\circ$  poate fi exploatată pentru a construi selectori de pereți de domeniu, a se vedea figura 4.7. Pentru a realiza acest lucru, am proiectat un dispozitiv în care conducta cu perete de domeniu dreaptă se împarte în două ramuri orientate la  $-45^\circ$  și  $45^\circ$  față de direcția pe care este

aplicat curentul. În funcție de polaritatea peretelui domeniului, acesta se deplasează de-a lungul unei ramuri sau a celeilalte.

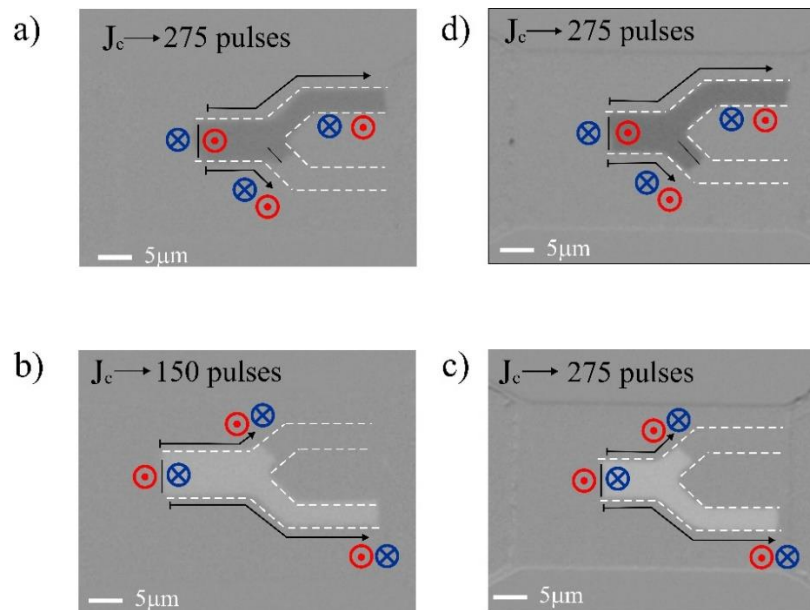


Fig. 4.7 Un selector de pereți de domeniu în formă de Y, cu două ramuri orientate la  $-45^\circ$  și  $45^\circ$  față de direcția curentului. Structura LD: (a) Un perete de domeniu jos/sus se deplasează sub acțiunea a  $N=275$  impulsuri pozitive. Peretele de domeniu se deplasează liber în ramura superioară, în timp ce în ramura inferioară deplasarea este blocată. (b) Un perete de domeniu sus/jos prezintă o simetrie în oglindă față de (a), peretele de domeniu fiind blocat în ramura superioară și deplasându-se liber în ramura inferioară. Structura HD: Pereții de domeniu jos/sus (c) sau sus/jos (d) arată un comportament similar structurii LD, dar la aplicarea a  $N=150$  impulsuri. Singura diferență față de cazul LD este că peretele de domeniu jos/sus (sus/jos) nu este complet blocat în ramura inferioară (superioară), dar se deplasează cu o viteză redusă.

## 5. Concluzii generale și perspective

Această teză abordează două subiecte cuprinzătoare: fezabilitatea integrării unui dispozitiv de valvă de spin cu magnetorezistență gigant într-un senzor de curent și evidențierea unor noi funcționalități în dispozitivele spinorbitronice.

În prima parte, teza de față se concentrează pe microfabricarea și caracterizarea magneto-electrică a unui dispozitiv cu valvă de spin bazat pe efectul de magnetorezistență gigant (GMR). Acest capitol include, de asemenea, implementarea și validarea a două modele de simulare PSpice care pot fi utilizate pentru a evalua performanța și funcționalitatea acestui tip de senzori în diferite scenarii. Procesul de microfabricare a implicat mai multe etape. Dispozitivele bazate pe valve de spin GMR au fost crescute pe substraturi de SiO<sub>2</sub> prin pulverizare catodică în magnetron și microfabricate prin litografie UV. În cele din urmă, structurile au fost tratate termic la diferite temperaturi pentru a le îmbunătăți proprietățile magnetice și magneto-electrice, cum ar fi cuplajul de schimb și raportul de magnetorezistență. Senzorul bazat pe GMR a prezentat un raport GMR de aproximativ 5% și o sensibilitate maximă de 80 mV/Oe.

O problemă importantă legată de senzorii de curent bazați pe GMR este lipsa modelelor electrice pentru simulatoarele de circuite electronice, cum ar fi PSpice. În această teză de doctorat au fost realizate, aplicând două metode, două modele PSpice ale unui senzor de curent GMR bazat pe o microstructură magnetorezistivă cu valvă de spin. Prima metodă este o abordare bazată pe tabele, care a folosit măsurători experimentale pentru a dezvolta modelul PSpice. Acuratețea acestui model este validată prin compararea rezultatelor simulării cu caracteristicile reale ale senzorului obținute din măsurătorile din laborator. A doua metodă

folosită pentru a modela comportamentul dispozitivului constă în obținerea cu ajutorul Matlab a unui polinom de ordin superior care să descrie cât mai fidel caracteristica de funcționare a dispozitivului. Ținând cont și de faptul că senzorul este sensibil la valori foarte mici ale câmpului magnetic, pentru a îmbunătăți acuratețea modelului în jurul lui 0 Oe, s-a optat pentru divizarea caracteristicii fix la valoarea de 0 Oe în două curbe distincte și generarea unui polinom pentru fiecare dintre ele. În felul acesta s-a ajuns la un compromis între ordinul polinomului și limitările impuse de Orcad. Pentru a evita erorile de convergență și pentru a reduce durata simulării s-a optat pentru polinoame de ordinul 4 acestea aproximând mai mult decât satisfăcător ambele porțiuni de caracteristică.

Ambele metode de modelare au demonstrat o precizie ridicată, aproximând comportamentul real al senzorului cu o eroare relativă de doar 0,014%. Parametri precum distanța dintre traseul de curent și senzorul GMR, tipul de dielectric utilizat în fabricarea PCB și poziția liniei de curent pe PCB pot fi definiți cu precizie. Această abordare crește eficiența și flexibilitatea caracterizării senzorului.

În a doua parte a tezei am studiat noi funcționalități în dispozitivele spinorbitronice prin exploatarea deplasării pereților de domeniu indusă de curent în sisteme de tip racetrack. În acest studiu, am arătat că separarea conductei peretelui de domeniu de linia de curent și modificarea unghiului dintre conducta magnetică și direcția curentului permite controlul precis al deplasării induse de curent a pereților de domeniu. Această tehnică permite ajustarea vitezei pereților de domeniu și oferă o abordare nouă pentru adăugarea de noi funcționalități dispozitivelor spinorbitronice.

Simulările micromagnetice efectuate în cadrul acestei teze de doctorat au arătat că într-o structură de tipul metal greu/feromagnet care prezintă anizotropie magnetică perpendiculară, cuplul de anti-amortizare produs de curentul de spin la interfața dintre metalul greu și feromagnet induce o asimetrie în viteza peretelui de domeniu atunci când curentul este aplicat la unghiuri de  $\pm 45^\circ$  față de conducta cu peretele de domeniu. Această proprietate poate fi exploatată pentru a controla eficient deplasarea peretelui de domeniu, permițând proiectarea de geometrii pentru conducta magnetică cu regiuni înclinate la 45 de grade față de linia de curent. Simulările micromagnetice au demonstrat că, pe lângă efectele geometrice asupra dinamicii peretelui de domeniu, interacțiunea Dzyaloshinskii-Moriya (DMI) influențează semnificativ asimetria vitezei peretelui de domeniu.

Pentru a demonstra experimental asimetria vitezei indusă de geometrie, am fabricat două tipuri de structuri. O structură cu interacțiune DMI relativ mică (LD) și una cu interacțiune DMI relativ mare (HD). Atât structura LD, constând din Si/SiO<sub>2</sub>/Ta(25)/Pt(60)/CFB(7)/Pd(2)/Pt(16), cât și structura HD, constând din Si/SiO<sub>2</sub>/Ta(25)/Pt(60)/CFB(6)/Pd(6)/Pt(12), unde numerele din paranteze reprezintă grosimea în angstromi a straturilor, au fost depuse pe substraturi de siliciu oxidat termic folosind pulverizarea catodică în magnetron. Pentru experimentele privind deplasarea peretelui de domeniu indusă de curent, probele au fost microfabricate în conducte cu pereți de domeniu de 3  $\mu\text{m}$  lățime, amplasate deasupra unei conducte de platină (Pt) de 26  $\mu\text{m}$  lățime, folosind tehnici de fotolitografie UV și gravură cu ioni de argon.

Experimentele de microscopie folosind efectul Kerr magneto-optic (MOKE) au confirmat simulările micromagnetice care arată că structurile LD și HD prezintă o asimetrie puternică între vitezele pereților de domeniu care se deplasează în regiunile înclinate la  $\pm 45^\circ$ . Această asimetrie poate fi exploatată în dispozitive cu pereți de domeniu care au un comportament asemănător cu diodele. În structurile LD, un perete de domeniu jos/sus (sau sus/jos) se deplasează liber prin structură la aplicarea unui tren de impulsuri de curent pozitive (sau negative). Prin inversarea curentului, deplasarea peretelui de domeniu este blocată în zona de  $45^\circ$ , confirmând eficiența controlului geometric în manipularea deplasării peretelui de

domeniu. În probele HD, comportamentul a fost similar, dar cu o excepție importantă: deși mișcarea peretelui de domeniu nu a fost complet blocată în zona de  $45^\circ$ , viteza sa a fost redusă semnificativ cu aproximativ un ordin de mărime.

Profitând de asimetria observată în viteza pereților de domeniu, am construit cu succes selectoare de pereți de domeniu. Într-o conductă cu pereți de domeniu în formă de Y, cu o intrare și două ieșiri înclinate la  $45^\circ$  și  $-45^\circ$ , un perete de domeniu injectat în joncțiune se propagă printr-o ramură, în timp ce un perete de domeniu cu polaritate opusă se deplasează prin cealaltă ramură.

În concluzie, studiul de față stabilește o bază pentru utilizarea controlului geometric în manipularea deplasării pereților de domeniu indusă de curenți. Prin sinergia dintre perspectivele teoretice, simulările micromagnetice și validarea experimentală, am demonstrat fezabilitatea și potențialul acestei abordări. Capacitatea de a construi diode cu pereți de domeniu și selectoare de pereți de domeniu deschide calea către dezvoltarea unor porți logice spinorbitronice. Aceste porți logice ar putea efectua operații logice bazate pe deplasarea controlată a pereților de domeniu. Prin ajustarea configurațiilor geometrice, ar putea fi posibilă proiectarea unor circuite complexe care exploatează proprietățile intrinseci ale materialelor spinorbitronice, ducând la dispozitive de calcul mai eficiente din punct de vedere energetic și mai rapide. Una dintre cele mai importante aplicații potențiale este în calculul neuromorf, unde dispozitivele spintronice ar putea imita funcționalitatea neuronilor și sinapselor. Prin exploatarea asimetriei vitezei și a controlului geometric al pereților de domeniu, ar putea fi create rețele neuronale artificiale cu capacități de învățare îmbunătățite și eficiență energetică, transformând aplicațiile de învățare automată și inteligență artificială.

## **Contribuții personale**

### **CAPITOLUL 2**

- Am contribuit la configurarea setup-ului experimental utilizat pentru caracterizarea magneto-electrică a dispozitivelor GMR.
- Am contribuit la configurarea și punerea în funcțiune a setup-ului experimental utilizat pentru experimentele de deplasare a pereților de domeniu indusă de curenți și câmp magnetic.
- Am contribuit la dezvoltarea unui program LabVIEW pentru a automatiza sistemul de măsură utilizat în cadrul experimentelor noastre de deplasare a pereților de domeniu indusă de curenți. Acest program a fost conceput special pentru a respecta cerințele specifice ale acestor experimente, pentru a îmbunătăți precizia și pentru a îmbunătăți eficiența generală.
- Am contribuit la dezvoltarea software-ului MuMax<sup>3</sup> și la configurarea diferitelor geometrii ale dispozitivelor studiate în cadrul acestei teze de doctorat.

### **CAPITOLUL 3**

- Am fost responsabilă cu efectuarea litografiei UV pentru majoritatea probelor studiate. Am realizat procesul de microstructurare pentru structurile bazate pe valve de spin de GMR.

- Am efectuat caracterizarea magneto-electrică a structurilor cu valve de spin bazate pe efectul GMR. Aceasta a implicat măsurarea variației rezistenței electrice ca răspuns la aplicarea unui câmp magnetic extern și măsurarea sensibilității microstructurii.
- Am optimizat microstructurile pentru a îmbunătăți atât cuplajul de schimb, cât și raportul magnetorezistiv. Acest lucru a implicat procese de tratament termic, în care probele au fost expuse la câmpuri magnetice controlate la diferite temperaturi. Cel mai bun cuplaj de schimb a fost obținut pentru tratamentele termice efectuate la temperaturi mai mari de 275 °C. Un raport de magnetorezistență de aproximativ 5% este observat pentru probele tratate termic la 275°C. Sensibilitatea maximă obținută de 80 mΩ/Oe a fost măsurată la un câmp magnetic de 50 Oe. Această valoare este comparabilă cu cea a senzorilor Hall semiconductori convenționali.
- Am propus o metodă de modelare PSpice pentru a descrie comportamentul unui senzor de curent GMR folosind o abordare empirică bazată pe Look-Up Table (LUT). Această metodă utilizează măsurătorile experimentale pentru a construi modelul. Metoda a fost validată prin compararea rezultatelor simulării cu caracteristicile senzorului real din măsurătorile efectuate în laborator.
- Am dezvoltat o metodă de modelare PSpice pentru un senzor de curent GMR care constă în descrierea analitică a caracteristicii de funcționare a senzorului și implementarea polinomului de ordin superior în Pspice. Metoda a fost validată prin compararea rezultatelor simulării cu caracteristicile reale ale senzorului din măsurătorile de laborator și prin încrucișarea acestor rezultate cu datele din metoda tabelelor de căutare.
- Am utilizat cele două modele PSpice propuse pentru a simula senzorul comercial de curent GMR NVE AA002. Acest lucru a validat eficiența acestor metode de modelare și a demonstrat adaptabilitatea lor la diferite configurații și condiții de funcționare ale senzorului.

## CAPITOLUL 4

- Am efectuat simulări micromagnetice în MuMax3, un software de simulare micromagnetică accelerat de GPU pentru a studia în detaliu dinamica pereților de domeniu în diferite condiții. Am configurat și am efectuat simulări pentru a modela comportamentul magnetic al nanostructurilor, prin baleierea sistematică a unor parametri precum geometria dispozitivului, interacțiunea DMI, densitatea curentului, unghiul la care este aplicat curentul și câmpul magnetic extern.
- Am fost responsabilă pentru efectuarea procesului de fotolitografie UV pentru dispozitivele cu pereți de domeniu magnetic. Această sarcină a implicat fabricarea de modele care permit manipularea și controlul pereților de domeniu magnetic, esențial pentru următoarea generație de aplicații de stocare a datelor sau alte aplicații.

- Pe parcursul tezei, a trebuit să rezolvăm o problemă experimentală semnificativă de reducere a rugozității marginilor. Deoarece marginile dispozitivului microstructurat prin litografie UV standard erau extrem de rugoase, am optimizat o procedură care utilizează un proces cu strat dublu de fotorezist (LOR3A și Shipley S1813) combinat cu o mască dură din titan (Ti). Am efectuat mai multe experimente pentru a determina rețeta optimă pentru procesul cu strat dublu de fotorezist.
- Am efectuat o analiză a proprietăților magnetice ale probelor prin măsurători realizate folosind magnetometrul cu probă vibrantă (VSM). Această tehnică a permis să determinăm cu exactitate parametrii magnetici esențiali precum magnetizarea la saturație, coercitivitatea și ciclul de histereză, oferind informații importante despre comportamentul și performanța probelor.
- Am efectuat experimente de microscopie magneto-optică Kerr pentru a studia deplasarea indusă de curent a pereților de domeniu. Experimentele au validat simulările micromagnetice.
- S-a demonstrat că, prin ajustarea unghiului dintre conducta cu peretele de domeniu și linia de curent, putem obține un control geometric suplimentar al deplasării peretelui de domeniu indusă de curent.
- Am arătat că, prin proiectarea formei conductei peretelui de domeniu și optimizarea constantei DMI, putem obține funcționalitatea unei diode cu pereți de domeniu. În această configurație, peretele de domeniu se deplasează unidirecțional sub influența curentului, în timp ce mișcarea în direcția opusă este semnificativ împiedicată sau complet blocată.
- Folosind asimetria observată în viteza pereților de domeniu, am reușit să construim selectori de pereți de domeniu. Într-o conductă cu perete de domeniu în formă de Y cu o ramură de intrare și două ramuri de ieșire înclinate la  $45^\circ$  și  $-45^\circ$  față de direcția pe care este aplicat curentul în structură, un perete de domeniu injectat în joncțiune se deplasează printr-o ramură, în timp ce un perete de domeniu de polaritate opusă se deplasează prin cealaltă ramură.



## REFERENCES

- [1] B. Dieny, I. L. Prejbeanu, K. Garello, P. Gambardella, P. Freitas, R. Lehndorff, W. Raberg, U. Ebels, S. O. Demokritov, J. Akerman, A. Deac, P. Pirro, C. Adelmann, A. Anane, A. V. Chumak, A. Hirohata, S. Mangin, Sergio O. Valenzuela, M. Cengiz Onbaşlı, M. d’Aquino, G. Prenat, G. Finocchio, L. Lopez-Diaz, R. Chantrell, O. Chubykalo-Fesenko and P. Bortolotti, “Opportunities and challenges for spintronics in the microelectronics industry”, *Nature Electronics*, vol. 3, no. 8, pp. 446–459, Aug. 2020, doi: 10.1038/s41928-020-0461-5.
- [2] A. Manchon, J. Železný, I. Miron, T. Jungwirth, J. Sinova, A. Thiaville, K. Garello, P. Gambardella, “Current-induced spin-orbit torques in ferromagnetic and antiferromagnetic systems”, *Reviews of Modern Physics*, vol. 91, no. 3, p. 035004, Sep. 2019, doi: 10.1103/RevModPhys.91.035004.
- [3] S. Bhatti, R. Sbiaa, A. Hirohata, H. Ohno, S. Fukami, and S. N. Piramanayagam, “Spintronics based random access memory: a review”, *Materials Today*, vol. 20, no. 9, pp. 530–548, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.mattod.2017.07.007.
- [4] S. Jung, H. Lee, S. Myung, H. Kim, S. K. Yoon, S.-Wan Kwon, Y. Ju, M. Kim, W. Yi, S. Han, B. Kwon, B. Seo, Kilho Lee, G. Koh, Kangho Lee, Yoonjong Song, Changkyu Choi, Do-Hyun Ham, Sang Joon Kim, “A crossbar array of magnetoresistive memory devices for in-memory computing”, *Nature*, vol. 601, no. 7892, pp. 211–216, Jan. 2022, doi: 10.1038/s41586-021-04196-6.
- [5] L. Wu, S. Rao, M. Taouil, E. J. Marinissen, G. Sankar Kar and S. Hamdioui, “Testing STT-MRAM: Manufacturing Defects, Fault Models, and Test Solutions”, 2021 IEEE International Test Conference (ITC), Anaheim, CA, USA, 2021, pp. 143-152, doi: 10.1109/ITC50571.2021.00022.
- [6] H. K. Lachowicz, “Modern Soft Magnetic Materials,” *MSF*, vol. 414–415, pp. 139–146, Jan. 2003, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.414-415.139.
- [7] K. H. J. Buschow and F. R. de Boer, “Physics of Magnetism and Magnetic Materials”, Boston, MA: Springer US, 2003. doi: 10.1007/b100503, ISBN: 978-1-4757-0567-6.
- [8] L. Landau and E. Lifshitz, “On the theory of the dispersion of magnetic permeability in ferromagnetic bodies,” in Elsevier eBooks, 1992, pp. 51–65. doi: 10.1016/b978-0-08-036364-6.50008-9.
- [9] T. L. Gilbert, “Classics in Magnetism A Phenomenological Theory of Damping in Ferromagnetic Materials,” *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 40, no. 6, pp. 3443–3449, Nov. 2004, doi: 10.1109/TMAG.2004.836740.
- [10] P. Chauve, T. Giamarchi, and P. Le Doussal, “Creep and depinning in disordered media,” *Physical Review B*, vol. 62, no. 10, pp. 6241–6267, Sep. 2000, doi: 10.1103/PhysRevB.62.6241.
- [11] P. J. Metaxas J. P. Jamet, A. Mougin, M. Cormier, J. Ferré, V. Baltz, B. Rodmacq, B. Dieny, and R. L. Stamps, “Creep and Flow Regimes of Magnetic Domain-Wall Motion in Ultrathin Pt / Co / Pt Films with Perpendicular Anisotropy,” *Physical Review Letters*, vol. 99, no. 21, p. 217208, Nov. 2007, doi: 10.1103/PhysRevLett.99.217208.
- [12] A. Thiaville, S. Rohart, É. Jué, V. Cros, and A. Fert, “Dynamics of Dzyaloshinskii domain walls in ultrathin magnetic films,” *EPL (Europhysics Letters)*, vol. 100, no. 5, p. 57002, Dec. 2012, doi: 10.1209/0295-5075/100/57002.
- [13] C. Reig, S. Cardoso, and S. C. Mukhopadhyay, “Giant Magnetoresistance (GMR) Sensors: From Basis to State-of-the-Art Applications,” vol. 6. in *Smart Sensors, Measurement and Instrumentation*, vol. 6, Springer Berlin Heidelberg, 2013. doi: 10.1007/978-3-642-37172-1, eISBN: 978-3-642-37172-1.

- [14] S. A. Campbell, "The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication," 2nd edition, Oxford University Press, 2001, ISBN-13 978-0195136050.
- [15] J. Kerr, "XLIII. On rotation of the plane of polarization by reflection from the pole of a magnet," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 3, no. 19, pp. 321–343, May 1877, doi: 10.1080/14786447708639245.
- [16] E.-M. Stetco, A.-C. Davidas, T. Petrisor, M. Gabor, and O. A. Pop, "Design and Characterization of a Micrometric Magnetoresistive Sensor," in 2019 IEEE 25th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), Cluj-Napoca, Romania: IEEE, Oct. 2019, pp. 54–57. doi: 10.1109/SIITME47687.2019.8990875.
- [17] E. M. Stetco, O. A. Pop, A. Grama, D. Pitica, and M. S. Gabor, "Manufacturing, Characterization, and Simulation Model Design for a Current Sensor Based on a Spin-Valve Magnetoresistive Microstructure," *IEEE Trans. Compon., Packag. Manufact. Technol.*, vol. 12, no. 3, pp. 422–428, Mar. 2022, doi: 10.1109/TCPMT.2022.3151952.
- [18] Z. Xiaodong, Q. Zheng, and P. Kaikai, "The Analysis of Hysteresis in the Spin Valve Magneto-resistance," in 2013 Third International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control, Shenyang, China: IEEE, Sep. 2013, pp. 736–739. doi: 10.1109/IMCCC.2013.163.
- [19] J. Nogués and I. K. Schuller, "Exchange bias," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 192, no. 2, pp. 203–232, Feb. 1999, doi: 10.1016/S0304-8853(98)00266-2.
- [20] B. Nikolova, G. Nikolov, and M. Hristov, "Analogue Behavioural Modelling of Integrated Sensors," in 2006 International Conference on Computer Engineering and Systems, Cairo: IEEE, Nov. 2006, pp. 107–112. doi: 10.1109/ICCES.2006.320433.
- [21] B. Nikolova, G. Nikolov, and M. Todorov, "SPICE modelling of magnetoresistive sensors," *IJRIS (International Journal of Reasoning-based Intelligent Systems)*, vol. 6, no. 1/2, p. 12, 2014, doi: 10.1504/IJRIS.2014.063948.
- [22] C. Jourdana, "Mathematical modeling and numerical simulation of innovative electronic nanostructures," UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, Università degli studi di Pavia, 2011.
- [23] A. Fert, V. Cros, and J. Sampaio, "Skyrmions on the track," *Nature Nanotechnology*, vol. 8, no. 3, pp. 152–156, Mar. 2013, doi: 10.1038/nnano.2013.29.
- [24] S. S. P. Parkin et al., "Giant tunnelling magnetoresistance at room temperature with MgO (100) tunnel barriers," *Nature Materials*, vol. 3, no. 12, pp. 862–867, Dec. 2004, doi: 10.1038/nmat1256.
- [25] S. Ikeda, K. Miura, H. Yamamoto, K. Mizunuma, H. D. Gan, M. Endo, S. Kanai, J. Hayakawa, F. Matsukura and H. Ohno, "A perpendicular-anisotropy CoFeB–MgO magnetic tunnel junction," *Nature Materials*, vol. 9, no. 9, pp. 721–724, Sep. 2010, doi: 10.1038/nmat2804.
- [26] D. A. Allwood, G. Xiong, C. C. Faulkner, D. Atkinson, D. Petit, and R. P. Cowburn, "Magnetic Domain-Wall Logic," *Science*, vol. 309, no. 5741, pp. 1688–1692, Sep. 2005, doi: 10.1126/science.1108813.
- [27] Z. Luo, A. Hrabec, T. P. Dao, G. Sala, S. Finizio, J. Feng, S. Mayr, J. Raabe, P. Gambardella and L. J. Heyderman, "Current-driven magnetic domain-wall logic," *Nature*, vol. 579, no. 7798, pp. 214–218, Mar. 2020, doi: 10.1038/s41586-020-2061-y.
- [28] J. Sampaio, V. Cros, S. Rohart, A. Thiaville, and A. Fert, "Nucleation, stability and current-induced motion of isolated magnetic skyrmions in nanostructures," *Nature Nanotechnology*, vol. 8, no. 11, pp. 839–844, Nov. 2013, doi: 10.1038/nnano.2013.210.
- [29] S. S. P. Parkin, M. Hayashi, and L. Thomas, "Magnetic Domain-Wall Racetrack Memory," *Science*, vol. 320, no. 5873, pp. 209–211, Apr. 2008, doi: 10.1126/science.1154587.

- [30] Z. Luo, A. Hrabec, T. P. Dao, G. Sala, S. Finizio, J. Feng, S. Mayr, J. Raabe, P. Gambardella and L. J. Heyderman, “Current-driven magnetic domain-wall logic,” *Nature*, vol. 579, no. 7798, pp. 214–218, Mar. 2020, doi: 10.1038/s41586-020-2061-y.
- [31] I. M. Miron, T. Moore, H. Szambolics, L.D. Buda-Prejbeanu, S. Auffret, B. Rodmacq, S. Pizzini, J. Vogel, M. Bonfim, A. Schuhl and G. Gaudin, “Fast current-induced domain-wall motion controlled by the Rashba effect,” *Nature Materials*, vol. 10, no. 6, pp. 419–423, Jun. 2011, doi: 10.1038/nmat3020.
- [32] O. Boulle, L. D. Buda-Prejbeanu, E. Jué, I. M. Miron, S. Pizzini, J. Vogel, G. Gaudin, and A. Thiaville, “Domain Wall Tilting in the Presence of the Dzyaloshinskii-Moriya Interaction in Out-of-Plane Magnetized Magnetic Nanotracks,” *Physical Review Letters*, vol. 111, no. 21, p. 217203, Nov. 2013, doi: 10.1103/PhysRevLett.111.217203.
- [33] C. Garg, S.-H. Yang, T. Phung, A. Pushp, and S. S. P. Parkin, “Dramatic influence of curvature of nanowire on chiral domain wall velocity,” *Science Advances*, vol. 3, no. 5, p. e1602804, May 2017, doi: 10.1126/sciadv.1602804.
- [34] Y. Guan, X. Zhou, F. Li, T. Ma, S.-H. Yang, and S. S. P. Parkin, “Ionitronic manipulation of current-induced domain wall motion in synthetic antiferromagnets,” *Nature Communications*, vol. 12, no. 1, p. 5002, Aug. 2021, doi: 10.1038/s41467-021-25292-1.
- [35] C. Garg, A. Pushp, S.-H. Yang, T. Phung, B. P. Hughes, C. Rettner, S. S. P. Parkin, “Highly Asymmetric Chiral Domain-Wall Velocities in Y-Shaped Junctions,” *Nano Letters*, vol. 18, no. 3, pp. 1826–1830, Mar. 2018, doi: 10.1021/acs.nanolett.7b05086.
- [36] C. K. Safeer, E. Jué, A. Lopez, L. Buda-Prejbeanu, S. Auffret, S. Pizzini, O. Boulle, I.M.Miron and G. Gaudin, “Spin-orbit torque magnetization switching controlled by geometry,” *Nature Nanotechnology*, vol. 11, no. 2, pp. 143–146, Feb. 2016, doi: 10.1038/nnano.2015.252.
- [37] P. M. Haney, H.-W. Lee, K.-J. Lee, A. Manchon, and M. D. Stiles, “Current induced torques and interfacial spin-orbit coupling: Semiclassical modeling,” *Physical Review B*, vol. 87, no. 17, p. 174411, May 2013, doi: 10.1103/PhysRevB.87.174411.
- [38] J. C. Slonczewski, “Current-driven excitation of magnetic multilayers,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 159, no. 1–2, pp. L1–L7, Jun. 1996, doi: 10.1016/0304-8853(96)00062-5.
- [39] L. Berger, “Emission of spin waves by a magnetic multilayer traversed by a current,” *Physical Review. B, Condensed Matter*, vol. 54, no. 13, pp. 9353–9358, Oct. 1996, doi: 10.1103/PhysRevB.54.9353.
- [40] F. Büttner, I. Lemesh, M. Schneider, B. Pfau, C. M. Günther, P. HESSING, J. Geilhufe, L. Caretta, D. Engel, B. Krüger, J. Viehhaus, S. Eisebitt and G. S. D. Beach, “Field-free deterministic ultrafast creation of magnetic skyrmions by spin-orbit torques,” *Nature Nanotechnology*, vol. 12, no. 11, pp. 1040–1044, Nov. 2017, doi: 10.1038/nnano.2017.178.
- [41] M. S. Gabor, M. Belmeguenai, and I. M. Miron, “Bulk and interface spin-orbit torques in Pt/Co/MgO thin film structures,” *Physical Review. B*, vol. 109, no. 10, p. 104407, Mar. 2024, doi: 10.1103/PhysRevB.109.104407.

## LIST OF PUBLICATIONS

1. **E. M. Stetco**, O. A. Pop, A. Grama, and D. Csipkes, Design, Modelling and Simulation of a Fifth Order Low-Pass Gm-C Filter, 41<sup>th</sup> International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), 2018, Zlatibor, Serbia, ISSN: 2161-2536, DOI: 10.1109/ISSE.2018.8443770, WOS:000449866600091.
2. **E. M. Stetco**, O. A. Pop, A. Grama, D. Csipkes, and E. Ceuca, Design and Simulation of a Sixth Order Band-Pass Gm-C Filter, IEEE 24<sup>th</sup> International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), 2018, Iași, România, DOI: 10.1109/SIITME.2018.8599271, WOS:000466960400041.
3. M. A. Ilie, **E.M. Stetco**, L. Viman and D. Pitica, AC Coupled Instrumentation Amplifier with Gytrators, 42<sup>th</sup> International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), 2019, Wroclaw, Poland, ISSN: 2161-2536, DOI: 10.1109/ISSE.2019.8810302, WOS:000507501000074.
4. Grama, D. Petreus, B. Bia, O. Coca, G. Petrasuc, V. Socaciu, and **E. M. Stetco**, Personal Assistant Based on Internet of Things, IEEE 25<sup>th</sup> International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), 2019, Cluj-Napoca, România, ISSN: 2642-7036, DOI: 10.1109/SIITME47687.2019.8990799, WOS:000564733700051.
5. **E.M. Stetco**, O. A. Pop, C. A. Davidas, T. Petrisor Jr., and M. S. Gabor, Design and Characterization of a Micrometric Magneto-resistive Sensor, IEEE 25<sup>th</sup> International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), 2019, Cluj-Napoca, România, ISSN: 2642-7036, DOI: 10.1109/SIITME47687.2019.8990875, WOS:000564733700009.
6. A. Grama, **E.M. Stetco**, O. A. Pop, and O. Pop, Autonomous Robot for House Supervision Based on Personal Assistance Technology, 43<sup>rd</sup> International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Slovakia, 2020, ISSN: 2161-2536, DOI: 10.1109/ISSE49702.2020.9120882, WOS:000610543500006.
7. **E.M. Stetco**, O. A. Pop, M. S. Gabor, A. Grama, and D. Pitica, PSpice Model for a Current Sensor Based on Spin-Valve Magneto-resistive Microstructure, Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC), 2020, Vestfold, Norway, ISBN:978-1-7281-6294-2, DOI: 10.1109/ESTC48849.2020.9229833, WOS:000631824100095.
8. Modelling, Simulation and Performance Analysis of K-Thermocouples using PSPICE. **M. Stetco**, O. A. Pop, and A. Grama, Simulation Model of a GMR Based Current Sensor, IEEE 26<sup>th</sup> International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), 2020, Pitesti, Romania, ISBN: 978-1-7281-7507-2, DOI:10.1109/SIITME50350.2020.9292159, WOS:000651085100001.
9. A. C. Davidas, O. Pop, A. Grama, **E. M. Stetco** and T. Petrișor, "Testing of the Noise Measurement System for GMR Sensors," 2021 IEEE 27<sup>th</sup> International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), Timisoara, Romania, 2021, pp. 37-40, doi: 10.1109/SIITME53254.2021.9663420, WOS:000786441900010.
10. **E. M. Stetco**, O. A. Pop, A. Grama, D. Pitica and M. S. Gabor, "Manufacturing, Characterization, and Simulation Model Design for a Current Sensor Based on a Spin-Valve Magneto-resistive Microstructure," in *IEEE Transactions on Components*,

*Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 12, no. 3, pp. 422-428, March 2022, doi: 10.1109/TCPMT.2022.3151952, WOS:000792916300009.

11. A. Grama, A. Fodor, C. Davidas, **E. M. Stetco** and O. A. Pop, "Modelling, Simulation and Performance Analysis of K-Thermocouples using PSPICE", *2023 IEEE 29th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, Craiova, Romania, 2023, pp. 106-109, doi: 10.1109/SIITME59799.2023.10431205.
12. E. Stetco, T. Petrisor jr., O. Pop, M. Belmeguenai, I.M. Miron, M.S. Gabor, Diode and selective routing functionalities controlled by geometry in current-induced spin-orbit torque driven magnetic domain wall devices – submitted, under review.