



UNIVERSITATEA BABEȘ-BOLYAI

Facultatea de Fizică

Școala Doctorală de Fizică



Rezumatul Tezei de Doctorat

Manipularea magnetizării în cadrul VCMA: un studiu multi-scală,
de la proprietăți fundamentale ale materialelor la dinamica
magnetizării

Roxana-Alina ONE

Conducător științific:

Prof. Dr. Coriolan Viorel TIUȘAN

April 2024

Thesis table of contents

List of Abbreviations	7
List of Tables	9
List of Figures.	11
Chapter 1: Introduction	18
1.1 Description of the general framework of the thesis: magnetization manipulation in spintronic devices with enhanced efficiency (low power consumption)	19
1.1.1 Concept of a spintronic device (e.g. MTJ) and applications in data storage technologies (MRAM)	20
1.1.2 Overview on standard and alternative magnetization manipulation issues: magnetic field, spin torque, spin-orbitronics, all optical, electric field, magneto-electric/magneto-elastic, mixed strategies	22
1.1.3 Specific aspects related to electric field switching: very brief references from the state of the art and open questions	26
1.2 Brief/synthetic description of the main objectives of the thesis and research methodology (theoretical and experimental approach)	27
1.3 Brief presentation of the thesis content: content and main ideas of each chapter, important original results, brief presentation of remaining unanswered questions with respect to initial objectives and perspectives	28
Chapter 2: Background of magnetization manipulation in novel generation spintronic devices	32
2.1 Non-volatile data storage devices based on magnetic tunnel junctions: from basic tunneling to MRAMs	34
2.2 Magnetization manipulation with low power consumption: from standard to alternative strategies.	39
2.3 MTJ integration issues in next generation spin-torque memories	41
2.4 Electric field magnetization manipulation concept: from basic physics to yet unanswered questions	41
2.4.1 Anatomy of perpendicular magnetic anisotropy in thin-film magnetic heterostructures	42
2.4.2 Electric field (voltage) control of anisotropy (VCMA)	42
2.4.3 Switching by electric field pulses	43
2.5 The main objectives of the thesis and the research methodology within a multiscale approach	44
Chapter 3: Theoretical and experimental tools involved in the multiscale approach	46
3.1 Theoretical modeling tools	46
3.1.1 Analytical quantum mechanics modeling: Rashba and Stoner	46
3.1.2 Ab initio calculations	47
3.1.3 Basics of micromagnetic simulations: LLG dynamic equation	48
3.1.4 Atomistic simulations	50
3.2 Experimental techniques	50
3.2.1 Physical vapor deposition of thin films: sputtering deposition	51
3.2.2 Structural and morphological sample characterization via atomic force microscopy	51
3.2.3 Magnetometry experiments	52

3.2.4 Lithographic patterning of spintronic devices	54
3.3 Importance of the multiscale approach and theory/experiment confrontation	56
Chapter 4: Quantum mechanics approach for perpendicular magnetic anisotropy and VCMA	59
4.1 Simple Stoner Hamiltonian	60
4.1.1 Stationary eigenvalues and eigenfunctions: exchange splitting	62
4.1.2 Time evolution: precession	64
4.2 Rashba+Stoner Hamiltonian	68
4.2.1 From Dirac to Rashba Hamiltonian	68
4.2.2 Spin-orbit Hamiltonian for a central (spherical) potential	70
4.2.3 Stationary eigenvalues and eigenstates and time evolution in pure Rashba problem: Rashba splitting and spin precession in external electric field	72
4.2.4 Stoner+Rashba mixed Hamiltonian	73
Chapter 5: Ab initio calculations	126
5.1 General description of supercell model used in ab initio Wien2k calculation for VCMA (electric-field related) effects	126
5.2 Magnetic anisotropy, DMI and VCMA in magnetic heterostructures suitable for electric field experiments	131
5.2.1 M/Fe(100)MgO, M=V, Au, Ag, Pd, Pt, Cr	132
5.2.2 Pt(111)/Co/MgO	140
5.2.3 Enhancement of PMA by an interfacial Pt monolayer addition in Pt/Co/MgO	142
5.2.4 Symmetric and Asymmetric MgO/Fe/MgO structures	144
Chapter 6 Spin dynamics in macrospin, atomistic and micromagnetic framework . . .	148
6.1 Stoner Wohlfarth approach	148
6.1.1 Maple simulations of magnetic free energy under an externally applied magnetic field and electric field pulse	150
6.1.2 Simulation of magnetization loops with variable effective anisotropy	153
6.2 Macrospin LLG approach	153
6.2.1 Electric-field precessional switching	154
6.3 Atomistic approach of anisotropy oscillation with thickness	169
Chapter 7 Experimental study of PMA and VCMA in patterned spintronic devices . .	172
7.1 Elaboration of Pt/Co/MgO and Pt/Co/Pt/MgO (111)-textured samples by UHV sputtering	172
7.2 Static magnetic properties (VSM measurements)	174
7.3 Lithographic patterning of Hall-cross geometry under electric-field spintronic devices	175
7.4 Magneto-electric characterization: Hall magnetometry experiments	176
7.5 Comparison: experimental results vs. theoretical predictions	179
7.6 Experimental blocking points and mitigation options	180
Chapter 8 General conclusions, perspectives and main original results	186
8.1 General conclusions and perspectives	186
8.2 Main original results	188
Bibliography	192

A Micromagnetic switching diagrams and the corresponding dynamics	209
B Magnetic skyrmions for neuromorphic and qubit applications	212
C Skyrmionic and magneto-caloric materials based on Rare-Earths and Transition Metals	215
List of Publications	217

Cuprinsul acestui rezumat

1. Introducere

1.1 Scopul tezei

1.2 Scurtă prezentare a conținutului tezei

2. Ultimele inovații și problematica domeniului

2.1 NV-MRAM: limitări ale tehnicilor curente de manipulare a magnetizării

2.2 Paradigma VCMA

3. Rezultatele acestei teze în relație cu progresele din domeniu

3.1 Abordarea analitică

3.2 Investigații ab initio

3.3 Dinamica magnetizării

3.4 Investigații experimentale

4. Concluzii și perspective

4.1 Concluzii generale

4.2 Principalele rezultate originale

Bibliografie

Diseminarea rezultatelor: lista de articole, contribuții orale și postere

1. Introducere

Într-o eră care se bazează din ce în ce mai mult pe tehnologia informației, computerele joacă un rol de o importanță crucială în societatea noastră, iar odată cu avansul Internet of Things (IoT), ele devin din ce în ce mai prezente în viața curentă. În consecință, atenția a fost îndreptată și înspre consumul de energie al dispozitivelor implicate. Se estimează că circa 1% din consumul mondial de energie este destinată computerelor, centrelor de date și infrastructurii de rețele [1], iar din această cantitate de energie, 30% este consumată doar de computere, ca dispozitive terminale [2]. Cu atât mai interesant este faptul că circa 40% din energia consumată de un computer este atribuită memoriilor, în principal datorită caracterului lor volatil. În acest context, cum lumea noastră este afectată de poluare și crize energetice, reducerea consumului de energie în contextul în care acest lucru este fezabil, devine un obiectiv de importanță crucială. Din perspectiva memoriilor, abordarea practică presupune înlocuirea graduală a memoriilor volatile, care sunt guri energetice, cu alternative non-volatile. Această abordare reprezintă o provocare din două motive. Primul ar fi că această înlocuire are o limitare: memoriile non-volatile nu le pot înlocui complet pe cele volatile în arhitecturile von-Neumann curente și cu actualele sisteme de operare, ci doar o fracțiune, până la nivelele inferioare ale memoriilor cache [3]. Cu toate acestea, acest impediment împreună cu alte provocări ca cele legate de viteză și eficiența energetică, au condus la înflorirea cercetărilor cu scopul de a optimiza arhitecturi non-von-Neumann, cum ar fi cele din paradigma in-memory computing, care implică procesarea informației la nivelul memoriei. Această idee, deși nu e nouă, pare acum mai fezabilă ca niciodată. Al doilea motiv ar fi cel legat de performanțe, unde memoriile magnetorezistive încă au dificultăți în a concura cu performanțele SRAM în termeni de viteză și cu DRAM în termeni de densitate a celulelor [5]. O comparație în termeni de performanță este prezentată în Figura 1.1

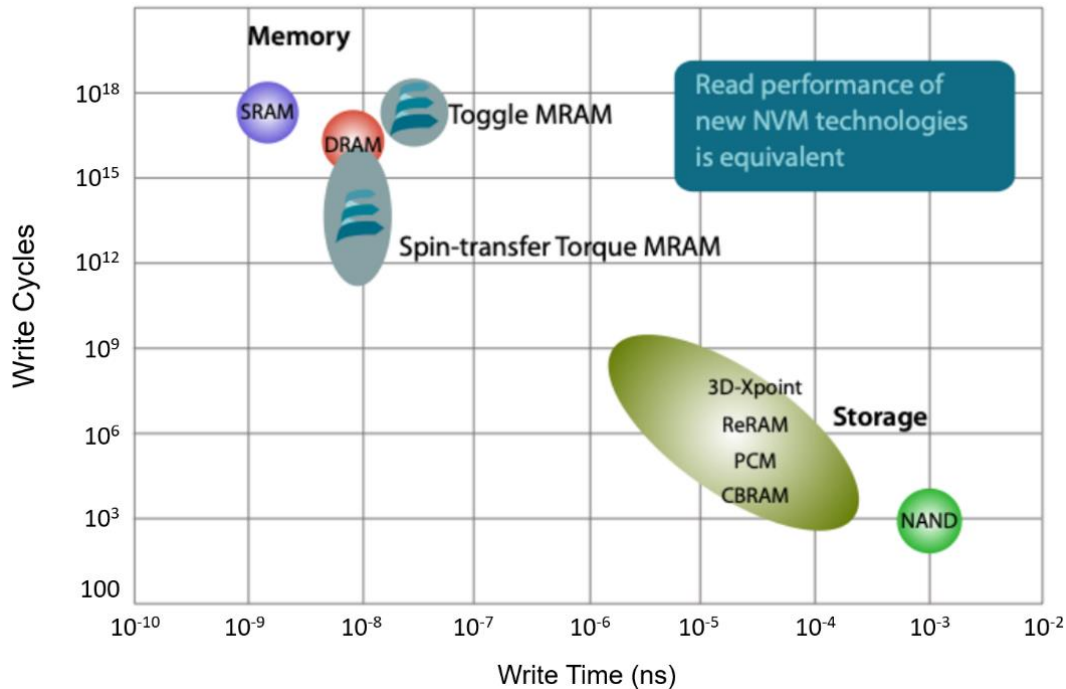


Figura 1.1: Performanțele MRAM comparate cu cele ale altor memorii (din datele recente ale Everspin [4])

1.1 Scopul acestei teze

Controlul magnetizării prin intermediul unui câmp electric, care este sinonim cu controlul anizotropiei magnetice prin intermediul unui voltaj (VCMA) reprezintă fundamentul VC-MRAM (memorii magnetorezistive în care manipularea magnetizării este realizată printr-un voltaj) și constituie subiectul acestei teze. Principala sa ipoteză de start este aceea că într-un sistem magnetic cu două minime de energie, corespunzătoare a două orientări opuse ale magnetizării, magnetizarea poate fi basculată între cele două orientări dacă energia barierei de anizotropie este redusă prin intermediul unui câmp electric care acționează la interfața feromagnet/izolator. În timp ce această barieră este coborâtă, orice stimul extern (fluctuații termice, câmp magnetic, câmp Rashba, etc.) poate declanșa bascularea prin coborârea unui minim de energie în raport cu celălalt.

De ce merită această metodă de manipulare a magnetizării atât de multă atenție? Deoarece vine cu un set de avantaje superior oricărei tehnici de manipulare a magnetizării, iar în curând ar putea propulsa memoriile magnetorezistive în arii care momentan sunt dominate de SRAM. Vom enumera punctual aceste caracteristici:

- Este cea mai eficientă energetic metodă de switching cunoscută până în prezent. În aplicații pentru memorii MRAM a demonstrat o eficiență de scriere cu două ordine de mărime mai bună ca cea a STT-MRAM[6];
- Permite bascularea extrem de rapidă a orientării magnetizării, fie ca metodă de sine stătătoare (demonstrată în simulări) [7] fie asistată, pe modelul SOT-MRAM (demonstrată experimental) [8];

- Este considerată a fi o tehnologie ușor de scalat, foarte promițătoare în termeni de densitate de stocare.

Aplicațiile ei viitoare nu se limitează doar la aplicații de stocare a informației. Este un candidat excelent pentru porți logice de spin și pentru procesarea informației la nivelul memoriei (in-memory computing) [9]. Cu toate acestea, deoarece nu este o tehnologie matură, încă necesită înțelegerea și aprofundarea la nivel fundamental. Câteva întrebări sunt încă fără răspuns:

? Care este originea acestui mecanism? (câteva ipoteze există, dar nu sunt aplicabile universal, explicând efectul în unele sisteme, dar în altele nu)

? Care sunt condițiile limită în care acest fenomen are loc cu un consum minim de energie? (este mai eficientă reducerea parțială a barierei de anizotropie decât modularea ei completă)

? Ce materiale ar fi potrivite pentru acest tip de aplicații?

Pe parcursul acestei teze, am încercat să oferim un răspuns pentru fiecare dintre întrebările menționate mai sus.

1.2 Prezentarea conținutului tezei

Această lucrare își propune să răspundă întrebărilor enunțate mai devreme. Primelor două, referitoare la originile controlului magnetizării cu un câmp electric le răspundem punctual în două capitole dedicate. Cu toate acestea, pentru cea de a treia, deși avem și rezultate experimentale, vom face apel și la literatura existentă. Teza este structurată în opt capitole, primul având rol introductiv, prezentând succint istoria domeniului și realizările recente. În acest capitol sunt prezentate în general aplicații de dispozitive spintronice și filosofia după care acestea au fost concepute, până la ultimele realizări în domeniu. Aplicațiile practice sunt de asemenea descrise, împreună cu relevanța lor pentru tehnologia de zi cu zi și nu numai.

Dacă primul capitol prezintă doar la nivel general conceptele de spintronică și VCMA, cel de-al doilea capitol este mai explicit în descrieri și explicații fizice. Scopul acestui capitol este de a familiariza cititorul cu tehnicile de manipulare a magnetizării, nu doar la nivel declarativ, ci și prin descrieri matematice, pentru a evidenția necesitatea și magnitudinea impactului VCMA în acest context. Accentul cade pe cele mai importante realizări din domeniu, în ceea ce privește manipularea magnetizării cu câmp electric, de la primele încercări cu semiconductori magnetici, la feromagneți metalici. În acest cadru de referință, prezentăm felul în care studiul nostru multi-scală se integrează în domeniu, prin metodologie, obiective și rezultate.

Cel de-al treilea capitol este dedicat metodologiei. Deși lucrarea a fost intenționată a fi inițial una pur experimentală, în contextul pandemic precum și al altor obstacole independente de noi, traiectoria acestei teze a suferit numeroare reajustări. Dat fiind acest fapt, alături de metodele experimentale, vom descrie și o serie de unelte și metode teoretice, de la calcule analitice și ab initio, la simulări atomistice și micromagnetice.

După cum am menționat mai devreme, această teză constituie de fapt o abordare multi-scală a fenomenologiei VCMA. Pentru a folosi o astfel de abordare pentru studiul nostru, investigațiile noastre au pornit de la un model analitic al unui singur spin precesând sub influența unui câmp electric. Doar după ce acest model a furnizat explicații legate de fenomenologie, am incrementat imaginea de ansamblu de la un spin la superstructuri, ori

chiar la sisteme de dimensiuni reale, prin simulări atomistice și micromagnetice. De aceea, capitolul patru reprezintă o descriere analitică a felului prin care un câmp electric induce bascularea magnetizării. Acesta prezintă în detaliu o abordare bazată pe mecanica cuantică pentru VCMA și anizotropia perpendiculară. Am început de la Hamiltonianul simplu Stoner, cu scopul de a ilustra comportamentul static și dinamic al spinului electronic într-un câmp magnetic extern. Apoi, pentru a descrie efectul unui câmp electric, am introdus termenul Rashba, după care am determinăm stările staționare proprii și vectorii proprii, urmând să descriem evoluția temporală, punând accent pe precesia spinului în cazul Hamiltonianului mixt Stoner+Rashba. În cele din urmă, analiza valorilor proprii și a soluțiilor în acest caz ilustrează contribuțiile la energia totală corespunzătoare câmpurilor electric și magnetic, permițându-ne să identificăm contribuțiile câmpului electric asupra anizotropiei magnetice și a controlului ei prin câmp electric. Analiza simplă dezvoltată în capitolul patru ne permite să identificăm mecanismul Rashba responsabil de efectele VCMA și prezice posibilitatea de manipulare precesională a spinului prin pulsuri de câmp electric, aspecte care sunt dezvoltate în capitolele dedicate calculelor ab initio și modelărilor micromagnetice.

Capitolul al cincilea ilustrează rezultatele unor calcule ab initio efectuate într-un formalism complet relativist, implementat într-un cadru bazat pe metoda undei plane augmentate liniarizate care ia în calcul și orbitalii locali. Dincolo de contribuția spin-orbită la Hamiltonian, care permite descrierea anizotropiei magnetice, în calculele noastre am inclus și efectul unui câmp electric, prin intermediul gradientului unui potențial zig-zag. Bazându-ne pe diferite modele de supercelule, am reușit să calculăm energia de anizotropie precum și variația ei cu un câmp electric, în heterostructuri ca M/Fe(100)MgO, M=V, Au, Ag, Pd, Pt, Cr; Pt(111)/Co/MgO. Astfel am explicat originea fizică a anizotropiei perpendiculare (PMA) și a efectului VCMA pe baza despicerilor spin-orbită Rashba și am reușit să explicăm dependența lor de compoziția supercelulelor. Mai mult, am arătat și cum se poate îmbunătăți controlul asupra anizotropiei prin inserarea de impurități de metale grele la interfața feromagnet/izolator și am demonstrat și că anizotropia oscilează cu grosimea stratului feromagnetic, datorită efectelor de groapă de potențial cuantic.

Capitolul șase este dedicat dinamicii magnetizării. Acest capitol cuprinde o abordare macrospin a controlului anizotropiei cu câmp electric, urmat de o validare micromagnetică a observațiilor făcute în diagramele de switching. Această validare demonstrează că rezultatele sunt aplicabile și în cazul unor sisteme de dimensiuni reale, cât timp se apropie de aproximația macrospin. Acest capitol constituie un capitol central de rezultate și oferă o vedere clară asupra condițiilor de energie minimă pentru switching.

Cel de-al șaptelea capitol acoperă toate eforturile și rezultatele noastre experimentale, pornind de la descrieri privind prepararea probelor, la procesele litografice, pâna la măsurătorile magnetice și de transport. Rezultatele teoretice și experimentale sunt discutate în paralel, dar la un nivel pur calitativ.

Ultimul capitol (opt) este dedicat concluziilor generale și perspectivelor. Acest capitol reprezintă un rezumat al tuturor eforturilor și rezultatelor noastre, precum și o

evaluare a răspunsurilor asociate întrebărilor inițiale. Perspectivele sunt enumerate în acest ultim capitol, precum și deschiderea unor noi orizonturi.

2. Stadiul actual din domeniu si problemele prezente

În acest capitol încercăm să evidențiem subiectul acestei teze în peisajul aplicațiilor memoriilor magnetice.

2.1 NV-MRAM: limitări ale tehnicilor curente de manipulare a magnetizării

Scopul industriei microelectronice este de a reduce continuu dimensiunea fizică a memoriilor, crescând în același timp densitatea acestora și îmbunătățindu-le eficiența. Trecerea de la tehnologia de stocare pe hard disk la memoriile bazate pe joncțiuni magnetice tunel, MTJ, a însemnat un salt tehnologic semnificativ în stocarea datelor, deoarece accesul la datele stocate nu mai implică o componentă mecanică și astfel accesul a devenit semnificativ mai rapid. Drumul din ce în ce mai extins către miniaturizare și aplicații embedded a făcut aproape uitată era hard disk-urilor. Următorul salt este deja în desfășurare, deoarece progresele în tehnologia informației necesită atât memorie, cât și putere de calcul și consum energetic. Avem acum pe piață memorii magnetice bazate pe MTJs, cu performanțe promițătoare în ceea ce privește rezistența și consumul de energie pentru ciclurile de citire/scriere, precum toggle și STT-MRAM, dar pentru ca MRAM-ul să ajungă la statutul de memorie universală, gama de îmbunătățiri necesare se întinde de la caracteristicile intrinseci ale MTJ, la tehnicile de manipulare a magnetizării și arhitectura propriu-zisă a memoriei. O astfel de memorie îmbunătățită necesită o soluție echilibrată care să satisfacă simultan două cerințe: PMA trebuie să fie suficient de mare, astfel încât stabilitatea termică să fie păstrată, dar și suficient de mică încât comutarea magnetizării să nu necesite un consum semnificativ de energie [10]. Cea mai recentă familie de memorii magnetice nevolatile cu acces aleator (NV-MRAM) este reprezentată de MRAM-urile bazate pe cuplu de transfer de spin, Spin Transfer-Torque (STT). În ciuda optimismului întâlnit de STT-MRAM, memoriile magnetorezistive nevolatile sunt o tehnologie care trebuie să se maturizeze mai mult. Provocările cu care se confruntă STT-MRAM includ: probleme legate de eficiența scrierii, marja de citire și chiar probleme de fiabilitate, împreună cu unele deficiențe de control al procesului (datorită spațiilor înguste între interconexiuni, cu uniformitate variabilă a distribuției) [11]. În afară de acest set de probleme, rămâne problema eficienței energetice. STT-MRAM necesită de obicei câteva sute de fJ/bit pentru un eveniment de scriere, deși recent consumul de energie a scăzut la 45 fJ/bit [12]. Alte tehnici de manipulare a magnetizării ar putea reduce semnificativ pierderile de energie, ele necesitând operarea la doar câțiva fJ/bit, cum se întâmplă în cazul VCMA [6][13].

2.2 Paradigma VCMA

Filosofia comutării magnetizării cu câmp electric se bazează pe o serie de fenomene complicate care apar la interfețe. Am putea spune că ar putea fi atribuită unui set de mecanisme colective și nu doar unuia singur, întrucât în majoritatea cazurilor, dovezile nu se exclud reciproc. Dincolo de originile VCMA, un obiectiv important este maximizarea randamentului acestui fenomen în aplicații. Este de mare interes găsirea unor modalități de

manipulare a energiei de anizotropie magnetice, astfel încât să putem reduce bariera energetică dintre două orientări ale magnetizării și să declanșăm un eveniment de comutare. Pentru a face acest lucru, ar trebui să maximizăm parametrul cunoscut sub numele de coeficient VCMA, cunoscut sub numele de β în primele studii teoretice, sau ξ , așa cum este cunoscut în prezent. Acest parametru nu reflectă nimic altceva, decât rata de modulare a anizotropiei magnetice de către un câmp electric și este măsurat în fJ/Vm. Valorile tipice pentru acest parametru variază între zeci de fJ/Vm și sute de fJ/Vm, cu observația notabilă că valorile experimentale sunt de obicei mai mari decât cele teoretice, pe care teoria nu a reușit să le explice până acum. Se crede că, deoarece efectul VCMA este rezultatul mecanismelor colective, nu se poate obține un bun acord între teorie și experiment. Din punct de vedere strict dinamic, comutarea magnetizării cu un puls de tensiune este condiționată de două elemente: un câmp electric trebuie să producă efecte notabile asupra anizotropiei suprafeței, adică o scădere semnificativă, iar un stimul secundar care generează un cuplu, trebuie să răstoarne magnetizarea în direcția opusă. Pentru a îndeplini aceste condiții, au fost testate mai multe configurații experimentale, cum ar fi asocierile dintre efectul VCMA și STT sau SOT (cuplul spin-orbită).

În capitolul doi am descris în general stadiul curent al VCMA și am încercat o descriere cronologică a progresului în domeniul anizotropiei magnetice controlate de tensiune. Am furnizat detaliile legate de acest domeniu, o justificare pentru demersul de a realiza un control precis al comutării câmpului electric, dar nu am furnizat informații legate de scopul urmărit de abordarea noastră. Pentru a oferi mai mult context despre investigația noastră, vom explica în ce măsură am încercat să răspundem la întrebările enunțate anterior. Deoarece originea anizotropiei magnetice controlate de tensiune nu este atribuită unui singur fenomen și este adesea în discuție, primul nostru obiectiv a fost înțelegerea fenomenelor subiacente. Pornind de la sisteme simple, mai multe elemente cheie nu pot fi explicate pur și simplu prin efectele dopajului interfacial. Să luăm de exemplu o heterostructură HM/Fe/MgO, care este supusă unui câmp electric. Depinzând de destratul de metal greu (HM), semnul coeficientului VCMA și PMA variază dramatic. Astfel de descoperiri nu au o explicație bazată pe abordarea dopajului cu sarcini la suprafață. Din acest motiv am cuplat calculele analitice și ab initio pentru a înțelege singuri care este originea acestor discrepanțe experimentale.

Deplasându-se în sus, către un „univers mai mare” de spini, reacția colectivă a momentelor magnetice de spin ca răspuns la un câmp electric, se materializează în comutarea magnetizării. Obținerea controlului asupra acestui proces dinamic înseamnă valorificarea parametrilor la care este susceptibilă magnetizarea: lungimea acțiunii stimulilor și câmpurile efective. Nu am găsit în literatură un studiu privind dinamica magnetizării, care să prezinte probabilitatea de comutare în paradigma celui mai mic consum de energie. Prin urmare, contribuția noastră la domeniu s-a concretizat într-o descriere a condițiilor critice (cu consum minim de energie) în care are loc comutarea magnetizării controlate prin câmp electric. Nu numai că ne-am concentrat pe modulația critică a anizotropiei, dar ne-a interesat și câmpul în plan minim necesar cu care poate fi realizată comutarea, iar pe parcurs am descoperit

importanța unei constante mari de amortizare, care este o schimbare de paradigmă, în comparație cu comutarea prin STT.

3. Rezultatele tezei în raport cu progresele din domeniu

3.1 Abordarea analitică

Deoarece fenomenele fundamentale sunt cel mai clar mai vizibile la nivelul momentului magnetic de spin, am decis că acesta ar trebui să fie punctul nostru de plecare. La fel ca Barnes et al. [14], în capitolul patru am pornit de la cele mai simple blocuri constitutive. Am analizat Hamiltonienii și am dedus valorile proprii și vectorii proprii pentru diferite situații: atunci când un spin este supus unui câmp molecular (Hamiltonianul Stoner), iar apoi am vorbit pe scurt despre precesia spinului datorată unui câmp electric (Hamiltonianul Rashba). Totuși, accentul a fost pus pe combinarea celor două condiții, întrucât am descris situația în care un spin supus unui câmp molecular este afectat simultan de un câmp electric (mixt Stoner-Rashba Hamiltonian).

$$\hat{H} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} - J_0 \vec{m} \hat{\sigma} + \alpha_R (\sigma_x k_y - \sigma_y k_x)$$

Toți acești pași au urmărit să descrie analitic fenomenologia la cel mai elementar nivel și consecințele reflectate asupra dinamicii. În capitolul patru arătăm în detaliu modul în care mecanismul Rashba contribuie atât la PMA, cât și la modularea cu câmp electric a anizotropiei, printr-un termen dependent de E^2 .

3.2 Investigații ab initio

În capitolul cinci, am explorat efectele câmpului electric asupra anizotropiei magnetice prin metode ab initio, pe o scară de zeci de atomi. Am studiat modul în care PMA, generată în unele sisteme, răspunde în moduri complet diferite sub acțiunea câmpului electric, în funcție de componența supercelulelor studiate. Aceste observații sunt reflectate în semnul coeficientului VCMA, β , care descrie reacția anizotropiei la câmpul electric. Acest coeficient este definit ca fiind raportul dintre variația energiei de anizotropie și câmpul electric:

$$\beta = \frac{\Delta MAE}{\Delta E}$$

iar valorile sale tipice variază de la câțiva fJ/Vm la zeci sau chiar sute de fJ/Vm. Pentru a realiza aceste investigații, am folosit pachetul software Wien2k, în care un câmp electric este aplicat unei supercelule ca un gradient de potențial în zig-zag. Am studiat sisteme de forma HM/FM/MgO, unde HM este fie un metal greu, fie un metal $3d$, FM este înlocuit fie de Fe, fie de Co, iar apoi structura este acoperită de un strat izolator de MgO. Capitolul cinci din teză discută într-o manieră largă modul în care stratul de bază de metal greu influențează semnul coeficientului β . Am văzut că, deși toate sistemele investigate au interfețe de top

FM/MgO similare, interfața HM/FM este cea care dictează comportamentul VCMA și valorile PMA. Tabelul de mai jos (Tabelul 3.1) oferă o scurtă descriere a rezultatelor noastre.

Tabelul 3.1 Diferite sisteme HM/FM/MgO , investigate prin metode ab initio

System	E_{ani} (meV)	E_{ani} (erg/cm ² =mJ/m ²)	β	$a = b$	crystal
V3Fe5MgO	0.54	0.94	68.44	3.02996	cubic(100)
Au3Fe5MgO	0.71	1.37	-32.26	2.883162	cubic(100)
Au3Fe5Pt1MgO	5.86	11.28	-56.65	2.883162	cubic(100)
Pd3Fe5MgO	0.43	0.83	17.3	2.883162	cubic(100)
Pd3Fe5Pt1MgO	5.13	9.87	87.46	2.883162	cubic(100)
Ag3Fe5MgO	1.35	2.59	-	2.888263	cubic(100)
MgO-Fe3-MgO	1.91	3.71	-	2.8689	cubic(100)
Pt3Co5MgO-ot-aPt	0.23	0.58	-43.43	2.7709	hexa(111)

Mai mult decât atât, am observat că inserând impurități de metal greu la interfața feromagnet/izolator, anizotropia perpendiculară poate fi îmbunătățită cu până la un ordin de mărime.

3.3 Dinamica magnetizării

Al șaselea capitol al tezei este dedicat studiului aprofundat al dinamicii magnetizării în cadrul VCMA. Am folosit metoda macrospin pentru a ilustra cum arată dinamica VCMA, pentru impulsuri sincronizate de tensiune și câmp magnetic, la o scară de timp de ordinul nanosecundelor. Am aflat că dinamica are caracteristici periodice, dar am identificat o condiție în care lungimea impulsului nu mai prezintă importanță, deoarece comutarea pare să fie independentă de lungimea impulsului. Când această condiție este îndeplinită, duce la generarea de benzi orizontale „critice” în diagrama de comutare, iar constanta de amortizare Gilbert îmbunătățește timpul de comutare în aceste benzi. Cu această ocazie, subliniem importanța amortizării în dinamica VCMA. Dacă în comutarea STT se evită valori mari ale constantei de amortizare pentru a limita densitățile critice de curent, aici amortizarea asigură un efect benefic. Arătăm așadar că nu este necesară anularea completă a barierei de anizotropie pentru a obține un eveniment de comutare, ci doar o fracțiune din aceasta. În acest context, au fost determinate condițiile pentru modularea critică a anizotropiei. În cadrul aceluiași capitol, am determinat și condițiile pentru consumul minim de energie care ar trebui vizat și optimizat la nivel de dispozitiv în aplicații.

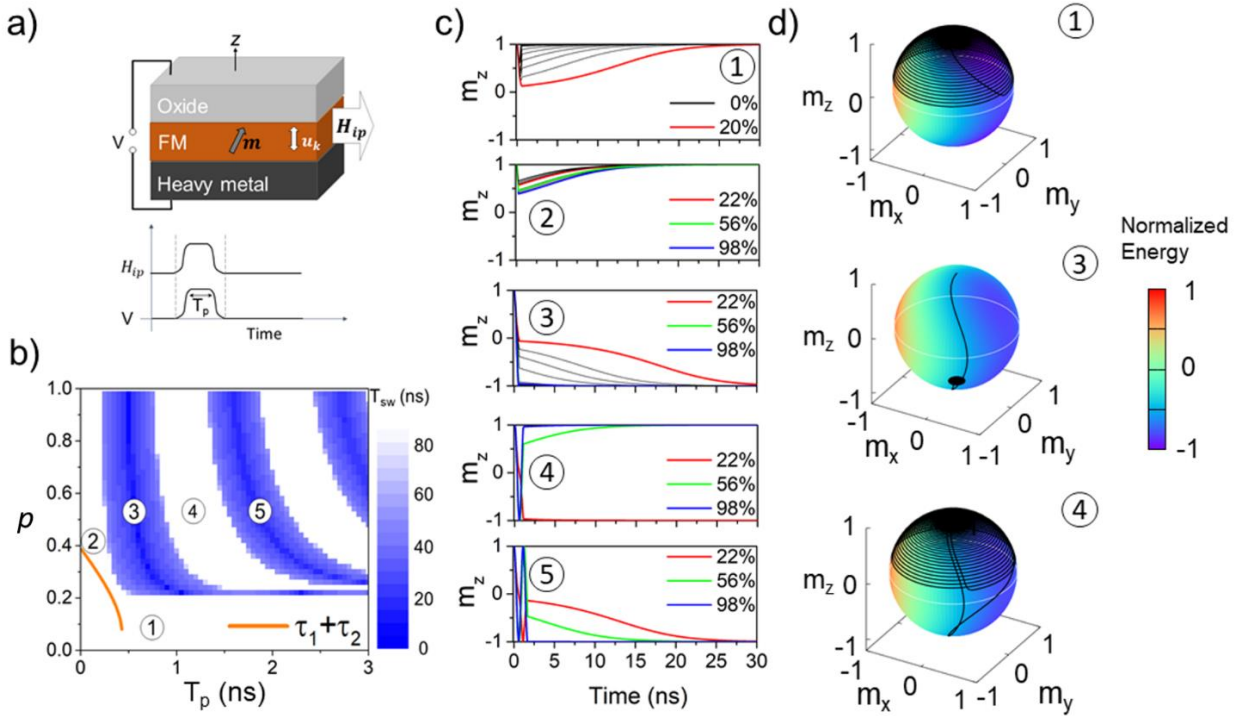


Figura 3.1 (a) Schiță ilustrând sistemul simulat, cu un câmp de anizotropie orientat de-a lungul direcției u_k . Câmpul electric este aplicat simultan cu un câmp magnetic aplicat în plan, pentru un puls de lungime T_p . (b) Diagrama de comutare a magnetizării, pentru $H_{ip} = 0.0324$ T și $\alpha = 0.01$. Probabilitatea de comutare este corelată cu timpul de comutare (switching), T_{sw} . Cu oranj este reprezentat timpul minim necesar pentru ca magnetizarea să ajungă în planul xOy pentru o lungimea a pulsului estimată analitic ($\tau_1 + \tau_2$). (c) Variația proiecției pe Oz a magnetizării cu timpul pentru diferite zone ale diagramei de comutare. (d) Dinamica magnetizării reprezentată pe sfera de energie normalizată, pentru diferite condiții de switching, reprezentative pentru unele zone din diagrama. Figură reprodușă din [7].

3.4 Investigații experimentale

Deoarece capitolul dedicat investigațiilor ab initio a dezvăluit că unele sisteme prezintă PMA precum și modul în care PMA poate fi îmbunătățită printr-o inserție fină de metal greu la interfața FM/MgO, am decis să explorăm experimental un sistem care ar putea verifica toate aceste observații. Am ales sistemul Pt/Co/MgO, cu diferite variații, așa cum este prezentat în Tabelul 3.2.

Tabelul 3.2 Compoziția probelor

Sample type	Composition and remarks
Reference sample (R)	Si/SiO ₂ // Ta(3nm)/Pt(4nm)/Co(1nm)/Pt(4nm) Symmetric top and bottom Co/Pt interfaces Sample with PMA, but no VCMA effect expected.
Standard sample (S)	Si/SiO ₂ // Ta(3nm)/Pt(4nm)/Co(1nm)/MgO(1nm)/Ta(2nm) Sample with PMA, but the Co/MgO interface is expected to be strongly influenced by an applied electric field, due to its inherent dipole.
Sample with tailored top interface (T)	Si/SiO ₂ // Ta(3nm)/Pt(4nm)/Co(1nm)/Pt(1nm)/MgO(1nm)/Ta(2nm) Sample expected to manifest a PMA enhancement and an improved response to the electric-field application.

Aceste probe au fost apoi supuse mai multor etape de litografie optică, astfel încât să fie pregătite pentru magnetometria de efect Hall anomal. Dispozitivele Hall sunt reprezentate în Figura 3.2.

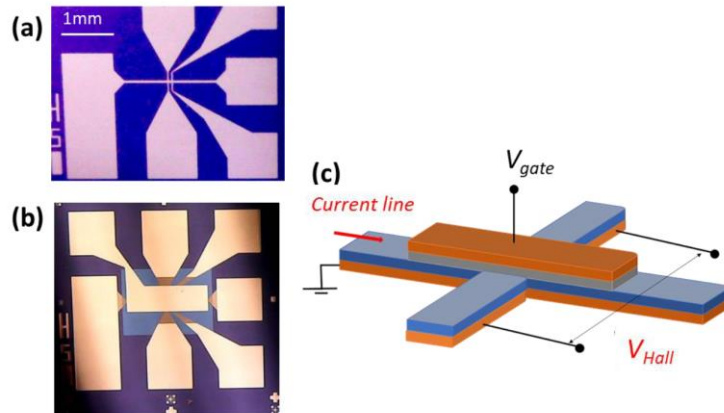


Figura 3.2 Proba pregătită pentru măsurători de magnetometrie Hall. Imagine reprodusă din [15] ©2021 IEEE.

Pentru proba de referință (R) nu s-a observat niciun efect notabil după aplicarea câmpului electric, deoarece niciun câmp electric nu pătrunde în structură.

Cu toate acestea, pentru proba de test (T), au fost făcute două observații majore: o variație a câmpului coercitiv are loc ca răspuns la câmpul electric aplicat, iar tensiunea Hall scade odată cu creșterea câmpului electric aplicat. Am discutat motivele potențiale ale acestor observații în profunzime în capitolul șapte al tezei și vom oferi dovada acestor observații în Figura 3.3.

Pentru a rezuma pe scurt rezultatele noastre, în primul rând, am confirmat experimental existența PMA în probe, așa cum a fost prezisă de calculele ab initio. În al doilea rând, am observat o variație asimetrică a anizotropiei cu câmpul electric, ceea ce validează și predicția teoretică. Cu toate acestea, discrepanța principală este legată de parametrul VCMA, β , care în estimările teoretice este mult mai mare decât valorile experimentale obținute. Apoi, variația parametrului K_s în raport cu câmpul electric nu respectă curba prezisă teoretic.

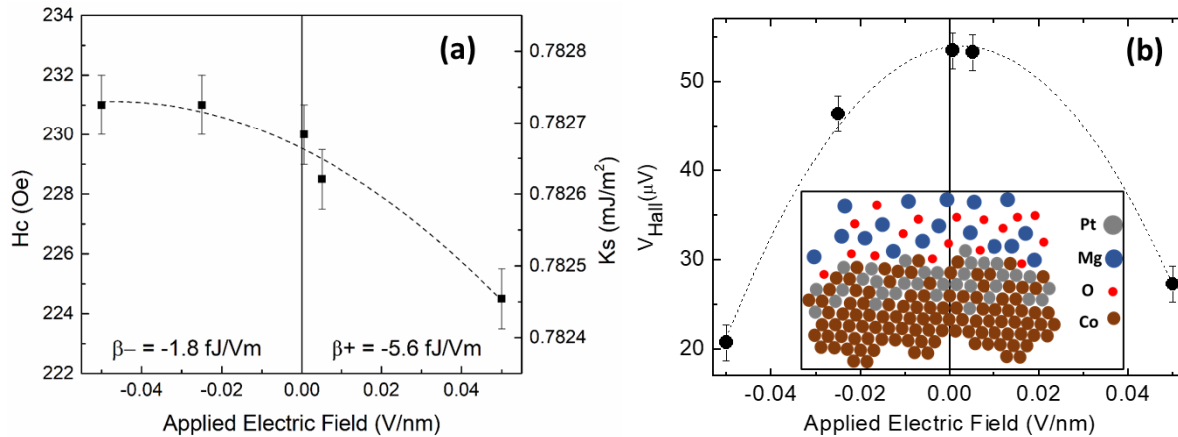


Figura 3.3 (a) Variația câmpului coercitiv ca răspuns la aplicarea unui câmp electric (b) Interfața superioară a probei (T). Imagine reprodusă din [15] ©2021 IEEE.

Pentru a aborda discrepanțele, trebuie să știm că acestea provin atât din motive teoretice, cât și din motive experimentale, și anume din metode, modele și limitări tehnice. De exemplu, în calculele ab initio există diferite metode de calcul prin care câmpul electric poate fi aplicat asupra unei supercelule. În timp ce Wien2k folosește un potențial zig-zag, VASP utilizează sarcini localizate, plasate în vid și, prin urmare, calculele ab initio efectuate pe aceeași structură vor genera rezultate diferite. O altă problemă este reprezentată de fidelitatea modelului, deoarece suprastructurile ar putea să nu reproducă cu acuratețe sistemele experimentale reale. Acest lucru nu se datorează lipsei de înțelegere a sistemelor experimentale, ci mai mult din cauza limitărilor instrumentelor teoretice, care nu pot lua în considerare aspectele micromagnetice, defecte etc. Adesea, trebuie să combinăm instrumentele și cadrele teoretice și să studiem un sistem la scale diferite pentru a-l putea caracteriza în mod corespunzător. În consecință, doar la nivel calitativ putem face comparații între rezultatele teoretice și cele experimentale.

4. Concluzii și perspective

4.1 Concluzii generale

La începutul acestei teze, am studiat elementele necunoscute ale temei, am identificat un set de probleme și provocări, am formulat o listă de întrebări inițiale și am stabilit și dezvoltat o abordare multi-scală, suficient de complexă pentru a le aborda. Ajunși la sfârșitul timpului dedicat acestui proiect de teză, putem face o evaluare critică a rezultatelor. Am găsit răspunsuri la o parte semnificativă a întrebărilor noastre inițiale. Am răspuns cu succes la întrebări importante legate de mecanismele fizice complexe care guvernează originea anizotropiei magnetice perpendiculare în heterostructurile magnetice ultrasubțiri. Folosind modele cuantice analitice simple, tehnici ab initio mai sofisticate și modele micromagnetice, am modelat cu succes efectul câmpului electric asupra PMA în sisteme cu diverse arhitecturi și secvențe de alternare a elementelor constituente ale structurilor de tip HM/FM/MgO. Am

identificat cu succes problemele critice care guvernează comutarea precesională a magnetizării sub acțiunea unui puls de câmp electric. Mai mult, chiar și în contextul complex al pandemiei, am reușit să obținem suficiente rezultate experimentale importante, care confirmă predicțiile și așteptările noastre teoretice legate de controlul anizotropiei cu câmp electric. Totuși, dezvoltarea componentei experimentale nu e niciodată o sarcină ușoară în spintronică. Scopul final privind caracterizarea magneto-electrică a unui dispozitiv spintronic implică mai multe etape de fabricație: elaborarea probelor(heterostructurilor) ca filme subțiri multistrat cu instrumente de depunere fizică (de exemplu, pulverizare și/sau epitaxie cu fascicul molecular în condiții de vid ultra-înalt) precum și litografia în mai multe etape. Aceste etape au fost la rândul lor precedate de proiectarea și fabricarea măștilor, caracterizarea probelor din punct de vedere morfologic, structural, magnetic și magneto-electric. Aceste activități sunt adesea complexe, consumatoare de timp și susceptibile la riscuri de implementare și prin urmare, în cazul nostru au fost afectate semnificativ de contextul pandemic. În aceste circumstanțe, centrul de greutate al activităților noastre a fost mutat treptat către modelarea teoretică la diferite scale. Prin urmare, critic, nu putem spune că am închis toate punctele deschise inițial.

Întrebările rămase, precum și celelalte apărute în timpul cercetării desfășurate în cadrul tezei, reprezintă perspective interesante ale lucrării curente. Să rezumăm câteva dintre ele. În ceea ce privește modelarea analitică și ab initio, am investigat cu succes aspecte fenomenologice fundamentale privind PMA și capacitatea de control a acesteia prin câmp electric. Pentru a studia aspectele complexe legate de arhitectura structurilor multistrat, am proiectat modele speciale de supercelule și am obținut predicții teoretice interesante și promițătoare. Cu toate acestea, aceste așteptări teoretice necesită o confirmare experimentală suplimentară. Este necesară elaborarea unor probe dedicate, de exemplu prin utilizarea instrumentelor de epitaxie cu jet molecular (Molecular Beam Epitaxy, MBE) disponibile prin colaborarea de cercetare existentă cu laboratorul dedicat al Institutului Jean-Lamour din Nancy, Franța. Apoi, aceste heterostructuri de filme subțiri multistrat trebuie modelate în continuare litografic în dispozitive dedicate, potrivite pentru experimente VCMA statice și dinamice. Dincolo de experimentele statice (de exemplu, dependența de câmpul electric a anizotropiei) ar fi de mare interes pentru noi să caracterizăm dinamica unor astfel de sisteme (de exemplu, inversarea magnetizării în nanojonctiuni modelate) pentru a valida și a rafina descoperirile noastre teoretice. În ceea ce privește dinamica magnetizării, pe baza a ceea ce am aflat despre extinderea cu amortizarea a ferestrei de probabilitate de comutare, ar fi utilă investigarea în perspectivă a dinamicii magnetizării în sistemele cu amortizare anizotropă. O primă presupunere ar fi că în acest caz, comutarea într-o direcție ar fi mai probabilă decât în cea opusă, dar asta depinde în întregime de peisajul energetic. Acest obiectiv îl vedem interesant din punct de vedere strict fundamental.

În ceea ce privește potențialele aplicații, pentru exploatarea eficientă a VCMA, am văzut că este crucial să existe o rată de variație cât mai mare a anizotropiei cu câmpul electric, ceea ce se traduce prin coeficienți (β sau ξ) cât mai mari posibil. Pe baza constatărilor și înțelegerii noastre, o modalitate de a realiza acest lucru ar fi să analizăm în detaliu factorii care

contribuie la efectul VCMA și să îi îmbunătățim pe cei care duc la creșterea β . Cu siguranță, un ingredient major ar fi controlul interacțiunii spin-orbită, prin alegerea stratului de bază de metal greu. Mai mult, contribuțiile aditive ale interfețelor filmului magnetic la PMA și VCMA, adesea cu semn opus, deschid o perspectivă interesantă pentru a controla mărimea și semnul PMA și β . Proiectarea și elaborarea de materiale inovatoare și sisteme multistratificate cu proprietăți îmbunătățite de spin-orbită este de așteptat să sporească coeficientul VCMA. Într-adevăr, Bauer și colaboratorii [16], raportează valori de 960 fJ/Vm și 910 fJ/Vm pentru o simplă pulverizare a unei interfețe Co/MgO cu ioni Tb³⁺ și Dy³⁺. Pe de altă parte, interesul pentru compușii pe bază de pământuri rare nu se limitează la aplicații VCMA. Recent, modularea câmpului electric al anizotropiei a fost propusă ca strategie pentru manipularea structurilor chirale solitonice (de exemplu, skyrmioni) [17]. Deoarece nuclearea și stabilizarea lor depind enorm de interacțiunea Dzyaloshinskii-Moriya (DMI), PMA și de câmpul dipolar, comutarea cu câmp electric pare a fi un instrument elegant pentru a controla orientarea nucleului skyrmionului. Referitor la acest subiect, în perioada de implementare a acestei teze, am efectuat activități dedicate simulărilor cu diagrame de fază skyrmionice și strategiilor de manipulare a skyrmionilor [18]. Anexa B din teza oferă mai multe detalii. Dincolo de posibilitatea de a regla PMA, considerăm că posibilitatea de a controla interacțiunea Dzyaloshinskii-Moriya cu o tensiune va rămâne un subiect major în viitor, având în vedere interesul crescut pentru dispozitivele skyrmionice pentru aplicații clasice, neuromorfe și cuantice. Mai mult decât atât, datorită proprietăților lor speciale legate de spin-orbită, aliajele de pământuri rare-3d și-au dovedit valoarea în aplicații ce implică texturi de spin chirale ultrarapide [17]. Nuclearea skyrmionilor a fost deja evidențiată în materiale feromagnetice, cum ar fi filmele subțiri de DyCo₃ [19] și în structurile multistrat SmCo₅ feromagnetice magnetizate perpendicular [20]. În ceea ce privește acest subiect, pentru comparație, am fabricat și studiat și materiale din Pământuri Rare, de ex. PrCo₃ [21], DyFe₂ și ErFe₂ (pentru mai multe detalii, vezi Anexa C a tezei). Aceste tipuri de studii sunt încă în curs de desfășurare. Pe baza experienței laboratorului nostru cu aliajele de metale tranzitionale din pământuri rare pentru efect magnetocaloric, aceste studii iau în considerare și alți candidați, în principal materiale feromagnetice pe bază de pământuri rare și metale de tranziție (RE-TM).

4.2 Principalele rezultate originale

Dincolo de principalele perspectivele enumerate în secțiunea anterioară a acestui ultim capitol, noi am dori să subliniem pe scurt principalele rezultate originale obținute în timpul acestei teze.

În primul rând, din modele cuantice simple, intuitive și rezolvabile analitic am evidențiat principalele mecanisme fizice care guvernează interacțiunea unui spin cu un câmp magnetic și electric. Am subliniat originea fizică a anizotropiei perpendiculare (PMA) și posibilitatea de a manipula PMA și spinul prin precesia generată cu pulsuri de câmp electric. Aceste rezultate ne-au motivat să realizăm simulări teoretice dinamice cu ajutorul unor instrumente atomistice și micromagnetice mai complexe. Pe de altă parte, din perspectiva ab initio, am făcut observații importante legate de originile anizotropiei, mecanismele intrinseci

ale acesteia (Rashba, depleția/dopajul de sarcină) și comportamentul acesteia față de un câmp electric aplicat. Înainte de această lucrare, ne-am fi gândit că având un metal greu sub un feromagnet $3d$ și având un strat de MgO deasupra (arhitectură spintronică standard pentru aplicații spin-orbitronice), am obține PMA pentru grosimi ale feromagnetului aflate sub o valoare maximă de prag. Această PMA ar fi rezultatul contribuției cumulate a celor două interfețe. Cu toate acestea, în acord cu indicațiile preliminare destul de limitate din literatura existentă, am descoperit că există o mare varietate de fenomene care au loc în structuri foarte asemănătoare și care conduc la comportamente complet opuse atunci când sistemele sunt supuse acțiunii unui câmp electric. Prin urmare, rezultatele noastre teoretice predictive indică ce tip de sistem și ce arhitectură ar fi cele mai interesante pentru a fi proiectate și fabricate pentru aplicații. O constatare importantă a acestei lucrări este legată de creșterea anizotropiei și de îmbunătățirea capacității de modulare a câmpului electric în sistemele în care a fost adăugată o inserție fină de platină la interfața feromagnet/izolator. Mai mult, ilustrăm și faptul că o impuritate nemetalică la interfață are un efect negativ opus asupra proprietăților PMA și VCMA. Un rezultat teoretic foarte interesant și original, cu potențial impact semnificativ asupra proprietăților sistemelor și dispozitivelor experimentale reale, este demonstrarea oscilațiilor PMA cu grosimea stratului feromagnetic pentru filme ultra-subțiri, atribuită unor gropi cuantice de potențial, a căror existență este puternic dependentă de simetria Bloch.

Dincolo de aceste rezultate, poate cea mai importantă realizare a acestei teze este cuprinsă în capitolul șase. În acest capitol am descris în detaliu baza fizică a dinamicii magnetizării în cadrul VCMA. Am ilustrat aici mecanismul precesional de inversare a magnetizării în cadrul unui model LLG-macrospin. Astfel demonstrăm faptul că nu este obligatorie anularea completă a barierei de anizotropie care separă două orientări opuse ale magnetizării pentru a putea avea o comutare precesională. Acest rezultat împinge cadrul VCMA și mai aproape de aplicații, deoarece demonstrează în continuare eficiența energetică îmbunătățită. Mai mult, rezultatele noastre ne permit proiectarea unui dispozitiv spintronic inovator cu trei terminale bazat pe VCMA, în care comutarea precesională a magnetizării poate fi declanșată de o densitate de curent electric care curge într-o pistă. Această arhitectură inovatoare ar putea-o înlocui pe cea utilizată în mod obișnuit, în care câmpul precesional efectiv este indus de un câmp magnetic în plan. Dincolo de această proiectare și analiză fenomenologică, simulările noastre micromagnetice au condus la o estimare cantitativă a caracteristicii pulsului de densitate de curent (intensitate, durată) necesară comutării. O altă constatare importantă a simulărilor micromagnetice este legată de demonstrarea unui regim/fereastră de bandă critică în care comutarea magnetizării are loc fără a ține cont de lungimea pulsului de câmp. Acest regim este controlat de o contribuție pozitivă a constantei de amortizare, care lărgeste fereastra de comutare unde probabilitatea de comutare este de 100%. Rezultatele noastre demonstrează că pentru dinamica VCMA, constanta de amortizare are un efect pozitiv. Aceasta reprezintă o schimbare de paradigmă în comparație cu peisajul STT, unde amortizarea poate avea efecte dăunătoare și crește consumul de energie: stimulul care generează precesia de către STT trebuie să concureze cu amortizarea intrinsecă a materialului feromagnetic. Dincolo de abordarea LLG-macrospin, am efectuat în continuare

simulări micromagnetice în nanopilari cu diametru lateral variabil, incluzând atât contribuțiile PMA, DMI și câmpul demagnetizant. În acest cadru mai complex, am arătat că DMI pare să contribuie la comutare, prin înmulțirea domeniilor de comutare (benzi). Comparativ cu modelul macrospin LLG, DMI scade modulația critică necesară realizării comutării și, în mod optimist, eficiența energetică va fi îmbunătățită, în mod corespunzător.

Deși nu am realizat atât de mult cât ne-am programat inițial, chiar și latura experimentală a acestei teze a adus niște rezultate satisfăcătoare. Am elaborat cu succes heterostructuri de filme subțiri care demonstrează PMA, ca filme continue. Apoi, am proiectat și fabricat cu succes măști de litografie UV, pentru modelarea în mai multe etape a dispozitivelor spintronice potrivite pentru experimente de magnetometrie de efect Hall anomal sub câmp aplicat. În ciuda problemelor clar identificate, specifice modelării litografice, am obținut cu succes câteva dispozitive spintronice pe care am putut realiza experimentele VCMA de magneto-transport. În aceste probe, am observat fără ambiguitate modularea câmpului electric al anizotropiei și suntem convinși de fenomenologia desfășurării. Aceste rezultate sunt în acord calitativ bun cu așteptările teoretice emise de modelarea noastră teoretică. Mai mult, în timpul etapelor de modelare micro-litografică, am identificat o listă completă de probleme și probleme care ar putea împiedica fabricarea dispozitivelor și altera calitatea proprietăților acestora, precum și performanța funcțională a VCMA. Pentru a atenua aceste puncte de blocare, am proiectat și fabricat o mască de litografie UV (a doua generație) care poate fi utilizată în proiectele viitoare. Pentru a adăuga o notă personală acestui capitol, aș spune că, pe lângă valoarea observațiilor științifice, pentru mine a fost o experiență de învățare profundă și un exercițiu de adaptare semnificativ, deoarece limitările tehnice și contextul pandemic au schimbat de mai multe ori traiectoria acestei lucrări. Cu toate acestea, nu aș putea să nu fiu recunoscătoare pentru această cale entropică, pentru că altfel am fi ratat analiza multi-scală a acestui fenomen și probabil am fi dobândit doar cunoștințe limitate la analiza experimentală. Ar fi fost foarte frustrantă efectuarea de măsurători cu pulsuri de câmp electric ale căror lungimi ar fi fost chiar multipli pari ai jumătăților perioadei de precesie. De asemenea, am fi ratat toate cunoștințele legate de originea Rashba a PMA și răspunsul PMA la câmpul electric și poate că am fi acceptat explicația exclusivă a dopajului de la interfețe în absența unor rezultate contradictorii, precum cele evidențiate de sistemul X/Fe/MgO descris în capitolul cinci.

Nu în ultimul rând, dezvoltarea acestei teze demonstrează clar complexitatea subiectelor PMA și VCMA și necesitatea unei abordări multi-scală pentru abordarea problemelor critice. Acest punct de vedere este în acord cu ideea din ce în ce mai acceptată, în zilele noastre, că spintronica necesită o abordare holistică, luând în considerare perspectivele sale de dezvoltare actuale și viitoare. Aceasta ar fi o abordare obligatorie pentru metodologia de cercetare în spintronică pentru a îndeplini cerințele de integrare în tehnologiile neuromorfe și cuantice care se dezvoltă într-un ritm rapid.

Bibliografie:

- [1] E. Masanet, A. Shehabi, N. Lei, S. Smith, and J. Koomey, “Recalibrating global data center energy-use estimates,” *Science*, vol. 367, pp. 984–986, 02 2020.
- [2] “CNRS News new technologies’ wasted energies,” <https://news.cnrs.fr/articles/new-technologies-wasted-energies>, accessed: 2022-10-17.
- [3] K. Bailey, L. Ceze, S. D. Gribble, and H. M. Levy, “Operating system implications of fast, cheap, non-volatile memory,” in *Proceedings of the 13th USENIX Conference on Hot Topics in Operating Systems*, ser. HotOS’13. USA: USENIX Association, 2011, p. 2.
- [4] “Everspin Technologies spin-transfer torque mram technology,” <https://www.everspin.com/spin-transfer-torque-mram-technology>, accessed: 2023-02-09.
- [4] B. Dieny, I. L. Prejbeanu, K. Garello, P. Gambardella, P. P. Freitas, R. Lehndorff, W. Raberg, U. Ebels, S. O. Demokritov, J. Akerman, A. Deac, P. Pirro, C. Adelman, A. Anane, A. V. Chumak, A. Hiroata, S. Mangin, M. C. Onbasli, M. D. Aquino, G. Prenat, G. Finocchio, L. L. Diaz, R. Chantrell, O. C. Fesenko, and P. Bortolotti, “Opportunities and challenges for spintronics in the microelectronic industry,” *Nature Electronics*, vol. 3, p. 446, Aug. 2020, review written by the SpinFactory European Consortium. [Online]. Available: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02917378>
- [5] C. Grezes, F. Ebrahimi, J. G. Alzate, X. Cai, J. A. Katine, J. Langer, B. Ocker, P. Khalili Amiri, and K. L. Wang, “Ultra-low switching energy and scaling in electric-field-controlled nanoscale magnetic tunnel junctions with high resistance-area product,” *Applied Physics Letters*, vol. 108, no. 1, p. 012403, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.4939446>
- [6] R.-A. One, H. Bea, S. Mican, M. Joldos, P. B. Veiga, B. Dieny, L. D. Buda-Prejbeanu, and C. Tiusan, “Route towards efficient magnetization reversal driven by voltage control of magnetic anisotropy,” *Scientific Reports*, vol. 11, no. 8801, Apr 2021. [Online]. Available: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-88408-z>
- [7] Y. Wu, K. Garello, W. Kim, M. Gupta, M. Perumkunnil, V. Kateel, S. Couet, R. Carpenter, S. Rao, S. Van Beek, K. Vudya Sethu, F. Yasin, D. Crotti, and G. Kar, “Voltage-gate-assisted spin-orbit-torque magnetic random-access memory for high-density and low-power embedded applications,” *Phys. Rev. Appl.*, vol. 15, p. 064015, Jun 2021.
- [8] S. Jung, H. Lee, S. Myung, H. Kim, S. K. Yoon, S.-W. Kwon, Y. Ju, M. Kim, W. Yi, S. Han, B. Kwon, B. Seo, K. Lee, G.-H. Koh, K. Lee, Y. Song, C. Choi, D. Ham, and S. J. Kim, “A crossbar array of magnetoresistive memory devices for in-memory computing,” *Nature*, vol. 601, no. 7892, p. 211—216, January 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04196-6>

- [9] F. Bonell, S. Murakami, Y. Shiota, T. Nozaki, T. Shinjo, and Y. Suzuki, "Large change in perpendicular magnetic anisotropy induced by an electric field in FePd ultrathin films," *Applied Physics Letters*, vol. 98, no. 23, p. 232510, 06 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.3599492>
- [10] R. Bishnoi, M. Ebrahimi, F. Oboril, and M. B. Tahoori, "Read disturb fault detection in stt-mram," in *2014 International Test Conference, 2014*, pp. 1–7.
- [11] C. Safranski, G. Hu, J. Z. Sun, P. Hashemi, S. L. Brown, L. Buzi, C. P. D'Emic, E. R. J. Edwards, E. Galligan, M. G. Gottwald, O. Gunawan, S. Karimeddiny, H. Jung, J. Kim, K. Latzko, P. L. Trouilloud, S. Zare, and D. C. Worledge, "Reliable sub-nanosecond mram with double spin-torque magnetic tunnel junctions," in *2022 IEEE Symposium on VLSI Technology and Circuits (VLSI Technology and Circuits), 2022*, pp. 288–289.
- [12] S. Kanai, F. Matsukura, and H. Ohno, "Electric-field-induced magnetization switching in CoFeB/MgO magnetic tunnel junctions with high junction resistance," *Applied Physics Letters*, vol. 108, no. 19, p. 192406, 05 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.4948763>
- [13] S. E. Barnes, J. Ieda, and S. Maekawa, "Rashba spin-orbit anisotropy and the electric field control of magnetism," *Scientific Reports*, vol. 4, Feb 2014.
- [14] R. A. One, S. Mican, A. Mesaros, M. Gabor, T. Petrisor, M. Joldos, L. D. Buda-Prejbeanu, and C. Tiusan, "Perpendicular magnetic anisotropy electric field modulation in magnetron-sputtered pt/co/x/mgo ultrathin structures with chemically tailored top interface," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 57, no. 6, pp. 1–10, 2021.
- [16] A. O. Leon and G. E. W. Bauer, "Voltage- and temperature-dependent rare-earth dopant contribution to the interfacial magnetic anisotropy," *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 32, no. 40, p. 404004, jul 2020. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1088/1361-648X/ab997c>
- [17] C. Ye, L.-L. Li, Y. Shu, Q.-R. Li, J. Xia, Z.-P. Hou, Y. Zhou, X.-X. Liu, Y.-Y. Yang, and G.-P. Zhao, "Generation and manipulation of skyrmions and other topological spin structures with rare metals," *Rare Metals*, vol. 41, no. 7, pp. 2200–2216, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12598-021-01908-9>
- [18] R.-A. One, S. Mican, A.-G. Cimpoes, u, M. Joldos, R. Tetean, and C. V. Tiusan, "Micromagnetic design of skyrmionic materials and chiral magnetic configurations in patterned nanostructures for neuromorphic and qubit applications," *Nanomaterials*, vol. 12, no. 24, p. 4411, 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2079-4991/12/24/4411>
- [19] K. Chen, D. Lott, A. Philippi-Kobs, M. Weigand, C. Luo, and F. Radu, "Observation of compact ferrimagnetic skyrmions in dyco3 film," *Nanoscale*, vol. 12, pp. 18 137–18 143, 2020. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1039/D0NR02947E>

[20] H.-A. Zhou, J. Liu, Z. Wang, Q. Zhang, T. Xu, Y. Dong, L. Zhao, S.-G. Je, M.-Y. Im, K. Xu, J. Zhu, and W. Jiang, "Rare-earth permanent magnet smco5 for chiral interfacial spin-orbitronics," *Advanced Functional Materials*, vol. 31, no. 46, p. 2104426, 2021. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adfm.202104426>

[21] S. Mican, R.-A. One, R.-C. Pop, C. V. Tiusan, and R. Tetean, "Influence of Cu addition on the structural, magnetic and magnetocaloric properties of the PrCo₃ intermetallic compound," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 905, p. 164248, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838822006399>

Lista de publicații și a rezultatelor diseminate

Articole Științifice

- Roxana-Alina One, Hélène Béa, Sever Mican, Marius Joldos, Pedro Brandao Veiga, Bernard Dieny, Liliana D Buda-Prejbeanu, Coriolan Tiusan, "Route towards efficient magnetization reversal driven by voltage control of magnetic anisotropy" *Scientific Reports*, vol. 11, 1, 8801, 2021. (IF=4.997, AIS=1.207)
- R.-A. One, S Mican, A Mesaros, M Gabor, T Petrisor, M Joldos, L.D. Buda-Prejbeanu, C Tiusan, "Perpendicular Magnetic Anisotropy Electric Field Modulation in Magnetron-Sputtered Pt/Co/X/MgO Ultrathin Structures With Chemically Tailored Top Interface" *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 57, 6, 1-10, 2021 (IF=1.848, AIS=0.399)
- Sever Mican, Roxana-Alina One, Razvan-Claudiu Pop, Coriolan Viorel Tiusan, Romulus Tetean, "Influence of Cu addition on the structural, magnetic and magnetocaloric properties of the PrCo₃ intermetallic compound" *Journal of Alloys and Compounds*, 905, 164248, 2022. (IF=6.2, AIS=0.736)
- Roxana-Alina One, Sever Mican, Angela-Georgiana Cimpoes, u, Marius Joldos, Romulus Tetean, Coriolan Viorel Tiusan, "Micromagnetic design of skyrmionic materials and chiral magnetic configurations in patterned nanostructures for neuromorphic and qubit applications" *Nanomaterials*, vol. 12, 24, 4411, 2022. (IF=5.3, AIS=0.707)
- Roxana-Alina One, Sever Mican, Coriolan Tiusan "Perpendicular magnetic anisotropy and its electric field manipulation in magnetic multilayered heterostructures" *Studia Universitatis Physica*, vol. 66, No. 1-2, 2021
- Roxana-Alina One, Coriolan Tiusan "Rashba field contribution and electric field control of the magnetic anisotropy" *Studia Universitatis Physica*, Volume 67, No. 1-2, 2022

Conferințe: prezentări orale

- MMM 2020, 2-6 November 2020, Virtual due to pandemic context "Optimization of the VCMA-Driven Magnetization Reversal" Roxana-Alina One, Hélène Béa, Charles-Élie Fillion, Sever Mican, Marius Joldos, Bernard Dieny, Liliana D. Buda-Prejbeanu, Coriolan Tiusan

- International Balkan Workshop on Applied Physics and Materials Science 2019, 16-19 July 2019, Contanta, Romania “Electric field switching of magnetization in HM/Co-MgO system: experiments, ab-initio, micromagnetic and atomistic studies” Roxana-Alina One, Sever Mican, Amalia Mesaros, Mihai Gabor, Traian Petrișor Jr, Liliana Buda-Prejbeanu, Marius Joldos, Coriolan Viorel Tiușan
- Processes in Isotopes and Molecules - 12th International Conference, 25.09.2019-27.09.2019 Cluj-Napoca, Romania “Magnetization dynamics in perpendicularly magnetized media under the influence of an electric field” Roxana-Alina One, Sever Mican, Amalia Mesaros, Mihai Gabor, Traian Petrișor, Liliana Buda-Prejbeanu, Marius Joldos, Coriolan Viorel Tiușan
- Processes in Isotopes and Molecules, Cluj-Napoca, 22-24 September, 2021 “Voltage control of perpendicular magnetic anisotropy in systems displaying quantum well effects” Roxana-Alina One, Sever Mican, Coriolan Viorel Tiușan
- International Balkan Workshop on Applied Physics and Materials Science, July 12-15, 2022 “Electric Field Assisted Magnetization Reversal In A Au/Fe/MgO Disk In A Pulse Length Independent Regime” Roxana-Alina One, Sever Mican, Coriolan Viorel Tiușan

Conferințe: postere

- European School on Magnetism – “Magnetism by Light”, 17th-28th September 2018, Kraków, Poland “Magnetization manipulation by electric field in perpendicularly magnetized thin films” R. One, A. Mesaros, M. Gabor, T. Petrișor Jr, V. Pop, C. Tiușan
- ESONN Grenoble (European School On Nanosciences & Nanotechnologies), 25th August - 14th September 2019, Grenoble, France “Multiscale approach for electric field switching of magnetization in HM-3d-MgO systems” Roxana-Alina One, Sever Mican, Amalia Mesaros, Mihai Gabor, Traian Petrișor, Liliana Buda-Prejbeanu, Marius Joldos, Coriolan Viorel Tiușan
- INTERMAG, 2nd – 30th April 2021, Virtual due to pandemic context “Perpendicular magnetic anisotropy electric field modulation in magnetron sputtered Pt/Co/X/MgO ultra-thin structures with chemically tailored top interface” R. A. One, S. Mican, A. Mesaros, M. Gabor, T. Petrișor Jr, M. Joldos, L.D. Buda-Prejbeanu, and C. Tiușan

Acknowledgements:

These results have been obtained with support from the following entities and resources:

«MODESKY »PN-III-P4-ID-PCE-2020-0230-P, PCE 245/02.11.2021

«EMERSPIN» ID PN-III-P4-ID-PCE-2016-0143, No. UEFISCDI:22/12.07.2017

« SPINTAIL » ID PN-II-PCE-2012-4-0315, No. UEFISCDI:23/29.08.2013

«SPINTRONIC» POS CCE Project: ID. 574, code SMIS-CSNR 12467

and Erasmus+ Program



Erasmus+



Unitatea Executivă pentru
Finanțarea Învățământului Superior,
Cercetării, Dezvoltării și Inovării



MINISTERUL CERCETĂRII ȘI INOVĂRII

