

MINISTRY OF EDUCATION AND RESEARCH



TECHNICAL UNIVERSITY
OF CLUJ-NAPOCA, ROMANIA

Domeniul Fundamental: Științe ingineresti

Specializare: Ingineria Materialelor

TEZĂ DE ABILITARE

REZUMAT

Materiale pentru spin-orbitronică

Conf. dr. Mihai Sebastian GABOR

**Facultatea de Ingineria Materialelor și a Mediului
Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca**

Cluj-Napoca

2025

str. Memorandumului nr. 28, 400114 Cluj-Napoca, România

tel. +40-264-401200, fax +40-264-592055, secretariat tel. +40-264-202209, fax +40-264-202280

www.utcluj.ro

Cuprinsul tezei

1. Introducere	5
2. Rezultate și realizări științifice	15
2.1. Introducere	15
2.2. Spin-orbitronica	16
2.2.1. Cuplajul spin-orbită	16
2.2.2. Efectul Hall de spin	18
2.2.3. Cuplul curenților de spin	20
2.2.4. Materiale pentru spin-orbitronică	23
2.3. Anizotropia magnetică perpendiculară în filme subțiri pe bază de aliaje Heusler	26
2.4. Cuplul de spin în heterostructuri epitaxiale (001) pe bază de aliaje Heusler	43
2.5. Cuplul de spin de volum și la interfață în multistraturi subțiri Pt/Co/MgO	51
2.6. Către aplicații: Diode și routere pe bază de pereți de domenii magnetice	70
3. Planuri de dezvoltare a carierei	89
4. Anexa I - Curriculum Vitae	99
5. Anexa II - Lista articolelor ISI publicate	103
6. Anexa III - Îndeplinirea cerințelor minime	117
7. Bibliografie	119

Rezumat

În teza *Materiale pentru Spin-Orbitronică*, prezint pe scurt activitățile mele de cercetare desfășurate în cadrul Centrului pentru Spintronică, Superconductivitate și Știința Suprafeței al Universității Tehnice din Cluj-Napoca (C4S/UTCN), evidențiind o direcție de cercetare nouă pe care am inițiat-o: spin-orbitronica. Acest domeniu utilizează cuplajul spin-orbită în materiale nemagnetice pentru generarea, detectarea și manipularea eficientă a curenților de spin, esențială pentru controlul electric al texturilor magnetice chirale precum pereții de domeniu și skyrmionii în filme feromagnetice ultrasubțiri. Cercetarea mea se axează pe optimizarea materialelor și interfețelor pentru a îmbunătăți performanța, fiabilitatea și eficiența dispozitivelor, cu aplicații în memorii spintronice, logică și arhitecturi avansate de calcul.

În filmele ultrasubțiri, proprietățile de material de volum sunt semnificativ modificate din cauza efectelor de suprafață și interfață pronunțate. La grosimi de ordin atomic, atomii de la suprafață devin dominanți, modificând semnificativ caracteristici precum anizotropia magnetică, amortizarea Gilbert și interacțiunea Dzyaloshinskii–Moriya de interfață. Aceste proprietăți devin extrem de sensibile la calitatea interfeței, aranjamentul atomic și prezența defectelor structurale, prezentând relații complexe care necesită control și analiză precisă. Observând importanța ingineriei precise a interfețelor și a calității depunerii materialelor, am proiectat și coordonat construirea unui sistem hibrid specializat de depunere de filme subțiri, de vid ultra-înalt la C4S/TUCN, care combină pulverizarea catodică și evaporare în fascicul de electroni (<https://c4s.utcluj.ro/facilities.html>). Acest sistem oferă un control excepțional asupra compoziției și structurii interfeței, permițând astfel fabricarea heterostructurilor spintronice cu performanțe și fiabilitate ridicate.

Manuscrisul este organizat în două secțiuni principale. Prima secțiune, *Rezultate și realizări științifice*, prezintă concepte fundamentale în spin-orbitronică, identificând structura optimă de tip metal greu (HM)/feromagnet (FM)/strat de acoperire (CL) pentru deplasarea eficientă a pereților de domeniu magnetici chirali și a skyrmionilor, indusă de cuplurile spin-orbită. Criteriile esențiale pentru a obține funcționalitate eficientă includ anizotropie magnetică perpendiculară puternică, prezența interacțiunii Dzyaloshinskii–Moriya de interfață și generare eficientă a cuplurilor curenților de spin. Este demonstrată îndeplinirea acestor cerințe prin ingineria sistematică a materialelor și a interfețelor.

A doua secțiune, *Planuri de Dezvoltare a Carierei*, detaliază parcursul meu academic, proiectele de cercetare în curs și obiectivele viitoare. De la finalizarea doctoratului în 2011, în care am investigat aliaje Heusler și oxizi magnetici diluați, cercetarea mea a evoluat de la caracterizarea fundamentală a materialelor către dezvoltarea heterostructurilor spintronice avansate. În 2015, primul meu grant național de cercetare (SPINCOD <https://c4s.utcluj.ro/SPINCOD/spincod.html>) a explorat fenomene critice de suprafață și interfață în filme ultrasubțiri de aliaje Heusler, cu aplicații în dispozitive spintronice. Am evaluat sistematic perspectivele integrării acestor materiale în dispozitive spintronice emergente, urmărind să îmbunătățim stabilitatea dispozitivelor, să reducem consumul de energie și să realizăm o stocare de date cu densitate mai mare.

În 2018, am obținut un al doilea grant național (SOTMEM <https://c4s.utcluj.ro/SOTMEM/sotmem.html>), investigând comutarea magnetizării indusă de cuplul curenților de spin în materiale nemagnetice cu rezistivitate scăzută precum platina (Pt) și paladiul (Pd), în vederea creșterii eficienței și scalabilității dispozitivelor de tip memorie.

Manipularea indusă de cuplurile curenților de spin a pereților de domeniu chirali și a skyrmionilor a devenit un domeniu foarte promițător în cadrul spin-orbitronicii, datorită potențialului său în dispozitive logice și de memorie cu consum ultra-redus de energie. În cadrul proiectului SPINSYNE (<https://c4s.utcluj.ro/SPINSYNE/spinsyne.html>), am fost printre primii care au demonstrat experimental că deplasarea pereților de domeniu și a skyrmionilor este influențată de amortizarea chirală, afectând dinamica lor indusă de curent și de câmp. De asemenea, am evidențiat două funcționalități noi în dispozitive bazate pe pereți de domeniu chirali: comportament de redresare asemănător unei diode și capabilități de rutare a pereților de domeniu. Aceste descoperiri evidențiază potențialul spin-orbitronicii nu doar în stocarea și procesarea convențională a datelor, ci și în noi paradigme de calcul, precum sistemele neuromorfe.

Dincolo de metalele grele convenționale, izolatorii topologici (TI) precum Bi_2Se_3 și Bi_2Te_3 atrag tot mai mult atenția în spin-orbitronică datorită stărilor de suprafață protejate topologic, cu blocare spin-moment cinetic, ducând la conversia eficientă sarcină-spin și la reducerea relaxării spinului. Aceste materiale prezintă coerență de spin robustă și cuplaje de spin mari la temperatura camerei, favorabile manipulării eficiente energetic a straturilor feromagnetice în heterostructuri TI/FM. Integrarea TI-urilor cu materiale cuantice bidimensionale permite dezvoltarea *valleytronicii*, oferind control simultan asupra gradelor de libertate de spin și *valley*, îmbunătățind den-

sitatea informației și permițând operații logice multi-stare. Alte planuri de cercetare viitoare includ integrarea de straturi de electrolit solid pentru a modula electric cuplajul spin-orbită, vizând creșterea eficienței dispozitivelor.

Spin-orbitronica are un potențial important pentru tehnologiile de calcul *beyond*-CMOS. Ea promite aplicații cu consum redus de energie și viteză ridicată, incluzând memorii magnetice cu acces aleatoriu bazate cuplul curenților de spin, arhitecturi logice scalabile și calcul neuromorf, care pot avansa semnificativ inteligența artificială și eficiența computațională. Laboratorul nostru din cadrul C4S/TUCN este bine echipat, cu sisteme avansate de depunere și instrumente de caracterizare, fiind ideal pentru formarea doctorilor în ingineria materialelor și fabricarea dispozitivelor spintronice. Cercetarea mea continuă, bazată pe metode avansate de depunere și ingineria materialelor, își propune să poziționeze C4S/TUCN în avangarda acestui domeniu de cercetare cu impact global aflat în continuă expansiune.