

ȘCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor

Ing. Cristian Leonard MUŞUROI

# Microsenzori Magnetorezistivi pentru Măsurarea Non-Contact a Curentului Electric și Detecția de Nanoparticule Magnetice

# Magnetoresistive Microsensors for Non-Contacting Current Measurement and Magnetic Nanoparticles Detection

# REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

Conducător științific

Prof. Dr.Ing. Elena HELEREA

BRAȘOV, 2024

# Mulțumiri

În primul rând, aș dori să mulțumesc îndrumătorului meu de doctorat, Prof. Dr.Ing. Elena Helerea pentru, perseverența și îndemânarea de care a dat dovadă în perioada de cercetare și de redactare a acestei lucrări. Mulțumesc, pentru răbdarea și îndrumarea de care a dat dovadă de-a lungul perioadei de cercetare, a demersurilor de publicare și de redactare a acestei teze. Abordarea temeinică a studiilor științifice de lucru, împreună cu cunoștințele vaste, înțelepciunea și experiența, au oferit un progres constant în demersurile mele științifice. Apreciez sprijinul pentru încercarea de a realiza o lucrare interdisciplinară complexă care necesită cunoștințe din mai multe domenii.

Doresc să-mi exprim aprecierea față de membrii comisiei de îndrumare a doctoratului meu: Prof. Dr.Ing. Paul Borza, Dr.Fiz. Marius Volmer, Dr.Ing. Marius Daniel Călin, Dr.Fiz. Marioara Avram și față de ceilalți membri ai Facultății de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor, din cadrul Universității Transilvania din Brașov, care au contribuit la îmbunătățirea calității acestei teze prin furnizarea de sugestii valoroase.

În mod special doresc să mulțumesc Dr.Fiz. Marius Volmer pentru inestimabilele sale cunoștințe științifice, sprijin material, logistic și moral în ceea ce privește domeniul științific și subiectul tezei. Acest sprijin a fost esențial pentru dezvoltarea acestei teze.

De asemenea, aș dori să-mi exprim recunoștința față de cercetătorul principal Dr.Fiz. Marioara Avram de la Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Microtehnologii (IMT-București) și colegii săi pentru sprijinul acordat pe parcursul elaborării tezei de doctorat și al proiectelor de cercetare asociate.

În plus, aș dori să mulțumesc cercetătorului principal Dr. Jenica Neamțu de la ICPE-CA București și colegilor asociați pentru asistența în depunerea structurilor senzorilor magnetici.

În plus, aș dori să îi mulțumesc colegului meu ing. Mihai Oproiu, pentru eforturile depuse în asistarea mea cu montaje experimentale, măsurători, prietenie și sprijin moral.

Nu în ultimul rând, aș dori să mulțumesc tuturor coautorilor mei din lucrările publicate în timpul doctoratului. Eforturile mele de publicare nu ar fi ajuns atât de departe fără un efort de echipă susținut și motivație suplimentară.

În cele din urmă, aș dori să mulțumesc familiei mele pentru sprijinul iubitor și încurajările neîncetate, în ciuda eșecurilor ocazionale în cercetarea mea. Ca în toate lucrurile, uneori apar dificultăți și eșecuri, dar încurajările lor m-au ajutat să depășesc fiecare obstacol.

Cercetarea de doctorat s-a dovedit a fi un proces provocator, dar incitant. M-am bucurat din plin de provocările asociate, de cunoștințele dezvoltate și de conexiunile create. Le mulțumesc sincer tuturor colaboratorilor pentru oportunitatea de a lua parte la procesul meu de maturizare științifică și profesională.

# Cristian Leonard Mușuroi

# CUPRIINS

1. Introducere	6
1.1. Necesitatea și Justificarea Tezei	6
1.2. Scopul și Obiectivele Cercetării	7
1.3. Metodologia Cercetării și Analiza Bibliometrică	7
1.4. Structura și Conținutul Tezei	8
2. Efectele Magnetorezistive în Microfabricarea Senzorilor Magnetici	10
2.1. Senzori de Câmp Magnetic — Aplicații și Materiale Active	10
2.1.1. Aplicații ale Senzorilor Magnetici	10
2.2. Efecte Magnetorezistive	11
2.2.1. Magnetorezistența ca Parametru de Material	11
2.2.2. Efectul Anizotropic Magnetorezistiv (AMR) și efectul Hall Planar (PHE)	12
2.2.3. Efectul Magnetorezistiv Gigant (GMR)	14
2.2.4. Efectul Magnetorezistiv Tunel	17
2.3. Caracteristicile și Performanțele Senzorilor Magnetorezistivi	18
2.3.2. Parametrii Caracteristici ai Senzorilor Magnetorezistivi	18
2.3.4. Aplicații ale Senzorilor Magnetorezistivi	19
2.3.5. Măsurarea Curentului cu Senzori Magnetorezistivi	20
2.4. Concluzii	21
3. Simulări Micromagnetice ale Comportamentului Senzorilor Magnetorezistivi	23
3.1. Aplicarea Teoriei Micromagnetice în Proiectarea Senzorilor Magnetorezistivi	23
3.1.2. Simulări Micromagnetice ale Comportamentului Senzorilor AMR și PHE	23
3.1.3. Simulări Micromagnetice ale Comportamentului Senzorilor GMR	26
3.2. Comportamentul Senzorilor Magnetorezistivi sub Influența Nanoparticulelor Magnetice	27
3.2.2. Simularea Micromagnetică a Structurii GMR pentru Detecția Nanoparticulelor Magne	tice
	27
3.3. Concluzii	29

4. Metode Analitice Macroscopice și Simulări Electromagnetice pentru Diferite Tipuri de	
Conductori	30
4.1. Câmpul Magnetic Creat de Curentul care Circulă în Conductoare	30
4.1.2. Cazul Conductorului Rectiliniu cu Secțiune Transversală Circulară	30
4.2. Câmpul Magnetic Creat de Curentul care Circulă prin Trasee Rectilinii Simple și Multiple	31
4.2.1. Metoda analitică	31
4.2.2. Simulări și Validare Experimentală a Traseului în Formă de U și a Bobinei Planare	34
4.3. Concluzii	
5. Detecția Nanoparticulelor Magnetice cu Senzori Magnetorezistivi	40
5.1. Metoda magnetică aplicată pentru detectarea nanoparticulelor magnetice	40
5.2. Studii Experimentale pentru Detectarea Nanoparticulelor Magnetice cu Senzori GMR	40
5.2.1. Detecția prin Analiza Derivatei Semnalului de Ieșire	40
5.3. Concluzii	43
6. Conceperea și Realizarea de Dispozitive de Măsurare Non-Contact a Curentului Electric b	azate
pe Senzori Magnetorezistivi	45
6.1. Proiectarea, Construcția și Caracterizarea unui Senzor AMR de tip Punte	45
6.1.1. Proiectarea și Funcționarea Senzorului Punte AMR	45
6.1.2. Fabricarea unui Demonstrator de Senzori cu Punte AMR	46
6.1.3. Caracterizarea Senzorului Punte AMR	47
6.1.4. Rezultate Experimentale pentru Cipul Demonstrator de Măsurare a Curentului	49
6.2. Conceperea unui Dispozitiv cu un Singur Traseu bazat pe Senzori GMR pentru Măsurarea Non-Contact a Curentului Electric	₃ CC/CA 50
6.2.1. Caracterizarea Senzorului de Curent bazat pe GMR	50
6.2.2 Dezvoltarea Dispozitivului cu un Singur Traseu bazat pe Senzori GMR	51
6.3. Conceperea unui Dispozitiv Multi-traseu bazat pe Senzori GMR pentru Măsurarea CC/CA Contact a Curentului Electric	Non- 54
6.3.1. Dezvoltarea și Modul de Funcționare al Dispozitivului Multi-Traseu bazat pe Senzor	'i GMR 54
6.3.2. Rezultate Experimentale pentru Măsurarea CC/CA a Curentilor	
6.5. Concluzii	

7. Concluzii Finale, Contribuții Originale, Valorificarea Rezultatelor Cercetării și Noi Direcții de		
Cercetare	59	
7.1. Concluzii Finale	59	
7.2. Contribuții Originale	63	
7.3. Valorificarea Rezultatelor Cercetării	65	
7.4. Noi Direcții de Cercetare	69	
Bibliografie (Selectivă)	70	

# 1. Introducere

#### 1.1. Necesitatea și Justificarea Tezei

Având în vedere ritmul actual de dezvoltare științifică și tehnologică accelerată, există o cerere din ce în ce mai mare de îmbunătățire a performanței tehnologiilor de detecție și, de asemenea, de dezvoltare a unor noi soluții pentru probleme care nu au fost prezente înainte. În acest sens, dezvoltarea tehnologiilor senzorilor magnetici este de o importanță semnificativă datorită gamei largi de aplicații și performanțelor lor unice.

Tehnologiile senzorilor magnetici sunt esențiale pentru progresul în multe industrii, îmbunătățind performanța sistemelor de detectare și control, permițând testarea nedistructivă, implementarea aplicațiilor biomedicale, IoT și a dispozitivelor portabile, pentru monitorizarea energiei și a mediului.

Optimizarea senzorilor magnetici în general și a senzorilor magnetorezistivi în special este necesară pentru a le îmbunătăți performanța și a le permite să fie utilizați în mod eficient într-o varietate de aplicații. Optimizarea înseamnă îmbunătățirea unor parametri importanți precum sensibilitatea, rezoluția, liniaritatea, stabilitatea și consumul de energie. Aceste optimizări permit senzorilor magnetorezistivi să furnizeze măsurători mai precise și mai fiabile ale câmpurilor magnetice, ceea ce duce la îmbunătățirea performanței generale ale sistemelor.

Caracteristicile intrinseci ale senzorilor magnetorezistivi (MR) (scalabilitate ridicată, sensibilitate și integrabilitate cu circuitele integrate cu semiconductori) fac din aceștia o alegere excelentă pentru o gamă largă de aplicații. Cu toate acestea, în special pentru aplicațiile cu sensibilitate ridicată, trebuie luate în considerare considerații specifice de proiectare și implementare, în special pentru detectarea câmpurilor magnetice de intensitate foarte scăzută.

Astfel, provocarea constă în dezvoltarea celor mai bune practici pentru obținerea unei performanțe maxime a senzorului cu adaptabilitate ridicată, complexitate minimă, costuri reduse și consum redus de energie. Acest obiectiv poate fi atins prin optimizarea designului și a alegerii materialului, a configurației experimentale și prin minimizarea dezavantajelor senzorilor magnetorezistivi: histerezisul, neliniaritatea, decalajul de semnal, deriva de temperatură, susceptibilitatea la interferențele câmpurilor electromagnetice.

În ceea ce privește prioritățile europene de cercetare, tema de cercetare privind implementarea și îmbunătățirea performanțelor senzorilor magnetorezistivi se încadrează în inițiativa Horizont Europe 2021-2027 în cadrul Pilonului II, pe direcția de cercetare -Cluster 4: Digital, Industry, Space. Această direcție sprijină noile tehnologii și inovarea în producție, inclusiv materialele avansate și tehnologiile cuantice [1].

Din punct de vedere al priorităților naționale de cercetare, conform documentului privind Planul Național de Cercetare Dezvoltare Inovare 2022-2027, tema de cercetare se încadrează în direcția de cercetare Programul 5.7 "Parteneriate pentru inovare", prin PNCDI IV [2].

Astfel, tema de cercetare a tezei este aliniată tendințelor actuale și se referă la dezvoltarea generală a senzorilor magnetorezistivi, de la abordarea teoretică, la proiectarea, simularea și realizarea de montaje experimentale, în vederea îmbunătățirii caracteristicilor senzorilor pentru aplicații specifice.

# 1.2. Scopul și Obiectivele Cercetării

Scopul cercetării este identificarea și dezvoltarea de soluții adecvate pentru optimizarea performanței senzorilor magnetorezistivi pentru două aplicații specifice: detecția nanoparticulelor magnetice pentru dispozitive biosenzoristice și măsurarea curentului fără contact. Astfel, scopul tezei este conceptualizarea și implementarea metodelor de măsurare pentru măsurarea curenților slabi fără contact și pentru detectarea nanoparticulelor magnetice prin utilizarea senzorilor și dispozitivelor bazate pe efectele magnetorezistive.

# **Obiective specifice**

**O1.** Dezvoltarea unei baze de cunoștințe prin documentarea și analiza comparativă a efectelor magnetorezistive pentru a fi aplicate în proiectarea și conceptualizarea de aplicații ale senzorilor de câmp magnetic.

**O2.** Modelarea, simularea și validarea experimentală pentru procesele care au loc în senzorii magnetorezistivi și în structurile de măsurare a curentului electric.

**O3.** Dezvoltarea de metode și montaje experimentale pentru detectarea nanoparticulelor magnetice cu senzori magnetorezistivi.

**O4.** Dezvoltarea de dispozitive de măsurare a curentului non-contact bazate pe senzori magnetorezistivi.

# 1.3. Metodologia Cercetării și Analiza Bibliometrică

Cercetarea a urmat etapele specifice metodologiei cercetării științifice: Identificarea problemei de cercetare; Definirea scopului și a direcției clare de cercetare; Documentarea și analiza critică; Stabilirea soluției și concretizarea ei prin modelare, simulare, proiectare; Realizarea practică și validarea soluției propuse; Stabilirea de noi direcții de cercetare.

În vederea stabilirii interesului pentru tema de cercetare și pentru analiza stadiului actual al senzorilor magnetorezistivi a fost realizată o analiză bibliometrică prin care s-a procedat la căutarea și extragerea de informații relevante și analiza sistemică pentru stabilirea tendințelor privind subiectul de cercetare, în vederea analizei stadiului actual al tehnologiei privind senzorii magnetorezistivi [3, 4, 5].

Rezultatul analizei bibliometrice a servit ca punct de plecare în identificarea subiectului de cercetare, definirea domeniului și a problematicii cercetării, în documentarea și analiza critică a literaturii de specialitate. Stabilirea bazei de cunoștințe a permis dezvoltarea de modele, simulări și setări experimentale privind comportamentul senzorilor magnetorezistivi. Următoarea fază de cercetare a constat în proiectarea, construirea și validarea setărilor experimentale cu senzori magnetorezistivi. Această fază de cercetare poate fi continuată datorită noilor provocări ale sistemelor propuse și ale tehnologiilor senzorilor magnetorezistivi.

#### 1.4. Structura și Conținutul Tezei

Teza de doctorat este structurată în 7 capitole, conține un număr de 144 figuri, 19 tabele, 250 referințe, 3 anexe, totalizând 216 pagini.

În cadrul tezei de doctorat sunt implementate tehnologii de senzori magnetorezistivi bazate pe efectul magnetorezistiv anizotropic (AMR), efectul magnetorezistiv gigant (GMR) și efectul magnetorezistiv tunel (TMR). Sunt dezvoltate două domenii de aplicare: detectarea nanoparticulelor magnetice și măsurarea curentului fără contact, în special a curenților mici de ordinul mA și µA.

Capitolul 1, *Introducere*, argumentează necesitatea abordării subiectului senzorilor magnetorezistivi și justifică tematica tezei de cercetare. Senzorii magnetorezistivi și aplicațiile acestora sunt subiecte prioritare în prezent în cadrul dezvoltării continue și implementării pe scară largă a tehnologiilor Industrie 4.0 și 5.0 și a Internetului lucrurilor (IoT). Sunt descrise scopul tezei și metodologia de cercetare.

În capitolul 2, *Efectele Magnetorezistive în Microfabricarea Senzorilor Magnetici*, sunt sistematizate cunoștințele privind efectele magnetorezistive care servesc drept bază pentru microfabricarea senzorilor magnetorezistivi. Efectul AMR este analizat în comparație cu efectul Hall planar (PHE). Sunt evidențiate particularitățile efectului GMR și ale efectului TMR. Se realizează o analiză critică cu privire la necesitatea de a îmbunătăți funcționarea și alegerea materialelor și dezvoltarea de aplicații specifice cu senzori magnetorezistivi.

În capitolul 3, *Simulări micromagnetice ale comportamentului senzorilor magnetorezistivi*, sunt efectuate simulări utilizând metodologia teoriei micromagnetice. Simulările sunt efectuate utilizând soluțiile software SimulMag, LLG Micromagnetics și Object Oriented Micromagnetic Framework (OOMMF) pentru a evidenția comportamentul senzorilor bazați pe efectele AMR, PHE și GMR pentru măsurarea câmpului magnetic. Simulările pe un singur domeniu sunt efectuate pentru senzorii AMR și PHE pe structuri permalloy. Simularea multidomenială este realizată pentru senzorii PHE pentru a studia influența geometriei și a anizotropiei magnetice pentru structurile în formă de cruce, pătrat și inel. Simularea prezenței nanoparticulelor magnetice de maghemită pe suprafața a trei structuri de senzori PHE (în formă de cruce, de disc și de inel) este realizată pentru a ilustra efectele localizării nanoparticulelor magnetice. De asemenea, pentru o structură simulată de valvă de spin GMR, sunt obținute caracteristicile câmpului în prezența și absența nanoparticulelor magnetice pe suprafața senzorului. Sunt discutate avantajele metodei de abordare micromagnetică, precum și inexactitățile care pot apărea, subliniindu-se că este necesară cercetarea experimentală pentru validarea rezultatelor.

În capitolul 4, *Metode analitice macroscopice și simulări electromagnetice pentru diferite geometrii de conductori*, autorul aplică modelarea analitică pentru a evidenția câmpul magnetic creat de curentul electric care trece prin conductori cu diferite geometrii: conductor rectiliniu, buclă de curent dreptunghiulară, bobină toroidală cu secțiuni circulare și dreptunghiulare. Aceste elemente servesc drept bază pentru dezvoltarea unei metode analitice de evaluare a câmpului magnetic creat de o singură și mai multe trasee de curent rectilinii, care fac posibilă concentrarea câmpului magnetic în regiunea de măsurare a senzorului magnetorezistiv. Pentru o bandă în formă de U și o bobină plană, sunt efectuate simulări COMSOL Multiphysics și măsurători experimentale, iar rezultatele sunt

validate cu metoda analitică propusă. În plus, influența lungimii, lățimii și formei geometrice asupra câmpului magnetic generat de curentul care trece prin acest traseu este realizată în COMSOL. Aceste rezultate sunt utile pentru proiectarea traseelor de curent pentru aplicații de măsurare a curentului cu câmp redus și fără contact.

În capitolul 5, *Detecția Nanoparticulelor Magnetice cu Senzori Magnetorezistivi*, autorul sistematizează datele privind proprietățile și comportamentul nanoparticulelor magnetice. Sunt discutate cerințele complexelor imunoenzimatice magnetice. Studiul experimental cu metoda magnetometrului cu eșantion vibrator (VSM) pe nanoparticule de maghemită a determinat caracteristicile de magnetizare ale nanoparticulelor de maghemită la diferite temperaturi, precum și temperatura de blocare și procedura de caracterizare a nanoparticulelor magnetice funcționalizate cu polietilenglicol. Studiile experimentale pentru detectarea nanoparticulelor magnetice (NPM) au fost efectuate cu senzori GMR folosind diferite metode: analiza derivatei semnalului de ieșire, detectarea DC, magnetorelaxometrie AC.

În capitolul 6, *Conceperea și Realizarea de Dispozitive de Măsurare Non-Contact a Curentului bazate pe Senzori Magnetorezistivi*, sunt descrise instalațiile experimentale concepute și realizate de autor pentru măsurarea fără contact a curentului electric cu senzori magnetorezistivi. În funcție de tehnologia de fabricație a senzorilor, determinările experimentale sunt efectuate cu traductoare bazate pe senzori AMR, GMR si TMR. Sunt dezvoltate patru configuratii pentru testarea senzorilor de măsurare și a traductoarelor. În primul rând, este descris un sistem demonstrativ bazat pe senzori punte AMR, proiectat de autor și microfabricat la ICPE-CA București. Demonstratorul include doi senzori AMR de tip punte care pot fi utilizați independent sau în configurație diferențială. Traseul de măsurare a curentului în formă de U, călirea magnetică și configurația experimentală au fost realizate în cadrul Laboratorului de Inginerie Electrică și Cercetare în Fizică Aplicată din cadrul Universității Transilvania din Brașov. Sunt prezentate și analizate caracteristicile de ieșire obținute pentru diferite câmpuri magnetice de polarizare atât în curent continuu cât și în curent alternativ și pentru diferite configurații de măsurare. În al doilea rând, este implementată o configurație cu senzori GMR comerciali într-o configurație diferențială dublă cu o singură bandă de curent în formă de U. Configurația a arătat o sensibilitate îmbunătățită în comparație cu măsurarea cu un singur senzor și demonstrează importanța ajustării câmpului de polarizare în timpul funcționării. A treia configurație, implementată cu aceiași senzori comerciali GMR ca și a doua configurație, include un dispozitiv de măsurare a curentului cu mai multe trasee de curent, construite ca o bobină plană pentru a amplifica câmpul magnetic în zona senzorului. Pentru măsurarea fără contact a curenților prin plăcile cu circuite imprimate, este descrisă o sondă demonstratoare de curent reglabil cu un senzor TMR de tip comercial, dezvoltată de autor. Configurația experimentală este proiectată cu posibilitatea de mișcare pe 3 axe și de rotație pentru a permite poziționarea precisă a sondei pe placa de circuite imprimate. Senzorul TMR a fost evaluat pentru măsurători de curent continuu și alternativ fără contact. Rezultatele sunt promițătoare pentru a servi drept bază pentru o aplicație automată de măsurare a curentului fără contact sau pentru aplicații de cartografiere magnetică 2D/3D.

Capitolul 7, *Concluzii Finale, Contribuții Originale, Valorificarea Rezultatelor Cercetării și Noi Direcții de Cercetare*, rezumă rezultatele obținute de autor. Sunt evidențiate contribuțiile originale ale autorului și sunt prezentate metodele de diseminare și utilizare a rezultatelor cercetării.

# 2. Efectele Magnetorezistive în Microfabricarea Senzorilor Magnetici

#### 2.1. Senzori de Câmp Magnetic — Aplicații și Materiale Active

#### 2.1.1. Aplicații ale Senzorilor Magnetici

Senzorii de câmp magnetic sunt necesari într-o varietate din ce în ce mai mare de aplicații care necesită performanțe îmbunătățite: sensibilitate ridicată, histerezis scăzut, zgomot redus și derivă termică redusă. În plus, performanțele specifice ale senzorilor trebuie să fie adaptate la aplicații specifice. De exemplu, aplicații ale senzorilor portabili pentru monitorizarea de la distanță a stării de sănătate sau biosenzorii lab-on-a-chip necesită dezvoltarea de noi tehnologii de implementare, precum substraturile flexibile [6].

Mai multe fenomene și efecte stau la baza principiului de funcționare a senzorilor de câmp magnetic. Bobinele de căutare, senzorii micro(fluxgate) [8], senzorii magnetorezistivi (MR), senzorii cu efect Hall care se bazează pe efecte galvanomagnetice dezvoltate în semiconductori și filme magnetice subțiri [9]. Senzorii magnetorezistivi (MR) și cu efect Hall sunt preferați pentru mai multe aplicații datorită ușurinței interfeței și compatibilității lor cu tehnologia circuitelor integrate (CI), care combină circuitele electrice digitale și analogice pe un singur cip. Domeniile lor de aplicare specifice și bine stabilite sunt strâns legate de performanța acestor senzori. Senzorii MR cu strat magnetic sunt considerați a fi extrem de sensibili și potriviți pentru câmpuri magnetice joase între  $10^{-9}$  și  $10^{-2}$  T, în timp ce senzorii Hall, realizați din semiconductori, sunt mai puțin sensibili și potriviți pentru câmpuri magnetice mai mari, de  $(10^{-1} - 10^2)$  T [10]. Spre deosebire de senzorii MR, senzorii Hall nu prezintă saturație la câmpuri magnetice ridicate. Trebuie menționat faptul că dispunerea senzorilor și caracteristicile magnetice ale materialelor utilizate pentru depunerea structurii stivei au un impact semnificativ asupra acestor limite pentru senzorii MR.



Figura 2.1. Distribuția senzorilor de câmp magnetic în funcție de câmp magnetic util (date originale din [25, 26]).

Senzorii magnetorezistivi sunt utilizați pentru a construi senzori magnetici pentru dispozitive precum magnetometre de înaltă sensibilitate [12], codificatoare de rotație și microbusole, precum și pentru cercetarea fundamentală, și anume, studiul proceselor de magnetizare și al altor fenomene conexe în filme subțiri nanostructurate [13], senzori de curent [18-20], detectarea nanoparticulelor magnetice pentru biosenzori [21-24] în dispozitive Lab-on-a-Chip (LOC).

#### 2.2. Efecte Magnetorezistive

#### 2.2.1. Magnetorezistența ca Parametru de Material

Efectul magnetorezistiv (MR) reprezintă o modificare a rezistivității electrice a unui material plasat într-un câmp magnetic [29, 30]. Un metal sau un semiconductor omogen generează un curent într-o varietate de condiții dacă este aplicat un câmp electric *E*. Legea conducției electrice descrie relația liniară microscopică între densitatea locală de curent electric *J* și intensitatea câmpului electric *E*:

$$\boldsymbol{J} = \sigma \boldsymbol{E} \tag{2.1}$$

unde  $\sigma$  este conductibilitatea electrică.

Pentru materialele nemagnetice, efectul MR poate fi exprimat cu [31]:

$$MR(H)\% = \frac{R(H) - R(H=0)}{R(H=0)} \times 100$$
 (%) (2.2)

unde R(H) and R(H = 0) reprezintă rezistența electrică a materialului pentru un câmp magnetic aplicat de intensitate H și pentru H = 0.

Pentru metalele nemagnetice, plasate în câmpuri magnetice de până la 1 T, amplitudinea efectului MR este mai mare decât zero, dar este mai mică de 1 %. În cazul semiconductorilor, amplitudinea efectului MR este mai mare, dar este semnificativ afectată de dependența de temperatură a rezistivității. Efectul MR, în acest caz, se datorează forței Lorentz care curbează traiectoriile electronilor de conducție și scurtează astfel distanța medie parcursă de aceștia de-a lungul câmpului aplicat. Datorită acestui efect, magnetorezistența este maximă atunci când câmpul magnetic este perpendicular pe planul sondei și, prin urmare, pe direcția curentului. Efectele longitudinale se pot manifesta numai la câmpuri magnetice mari (de obicei, mai mari de 5 T). Pentru materialele magnetice, efectul MR poate fi descris cu:

$$MR(H) = \frac{R(H) - R(H_{sat})}{R(H_{sat})}$$
(2.3)

unde R(H) este rezistența în funcție de câmpul aplicat și  $R(H_{sat})$  este rezistența corespunzătoare stării de saturație.

Raportul MR are valori diferite în funcție de tipul de efecte magnetorezistive și de tehnologia de microfabricare. Există diferite tipuri de senzori MR.

**Senzorii de magnetorezistență anizotropică** (AMR; raport MR 2-4%): Sunt senzori în care rezistența depinde de unghiul dintre magnetizare și direcția curentului electric. Senzorii AMR utilizează o electronică de citire în buclă deschisă cu o gamă dinamică de la DC la 1 GHz și o gamă de sensibilitate de la 10<sup>-2</sup> la 50 Gs sau de la 10<sup>3</sup> la 5×10<sup>6</sup> nT. Cu feedback în buclă închisă, câmpul minim detectabil poate fi redus la 0,1 nT pentru lățimi de bandă limitate. Acești senzori sunt ușori, compacți, ușor de fabricat și necesită între 0,1 și 0,5 mW de putere.

**Senzori magnetorezistivi gigant** (GMR; raport MR ~8-20 %): Efectul GMR se manifestă în structuri magnetice multistrat de tipul FM/NM/FM legate prin interacțiune de schimb, în care NM se referă la un strat conductiv nemagnetic de grosime nanometrică (Cu, Cr) iar FM desemnează straturi magnetice de Ni80Fe20, Co, CoFeB etc. La o structură TMR stratul nemagnetic (NM) este un dielectric de tipul MgO<sub>2</sub> sau Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Senzorii GMR pot fi utilizați în câmpuri cu o rezoluție între 10-10<sup>8</sup> nT. Comparativ cu senzorii AMR, aceștia au adesea un zgomot 1/f mai mare.

Senzori magnetorezistivi tunel (TMR; raport MR ~200 % sau mai mare): Senzorii TMR, din punct de vedere al structurii magnetice, sunt asemănători cu senzorii GMR, diferența constând în faptul că curentul trece printr-o barieră izolatoare și perpendicular pe suprafața peliculei, în timp ce într-un element GMR curentul trece orizontal pe suprafața peliculei. În ciuda numeroaselor avantaje ale senzorilor TMR (magnetorezistență medie de aproximativ 200 %, zgomot redus), aceștia au un răspuns pătratic cu curentul injectat. Acești senzori pot fi utilizați pentru a construi memorii nevolatile cu acces aleatoriu (MRAM).

Senzori cu magnetorezistență extraordinară (EMR; raport MR ~10<sup>5</sup>%): Prin utilizarea de semiconductori cu o bandă interzisă îngustă și geometrii specifice se pot obține valori foarte mari ale magnetorezisten ei la temperatura camerei. În senzor este utilizat un disc van der Pauw simetric din antimoniură de indiu cu neomogenitate de aur încorporată. Deoarece senzorul nu conține niciun material magnetic, deviația în funcție de câmp a curentului în jurul neomogenității produce magnetorezistența. Densitatea de stocare magnetică ar putea fi crescută la 1 Tbit/in<sup>2</sup> prin utilizarea unor capete de citire cu magnetorezistență extraordinară.

Senzori balistici magnetorezistivi (BMR; raport MR , x00-1000 %): Doi feromagneți trebuie să realizeze un contact metalic foarte mic pentru ca magnetorezistența balistică să apară. Electronii pot trece balistic între cei doi feromagne i dacă contactul este suficient de mic și nu conține un perete de domeniu magnetic. Efectul este cauzat de împrăștierea neadiabatică a spinilor electronilor prinși în constricție, prin pereți de domeniu magnetic la scară atomică.

Senzori cu magnetorezistență colosală: Anumite materiale, în special oxizii perovskitici pe bază de mangan, au o caracteristică numită magnetorezistență colosală (CMR) care le permite să își modifice drastic rezistența electrică atunci când sunt expuse la un câmp magnetic. Deși acest fenomen nu este încă pe deplin înțeles, acești senzori prezintă efecte de anizotropie foarte reduse și sunt capabili să înregistreze doar magnitudinea câmpului magnetic cu o precizie ridicată, indiferent de orientarea câmpului în raport cu planul senzorului. Alte avantaje includ: gama largă de frecvențe de funcționare (până la câteva sute de kHz) și posibilitatea de a măsura câmpuri magnetice cu impulsuri înalte, cu durate ale impulsurilor de ordinul microsecundelor.

#### 2.2.2. Efectul Anizotropic Magnetorezistiv (AMR) și efectul Hall Planar (PHE)

Efectul de magnetorezistență anizotropică a fost descoperit de William Thompson (Lord Kelvin) în 1856 și apare în materiale feromagnetice 3d în stare brută sau în filme subțiri de Ni, Co, Fe și aliajele lor [32, 33]. Efectul AMR constă într-o variație a rezistivității electrice a materialului, în funcție de unghiul  $\theta$  format de direcția magnetizării M a materialului și curentului electric I. Dispersia s-d anizotropă a electronilor cauzată de cuplajul spin-orbită pe orbitele tridimensionale ale materialelor feromagnetice este sursa fizică a AMR. Acest efect face ca rezistivitatea electrică a

multor materiale magnetice să fie maximă atunci când curentul circulă paralel cu direcția câmpului magnetic aplicat și minimă atunci când curentul circulă perpendicular pe acesta. Astfel, amplitudinea efectului AMR poate fi exprimată prin:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_{\perp}} = \left(\frac{\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}}{\rho_{\perp}}\right) \times 100 \%$$
(2.4)

unde rezistivitățile  $\rho_{\parallel}$  și  $\rho_{\perp}$ sunt definite la câmpul de saturație, atunci când curentul *I* este paralel și, respectiv, perpendicular pe direcția magnetizării *M*.

Raportul magnetorezistenței AMR pentru filmele feromagnetice de NiFe este de obicei cuprins între 2-2,2 % pentru câmpuri în domeniul mT, pentru majoritatea materialelor magnetice, acest raport este rareori mai mare de 5 %. Permalloy (Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>) având constante de magnetostricțiune aproape zero în toate direcțiile, este frecvent utilizat pentru acest efect. Pentru materialele magnetice policristaline (inclusiv aliajele de tip 3d), dependența rezistivității este exprimată prin [34]:

$$\rho_{xx} = \rho_{\perp} + \left(\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}\right) \cos^2 \theta \tag{2.5}$$

$$\rho_{xy} = \frac{1}{2} \left( \rho_{||} - \rho_{\perp} \right) \sin 2\theta \tag{2.6}$$

une  $\rho_{xx}$  este rezistivitatea paralelă și  $\rho_{xy}$  este rezistivitatea perpendiculară, în timp ce  $\theta$  este unghiul între densitatea de curent **J** și magnetizarea **M**.

Efectul AMR poate fi vizualizat schematic prin considerarea unui film subțire de material feromagnetic (Figura 2.3).



Figura 2.3. Diagrama schematică pentru efectele AMR (a) și PHE (b) asupra unei pelicule subțiri de Permalloy, cu sensul de curgere al curentului după axa x. Toate componentele magnetizării M sunt în planul filmului.

Diferența de rezistivitate longitudinală descrie efectul AMR, în timp ce variația de rezistivitate transversală corespunde efectului Hall planar (PHE).

Pentru dispozitivele reale, anizotropia de formă (/ > w) și câmpul uniaxial de anizotropie  $H_K$  definesc axa ușoară de magnetizare. Dependența unghiulară a componentelor tensorului de rezistivitate  $\rho_{xx}$  și  $\rho_{xy}$  poate fi utilizată pentru a determina câmpurile electrice longitudinal  $E_x$  și transversal  $E_y$  atunci când un curent electric trece prin film de-a lungul direcției x și magnetizarea M formează un unghi  $\theta$  cu direcția curentului [36]:

$$\begin{cases} E_x = J_x \cdot \rho_{xx} = J_x \rho_\perp + J_x (\rho_\parallel - \rho_\perp) \cos^2 \theta \\ E_y = J_x \rho_{xy} = J_x (\rho_\parallel - \rho_\perp) \sin \theta \cos \theta \end{cases}$$
(2.7)

unde  $|J| = J_x$  și  $\rho_{\parallel}$ ,  $\rho_{\perp}$  sunt definite mai sus și  $\rho_{xx}$ ,  $\rho_{xy}$  sunt componentele tensorului rezistivității electrice:

$$E = \rho J; \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{xx} & \rho_{xy} \\ \rho_{yx} & \rho_{yy} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} J_x \\ 0 \end{bmatrix}$$
(2.8)

Efectul AMR este caracterizat prin variația rezistenței longitudinale, care este dată de  $\rho_{xx}$  și măsurată prin:

$$V_{AMR} = E_x \cdot l \tag{2.9}$$

Într-o geometrie comună efectului Hall, al doilea termen  $E_y$  descrie generarea unui semnal perpendicular pe direcția curentului, dar cu câmpul aplicat conținut în planul filmului. Acest semnal PHE, notat  $V_{PHE}$ , este:

$$V_{\rm PHE} = I \frac{(\rho_{||} - \rho_{\perp})}{t} \sin \theta \cos \theta \tag{2.10}$$

unde *t* este grosimea stratului feromagnetic (FM), iar *I* este curentul electric aplicat de-a lungul axei *x* a stratului FM.

În structurile de tip AFM/FM (AFM: antiferomagnetic - IrMn, FeMn) sau AFM/NM/FM se poate stabili o interacțiune de schimb între stratul antiferomagnetic și cel feromagnetic. Stratul feromagnetic este, de asemenea, responsabil pentru orientarea magnetizării din stratul feromagnetic adiacent în absența unui câmp magnetic extern. Aceasta definește polarizarea prin interacțiune de schimb,  $H_{ex}$ .

Comparativ cu AMR, senzorii PHE au avantaje specifice. În primul rând, panta maximă se obține, figura 2.3, la  $\frac{\pi}{4} + \frac{n\pi}{2}$  în timp ce pentru PHE la  $\frac{n\pi}{2}$ . Acest lucru permite ca senzorul PHE să fie realizat utilizând proceduri de fabricație cu costuri reduse, unghiul  $\theta$  fiind egal cu  $\frac{n\pi}{2}$  față de câmpul magnetic aplicat [35].

De asemenea, având în vedere semnalul relativ slab al senzorului AMR (câteva procente) și având în vedere că acesta este măsurat, de obicei, pe un element de curent continuu conectat la o rezistență, acest lucru face ca îmbătrânirea și variațiile de temperatură care afectează această componentă să influențeze și senzorul AMR. Pentru a eluda această problemă, de obicei patru elemente AMR sunt conectate într-o configurație de punte Wheatstone. Pentru senzorii PHE, un astfel de aranjament este necesar deoarece componenta DC nu mai este prezentă la câmp zero.

#### 2.2.3. Efectul Magnetorezistiv Gigant (GMR)

În 1988, efectul de magnetorezistență gigantică (GMR) a fost descoperit într-un multistrat magnetic [Fe/Cr]n. Efectul GMR este o scădere observată a rezistenței electrice a multistraturilor de filme magnetice subțiri atunci când se aplică un câmp magnetic extern suficient de mare. S-a descoperit că o modificare considerabilă a rezistenței este cauzată de o schimbare a orientării momentului magnetic relativ între straturile magnetice vecine.

Rezistența  $R_P$  este la cel mai scăzut nivel atunci când straturile sunt magnetizate în paralel. La cea mai mare valoare a  $R_{AP}$ , rezistența apare atunci când magnetizările straturilor magnetice adiacente sunt antiparalele între ele [20]. Răspândirea în funcție de spin a electronilor cu spin-up (spin paralel cu magnetizarea stratului) și spin-down (spin antiparalel cu magnetizarea stratului) la interfețe și în straturile FM este procesul fizic care stă la baza fenomenului GMR. Premiul Nobel pentru Fizică 2007 a fost acordat în semn de recunoaștere a importanței acestei descoperiri [42].

Efectul GMR se poate manifesta în diferite structuri: multistrat; pseudo-valvă de spin, valvă de spin și film subțire granular (Figura 2.5.).



Figura 2.5. Diferite structuri GMR (a) multistrat (b) pseudo-valvă de spin (c) valvă de spin (d) film subțire granular. Straturile feromagnetice (FM) sunt separate de straturi distanțiere nemagnetice (NM). La câmp zero, feromagneții sunt aliniați antiparalel, în timp ce la câmp de saturație, momentele magnetice sunt aliniate în paralel.

Fiecare dintre aceste structuri are moduri de funcționare și caracteristici diferite, având în vedere că există o creștere a rezistivității filmului subțire pe măsură ce grosimea acestuia scade la câteva straturi atomice. Se poate spune că straturile magnetice acționează ca niște filtre pentru spinul cu orientare opusă. Practic, rezistența R rezultată poate fi exprimată în funcție de unghiul  $\theta$  dintre magnetizări ( $R_{AP}$  - rezistența antiparalelă:  $R_P$  - rezistența paralelă):

$$R = \frac{R_{\rm AP} + R_{\rm P}}{2} + \frac{R_{\rm P} - R_{\rm AP}}{2} \cdot \cos\theta \tag{2.12}$$

Astfel, pentru configurația antiparalelă:

$$\theta = 180^{\circ} \rightarrow cos\theta = -1 \rightarrow R = R_{AP} = R_{High}$$
 (2.13)

în timp ce, pentru configurația paralelă:

$$\theta = 0^{\circ} \rightarrow cos\theta = 1 \rightarrow R = R_{\rm P} = R_{Low}$$
 (2.14)

Efectul GMR este definit prin:

$$GMR = \frac{R_{\rm AP} - R_{\rm P}}{R_{\rm AP}} \cdot 100 ~[\%]$$
 (2.15)

Un raport GMR ridicat este preferat pentru senzorii cu sensibilitate ridicată. GMR are o valoare tipică de 4 % până la peste 20 %.

Efectul GMR se bazează pe faptul demonstrat experimental că conservarea spinului electronilor se extinde pe distanțe de până la zeci de nanometri, mai lungi decât grosimea unui multistrat tipic. Ca urmare, curentul electric circulă în două moduri: unul pentru electronii corespunzători care au spinul în sus și altul pentru electronii care au proiecția spinului în jos. Modelul senzorului GMR poate fi redus la modelul rezistenței Mott cu două canale, deoarece canalele de spin sunt independente și pot fi considerate ca două elemente rezistive conectate în paralel (Figura 2.6).



Figura 2.6. Model al rezistoarelor pentru efectul GMR cu schema circuitului echivalent: Împrăștierea electronilor în sistemul cu trei straturi în cazul (a) configurație magnetică paralelă și (b) configurație magnetică antiparalelă (adaptat din [43]).

Există două configurații în care poate apărea efectul GMR: curent în plan (CIP) și curent perpendicular pe plan (CPP) (Figura 2.7). Având în vedere că curentul circulă în planul unei pelicule subțiri, multistrat, dispozitivele CIP sunt mai ușor de fabricat, iar CIP-GMR este mai ușor de identificat. Controlul orientării momentelor magnetice în straturile feromagnetice și realizarea unor straturi suficient de subțiri în raport cu calea liberă medie a electronilor reprezintă cele mai mari provocări [44]. Cu toate acestea, deoarece aranjamentul CPP necesită măsurarea rezistenței unui film perpendicular pe straturi, acesta este mai dificil de implementat. Este important să se ia în considerare că rezistența stivei poate fi măsurată în raport cu rezistența cablurilor și a altor componente ale circuitului. Au fost încercate multe tehnici pentru a realiza cu succes măsurători CPP GMR.



Figura 2.7. Configurații de stive multistrat GMR: (a) curent în plan (CIP); (b) curent perpendicular pe plan (CPP) (adaptat din [44]).

Printre acestea se numără reducerea secțiunii transversale a straturilor până la domeniul nanometric, stivuirea unui număr mare de straturi în eșantion, creșterea grosimii totale a eșantionului (deși acest lucru poate cauza neuniformități în stratul distanțier) și chiar utilizarea de conductoare supraconductoare pentru a reduce rezistența în raport cu porțiunea GMR a circuitului.

## 2.2.4. Efectul Magnetorezistiv Tunel

Joncțiunile magnetice tunel (MTJ), denumite și structuri de magnetorezistență tunel (TMR), se bazează pe principiul tunelării dependente de spin. Dacă, în cazul GMR, curentul de măsurare curge de obicei în plan, în cazul senzorilor TMR, curentul traversează prin tunel stratul de separare neconductor și curge perpendicular pe planul stratului [48]. Straturile magnetice nu sunt separate de un strat conductor, ci de un strat izolator foarte subțire (de obicei 1–2 nm).

Luând în considerare structurile CIP și CPP (Figura 2.7), TMR apare numai în geometria curent-perpendicular-la-plan (Figura 2.9), iar valoarea curentului este mai mică decât cea a valvelor de spin metalice, totuși, magnitudinea acestui efect este mult mai pronunțată (MR este de ordinul sutelor de procente).



Figura 2.9. Schema unei structuri de valvă de spin TMR. P desemnează stratul de protecție (de acoperire), B este stratul tampon (de obicei, Si), FM reprezintă feromagnetul, AF reprezintă antiferromagnetul, iar antiferromagnetul sintetic este format de o structură spin-valvă tradițională FM/spacer/FM, **j** este densitatea curentului prin joncțiune.

Efectul TMR rezultă din capacitatea unei particule cuantice de a traversa bariera de potențial la scară atomică, imposibil de descris cu ajutorul fizicii clasice: funcția de unda asociată unei particule nu se anulează în zona barierei, ci este atenuată într-un mod exponențial în această zonă. Dacă funcția de undă nu devine matematic nulă la ieșirea din barieră, exista o probabilitate ca particula să traverseze bariera de potențial. Utilizând acest principiu, Gamow [49] a reușit să explice dezintegrarea nucleară cu ajutorul emisiilor de particule  $\alpha$ . Pe baza acestui principiu, au fost dezvoltate dispozitive precum diodele tunel, joncțiunile metal-oxid-metal (MOM), joncțiunile Josephson supraconductoare și, recent, joncțiunile tunel cu componente magnetice.

Electronii de conducție din metalele feromagnetice prezintă polarizare de spin, iar spinul este păstrat pe tot parcursul procesului de tunelare, conform experimentelor de tunelare. Jullière (1975) a prezentat primul model utilizat pentru tunelarea dependentă de spin [50]. Polarizarea *P* a electronilor "tunelând din metale feromagnetice" este utilizată în acest concept pentru a explica conductanța de tunelare dependentă de spin:

$$P = \frac{n^{\uparrow} - n^{\downarrow}}{n^{\uparrow} + n^{\downarrow}} \tag{2.29}$$

În consecință,

$$\frac{n^{\uparrow}}{n^{\downarrow}} = \frac{1+P}{1-P} \tag{2.30}$$

$$G = G^{\uparrow} + G^{\downarrow} \tag{2.31}$$

unde *G* este conductanța barierei tunel și  $n^{\uparrow}$ ,  $n^{\downarrow}$  denotă "densitatea de stări" a electronilor polarizați pe spin. Relațiile pentru efectul TMR bazate pe modelul Jullière sunt:

$$TMR = \frac{G_P - G_{AP}}{G_P} = \frac{\Delta R}{R} = \frac{R_{AP} - R_P}{R_{AP}} = \frac{2P_1 P_2}{1 + P_1 P_2}$$
(2.32)

unde  $G_P$  and  $G_{AP}$  sunt conductanțele cu orientare paralelă și antiparalelă,  $P_1$  și  $P_2$  sunt polarizările de spin a două straturi feromagnetice,  $R_{AP}$  este rezistența dintre cele două straturi atunci când acestea sunt orientate antiparalel, în timp ce  $R_P$  este rezistența pentru orientarea paralelă.

Pentru evaluări mai precise ale efectului tunel dependent de spin, modelul electronilor liberi pe straturi este mai potrivit pentru calcularea magnetorezistenței prin efect tunel pentru o structură electronică precizată. În special, benzile de energie de la suprafața Fermi ale mai multor metale (Na, K, Cu, Ag, Au) și ale unor semiconductoare pot fi reprezentate în mod rezonabil prin modelul electronilor liberi. Însă, cu rare excepții, structura electrică a metalelor de tranziție nu poate fi descrisă în mod adecvat de modelul electronilor liberi.

În concluzie, fenomenul transportului de electroni dependent de spin este esențial pentru descrierea comportamentului dispozitivelor GMR și TMR.

#### 2.3. Caracteristicile și Performanțele Senzorilor Magnetorezistivi

#### 2.3.2. Parametrii Caracteristici ai Senzorilor Magnetorezistivi

Cea mai bună abordare în selectarea unui senzor specific este definirea cerințelor generale și specifice pentru aplicația respectivă. În acest sens, trebuie luate în considerare cu atenție parametrii specifici pentru senzor (sensibilitatea, precizia, eroarea, caracteristicile dinamice), precum și condițiile de funcționare din mediu (temperatură, câmpuri de interferență electromagnetică, stres chimic, mecanic etc.).

Cele mai importante caracteristici generale ale senzorilor magnetorezistivi sunt: intervalul (scala completă) de intrare, scala completă de ieșire, precizia, eroarea de calibrare, histerezisul, neliniaritatea, saturația, repetabilitatea, rezoluția, impedanța de ieșire, caracteristicile dinamice (electrice, termice), fiabilitatea. Clasificarea acestor parametri se bazează pe cea efectuată în [57].





Alte caracteristici importante ale senzorilor magnetici sunt: rezoluția câmpului magnetic, raportul semnal-zgomot: acuratețea (absolută) și precizia (relativă), liniaritatea răspunsului magnetic, consumul de energie, dimensiunea, greutatea, costul și disponibilitatea, mediul de aplicare (umiditate, substanțe chimice, stres mecanic), impedanța electrică de intrare și de ieșire, stabilitatea, fiabilitatea, durata de viață. Limitările senzorilor magnetorezistivi sunt legate de reproductibilitate, decalajul de tensiune, deviațiile de temperatură și restricțiile de lățime de bandă.

Figura 2.12 prezintă gama de aplicații pentru senzorii de câmp magnetic în ceea ce privește câmpul magnetic util. Din figura 2.12 se observă că senzorii GMR/TMR pot fi utilizați de la pT până aproape de kT, în timp ce AMR pot fi utilizați în domeniul nT până la mT.

## 2.3.4. Aplicații ale Senzorilor Magnetorezistivi

Senzorii magnetorezistivi pot detecta câmpuri magnetice cuprinse de obicei între 10<sup>-9</sup> și 10<sup>-1</sup> T, cu o scară liniară de până la ~ 10<sup>-2</sup> T. Senzorii magnetorezistivi construiți din straturi magnetice subțiri au sensibilități mult mai mari în comparație cu senzorii Hall pe bază de semiconductori. Pe de altă parte, limitările senzorilor MR sunt legate de caracteristicile magnetice neliniare ale materialelor utilizate, de structura sistemului multistrat și de dispunerea senzorului. Tabelul 2.6 prezintă un rezumat al domeniilor de aplicare pentru senzorii AMR, GMR, TMR, precum și adecvarea senzorilor MR pentru domeniul respectiv.

	Tehnologia senzorilor		
Domeniai de aplicare	AMR	GMR	TMR
Senzori de curent	~	$\checkmark$	~
Magnetometru pentru câmpuri reduse	~	$\checkmark\checkmark\checkmark$	$\checkmark\checkmark$
Poziționare (liniară/angulară)	~	~	~

Table 2.6. Gradul de adecvare a domeniului de aplicare cu tehnologia senzorilor magnetorezistivi.

Senzori tactili	$\checkmark\checkmark$	<b>√√√</b>	~
Senzori de deformare	$\checkmark\checkmark$	✓	$\checkmark\checkmark$
Busolă magnetică	$\checkmark\checkmark$	✓	~
Rezonanță magnetică nucleară (RMN)/MRI	$\checkmark$	<b>√</b> √	$\checkmark\checkmark$
Testare nedistructivă	$\checkmark$	✓	~
Senzori magnetici flexibili	$\checkmark\checkmark$	✓	$\checkmark\checkmark$
Microfluidică	$\checkmark$	✓	~
MRAM	×	✓	$\checkmark\checkmark$
Capete de citire pentru hard disk	×	✓	$\checkmark\checkmark$
Cultura neuronilor	×	✓	~
Cartografierea creierului/cardiacă	×	~	$\checkmark\checkmark$
Microscop de scanare	×	~	$\checkmark\checkmark$
Biosenzori	✓	$\checkmark \checkmark \checkmark$	$\checkmark\checkmark$

<sup>1</sup> Numărul de semne "✓" pentru o aplicație marchează adecvarea utilizării tehnologiei senzorilor pentru domeniul de aplicație.

## 2.3.5. Măsurarea Curentului cu Senzori Magnetorezistivi

Sistemele electrice necesită o măsurare precisă a curentului electric, iar diferite tehnici de detectare a curentului au fost create și modificate pentru a satisface cerințe specifice. Aceste aplicații necesită măsurători precise DC/AC pentru a controla dispozitive precum motoare electrice, contactoare electrice și alte elemente, precum și pentru a măsura cantitatea și calitatea energiei electrice. Există un interes continuu pentru îmbunătățirea performanțelor și funcțiilor metodelor de detectare a curentului, în special odată cu apariția tehnologiilor Industry 4.0 și 5.0 în era internetului obiectelor. O clasificare generală a metodelor de măsurare a curentului este prezentată în Figura 2.14.



Figura 2.14. Diagrama schematică a clasificării metodelor de măsurare a curentului electric.

Există trei metode generale de măsurare a curentului electric: rezistivă, magnetică și bazată pe tranzistori. Metodele rezistive și cele bazate pe tranzistoare măsoară direct curentul electric, în timp ce metodele magnetice pot fi aplicate pentru măsurarea fără contact a curentului.

Deși benefice în anumite situații, metodele de detectare a curentului pe bază rezistivă prezintă o serie de neajunsuri, inclusiv precizie redusă, pierderi de putere, lățime de bandă redusă, lipsă de izolare galvanică și zgomot. Dimpotrivă, majoritatea acestor dezavantaje sunt contracarate de sistemele de detectare fără contact a curentului (metode electromagnetice), deși acestea au anumite provocări unice în ceea ce privește funcționarea și implementarea.

Metodele de măsurare fără contact care includ transformatoare de curent, bobine de tip Rogowski, senzori (micro)fluxgate, senzori Hall, senzori MR au anumite avantaje, cum sunt: izolarea galvanică, stabilitatea termică și rezistența sporită la câmpurile magnetice de interferență.

Tehnologiile tipice de senzori de curent fără contact sunt transformatoarele de curent AC/DC [143, 144, 145], magnetometrele fluxgate [146], senzorii cu efect Hall [149], senzorii magnetorezistivi anizotropi (AMR) [150], senzorii PHE [151], senzorii magnetorezistivi giganți (GMR) [10, 143, 152, 153] și senzorii magnetorezistivi cu efect tunel (TMR) [154, 155].

Cele mai populare instrumente pentru măsurarea doar a componentei de curent alternativ sunt bobinele Rogowski și transformatoarele de curent. Cu toate acestea, senzorii care pot detecta cu exactitate câmpurile magnetice de curent continuu trebuie să fie utilizați universal, pentru a măsura curenții de curent continuu/curent alternativ. Senzorii de curent bazați pe efecte magnetorezistive oferă o precizie ridicată, derivă scăzută la temperatură, ofset scăzut și sunt potriviți pentru producția de volum redus împreună cu capacități înalte de integrare cu circuite integrate (CI). Pe baza proprietăților senzorilor AMR, PHE GMR și TMR, au fost dezvoltate numeroase aplicații pentru măsurarea curentului electric.

# 2.4. Concluzii

1. A fost stabilită baza teoretică pentru cercetarea și dezvoltarea senzorilor magnetorezistivi, pentru o poziționare generală și aplicativă ale senzorilor magnetorezistivi, comparativ cu alte tehnologii de senzori magnetici.

2. Accentul este pus pe explicația fizică a efectelor magnetorezistive: magnetorezistența anizotropică (AMR), efectul Hall planar (PHE) - care este o consecință a AMR, magnetorezistența gigantică (GMR) și senzorii cu magnetorezistență tunel (TMR sau MTJ).

3. Efectul AMR este definit ca dependența rezistivității sau rezistenței electrice a unui material de unghiul format de direcția magnetizării interne a materialului și de direcția curentului electric.

4. Descrierea exactă a efectelor GMR și TMR necesită aplicarea unor modele teoretice care combină teorii ale mecanicii cuantice cu teoria semi-clasică a fenomenelor de transport.

5. În proiectarea senzorilor magnetorezistivi trebuie luați în considerare atât parametrii generali cât și parametrii caracteristici specifici pentru senzorii magnetorezistivi.

6. Determinarea caracteristicilor generale și specifice ale senzorilor MR poate să nu fie suficientă pentru evaluarea performanței senzorului, în special atunci când se introduc alte elemente perturbatoare în sistemul senzorilor (cum ar fi nanoparticulele magnetice) și se sporește complexitatea configurației senzorului prin introducerea unei rețele de senzori, a altor componente electronice sau prin introducerea unor componente sensibile la mediu, cum ar fi analiții biologici, pentru aplicații de biosenzori pentru utilizare in vitro sau in vivo.

7. Există avantaje specifice pentru diferite tipuri de senzori magnetorezistivi:

 Raportul de magnetorezistență tipic crește în următoarea ordine pentru acești senzori: AMR (2-4 %), GMR (8-20 %), TMR (mai mare de 100-200 % sau chiar mii de procente). Senzorii AMR sunt simpli și eficienți din punct de vedere al costurilor, cu performanțe bune la câmpuri joase, dar limitate la câmpuri înalte, derivă termică scăzută (pentru senzorii PHE în configurație punte) în comparație cu senzorii GMR și TMR.

- Performanța GMR depinde în mare măsură de configurația senzorului: GMR CPP tinde să fie mai mare decât GMR CIP în majoritatea cazurilor, în timp ce GMR granular poate fi comparat cu CPP în ceea ce privește comportamentul.
- Comportamentul de câmp al efectului GMR este pătratic, foarte similar cu efectul AMR, dar amplitudinea efectului GMR este mai mare, de până la 15-20 % la temperatura camerei.
- Senzorii TMR au o sensibilitate mai mare și un consum de energie mai mic în comparație cu senzorii GMR, dar au, de asemenea, niveluri de zgomot mai ridicate, ceea ce limitează utilitatea lor pentru aplicații pe teren redus. De asemenea, din cauza fabricației mai complexe, senzorii TMR sunt cei mai scumpi în comparație cu GMR și AMR.

8. Analiza comparativă a aplicațiilor și performanțelor senzorilor MR demonstrează gama largă de aplicații pentru senzorii MR: senzori de curent fără contact, magnetometre de precizie, senzori de poziție (viteză, busolă etc.), senzori de testare nedistructivă, senzori de temperatură, senzori de stres mecanic, senzori inteligenți, senzori flexibili, biosenzori etc. Unele efecte MR pot fi mai potrivite pentru o anumită aplicație.

9. Senzorii magnetorezistivi oferă acuratețe ridicată, rezistență, derivă scăzută la temperatură, deviație a semnalului de ieșire scăzut, integrare strânsă a circuitelor integrate, ceea ce îi face potriviți pentru măsurarea curentului fără contact.

Principalele provocări identificate de limitările senzorilor MR în ceea ce privește implementarea aplicațiilor sunt legate de eroarea de rezoluție, precizie și repetabilitate a mmăsurătorilor. Pentru aplicațiile de biosenzori, acest lucru este valabil mai ales în partea de câmp scăzut a scalei complete. Astfel, este necesar să se stabilească noi metode de modelare, proiectare și fabricare pentru senzorii magnetorezistivi, care vor avea caracteristici și performanțe special concepute pentru fiecare domeniu de aplicare.

# 3. Simulări Micromagnetice ale Comportamentului Senzorilor Magnetorezistivi

## 3.1. Aplicarea Teoriei Micromagnetice în Proiectarea Senzorilor Magnetorezistivi

#### 3.1.2. Simulări Micromagnetice ale Comportamentului Senzorilor AMR și PHE

Pentru a ilustra comportamentul senzorilor AMR și PHE a fost efectuat un studiu cu simulări micromagnetice. O parte a acestui studiu a fost publicată în lucrarea de autor din [172].

Cele două utilizări principale ale senzorilor PHE sunt detectarea câmpului magnetic și codificarea rotației. Trebuie remarcat faptul că rotația magnetizării poate fi cauzată de un câmp magnetic rotativ sau de un câmp magnetic *H* aplicat de-a lungul axei *y* (Figura 3.2). Pe baza acestor ipoteze, sunt propuse mai multe strategii de simulare, pornind de la o metodă de simulare pe un singur domeniu magnetic la una multidomenială. În plus, sunt evidențiate prin simulări efectele geometriei structurii.

#### a. Modelarea Multidomenială a Efectelor AMR și PHE

În structurile reale, efectele AMR și PHE pot fi afectate de histerezis, deoarece straturile de permalloy nu sunt monodomeniale, chiar și în ipoteza unei anizotropii uniaxiale ridicate. Figura 3.4 prezintă rezultatele simulărilor micromagnetice utilizând simulatorul LLG Micromagnetics [163]. Parametrii utilizați pentru simulare, pentru o bandă de permalloy de 800x400x10 nm<sup>3</sup> cu dimensiunile celulei de 5x5x5 nm<sup>3</sup>,  $M_S$ =710 kA/m, constanta de interacțiune de schimb A = 1.3x10<sup>-11</sup> J/m, constanta de anizotropie  $K_u$ =500 J/m<sup>3</sup> după axa x la temperatura T = 0 K.





Magnetizarea internă nu are o direcție preferată de-a lungul axei longitudinale; se poate produce o inversare cu 180° din cauza vârfurilor sau a expunerii la anumite câmpuri magnetice externe. Această inversare a magnetizării duce la o sensibilitate diferită a sistemului.

Pentru a depăși această problemă, ar trebui utilizată o bobină internă sau un câmp magnetic extern controlat pentru a reseta și a seta magnetizarea la orientarea inițială. Alte metode de menținere a stării inițiale de magnetizare, pentru H = 0, constau în utilizarea structurilor cu polarizare de schimb, cum ar fi bistraturile FM/AF, tristraturile FM/NM/AF sau valvele de spin de tipul FM/NM/FM/AF, unde FM este un strat feromagnetic (NiFe, NiFeCo etc.), NM este un strat nemagnetic, cum ar fi Cu, Ag, Pt și AF este un strat antiferomagnetic, cum ar fi FeMn sau IrMn [39]. Figura 3.5 prezintă caracteristicile simulate ale semnalului PHE pentru trei structuri polarizate prin schimb cu permalloy. Simulările au fost efectuate în aceleași condiții ca în Figura 3.4.



Figura 3.5. Simularea micromagnetică multidomenială a unui semnal PHE pentru trei structuri Permalloy: (a) 250×250×10 nm<sup>3</sup>, (b) 250×80×10 nm<sup>3</sup> și 250×50×10 nm<sup>3</sup>.

Simularea arată importanța anizotropiei formei pentru reducerea efectelor de histerezis magnetic.

#### b. Influența geometriei structurii

Pentru a ilustra efectele geometriei senzorului asupra semnalului PHE, au fost efectuate simulări micromagnetice cu LLG Micromagnetics simulator v4 pentru structuri de permalloy în formă de cruce (Figura 3.6), de pătrat (Figura 3.8) și inel cu disc interior (Figura 3.9), cu următorii parametri:  $M_S$ = 710 kA/m, constanta de schimb A =  $1.3 \times 10^{-11}$  J/m, constanta de anizotropie  $K_u$ =500 J/m<sup>3</sup> de-a lungul axei x la temperatura T = 0 K,  $H_{EB} = 150$  Oe cu o celulă de discretizare de 10x10x10 nm<sup>3</sup>. Între  $K_u$  și  $H_k$  există relația:  $H_k = 2K_u/M_S$ . În toate simulările, stratul magnetic are o grosime de 10 nm.

Dimensiunile geometrice ale fiecărei structuri de permalloy sunt: pentru structurile în formă de cruce 900x900x10 nm<sup>3</sup> (300 nm arm, Figura 3.6a), 500x500x10 nm<sup>3</sup> pentru formă de pătrat. Unele dintre rezultatele simulărilor pentru diferitele geometrii ale structurilor PHE sunt rezumate în Figura 3.6 (în formă de cruce), Figura 3.8 (în formă de pătrat) și Figura 3.9 (inel cu disc interior).





Figura 3.6. Simularea micromagnetică multidomenială a unei structuri de permalloy în formă de cruce în care H este aplicat pe axa ușoară și axa dură: (a) geometria și reprezentarea axei dure, (b) semnalul PHE pe axa dură, (c) reprezentarea axei ușoare, (d) semnalul PHE pe axa ușoară.



Figura 3.8. Simularea micromagnetică multidomenială a unei structuri de permalloy de formă pătrată în care *H* este aplicat pe axa ușoară: (a) structură simulată, (b) curbă de magnetizare, (c) semnal PHE calculat.

În figura 3.8 se poate observa procesul de comutare bruscă a magnetizării, care este o consecință a mișcării pereților de domeniu, mai mult decât o rotație ireversibilă a momentelor magnetice.



Figura 3.9. Simularea micromagnetică multidomenială a unui inel cu structură permalloy cu disc interior: (a) Instantanee a structurii simulate pentru câmpul coercitiv  $H_c$ , (b) semnal PHE calculat pentru  $H_{ex}$ =50 Oe; inserția arată răspunsul PHE pentru  $H_{ex}$ =200 Oe.

Diferitele stări de magnetizare din structura inelului cu disc interior (conform codului de culori), Figura 3.9a, arată posibilitatea creării unei punți Wheatstone din elemente AMR rezistive, unde brațele punții vor avea variații diferite în câmpul magnetic. În centrul discului, un domeniu magnetic este legat magnetostatic (diagonal) cu spinii magnetici ai inelului.

#### 3.1.3. Simulări Micromagnetice ale Comportamentului Senzorilor GMR

Unele dintre rezultatele prezentate în această secțiune sunt publicate în lucrarea autorului [20]. Pentru a avea o înțelegere calitativă a procesului de funcționare a efectului GMR, au fost efectuate simulări micromagnetice pe o structură convențională de valvă de spin.

Acești senzori sunt de tipul AFM/FM/NM/FM, unde FM sunt straturi de Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>, stratul AFM este de obicei IrMn, iar NM este Cu (de obicei de 0,1-2 nm grosime). Stratul AFM acționează ca un strat de prindere pentru stratul FM adiacent. Deoarece comportamentul AFM este dificil de simulat, fixarea magnetizării stratului FM (care poate fi presupusă pentru câmpuri scăzute) poate fi simulată prin aplicarea unui câmp de cuplare a stratului fixat.

Astfel, calcularea comportamentului magnetizării din stratul liber este o metodă simplă de simulare a dependenței de câmp a semnalului senzorului GMR. Simulatorul micromagnetic OOMMF (Object Oriented MicroMagnetic Framework) a fost utilizat din acest motiv [183]. Stratul simulat este realizat din permalloy și este de dimensiunea  $1000 \times 500 \times 10 \text{ nm}^3$ . Fiecare celulă din strat este  $5 \times 5 \times 5 \text{ nm}^3$ . Prin stratul NM, FL și PL sunt conectate antiferomagnetic cu un câmp de cuplare de 200 Oe de-a lungul axei *x*. Câmpul,  $H_{appl}$  este aplicat pe axa grea de magnetizare (axa *y*), Figura 3.14a. Parametrii de material sunt:  $M_S = 710 \text{ kA/m}$ , constanta de schimb  $A=1.3 \times 10^{-11} \text{ J/m}$ , constanta de anizotropia uniaxială  $K_u = 804 \text{ J/m}^3$  [20, 184].

Răspunsul simulat al senzorului GMR poate fi reprezentat ca funcție de unghiul de magnetizare relativă  $\theta$ , între stratul liber și stratul fixat, cu o relație de forma:  $a + b(1 - \cos \theta)$ [188]. Aici, *a* specifică rezistența structurală la saturație iar *b* reprezintă amplitudinea efectului GMR. Răspunsul estimat GMR și dependența simulată a câmpului de magnetizare  $M_y$  dupa axa *y* sunt prezentate in Figura 3.14b.



Figura 3.14. Structura simulată a valvei de spin GMR: (a) Structura tipică a senzorilor GMR cu valvă de spin; (b) dependența simulată a magnetizării  $M_y$  și efectul GMR calculat atunci când câmpul este aplicat pe axa de grea magnetizare (axa y).

Chiar și atunci când câmpul este aplicat după axa de grea magnetizare, un comportament de histerezis este observat în dependența lui  $M_y$  iar efectul GMR este cauzat de structura domeniului magnetic al stratului simulat. În metoda de simulare cu un singur domeniu, nu s-a pus în evidență histerezisul pentru  $M_y$  și GMR.

# 3.2. Comportamentul Senzorilor Magnetorezistivi sub Influența Nanoparticulelor Magnetice

# 3.2.2. Simularea Micromagnetică a Structurii GMR pentru Detecția Nanoparticulelor Magnetice

Simularea unei structuri micromagnetice mai complexe (cum ar fi structura multistrat cu valvă de spin din Figura 3.14a) este o sarcină care nu poate fi rezolvată de soluțiile micromagnetice 2D, deoarece implică crearea a mai mult de un strat. În plus, dacă interacțiunea unor astfel de structuri cu alte obiecte micromagnetice este de interes (de exemplu, interacțiunea cu nanoparticule magnetice), complexitatea simulării crește semnificativ. De asemenea, pentru aceste simulări, sunt de preferat soluțiile software gratuite, cu sursă deschisă. Object Oriented Micromagnetic Framework (OOMMF) este o soluție software populară care îndeplinește cerințele necesare. OOMMF utilizează metoda diferențelor finite (FDM) pentru discretizare [183, 189]. Totuși o scurtă descriere a funcționării și configurării programului pentru simulări 3D este necesară.

Prin utilizarea unor surse de cod, este cea prezentată în codul A1.1 (Anexa 1), s-au efectuat mai multe simulări ale valvei de spin cu cuplaj de schimb feromagnetic și antiferomagnetic între straturi pentru o structură cu geometrie pătratică. Parametrii pentru simulările efectuate sunt prezentați în Tabelul 3.3.

Parametrii structurii senzorului valvei de spin		Parametrii nanoparticulelor magnetice	
Magnetizarea de saturație, <i>M<sub>s</sub></i>	800 kA/m	Magnetizarea de saturație <i>M<sub>s</sub></i>	450 kA/m
Dimensiuni în plan ( <i>x, y</i> )	200x200, 400x400, 600x600, 1000x1000 nm <sup>2</sup>	Dimensiuni $h_x   imes  h_y   imes  h_z$	40 x 40 x39 nm <sup>3</sup>
Constanta de schimb <i>A</i> <sub>ex</sub>	$1.3 \times 10^{-11} \text{ J/m}$	Distanța Senzor-particulă	21 nm
Parametrul de amortizare $lpha$	0.5	Distanța dintre particule (nm)	40 nm
Câmpul de polarizare al stratului inferior	40 kA/m	Poziția particulei (P <sub>x</sub> , P <sub>y</sub> ) O particulă: <i>x<sub>range</sub>, y<sub>range</sub></i> : 80-120 nm,	
Grosimea straturilor superior/inferior	3 nm	Două particule: <i>x<sub>range</sub></i> , <i>y<sub>range</sub></i> particula 1: 40-80 nm, 80-120 nm	
Celula de discretizare	5 x 5 x 3 nm <sup>3</sup>	$x_{range}, y_{range}$ , particula 2:	
Temperatura	ОК	120-160 nm, 80-120 nm; 4 Particule: echidistante între ele	

Tabelul 3.3. Parametrii utilizați pentru simulărilor micromagnetice multidomenale pentru structura senzorului cu valvă de spin GMR.

Între straturile feromagnetice este plasat un distanțier, spre deosebire de stratul nemagnetic (NM) - acest lucru nu afectează rezultatele. Datorită faptului că OOMMF utilizează metoda FDM, iar dimensiunea celulei pentru simulare este de 5 x 5 x 3 nm<sup>3</sup>, geometria rezultată a particulei este de 40 x 40 x 39 nm<sup>3</sup>, care este apropiată de dimensiunea sferică prevăzută de 40 nm. În plus, datorită unei mai bune scalări între elementele senzoriale reale și dimensiunea nanoparticulelor magnetice și, de asemenea, datorită cerințelor semnificative de timp de calcul pentru simulările cu nanoparticule magnetice (180-240 de ore de simulare), pentru simulările cu NPM a fost aleasă o structură cu valvă de spin de 200 x 200 nm<sup>2</sup>. Particulele au fost plasate echidistant una față de cealaltă și, deoarece comportamentul super-paramagnetic nu poate fi reprodus de simulator, pentru NPM a fost aleasă o magnetizare de saturație de 450 kA/m.

Figura 3.22a prezintă rezultatele simulării pentru structura cu valvă de spin cu schimb antiferomagnetic între straturile superioare și inferioare și cu 0, 1, 2 și 4 particule magnetice dispuse deasupra suprafeței senzorului. Figura 3.22b prezintă curba de magnetizare simulată obținută pentru doar o nanoparticulă magnetică.



Figura 3.22. (a) Dependența simulată a magnetizării de-a lungul axei x a unei structuri cu valvă de spin pentru un senzor GMR cu cuplaj de schimb antiferomagnetic (AF) între straturile superior și inferior și cu 0, 1, 2 și 4 nanoparticule magnetice; (b) dependența simulată de câmp a magnetizării de-a lungul axei x a unei nanoparticule magnetice 40x40x39 nm<sup>3</sup>.

Se poate concluziona că, în ceea ce privește comportamentul structurii simulate a supapei de spin, pe măsură ce dimensiunile în plan ale structurii scad, curba de magnetizare obținută este destul de similară, astfel încât structurile mai mici ale supapei de spin pot fi utilizate pentru simulări pentru o economie semnificativă de timp de simulare.

De asemenea, simularea fără parametrul de cuplaj de schimb face ca schimbarea curbei de magnetizare să fie mai bruscă, spre deosebire de răspunsul unui senzor GMR real, ca în [20]. Din figura 3.22 rezultă că, pe măsură ce numărul de nanoparticule magnetice de pe suprafața senzorului crește, dependența magnetizării obținute seamănă mai mult cu cea a unei singure particule magnetice.

# 3.3. Concluzii

1. Teoria micromagnetică este un instrument esențial pentru determinarea comportamentului structurilor senzorilor magnetici. Atunci când se efectuează simulări micromagnetice, trebuie avute în vedere anumite considerente:

- Metoda de discretizare a geometriei este de obicei bazată pe FDM sau FEM. Fiecare software utilizează o metodă de discretizare diferită. Chiar dacă FEM este preferată în comparație cu FDM, deoarece conduce la o precizie sporită și la reducerea erorilor geometrice ale suprafețelor neregulate, discretizarea FDM poate oferi economii semnificative de timp de simulare și rezultate fiabile pentru geometrii specifice.
- Modelul micromagnetic cu un singur domeniu (de exemplu, Stoner-Wohlfarth) poate fi suficient pentru evaluarea rapidă a structurilor magnetorezistive specifice, în cazul în care unele efecte de histerezis pot fi neglijate. Structurile mai complexe (de exemplu, valva de spin) sunt mai potrivite pentru simulări multidomenale pentru a evalua cu precizie mecanisme precum interacțiunea de schimb între straturile feromagnetice cuplate.
- Reprezentarea geometrică precisă a componentelor senzoriale reale (NPM sau elemente senzoriale din cauza dimensiunilor lor foarte mici) nu poate fi uneori reprezentată pe un simulator micromagnetic. În aceste situații, aproximările geometrice ale structurii sunt acceptabile.

2. Simulările efectuate utilizând SimulMag, LLG Micromagnetics și software-ul Object Oriented Micromagnetic Framework (OOMMF) evidențiază comportamentul senzorilor bazați pe efectele AMR, PHE și GMR pentru măsurarea câmpului magnetic.

- Simularea multidomenială efectuată pentru senzorii PHE demonstrează influența geometriei și a anizotropiei magnetice asupra caracteristicilor magnetice pentru structurile senzorilor în formă de cruce, pătrat și inel.
- Structura simulată a valvei de spin GMR permite obținerea caracteristicilor câmpului magnetic în prezența și absența nanoparticulelor magnetice de pe suprafața senzorului.
- S-a stabilit că anizotropia formei și efectele localizării magnetizării oferă diferențe mult mai semnificative.

3. Studiul efectuat a demonstrat că modelarea și simulările cu ajutorul teoriei micromagnetice reprezintă o etapă esențială în procesul de proiectare și optimizare și pentru evaluarea performanței de câmp a structurilor senzorilor magnetorezistivi potențiali. Cu toate acestea, datorită provocărilor inerente ale perturbațiilor electromagnetice care pot perturba performanța senzorului pentru aplicații specifice, în special în regiunea de câmp scăzut, poate fi necesară evaluarea macroscopică a surselor de câmp electromagnetic din jurul zonei senzorului. Acest lucru poate fi realizat fie prin investigații experimentale sau analitice pentru a îmbunătăți selectivitatea geometrică a surselor de câmp magnetic ale senzorului, fie prin îmbunătățiri intenționate ale configurației funcționale pentru aplicații specifice.

# 4. Metode Analitice Macroscopice și Simulări Electromagnetice pentru Diferite Tipuri de Conductori

Modelarea electromagnetică a surselor de câmp magnetic poate oferi informații importante pentru optimizarea configurației senzorului și a mediului operațional pentru o sensibilitate mai bună și chiar noi aplicații. Această etapă este esențială pentru aplicațiile care necesită o sensibilitate ridicată în zona de câmp scăzut, cum ar fi senzorii de curent fără contact și pentru a reduce la minimum cerința de a adăuga ecranare electromagnetică în configurațiile de măsurare a senzorilor magnetici (pentru a reduce dimensiunea și costul).

## 4.1. Câmpul Magnetic Creat de Curentul care Circulă în Conductoare

Analiza din acest subcapitol se bazează pe teoria generală a câmpului electromagnetic și pe surse bibliografice fiabile din cărți și cursuri [195, 196, 197, 198].

#### 4.1.2. Cazul Conductorului Rectiliniu cu Secțiune Transversală Circulară

Analiza este efectuată pentru cazul conductorului de lungime infinită prin care trece un curent *I*. Acest caz este detaliat în Figura 4.4.



Figura 4.4. Inducția magnetică a câmpului magnetic creat de un curent electric *I* care trece printr-un conductor rectiliniu cu secțiune circulară, în coordonate carteziene.

Pentru a calcula inducția magnetică al câmpului creat de curentul *I*, se calculează elementul de inducție magnetică, care în modul este:

$$dB = \frac{\mu_0 I dl \cdot r \cdot sin\varphi}{4\pi \cdot r^3} \tag{4.12}$$

unde elementul de lungime este:

$$dl = \frac{r \cdot d\alpha}{\cos \alpha} \tag{4.13}$$

Prin integrarea ecuației 4.12, pentru un conductor de lungime finită, rezultă:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi \cdot d} \int_{-\alpha_1}^{\alpha_2} \cos \alpha \cdot d\alpha = \frac{\mu_0 I}{4\pi \cdot d} (\sin \alpha_2 + \sin \alpha_1)$$
(4.14)

Pentru un conductor de lungime infinită ( $\alpha_{1,2} \rightarrow \pi/2$ ), inducția magnetică într-un punct situat la distanța *d* de conductor este:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d} \tag{4.15}$$

#### 4.2. Câmpul Magnetic Creat de Curentul care Circulă prin Trasee Rectilinii Simple și Multiple

#### 4.2.1. Metoda analitică

Adesea, pentru electronica modernă, problema detectării cu acuratețe și fiabilitate, cu soluții cu costuri reduse, a curenților mici se poate dovedi critică. Această secțiune descrie metoda analitică creată și implementată inițial în [20] și îmbunătățită ulterior în [184] și [36]. Deoarece metoda analitică a urmat o îmbunătățire iterativă cu determinări cu un singur traseu în [20], urmate de determinări cu mai multe trasee rectilinii în [184] și corecții de grosime și lungime în [36]. În această secțiune va fi prezentată doar versiunea finală a metodei analitice, care a fost publicată în [36].

Acest studiu constă în dezvoltarea unei metode practice de îmbunătățire a sensibilității și a preciziei răspunsului unui senzor de curent bazat pe GMR. Noutatea abordării constă în utilizarea unei configurații de detectare a curentului cu trasee rectilinii multiple de curent pe o placă de circuit imprimat prototip. În esență, aceasta constituie o bobină plană care la parcurgerea ei de către curentul de măsurare va amplifica câmpul magnetic utilizabil, detectat de senzorul MR. În sprijinul acestor afirmații, a fost elaborat un model analitic pentru calcularea câmpului magnetic în zona de detectare MR. În ceea ce privește perspectivele, aceste metode de îmbunătățire a sensibilității senzorilor MR pot fi utile pentru o serie de aplicații care necesită detectarea de câmpuri magnetice mici.

Prin proiectarea corectă a circuitului care generează câmpul magnetic de măsurat, ideea principală a configurației propuse este de a amplifica intensitatea câmpului magnetic în zona senzorului de curent fără contact și, prin urmare, precizia și sensibilitatea senzorului. Senzorii MR din configurația de măsurare a curentului sunt magnetometre, prin urmare, atunci când un curent *I* trece prin traseele de curent, inducția magnetică *B* creată de curent va produce o modificare a tensiunii de ieșire a senzorului MR plasat în apropiere.



Figura 4.10 prezintă structura și principiul de funcționare al instalației de măsurare a curentului fără contact cu un curent care parcurge un singur traseu și cazul cu mai multe trasee.

Figura 4.10. Principiul de funcționare al instalației de măsurare a curentului fără contact care utilizează trasee de curent și un cip bazat pe GMR: (a) secțiune plană unică cu un singur traseu de curent de măsurare; (b) secțiune plană cu mai multe trasee de curent; (c) secțiune transversală cu un singur traseu de curent; (d) secțiune transversală cu mai multe trasee.

Inducția magnetică va fi calculată într-un punct care corespunde zonei centrale a senzorului MR, plasat centrat deasupra urmei. Prin utilizarea mai multor trasee prin care trece același curent de măsurat se poate realiza în esență o bobină plană. Figura 4.11.



Figura 4.11. Model analitic pentru calculul inducției magnetice în zona centrală a senzorului: (a) calculul inducției magnetice cu corecția de lungime a traseului și a distantei față de senzor; (b) componentele inducției magnetice a câmpului magnetic generat de curentul care intră în traseele considerate și parametrii dimensionali; (c) parametrii grosimii stratificate a bandei/traseului de curent.

Un model analitic luat în considerare în acest caz se bazează pe legea Biot-Savart, care presupune că senzorul este centrat deasupra traseelor multiple de curent, la distanța h. Grosimea fiecărei bande este divizată într-un număr m de straturi, în consecință, h se modifică pentru fiecare strat individual/

Pentru corecția lungimii finite, se introduce suma funcțiilor sinusurilor unghiurilor dintre zona senzorului (deasupra traseului central) și pentru fiecare capăt al traseului liniar de curent (Figura 4.11). Unele corecții geometrice pot fi încă introduse, în special pentru un număr mare de trasee adiacente sau configurații de trasee neliniare.

Presupunând o bandă conductoare foarte lungă, curentul elementar *dI* distribuit în bandă poate fi exprimat prin:

$$dI = \frac{I}{D} dx, \tag{4.38}$$

$$dB_n = \mu_0 \frac{dI}{2\pi r} = \mu_0 \frac{Idx}{D} \cdot \frac{1}{2\pi\sqrt{h^2 + x^2}}$$
(4.39)

$$dB_{nx} = dB_n \cdot \cos\theta = \mu_0 \frac{Idx}{2\pi D} \cdot \frac{1}{\sqrt{h^2 + x^2}} \cdot \frac{h}{\sqrt{h^2 + x^2}}$$
(4.40)

După câteva simplificări, ecuația 4.40 devine:

$$dB_{nx} = dB_n \cdot \cos\theta = \mu_0 \frac{Ih}{2\pi D} \cdot \frac{dx}{h^2 + x^2}$$
(4.41)

care, după integrare, devine:

$$B_{nx} = \mu_0 \frac{lh}{2\pi D} \int_{D_{n1}}^{D_{n2}} \frac{dx}{h^2 + x^2}$$
(4.42)

unde  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m este permeabilitatea magnetică a vidului, *D* este lățimea benzii de curent, *t* este grosimea benzii, *h* este înălțimea la care elementul de detecție este plasat deasupra benzii, iar  $\theta$  este unghiul utilizat pentru a estima componenta  $B_x$  a inducției câmpului magnetic. Presupunând o densitate de curent liniară, I/D, și integrând eq.4.42 de la  $D_{n1}$  la  $D_{n2}$  se obține:

$$B_{nx} = \frac{\mu_0 Ih}{2\pi D} \cdot \frac{1}{h} \arctan \frac{x}{h} \bigg|_{D_{n1}}^{D_{n2}}$$
(4.43)

Prin evaluarea integralei, componenta x a inducție magnetice a câmpului generat de o bandă n=1, 2, 3,..., în zona senzorului este:

$$B_{nx} = \frac{\mu_0 I}{2\pi D} \left[ \arctan\left(\frac{D_{n2}}{h}\right) - \arctan\left(\frac{D_{n1}}{h}\right) \right]$$
(4.44)

Dacă se ia în considerare lungimea traseului, se împarte grosimea acestuia în m straturi și se presupune uniformitatea distribuției curentului în straturi se obține ecuația 4.45. Pentru urma centrală, rezultatul este prezentat în ec. 4.46:

$$B_{nx} = \sum_{i=0}^{m} \left( \frac{\mu_0 \frac{i}{m}}{2\pi D} \left[ \arctan\left(\frac{D_{n2}}{h_i}\right) - \arctan\left(\frac{D_{n1}}{h_i}\right) \right] \cdot \left(\sin\alpha_1 + \sin\alpha_2\right) \right)$$
(4.45)

$$B_{0x} = \sum_{i=0}^{m} \left( \frac{\mu_0 \frac{l}{m}}{\pi D} \left[ \arctan\left(\frac{D}{2h_i}\right) \right] \cdot \left( \sin \alpha_1 + \sin \alpha_2 \right) \right), \tag{4.46}$$

unde *h<sub>i</sub>* este distanța specifică de la senzor corespunzătoare fiecărui strat, exprimată prin:

$$h_i = h + \left[ \left( \frac{t/m}{2} \right) + (m-1) \cdot \frac{t}{m} \right]$$
 (4.47)

Parametrii  $D_{n1}$ ,  $D_{n2}$  poate fi calculat în funcție de numărul de trasee n (Figure 4.11):

$$D_{n1} = \frac{D}{2} + (n-1)D + nT_d \quad , \tag{4.48}$$

$$D_{n2} = \frac{D}{2} + nD + nT_d \tag{4.49}$$

Luând în considerare simetria problemei, componenta z a câmpului magnetic din senzor va fi anulată de câmpurile din benzile din stânga și din dreapta, adică  $B_{nz} = 0$ . Astfel, câmpul total generat în zona centrală a senzorului va avea inducția magnetică de forma:

$$B = B_0 + 2B_1 + 2B_2 + \dots + 2B_n \tag{4.50}$$

Un exemplu de calcul pentru ec. 4.44 și ec. 4.50 prin utilizarea parametrilor specifici pentru o structură multi-traseu cu până la 11 benzi (*n* = 5) și fără corecția lungimii și grosimii este prezentat în Anexa 2.

Pentru a valida rezultatele care pot fi obținute cu ajutorul metodei analitice, a fost efectuat un studiu bazat pe simulări pentru patru cazuri posibile pentru această metodă analitică:

- Cazul I- lungime infinită a traseului de curent, cu un singur strat (grosimea urmei neglijată);
- Cazul II- lungime infinită a traseului de curent, cu m = 35 de straturi (1 μm fiecare strat);
- Cazul III- lungime finită a traseului de curent, cu un singur strat (grosimea urmei neglijată);
- Cazul IV- lungime finită a traseului de curent, cu m = 35 de straturi (1 μm fiecare strat).

Pentru cazurile II și IV, grosimea urmei stratificate înseamnă că grosimea fiecărei urme este împărțită pe un număr de straturi prin care presupunem că trece un curent constant, *I/m* (unde *m* este numărul de straturi).

Unele dintre rezultatele acestui studiu au fost publicate în lucrarea de autor din [36].

# 4.2.2. Simulări și Validare Experimentală a Traseului în Formă de U și a Bobinei Planare

Au fost studiate două cazuri utilizând simulări prin metoda elementelor finite pentru a efectua o examinare comparativă a rezultatelor obținute cu metoda analitică.

În primul rând, a fost modelată o bandă de curent în formă de U (Figura 4.12a) pentru a descrie comportamentul a doi senzori MR într-o configurație dublu diferențială.

Capacitatea de a integra senzori magnetorezistivi extrem de sensibili și de mici, într-o configurație diferențială dublă într-un pachet foarte compact, stă la baza dimensionării precise ale traseelor de curent în formă de U. În al doilea rând, se face o comparație între rezultatele experimentului și situația unei bobine planare cu mai multe trasee de curent, Figura 4.12b.



Figura 4.12. Proiectarea și implementarea experimentală a (a) geometriei și parametrilor pentru traseele de curent în formă de U; (b) vedere a bobinei plane cu șapte trasee de curent.

Dimensiunile benzii în formă de U sunt determinate de modul în care se pot integra senzori magnetorezistivi miniaturizați și foarte sensibili, precum cei din [199].

Tabelul 4.1 prezintă parametrii specifici utilizați pentru modelul analitic și simularea FEM.

Software-ul COMSOL Multiphysics<sup>®</sup> a fost utilizat pentru a efectua modelarea [200]. Bobina planară a fost modelată cu considerarea cuprului (Cu) ca material conductor, cu rezistivitatea de  $1.72 \times 10^{-8} \Omega m$ , în timp ce banda în formă de U a fost modelată considerând ca material conductor argintul (Ag), cu o rezistivitate mai mică, de  $1.36 \times 10^{-7} \Omega m$  pentru a corespunde măsurătorilor experimentale (traseul în formă de U a fost imprimat cu o cerneală pe bază de argint). Configurațiile experimentale utilizate pentru validarea experimentală sunt prezentate în capitolul 6.

Table 4.1. Parametrii utilizați pentru modelul analitic și simularea COMSOL a traseului în formă de U și a bobinei planare.

Simbol	Denumirea parametrului	Valoare		
	Lătimos tracoului	Bobină pla	nă cu 7 trasee: 0.22 mm	
D	Lațimea traseului	Urme în formă de U: 1.2 mm		
T	Dictanta dintro tracoo	Bobină plană cu 7 urme: 0.19 mm		
I d	Distanța unitie trasee	Traseu în formă de U: N/A		
Ι	Curentul prin traseu	0.1 A		
		Bobină plană cu 7 trasee: 0.045 [mm] to		
h	Distanța dintre senzor și	3.58 [mm]		
11	traseu	Traseu în f	ormă de U: 0.045 mm to 2.08	
		mm		
t	Grosimea traseului	35 µm		
m	Numărul de straturi în	35 (1 um each laver)		
	care este împărțit <i>t</i>	55 (1 µm each ayer)		
I.	l ungimea traseului	Bobină plană cu 7 trasee: 42 mm		
		Traseu în f	ormă de U: 3.2 mm	
Δ1	Poziția senzorului pe	Bobină plană cu 7 trasee: 21 mm		
	lungimea traseului <sup>1</sup>	Traseu în formă de U: 1.6 mm		
V	Tensiunea de alimentare	Traseu în formă de U: 4.399 V		
• <u>s</u>	a senzorului	Pentru montaj cu bobină plană: 4.096 V		
			$S_1$ : 159 $\mu$ V/(V × A/m)	
		Montaj cu	(0.01268 mV/V-Oe)	
		senzori cu	$S_2$ : 188.54 $\mu$ V/(V × A/m)	
	Sensibilitatea	Traseu în	(0.0150034 mV/V-Oe)	
S	experimentală a	formă de U	S <sub>diferential</sub> : 347.94	
	senzorului		$\mu V/(V \times A/m)$	
			(U.U277 mV/V-Ue)	
		Montaj cu	<i>S<sub>differential</sub></i> : 32.67	
		Bobina plană:	$\mu V/(V \times A/m)$	

<sup>1</sup> Poziția senzorului pe lungimea traseului este dată de:  $\Delta l/L \cdot 100$  [%].

Distribuția intensității câmpului magnetic de-a lungul axei x din simulările COMSOL este prezentată în figura 4.13a pentru urma în formă de U, în timp ce figura 4.13b prezintă bobina plană.

Datele au fost extrase pentru locațiile de interes la înălțimea h deasupra senzorului (a se observa inserțiile din figurile 4.14-4.16) de-a lungul liniilor longitudinale și transversale, figurile 4.14a și 4.14b pentru traseul în formă de U și figura 4.14 și figura 4.15 pentru bobina planară cu mai multe trasee. Figurile 4.14-4.15 arată că există o intensitate minimă a câmpului magnetic între urme și că intensitatea câmpului magnetic este cea mai mare în apropierea centrului urmei.

În Figura 4.15, orice neliniaritate din grafic nu se datorează distribuției reale a câmpului, ci distribuției discretizării obiectului pentru simulare, deoarece la aceeași înălțime de la traseu și poziționare relativă, câmpul este constant. Rezultatele prezentate în Figura 4.18a demonstrează modul în care modelul analitic converge către rezultatele simulării COMSOL în următoarea manieră (pentru banda în formă de U): pentru valori mai mari ale câmpului și distanțe corespunzătoare mai apropiate de traseu, cazurile în care se presupune o bandă conductoare foarte lungă (cazurile I și II) sunt mai apropiate de rezultatele COMSOL, în timp ce rezultatele pentru modelul finit (cazurile III și IV) converg mai mult către rezultatele COMSOL la distanțe mai mari de traseu.



Figura 4.13. Distribuția câmpului magnetic pe axa x pentru trasee de curent în formă de U și bobina plană pentru un curent de 100 mA conform simulărilor COMSOL: **(a)** Bandă în formă de U: Distribuția câmpului  $H_x$  la o înălțime  $h = 45 \ \mu m (H_{x\_sensor} = 40.630 \ A/m)$  de traseu și  $h = 80 \ \mu m (H_{x\_sensor} = 39.056 \ A/m)$  (b) Bobină plană cu 7 trasee: Distribuția câmpului  $H_x$  la înălțimea  $h = 45 \ \mu m$  de traseu ( $H_{x\_sensor} = 126.67 \ A/m$ ) and  $h = 80 \ \mu m (H_{x\_sensor} = 121.94 \ A/m)$ .



Figura 4.14. Intensitatea câmpului magnetic de-a lungul direcției axei x, variația pentru traseul de curent în formă de U la înălțimea h = 45 µm conform rezultatelor simulării COMSOL (a se observa inserțiile): (a) linia centrală transversală (b) linia centrală longitudinală.
În plus, în cazul dispunerii bobinei planare (Figura 4.18b), Cazurile I și II conduc la rezultate comparabile cu simularea la distanțe mai mici de bobină, în timp ce Cazurile III și IV prezintă un comportament opus celui din cazul unui singur traseu: acestea converg mai strâns la distanțe mai mari.



Figura 4.15. Intensitatea transversală a câmpului magnetic pe linia centrală pe direcția x, variație pentru bobina plană Multitrace cu 7 trasee de curent la înălțimea h = 80 µm de la traseu, conform rezultatelor simulării COMSOL.



Figura 4.18.Intensitatea câmpului magnetic  $H_x$ , variație pentru diferite înălțimi h conform simulării COMSOL și modelului analitic pentru: (a) traseul în formă de U cu h între 0.08 mm și 2.08 mm: (b) pentru "Bobina planară cu 7 trase" cu h de la 0.08 mm la 3.58 mm. Curentul prin traseul de curent a fost de 100 mA.

Metodologia de analiză pentru bobina plană cu șapte trasee de curent este comparată cu rezultatele experimentale din [184], iar Tabelul 2 prezintă datele de validare pentru punctul central (observați insertul din Figura 18a) între rezultatele simulării COMSOL și metoda analitică. Rezultatele prezentate în Tabelul 2 au fost obținute utilizând parametrii enumerați în Tabelul 4.1.

Trebuie remarcat faptul că valorile intensității câmpului magnetic sunt calculate pentru următoarele: 0,8 mm sau 0,08 mm pentru bobina plană, deoarece configurația experimentală pentru bobina plană a utilizat senzorii încapsulați AA003-02 [201], și 45 µm (grosimea benzii Kapton pe care este imprimată urma) și 80 µm distanță între senzor și banda de curent pentru traseul în formă de U.

Tipul traseului	Caz de validare		h <sup>1</sup> (mm)	$H_x$ (A/m)	V <sub>out</sub> <sup>2</sup> (mV)	V <sub>diferential</sub> <sup>2</sup> (mV)
			0.08	39.056	-	-
		SITIUIATI COMSOL	0.045	40.630	-	-
	Metodă Analitică	Cazul I: Lungime infinită, <i>t</i> neglijat	0.08	38.150	S <sub>1</sub> : 0.02675	0.05839
					S <sub>2</sub> : 0.03164	
			0.045	39.680	S <sub>1</sub> : 0.02782	0.06073
					S <sub>2</sub> : 0.03291	
		Cazul II: Lungime infinită, m = 35 de straturi (1 μm fiecare strat)	0.08	36.7321	S <sub>1</sub> : 0.02575	0.05622
Traseu în					S <sub>2</sub> : 0.03046	
formă de U <sup>3</sup> (Figura 4.12a) <i>I<sub>traseu</sub></i> = 100 mA <i>V<sub>s</sub></i> = 4.399 V			0.045	38.2408	S <sub>1</sub> : 0.02681	0.05853
					S <sub>2</sub> : 0.03171	
		Cazul III: Lungime finită, <i>t</i> neglijat	0.08	32.0769	S <sub>1</sub> : 0.02249	0.04910
					S <sub>2</sub> : 0.0266	
			0.045	22 2010	S <sub>1</sub> : 0.02341	0.05109
				33.3818	S <sub>2</sub> : 0.02768	
		Cazul IV: Lungime finită, <i>m</i> <i>=</i> 35 de straturi (1 μm fiecare strat)	0.08		S <sub>1</sub> : 0.02165	0.04727
				30.8842	S <sub>2</sub> : 0.02561	
			0.045	32.1704	S <sub>1</sub> : 0.02255	0.04924
					S <sub>2</sub> : 0.02668	
	Rezultate experimentale		0.045	31.7423	S <sub>1</sub> : 0.0198	0.042
					S <sub>2</sub> : 0.022	
	c	ci l concol		79.780	-	-
	Simulare COMSOL		0.08	121.94	_	_
	Metoda Analitică	Cazul I: Lungime infinită,	0.8	82.5885	11.8702	23.7404
Bohină nlană		<i>t</i> neglijat	0.08	157.422	22.6257	45.2514
cu		Cazul II: Lungime infinită,	0.8	81.2428	11.6768	23.3536
7 trasee <sup>3</sup> (Figura 4.12b) $I_{traseu} =$ 100 mA $V_s = 4.399$ V		m = 35 de straturi	0.08	140.624	20 2115	40.423
		(1 µm fiecare strat)			20.2115	
		Cazul III: Lungime finită,	0.8	67.9498	9.9838	19.9676
		<i>t</i> neglijat	0.08	132.465	19.0388	38.0776
		Cazul IV: Lungime finită, m	0.8	66.8427	9.821	19.642
		= 35 de straturi (1 um fiecare strat)	0.08	118.331	17.0073	34.0146
	Rezu	ultate experimentale	0.8	_	10.716	21.432

Table 4.2. Analiză comparativă între simularea COMSOL, modelul analitic și datele experimentale.

<sup>1</sup> Distanța dintre elementul de detecție și urma de curent. Rețineți că 0,045 mm este distanța dintre senzori și traseul în formă de U în configurația experimentală și 0,8 mm este distanța dintre elementul de detectare și traseul curentului în configurația experimentală pentru bobina plană cu senzorii AA003-02 [201].

<sup>2</sup> Tensiunea de ieșire pentru un singur senzor ( $V_{out}$ ) și pentru cei doi senzori în configurație diferențială ( $V_{diferential}$ ).

<sup>3</sup> Tensiunea de alimentare a senzorilor în configurație diferențială.

#### 4.3. Concluzii

1. Modelele analitice și simulările electromagnetice macroscopice sunt metode avantajoase pentru optimizarea și îmbunătățirea selectivității geometrice a senzorilor magnetorezistivi, aplicate în special pentru aplicații de măsurare a curentului fără contact, în care forma, lungimea și structura traseului de curent pot afecta radical câmpul magnetic generat de curentul de măsurare în zona senzorului. În acest caz, optimizarea designului traseului de curent înseamnă caracteristici geometrice specifice ale traseului de curent aplicate unor modele specifice de senzori.

2. Prin utilizarea teoriei electromagnetice, sunt dezvoltate mai multe modele analitice specifice și simulări pentru a estima cu un grad de precizie ridicat intensitatea câmpului magnetic generat în zona senzorului magnetorezistiv.

- Au fost dezvoltate modele pentru conductoare simple, dreptunghiulare și toroidale în care circulă curent continuu și a fost calculată intensitatea câmpului magnetic în diferite puncte, pentru a stabili abordarea optimă pentru implementarea unui tip de conductor pentru un senzor de curent magnetorezistiv fără contact.
- Conductoarele de tip bobină asigură o uniformitate bună a câmpului magnetic, cu o intensitate a câmpului magnetic sesizabilă pentru un curent dat, dar, din cauza dimensiunii lor inerente, conductoarele de tip bobină sunt dificil de implementat în aplicații miniaturizate.
- Este dezvoltat modelul pentru trasee rectilinii de curent, simple și multiple și este obținută expresia intensității câmpului magnetic creat de curentul care circulă prin aceste trasee.

3. Pentru un traseu în forma de U și o bobina plană, studiul efectuat ia în considerare diferiți parametri pentru materialul și geometria benzilor de curent.

- Metoda analitică a inclus patru cazuri de studiu: neglijarea grosimii traseului, împărțirea grosimii traseului în mai multe straturi, trasee conductoare finite sau foarte lungi și mai multe geometrii adiacente în zona senzorului.
- Comparația cu studiul experimental arată că modelul analitic este precis în cazul în care lungimea traseului este finită, iar grosimea traseului este luată în considerare prin divizarea într-un număr adecvat de straturi. Cu toate acestea, pentru lungimi mai mari ale traseului, modelele care neglijează lungimea benzii de curent se pot dovedi precise și mai apropiate de modelul COMSOL FEM.
- Metoda analitică a fost validată folosind simulări prin metoda elementelor finite COMSOL și rezultate experimentale.

Aceste rezultate se pot dovedi utile pentru proiectarea și optimizarea aplicațiilor care conțin trasee de curent, cum ar fi senzorii de curent fără contact și, de asemenea, pentru detectarea nanoparticulelor magnetice, deoarece unele metode de măsurare implică polarizarea nanoparticulelor magnetice cu un câmp de polarizare care poate fi produs fie de o bobină, fie de o bandă de curent.

## 5. Detecția Nanoparticulelor Magnetice cu Senzori Magnetorezistivi

#### 5.1. Metoda magnetică aplicată pentru detectarea nanoparticulelor magnetice

Caracteristicile intrinseci ale senzorilor de câmp magnetic (scalabilitate ridicată, sensibilitate și integrabilitate cu circuitele integrate cu semiconductori) fac din aceștia o alegere excelentă pentru detectarea nanoparticulelor magnetice (NPM).

#### 5.2. Studii Experimentale pentru Detectarea Nanoparticulelor Magnetice cu Senzori GMR

Scopul acestui studiu este de a dezvolta două setări experimentale și mai multe metode de îmbunătățire a performanței și a caracteristicilor sistemelor de senzori GMR pentru detectarea nanoparticulelor magnetice (NPM). Prima metodă se bazează pe analiza derivatei semnalului de ieșire al senzorului pentru a determina prezența și concentrația de NPM. Lucrarea prezentată în această secțiune poate fi găsită în lucrarea de autor din [235]. A doua metodă implică o placă de circuite imprimate construită la comandă pentru a optimiza selectivitatea geometrică și eficiența generală a configurației de detecție. Prin intermediul celei de-a doua metode, au fost efectuate experimente de testare DC și magnetorelaxometrie AC pentru detectarea NPM. În cele din urmă, integrarea cu setări microfluidice este demonstrată prin trei abordări diferite: cameră microfluidică, două canale microfluidice și un singur canal microfluidic.

Utilitatea potențială în biosenzori și aplicații LOC este demonstrată de acest studiu, care demonstrează capacitatea de a detecta nanoparticulele magnetice utilizând un senzor bazat pe efectul de magnetorezistență gigant (GMR). Măsurătorile experimentale au furnizat dovezi ale conceptului de funcționare.

#### 5.2.1. Detecția prin Analiza Derivatei Semnalului de leșire

Senzorii de câmp magnetic de înaltă sensibilitate bazați pe efectul GMR pot fi creați în laboratoarele de cercetare în microtehnologie [10] sau găsiți în comerț [13, 95]. Senzorul GMR utilizat în această investigație, face parte din pachetul flip-chip de la Sensitec GmbH din Germania [13]. Patru componente GMR sunt conectate într-o configurație de punte Wheatstone pentru a forma senzorul (Figura 5.7). În timp ce celelalte două structuri GMR sunt acoperite de concentratoare de flux și servesc ca elemente de referință pentru a completa puntea Wheatstone, două structuri sunt poziționate în spațiul unui concentrator de flux magnetic (MC). Ca urmare, tensiunea de ieșire a senzorului are o stabilitate termică foarte puternică, variind de la aproximativ -0.35%/K la 13 mV/V/Oe în intervalul liniar de la -10 la 10 Oe [13].

Cipul GF708 a fost montat pe o platformă conectată la sistemul de măsurare compus dintr-o sursă de curent Keithley 6221A și un nanovoltmetru Keithley 2182A pentru a citi tensiunea de ieșire a senzorului. Platforma cu cipul a fost montată în interiorul unui sistem compus dintr-o configurație dublă de bobine Helmholtz care poate furniza un câmp magnetic uniform. Bobinele au fost conectate la o sursă de alimentare programabilă Kepco BOP100-10MG. Toate aceste dispozitive, prezentate în Figura 5.7, au fost interfațate cu un computer.

Bobinele orizontale (Figura 5.7d) sunt utilizate pentru a aplica un câmp magnetic perpendicular pe senzori, pentru a studia posibila influență a acestei componente de câmp perpendicular  $H_p$  asupra răspunsului senzorului. Figura 5.8 prezintă caracteristicile de câmp ale senzorului fără NPM pe suprafața sa pentru câmpul perpendicular  $H_p$  cu valori 0 și 25 Oe.



(a, b, c)



Figura 5.7. Prezentare generală a senzorului GF708 și configurația experimentală: (a) Vedere generală a senzorului GF708, (b) și (c) schema simplificată a senzorului cu structurile GMR active  $R_1$  și  $R_3$  și structurile ecranate  $R_2$  și  $R_4$ ; sensibilitatea maximă este obținută atunci când H este direcționat pe axa y și (d) Configurația experimentală pentru caracterizarea senzorului GF708: (1) Kepco BP 100-10MG, (2) configurația cu bobină Helmholtz dublă, (3) sursa de curent Keithley 6221A și nanovoltmetrul 2182A și (4) platforma cu cip GMR.

O picătură de 1 µl de apă a fost plasată deasupra suprafeței cipului pentru a avea o stare de echilibru termic similară celei în care soluția cu nanoparticule magnetice (NPM) este plasată deasupra senzorului. În timpul experimentelor, curentul senzorului a fost setat la 0,31 mA. Din Figura 5.7a se observă că senzorul este insensibil la câmpurile aplicate perpendicular. Acest comportament se datorează faptului că coeficientul de demagnetizare pe direcția perpendiculară pe suprafața filmului este apropiat de -1 ( $N_{\perp} \approx -1$ ), ceea ce forțează magnetizarea să rămână în planul filmului. Deplasarea mică observată se datorează unei componente foarte slabe în plan a  $H_p$ .



Figura 5.8. Caracteristica (V = f(H)) a senzorului GF708 în prezența și absența unui câmp magnetic aplicat perpendicular.

Derivatele calculate ale semnalului de ieșire (Figura 5.9) dau doua vârfuri care corespund câmpurilor de comutare în stratul senzitiv (stratul liber) a cărui magnetizare se rotește sub câmpul aplicat. Figura 5.9a și figura 5.9b arata ca lățimea curbei de histerezis,  $\Delta H_c=1,2$  Oe, este aceeași atât pentru  $H_p = 0$ , cât și pentru  $H_p = 25$  Oe. Se observă doar o mică deplasare, de aproximativ 0,3 până la 0,4 Oe, datorită componentei în plan a  $H_p$ . Cu toate acestea, este de așteptat să se observe o modificare a câmpurilor de comutare atunci când NPM vor fi plasate deasupra suprafeței senzorului, așa cum este descris în Figura 5.10.



Figura 5.9. Curbele de magnetizare și derivatele semnalului de ieșire al senzorului GF708 pentru  $H_p = 0$  și  $H_p = 25$  Oe fără NPM pe suprafața senzorului.



Figura 5.10. Principiul de funcționare al senzorului GMR cu NPM plasate pe suprafața sa: secțiune transversală și reprezentare schematică în plan.

Utilizând configurația prezentată în Figura 5.7 și aderând la protocolul de măsurare definit anterior, pe suprafața senzorului au fost aplicate cantități variabile de soluție conținând NPM. NPM sunt nanoparticule de maghemită ( $\gamma - Fe_2O_3$ ) cu diametrul de 10 nm, funcționalizate cu polietilenglicol 6000 (PEG 6000) și suspendate în apă. Diferiți anticorpi pot fi adăugați la aceste NPM funcționalizate pentru a le utiliza pentru biodetecția anumitor antigene. Numărul de procese distincte de legare anticorp-antigen poate fi aproximat pe baza materialului magnetic prezent deasupra suprafeței senzorului. În acest studiu, a fost demonstrată capacitatea sistemului bazat pe senzori GMR de a detecta nanoparticule de maghemită. A fost aplicat un câmp magnetic continuu,  $H_p = 25$  Oe, perpendicular pe suprafața senzorului, pentru a îmbunătăți câmpul magnetic creat de NPM și, în consecință, sensibilitatea de detecție. Acest câmp va magnetiza NPM, dar nu va afecta semnificativ comportamentul senzorului. Figura 5.11a prezintă dependențele de câmp ale tensiunii de ieșire atunci când o picătură de 1,25 µl de soluție cu nanoparticule de maghemite funcționalizate cu PEG 6000 a fost plasată deasupra suprafeței senzorului. Pentru comparație, semnalul de ieșire atunci când a fost plasată doar o picătură de apă deasupra suprafeței cipului este, de asemenea, trasat, figura 5.11a. Este necesar un câmp mai puternic pentru a comuta magnetizarea în stratul senzorial și pentru a atinge saturația, deoarece NPM plasate deasupra suprafeței senzorului acționează ca straturi de derivație. Analizând semnalul de ieșire prin derivata sa și exprimând dU/dH = f(H) ca în Figura 5.9, acest comportament poate fi descris mai precis.



Figura 5.11. Caracteristicile senzorului GMR: (a) dependențele de câmp ale semnalului de ieșire cu și fără NPM pe suprafața senzorului și (b) derivata calculată a semnalului de ieșire în prezența NPM.

Această tehnică permite determinarea precisă a câmpurilor de comutare, care servesc drept marker pentru prezența NPM deasupra suprafeței senzorului. La compararea curbei de răspuns cu scenariul fără NPM deasupra senzorului, s-a observat o deplasare de 0,8 Oe, iar lățimea curbei de histerezis a devenit  $\Delta H_C = 2,2$  Oe.

Utilizând procedura descrisă în [22] și [184], se poate determina masa de NPM existentă în aceste experimente. Ca urmare, s-a estimat că 1,25  $\mu$ l de soluție conținea 16,7  $\mu$ g de pulbere formată din nanoparticule de maghemită, cu diametrul de 10 nm, funcționalizate cu PEG 6000. Acest lucru se traduce prin aproximativ 1,20  $\mu$ g de nuclee de maghemite pure, moleculele de PEG 6000 constituind restul soluției. Folosind datele din curbele de magnetizare ale NPM funcționalizate cu PEG6000, s-a estimat un moment magnetic de aproximativ 9,098  $\cdot$  10<sup>-5</sup> emu pentru o variație a semnalului de 0,035 V (adică o sensibilitate de detecție de aproximativ 75,81 emu/g).

#### 5.3. Concluzii

1. Metoda de detecție pe suprafața a NPM cu senzori magnetorezistivi este mai sensibilă și implică o electronică mai simplă, dar necesită un proces complex de spălare a suprafeței după fiecare măsurare. De asemenea, lipsa electrozilor induce rezistențe la multiplele procese de spălare. Alte aspecte specifice pentru detectarea NPM cu senzori MR cu peliculă subțire sunt:

• Nanoparticulele de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sau Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> au un comportament superparamagnetic la temperatura ambientală.

- Senzorii sunt sensibili la câmpurile magnetice în plan și puțin sensibili la câmpurile magnetice aplicate perpendicular pe suprafață;
- Senzorii MR saturează la câmpuri care nu depășesc 0,01 T, iar procesul de detecție este puternic influențat de interacțiunea magnetostatică dintre suprafața senzorului și NPM. În acest caz, considerarea comportamentului superparamagnetic al NPM este necesar pentru a elimina atât semnalele de detecție fals pozitive, cât și procesele de aglomerare în volumul lichidului și pe suprafața senzorului.

2. Atunci când se utilizează senzori magnetorezistivi pentru aplicații biomedicale, se pot aplica aceleași reguli metode de proiectare și optimizare ca și pentru alte aplicații ale senzorilor MR. Cu toate acestea, de cele mai multe ori, proiectarea trebuie modificată pentru utilizarea biosenzorilor, deoarece integrarea biosenzorilor MR în dispozitive de tip "lab-on-a-chip" are mai multe cerințe.

3. A fost efectuat un studiu experimental complex cu senzorul GMR pentru optimizarea detectării NPM cu structuri de valve de spin cu polarizare de schimb pentru îmbunătățirea performanței și a caracteristicilor sistemelor de senzori GMR. Prima metodă se bazează pe analiza derivatei semnalului de ieșire al senzorului pentru a determina prezența și concentrația de NPM. Cu sistemul experimental s-a estimat un moment magnetic de aproximativ 9,098 · 10<sup>-5</sup> emu pentru o variație a semnalului de 0,035 V (adică o sensibilitate de detecție de aproximativ 75,81 emu/g). A doua metodă a implicat un PCB personalizat pentru a optimiza selectivitatea geometrică și eficiența generală a configurației de detecție. Pentru detectarea NPM au fost efectuate teste în curent continuu și experimente de magnetorelaxometrie în curent alternativ. Testele DC au arătat o performanță rezonabilă, în timp ce magnetorelaxometria a arătat utilitatea analizei spectrale FFT pentru câmpurile AC de înaltă frecvență pentru analiza prezenței NPM. De asemenea, integrarea cu configurații microfluidice este demonstrată prin trei abordări diferite: cameră microfluidică, două canale microfluidice și un singur canal microfluidic.

4. Cercetarea descrisă în acest capitol a demonstrat posibilitățile de aplicare a sistemelor de senzori magnetorezistivi dezvoltate pentru detectarea NPM. Metoda și rezultatele obținute pot fi îmbunătățite și aplicate în continuare pentru a dezvolta configurații de biosenzori magnetorezistivi sensibili și integrați, cu scopul final de a implementa în laborator pe un cip măsurători biologice specializate, ceea ce va reduce semnificativ costurile de analiză și va îmbunătăți accesibilitatea asistenței medicale personalizate.

## 6. Conceperea și Realizarea de Dispozitive de Măsurare Non-Contact a Curentului Electric bazate pe Senzori Magnetorezistivi

În acest capitol sunt descrise contribuțiile autorului la proiectarea și construcția dispozitivelor de măsurare fără contact a curentului cu senzorii AMR, GMR și TMR. Sunt detaliate instalațiile experimentale dezvoltate și senzorii magnetorezistivi propuși. Prin măsurători experimentale este validată performanța dispozitivelor de măsurare a curentului pentru aplicații de măsurare fără contact.

#### 6.1. Proiectarea, Construcția și Caracterizarea unui Senzor AMR de tip Punte

Rezultatele acestei cercetări sunt parțial publicate de autorul tezei în [36].

#### 6.1.1. Proiectarea și Funcționarea Senzorului Punte AMR

Principiul de funcționare al senzorului punte AMR propus este prezentat în Figura 6.1, iar schema cipului demonstrativ este prezentată în Figura 6.2. Pentru a minimiza impactul variațiilor de temperatură și al interferențelor cauzate de câmpurile magnetice externe, acest sistem format doi senzori identici, vizează definirea unor structuri magnetorezistive adaptate câmpului magnetic produs de curenții electrici. Deoarece fiecare punte AMR este un senzor diferențial, cipul cu doi senzori prezintă un sistem dublu de măsurare diferențială. Structura se încadrează într-un pătrat de 4 × 4 mm<sup>2</sup> și a fost realizată pe un cip de 5 × 5 mm<sup>2</sup>. Marginile sunt de 0,5 mm, în timp ce brațul punții are o lungime L = 1 mm și o lățime de 0,1 sau 0,2 mm. Dimensiunea plăcuțelor de contact poate fi redusă astfel încât cipul să încapă într-o amprentă de 3 × 3 mm<sup>2</sup>.

O bandă de curent în formă de U pe bază de argint a fost plasată deasupra senzorului. Folosind o imprimantă prototip Voltera V-One, banda în formă de U a fost imprimată deasupra unei benzi de Kapton de 45 µm grosime [240]. Senzorii au fost poziționați deasupra acestei benzi.



Figura 6.1. Principiul de funcționare al senzorului punte AMR : (a) configurația senzorului cu elemente AMR; (b) circuitul echivalent al unui singur senzor cu punte AMR și configurația magnetică a unui braț al punții.



Figura 6.2. Schema cipului senzor cu punte AMR cu polarizare de schimb: (a) Schema cipului cu traseu de curent în formă de U supraimpus pe partea superioară a punților AMR; (b) Dimensiunile cipului.

Circuitul echivalent pentru senzorul cu punte AMR (figura 6.2) arată că cele patru elemente ale cipului AMR sunt într-o configurație de punte Wheatstone (brațe ale punții  $R_1 - R_4$ ). Fiecare braț de rezistență al punții poate fi constituit din mai multe benzi cu configurații specifice. Astfel, rezistența fiecărui braț depinde de numărul de benzi. La alimentarea cu curentul *I*, tensiunea de ieșire (creșterea potențialului în direcția *y*) pe diagonala de măsurare a punții este:

$$V = I \frac{R_2 R_4 - R_1 R_3}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}$$
(6.1)

unde rezultatul expresiei este valabil atunci când  $R_1 + R_2 \approx R_3 + R_4$ , deci când  $I_{bandă} = I/2$ .

#### 6.1.2. Fabricarea unui Demonstrator de Senzori cu Punte AMR

Senzorii cu punte AMR propuși utilizează structuri spintronice de tip Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> (10 nm)/FeMn (1 nm) care au fost depuși la ICPE-CA București prin pulverizare magnetron pe un substrat de siliciu oxidat și microfabricați prin metoda lift-off. Date fiind particularitățile metodei de depunere, structurile sunt amorfe și au o conductivitate electrică foarte scăzută. În plus, structurile depuse nu prezintă o axă de anizotropie magnetocristalină sau un câmp de polarizare de schimb  $H_{ex}$  între stratul antiferomagnetic (FeMn) și stratul magnetic de permalloy (Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>). În final, au fost tăiate bucăți de 5 × 5 mm<sup>2</sup>. De remarcat este faptul că pentru cip a fost utilizată o singură mască, reducându-se astfel semnificativ complexitatea procesului de microfabricare. În Figura 6.6a poate fi văzută o imagine de microscop electronic a cipului. Mai multe cipuri au fost tratate termic, Figura 6.6b, cu scopul de a îmbunătăți structura cristalină ale straturilor depuse și, astfel, conductivitatea electrică.

Tratamentul termic, efectuat în atmosferă de argon (Ar, 99,99%), la o presiune de 2 mbarr și la o temperatura de 450 °C, timp de două ore, a fost aplicat într-o instalație de călire magnetică propusă [36].



Figura 6.6. (a) Imagine SEM a senzorului cu punte AMR; (b) Direcția și valoarea inducției magnetice a câmpului aplicat *B*, peste structură în timpul procesului de călire magnetică.

## 6.1.3. Caracterizarea Senzorului Punte AMR

## a. Configurația experimentală

Diagrama bloc funcțională a instalației (Figura 6.9) a fost concepută pentru a crește performanța senzorului AMR de a detecta câmpuri magnetice joase, sub 1 Oe (10<sup>-4</sup> T în aer).



Figura 6.9. Diagrama bloc funcțională a configurației experimentale pentru cipul demonstrativ al senzorului cu punte AMR.

Cipul a fost conectat cu fire de Cu placate cu argint. Lipirea firelor s-a realizat cu pastă de Ag de la Sigma-Aldrich, cu timp de întărire de 24 de ore, la temperatura camerei. Cipul conectat a fost plasat pe o placă PCB, MSOP8 care permite amplasarea cipului într-o mufă DIP PIN 8 cu pini placați cu aur, Figura 6.11a. Peste cip a fost plasat traseul de curent printat în formă de U. Astfel, a fost obținută o structură compactă, care poate fi considerată un circuit integrat hibrid, care poate fi manipulat și caracterizat, având o mare versatilitate. Un al doilea traseu de curent în formă de U a fost plasat sub senzor pentru testarea curenților mai mari. Deoarece răspunsul senzorului pentru valori scăzute ale câmpului este de interes, lângă cip a fost amplasat un sistem de bobine Helmholtz de dimensiuni mici, Figura 6.11b.



Figura 6.11. Configurația demonstratorului: (a) Etapele de asamblare a cipului demonstrator; (b) Senzorul montat în cutia ecranată, așa cum a fost implementat pentru caracterizare și testare.

Întreaga instalație este plasată într-o carcasă feromagnetică pentru ecranare magnetică. Cipul a fost introdus într-o mufă DIP PIN 16, unde au fost realizate conexiunile necesare la grila de conectare, în timp ce pinii rămași au fost utilizați pentru a conecta traseele de curent. Au fost utilizați încă doi magneți permanenți de ferită pentru a compensa efectul câmpului de polarizare de schimb,  $H_{bias}$ , Figure 6.11b.

#### b. Caracterizarea cipului demonstrator - după călire termică și magnetică

În figura 6.12 sunt prezentate caracteristicile de ieșire pentru un cip căruia i s-a aplicat doar tratamentul termic și pentru un cip care a trecut prin procesul de călire magnetică.



Figura 6.12. Caracteristicile de ieșire pentru senzorul punte AMR recopt termic: (a) Fără câmp de polarizare aplicat; (b) Pentru diferite valori ale câmpului de polarizare  $H_{bias}$ .

Pentru cipul cu tratament termic și recoacere magnetică, rezultatele pot fi observate în Figura 6.12b pentru senzorul 1 și în Figura 6.13b pentru senzorul 2, conectat după cum se arată în Figura 6.10b.



Figura 6.13. Caracteristicile de ieșire pentru senzor cu punte AMR tratat termic și magnetic, pentru diferite niveluri de polarizare ( $H_{bias}$  = 0, 45, 80 Oe): (a) Determinări pentru senzorul 1; (b) Determinări pentru senzorul 2 ( $H_{bias}$  = 80 Oe).

Pentru a reduce efectul de histerezis și neliniaritatea, au fost plasați doi magneți permanenți pe peretele cutiei metalice ecranate. Cei doi senzori au un spațiu de 1 mm între ei. Asimetriile dintre răspunsul senzorilor vor fi compensate în sistemul de măsurare diferențială. Luând în considerare distribuția curentului prin banda în formă de U și orientarea câmpului magnetic creat de senzori, tensiunea de ieșire va fi:  $V_{diff} = V_{sensor1} - V_{sensor2}$ .

#### 6.1.4. Rezultate Experimentale pentru Cipul Demonstrator de Măsurare a Curentului

Luând în considerare configurația din Figura 6.9, a fost testată opțiunea de a alimenta senzorii cu o sursă de tensiune constantă, dar răspunsul s-a dovedit a fi instabil. Având în vedere că cei doi senzori au rezistențe asemănătoare, a fost aleasă opțiunea de a alimenta senzorii cu o sursă de curent constantă. Sursa de curent K2635A a fost setată la 6 mA. Curentul a fost distribuit în mod egal între cei doi senzori, fapt confirmat de tensiunile de off-set măsurate pentru fiecare senzor, care sunt apropiate de cele înregistrate atunci când senzorii au fost alimentați separat la 3 mA. În condițiile descrise mai sus, s-a determinat:

- Tensiunea la terminalele punții: 4.399 V;
- Rezistenţa totală a punţii: 0.734 kΩ;
- Puterea disipată de punte: 13.1 mW.

Caracteristica de răspuns a senzorului AMR în modul diferențial de conectare în funcție de curentul care trece prin banda imprimată de Ag este reprezentată în Figura 6.15. Se observă o bună liniaritate a sistemului, cu o sensibilitate între 4–4.67·10<sup>-4</sup> mV/mA.



Figura 6.15. Caracteristicile de răspuns ale senzorului diferențial, în funcție de valoarea curentului prin traseul imprimat de Ag pentru: (a) Curenți mici de până la 25 mA; (b) Curenți de până la 100 mA.

Limita de detecție pentru această configurație este de aproximativ 2 mA (atât CC, cât și CA). Eroarea de liniaritate a fost determinată din figura 6.15b prin determinarea unei erori de 0,006 mV pentru o variație a semnalului de 0,078 mV, ceea ce corespunde la o eroare de liniaritate de aproximativ 7,5 %. Senzorul a fost testat într-un interval de curenți de 0-100 mA pentru a evita orice efecte termice semnificative asupra benzii conductoare care pot influența stabilitatea semnalului. Configurația urmărește să servească drept probă concept și nu poate fi comparată direct cu soluțiile comerciale, dar poate face obiectul unor noi evaluări, în special în ceea ce privește structura multistrat utilizată pentru depunerea senzorilor.

Structuri mai complexe bazate pe efectul GMR sau TMR, cu anizotropie pe axa transversală, pot duce la rezultate mult mai bune și la creșterea semnificativă a performanței acestui tip de senzor. Rezultatele acestei lucrări pot fi, de asemenea, utilizate pentru detectarea nanoparticulelor magnetice plasate în locul benzilor în formă de U pe ramurile senzorilor PHR. Acestea pot fi considerate surse suplimentare de câmp magnetic care provoacă dezechilibrarea punții. Eforturile de cercetare ulterioare se pot concentra pe configurații complexe ale senzorilor.

## 6.2. Conceperea unui Dispozitiv cu un Singur Traseu bazat pe Senzori GMR pentru Măsurarea CC/CA Non-Contact a Curentului Electric

#### 6.2.1. Caracterizarea Senzorului de Curent bazat pe GMR

În acest studiu, este prezentată o metodă practică care va crește semnificativ sensibilitatea și precizia unui senzor GMR prin proiectarea adecvată a circuitului care generează câmpul magnetic. Studiul din acest subcapitol face parte din lucrarea de autor publicată în [20]. Noutatea configurației propuse constă într-o schemă de măsurare diferențială dublă cu câmp de polarizare cu magnet permanent reglabil. Principiul de funcționare este ilustrat în Figura 4.10 a, c. Curentul *I* din traseele conductoare generează un câmp magnetic, a cărui componentă  $B_x$  va fi detectată de senzorul GMR.

Senzorul AA003-02 [95], care conține două elemente GMR active și două elemente ecranate, conectate într-o punte Wheatstone, are un raport GMR între 13 %-16 % [95]. Figura 6.21 prezintă caracteristicile de ieșire obținute atunci când senzorul este nepolarizat.



Figura 6.21. Dependențe tipice de câmp măsurate ale semnalului de ieșire pentru senzorul GMR AA003-02 pentru: (a) alimentare cu diferiți curenți de comandă; (b) alimentare cu tensiunea de 4,096 V.

## 6.2.2 Dezvoltarea Dispozitivului cu un Singur Traseu bazat pe Senzori GMR

Figura 6.25 prezintă PCB-ul sistemului personalizat de măsurare a curentului, atunci când curentul de măsurat *I* trece prin banda conductoare în formă de U, Figura 6.25a. Senzorii GMR sunt dispuși să funcționeze într-un aranjament diferențial, ceea ce înseamnă că tensiunea de ieșire crește pentru un senzor și scade pentru celălalt.



Figura 6.25. PCB personalizat pentru măsurarea curentului folosind senzori GMR: (a) partea din spate; (b) partea din față. Pasta de Ag este utilizată pentru a crește secțiunea transversală (în consecință, conductivitatea electrică) în zonele de contact, reducând astfel rezistența electrică globală a traseului de curent în formă de U. Un magnet permanent mobil și două plăci de FeSi alcătuiesc un sistem de polarizare reglabil care reduce și omogenizează densitatea efectivă a fluxului magnetic (Figura 6.25b). În ceea ce privește deciziile de proiectare, a fost selectat un câmp de polarizare de 8 Oe. Modul de funcționare al sistemului este următorul: răspunsul senzorului GMR trece la un regim de funcționare liniară atunci când magnetul permanent creează un câmp magnetic îndreptat spre axa sensibilă a senzorilor.

Banda conductoare *w* are o lățime de 4 mm. Această configurație anulează simultan câmpurile magnetice de interferență externe nedorite. Deoarece există o izolare galvanică între senzori și traseul de curent, se poate observa că această metodă de funcționare împiedică senzorul să fie afectat de supracurent. Datorită tehnologiei de fabricație, în care un strat AF (antiferomagnetic) sau un strat AF sintetic este utilizat pentru a polariza stratul fixat, chiar dacă curentul din traseu generează un câmp magnetic de intensitate ridicată, acesta nu va afecta funcționalitatea senzorului. Cu alte cuvinte, magnetizarea stratului fixat nu este afectată, iar magnetizarea stratului liber va reveni la orientarea sa inițială. Astfel, spre deosebire de alți senzori AMR, în acest caz nu este nevoie de un câmp magnetic extern pentru a reseta senzorii.

Configurația amplificatorului pentru măsurarea curentului este prezentata în figura 6.26. Semnalele de ieșire de la senzori sunt amplificate folosind un amplificator de instrumentație LabJack EI1040 [244], cu un câștig de 10, ajustat pentru fiecare canal. Un amplificator LabJack EI1040 suplimentar, cu un câștig de 10 pentru măsurători de curenți mici și de 1 pentru măsurători de curenți mari, amplifică în continuare semnalul rezultat.

Senzorii GMR AA003-02 au fost alimentați cu o tensiune constantă de 4,096 V, generată de o sursă compensată termic, de la amplificatorul El 1040. Pentru această tensiune, curentul prin fiecare senzor a fost de aproximativ 0,8 mA (rezistența internă pentru fiecare senzor este de 5 kΩ).



Figura 6.26. Diagrama bloc funcțională a sistemului diferențial de măsurare a curentului utilizând senzori GMR.

Diagrama bloc funcțională a sistemului diferențial de măsurare a curentului utilizând senzori GMR este prezentată în Figura 6.26.

Utilizarea a doi senzori AA003-02E aproape identici a condus la un sistem dublu de măsurare diferențială, care a sporit și mai mult avantajele și precizia față de un singur sistem de măsurare diferențială (Figura 6.27a). Funcționarea sistemului de măsurare diferențială a curentului este prezentată în Figura 6.27b: ambii senzori au avut un câmp de polarizare de 8 Oe aplicat prin magnetul

permanent. Pentru *H*<sub>bias</sub> = - 8 Oe, tensiunea pe senzorul 1 scade, în timp ce tensiunea pe senzorul 2 crește atunci când se aplică același curent *I*.



Figura 6.27. Sistemul de măsurare diferențială: (a) configurația experimentală; (b) ilustrarea modului de funcționare pentru  $H_{bias}$  = 8 Oe: atunci când un curent *I* trece prin banda în formă de U, tensiunea pe senzorul 1 crește (săgeata verde), în timp ce tensiunea pe senzorul 2 scade (săgeata roșie).

Considerând că S1≈S2 (pentru același tip de senzori), adică sistemul este echilibrat termic, iar diferențele dintre variațiile semnalelor de ieșire ale senzorilor create de câmpurile externe sunt neglijabile, semnalul de ieșire este:

$$\Delta U = (K_{S1} + K_{S2}) \cdot H_I = (K_{S1} + K_{S2}) \cdot C \cdot I = S \cdot I$$
(6.8)

unde S (V/A) este sensibilitatea sistemului de măsurare diferențială.

#### Rezultate experimentale în Curent Continuu cu Senzori polarizați

Cu senzorii polarizați cu 8 Oe, semnalul de ieșire este liniar pentru ambii senzori. Figura 6.29 prezintă caracteristica de ieșire a sistemului atunci când este la măsurarea unui curent continuu, variat între -2 A și 2 A. Sensibilitatea diferențială de ieșire este: *S* = 0,0307 V/A.



Figura 6.29. Caracteristica diferențială de ieșire pentru senzori polarizați la 8 Oe, DC ±2 A: (a) răspunsul individual; (b) răspunsul diferențial.

## 6.3. Conceperea unui Dispozitiv Multi-traseu bazat pe Senzori GMR pentru Măsurarea CC/CA Non-Contact a Curentului Electric

Această lucrare, publicată în [184], include proiectarea și implementarea unui senzor de curent GMR ultra-sensibil care poate detecta curenți CC și CA de la 2 la 300 mA, cu o sensibilitate de configurare cuprinsă între 15,62 și 23,19 mV/mA. Limita de detecție este de 100 μA în curent continuu. In curent alternativ, între 10 Hz și 50 kHz, limita de detecție este de 100 până la 300 μA. Aceste rezultate s-au obținut prin utilizarea unei bobine planare cu mai multe spire și a unui sistem de detecție dublu diferențial bazat pe GMR, împreună cu un sistem mixt de polarizare DC/AC care utilizează atât magneți permanenți, cât și o configurație de bobină Helmholtz.

## 6.3.1. Dezvoltarea și Modul de Funcționare al Dispozitivului Multi-Traseu bazat pe Senzori GMR

Pentru această configurație s-au utilizat doi senzori AA003-02E în configurație diferențială [95]. Configurația de măsurare a curentului bazată pe GMR a fost creată folosind rezultatele metodei analitice. Configurația plăcii de testate, denumită GMR Testboard, este indicată în figura 6.37a iar in figura 6.37b este prezentată placa experimentală.





(b)

Figura 6.37. Placă de testare GMR (PCB personalizat) optimizată pentru detectarea câmpurilor joase (măsurarea curentului) utilizând senzori GMR: (a) schema și detaliile PCB; (b) placa experimentală.

Configurația traseelor de curent este aceeași cu cea descrisă în secțiunea 4.2.1, Tabelul 4.1.

## 6.3.2. Rezultate Experimentale pentru Măsurarea CC/CA a Curenților

## a. Rezultate Experimentale Curent Continuu

Rezultatele prezentate în această secțiune se concentrează pe demonstrarea capacității de detectare a curenților mici ale configurației propuse. Pentru fiecare din determinările experimentale s-a calculat sensibilitatea senzorului (fără amplificare). Principala provocare o reprezintă măsurătorile curenților de intensitate redusă , deoarece curenții mai mari pot fi detectați cu ușurință cu această configurație, de exemplu prin integrarea unei bare de cupru în partea din spate a PCB.



Figura 6.40. Răspunsul sistemului de senzori GMR pentru un curent continuu de ±150 mA, cu *H*<sub>bias</sub> configurat la 8 Oe: (a) răspunsul individual al senzorilor; (b) răspunsul diferențial.

Din figura 6.40, comparativ cu rezultatele prezentate în [20], pentru kitul de evaluare a senzorilor NVE AG003-01E (care utilizează același model de senzori), cu măsurători pe un singur traseu de curent, cu o lățime similară de 0,254 mm, sensibilitatea obținută este  $S_{masurat}$ = 0.0179 mV/mA în timp ce pentru sistemul diferențial din [10] cu o grosime a benzii de 4 mm, pentru același test de 150 mA, sensibilitatea obținută  $S_{D=4 mm}$ =0.028 mV/mA care este de aproximativ 8,3 ori mai mică. Prin urmare, în acest test, utilizând aranjamentul multi-traseu, s-a obținut o îmbunătățire a sensibilității de aproximativ 13 ori față de kitul de evaluare a senzorului și de 8,3 ori față de configurația diferențială optimizată anterior din [20].

#### b. Măsurarea curenților mici

Este posibil să se detecteze cu exactitate valori mai mici ale curentului datorită îmbunătățirii sensibilității structurii sistemului de senzori.

Figura 6.46 prezintă curba de calibrare pentru dispozitiv în intervalul 0-100 mA la măsurarea unei unde sinusoidale de 100 Hz. Coeficientul de corelare  $R^2$  obținut este  $R^2 = 0,99992$ . Sensibilitatea întregii configurații, în intervalul 0-100 mA, este *S*= 15,62 mV/mA. Există o corelare foarte bună între curentul măsurat și răspunsul sistemului.



Figura 6.46. Curba de calibrare în intervalul 0-100 mA pentru o undă sinusoidală de 100 Hz. Curentul minim de urmărire reprezentat pe curba de calibrare este de 1 mA.

#### 6.5. Concluzii

#### a. Dispozitiv punte cu senzor AMR

1. Cercetarea este dedicată proiectării, construcției și caracterizării unui demonstrator bazat pe senzori AMR în punte pentru măsurarea curentului fără contact. Acesta include doi senzori AMR identici conectați într-o configurație de punte, care pot fi utilizați individual sau în configurație diferențială pentru a minimiza impactul variațiilor de temperatură și al interferențelor câmpului magnetic. Este stabilită dimensiunea fizică a cipului și a traseului de curent de măsurare, iar funcționalitatea cipului demonstrativ este verificată prin simulări.

2. Cipul punte AMR, cu o structură de tipul Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>(10 nm)/FeMn a fost microfabricat la ICPE-CA București. Fabricarea traseelor de curent și tratamentele termice și magnetice pentru senzori au fost realizate la Universitatea Transilvania din Brașov, Laboratorul de cercetare în Fizică Aplicată din cadrul Centrului de cercetare al Departamentului de Inginerie Electrică și Fizică Aplicată.

3. Determinările experimentale au fost efectuate individual pentru cei doi senzori AMR și apoi în configurație diferențială. Pentru aceasta, autorul a construit un montaj experimental care include cipul demonstrator, sursa de curent de măsurare și curentul de alimentare a senzorului, surse de câmp magnetic (bobine Helmholtz și magneți permanenți), blocuri electronice de amplificare și sisteme de măsurare (curenți, tensiuni, câmp magnetic etc.).

4. Analiza efectuată certifică posibilitatea de a efectua măsurători cu senzori cu punte AMR în configurație diferențială sau cu curenți de ordinul 0-100 mA. Testele în curent alternativ la o frecvență și cu amplitudini de curent variabile (5 mA, 25 mA, 50 mA) indică un semnal de ieșire liniar (eroare de liniaritate este de aproximativ 7,5 %) și stabil, fără perturbații percepute. Limita de detecție a fost de ± 2 mA atât în curent continuu, cât și în curent alternativ.

#### b. Dispozitiv bazat pe senzor GMR cu un singur traseu de curent

1. Cercetarea a implicat realizarea unei configurații experimentale de mare sensibilitate pentru măsurarea curentului fără contact, bazată pe senzori de magnetorezistență gigant (GMR). Pentru a îmbunătăți și a exploata sensibilitatea senzorilor GMR, autorul propune utilizarea senzorilor GMR într-o configurație de conexiune diferențială dublă cu un sistem de polarizare reglabil.

2. Configurația de măsurare a curentului s-a bazat pe un PCB realizat de autor, care conține cei doi senzori GMR, senzorul de temperatură în formă de U și sistemul de polarizare magnetică permanentă. Sistemul de polarizare este alcătuit dintr-un magnet dreptunghiular din ferită cu posibilitate de rotație și două folii de FeSi pentru a concentra fluxul magnetic în jurul zonei senzorului pentru câmpul de polarizare dorit.

3. A fost pusă în practică o configurație experimentală de măsurare a curentului fără contact, de mare sensibilitate, bazată pe un senzor magnetorezistiv gigant (GMR). Sensibilitatea configurației detectorului variază de la 0,0272 la 0,0307 V/A, iar efectele de histerezis sunt minime (40 mA). Dependențele de câmp ale senzorilor au fost liniarizate prin aplicarea unui câmp magnetic de polarizare. În plus, sistemul diferențial GMR realizat este versatil, deoarece poate măsura curenți în DC și în CA. S-a demonstrat că dispozitivul de măsurare a curentului poate măsura atât în curent continuu (75 mA până la aproximativ 4 A), cât și în curent alternativ (150 mA până la 4 A) cu o precizie ridicată și o durată lungă.

4. Aceste rezultate au fost obținute fără sisteme de ecranare sau filtrare EMF. PCB-ul personalizat a fost proiectat pentru a măsura curenți de până la 10 A (luând în considerare lățimea urmei de cupru). Totuși, s-a observat că măsurarea prelungită a curenților mai mari de 4 A duce la o încălzire apreciabilă.

#### c. Dispozitiv bazat pe senzor GMR de tip Multi-traseu

1. Această cercetare include îmbunătățiri efectuate de autor pentru sistemul de măsurare a curentului fără contact cu senzori GMR, constând în: utilizarea mai multor trasee de curent dispuse într-o configurație de bobină plană, metoda de măsurare diferențială dublă, un sistem mixt de polarizare DC/AC care utilizează magneți permanenți și utilizarea unei configurații speciale a bobinei Helmholtz.

2. Configurația de măsurare are performanțe superioare față de cea care utilizează un singur traseu de măsurare a curentului.

3. Un PCB special conceput cu senzori GMR a servit drept bază pentru un sistem de măsurare a curentului fără contact extrem de sensibil, potrivit pentru aplicații de câmp magnetic redus. Sunt utilizați doi senzori GMR comerciali (AA003-02E) într-o configurație diferențială dublă. O bobină plană spiralată asigură, prin cele 7 trasee rectilinii de curent, o concentrare a câmpului magnetic care este măsurat de senzori. Dimensionarea și validarea structurii traseelor de curent sunt prezentate în Capitolul 4 (Tabelul 4.1, Figurile 4.13-4.16). Câmpul magnetic de polarizare, pentru liniarizarea răspunsului senzorilor GMR, este alcătuit din două bobine de polarizare plasate într-o configurație simetrică cvasi-Helmholtz pe PCB, la o distanță optimă de fiecare senzor GMR. Calibrarea bobinelor se realizează prin măsurători în etapa de asamblare a plăcii de testare ( $R_{coil} = 38 \Omega$ , pentru I = 57,55 mA,  $H_{bias} = 8$  Oe).

4. Determinările experimentale efectuate de autor au servit scopului de a demonstra capabilitatea metodei și a configurației implementate pentru măsurarea fără contact a curenților slabi în funcționare DC și AC. Comparativ cu valorile sensibilității din literatura de specialitate, datele obținute certifică îmbunătățirea performanței de măsurare prin configurația diferențială propusă cu senzori GMR cu o bobină plană cu 7 trasee de curent.

5. Sistemul de măsurare dezvoltat permite detectarea curenților DC și AC între 2 și 300 mA cu o sensibilitate ridicată între 15,62 și 23,19 mV/mA. Configurația are o limită de detecție de 100 μA în curent continuu și pentru frecvențe între 10 Hz și 50 kHz, o limită de detecție de 100 până la 300 μA. Determinările la frecvențe mai mari au fost limitate de limitele electronicii de procesare, deoarece senzorii funcționează cu frecvențe de până la 1 MHz.

6. Pentru semnalul periodic cu forme de undă diferite, măsurătorile au certificat integritatea semnalelor măsurate: forma de undă a tensiunii de ieșire ( $V_{out}$ ) urmează îndeaproape forma de undă a curentului măsurat.

7. Configurația experimentală prezentată în subcapitolul 6.3 a îmbunătățit considerabil domeniul de funcționare al senzorului pentru valori scăzute ale curentului, comparativ cu studiul din subcapitolul 6.2 și cu soluțiile comerciale. Această abordare nu a fost observată în alte lucrări [112, 152, 153, 158] sau în soluții comerciale de senzori bazate pe AMR [13,19], Hall [250], microfluxgate [145, 146] sau TMR [147].

## 7. Concluzii Finale, Contribuții Originale, Valorificarea Rezultatelor Cercetării și Noi Direcții de Cercetare

#### 7.1. Concluzii Finale

Această cercetare doctorală are ca obiectiv identificarea și dezvoltarea de soluții adecvate pentru optimizarea performanțelor senzorilor magnetorezistivi pentru două aplicații specifice: detectarea nanoparticulelor magnetice și măsurarea curentului electric fără contact. Activitățile desfășurate și rezultatele obținute sunt descrise într-o manieră structurată pentru fiecare obiectiv specific al tezei.

**O1.** Dezvoltarea unei baze de cunoștințe prin documentarea și analiza comparativă a efectelor magnetorezistive pentru a fi aplicate în proiectarea și conceptualizarea aplicațiilor senzorilor de câmp magnetic.

Acest obiectiv de cercetare a fost luat în considerare în toate activitățile dezvoltate, dar principalele rezultate sunt descrise în capitolul 2 al tezei: Efectele magnetorezistive în microfabricarea senzorilor magnetici. Sunt sistematizate cunoștințele privind efectele magnetorezistive care stau la baza microfabricării senzorilor magnetorezistivi.

**O2.** Modelarea, simularea și validarea experimentală pentru procesele care au loc în senzorii magnetorezistivi și în structurile de măsurare a curentului electric.

Acest obiectiv de cercetare a fost realizat prin activitățile descrise în capitolele 3 și 4 din teză.

## a. Simulări micromagnetice ale comportamentului senzorilor magnetorezistivi

Teoria micromagnetică este un instrument esențial pentru determinarea comportamentului structurilor senzorilor magnetorezistivi. Simularea micromagnetică poate fi o modalitate rapidă și eficientă de a valida un anumit proiect, dar rezultatele trebuie întotdeauna validate prin determinări experimentale, deoarece teoria micromagnetică nu ia în considerare toate fenomenele microscopice care afectează filmele magnetice subțiri.

- Abordarea micromagnetică este utilă în procesul de proiectare a senzorilor, pentru determinarea precisă a parametrilor geometrici și a formei acestora și alegerea materialului. Dar, pe lângă avantajele metodei micromagnetice, precum și impreciziile care pot apărea, cercetarea experimentală este absolut necesară pentru validarea rezultatelor. Cercetarea experimentală este introdusă pentru a valida rezultatele simulării.
- Simulările efectuate utilizând programele SimulMag, LLG Micromagnetics și Object Oriented Micromagnetic Framework (OOMMF) evidențiază comportamentul senzorilor bazați pe efectele AMR, PHE și GMR pentru măsurarea câmpului magnetic.
- Structura simulată a valvei de spin GMR permite obținerea caracteristicilor câmpului magnetic în prezența și absența nanoparticulelor magnetice de pe suprafața senzorului. Prezența

nanoparticulelor magnetice pe suprafața senzorului GMR cu valvă de spin influențează magnetizarea în sensul că există o asemănare crescută a magnetizării cu cea a unei singure nanoparticule magnetice pe măsură ce crește concentrația NPM.

Studiul efectuat demonstrează că modelarea și simulările cu ajutorul teoriei micromagnetice reprezintă o etapă esențială în procesul de proiectare și optimizare și pentru evaluarea performanței de câmp a structurilor senzorilor magnetorezistivi potențiali. Cu toate acestea, datorită provocărilor inerente ale perturbațiilor electromagnetice care pot perturba performanța senzorului pentru aplicații specifice, în special în regiunea de câmp scăzut, este necesară evaluarea macroscopică a surselor de câmp electromagnetic din jurul zonei senzorului. Acest lucru poate fi realizat fie prin investigații experimentale sau analitice pentru a îmbunătăți selectivitatea geometrică a surselor de câmp magnetic ale senzorului, fie prin îmbunătățiri intenționate ale configurației funcționale pentru aplicații specifice.

# b. Metode analitice macroscopice și simulări electromagnetice pentru diferite tipuri de conductori

Datorită provocărilor inerente ale perturbațiilor electromagnetice care pot perturba performanța senzorului pentru aplicații specifice, în special în domeniul câmpului magnetic scăzut, este necesară evaluarea macroscopică a surselor de câmp electromagnetic din jurul zonei senzorului.

Modelele analitice și simulările electromagnetice macroscopice sunt instrumente avantajoase pentru optimizarea și îmbunătățirea selectivității geometrice a senzorilor magnetorezistivi. Aceste rezultate pot fi aplicate în special pentru aplicațiile de măsurare a curentului fără contact, în care forma, lungimea și proiectarea structurii de măsurare a traseului curentului pot afecta radical câmpul magnetic din zona senzorului.

Prin utilizarea teoriei electromagnetice, sunt dezvoltate mai multe modele analitice specifice și simulări pentru a estima cu un grad foarte bun de precizie intensitatea câmpului magnetic generat în zona senzorului magnetorezistiv.

- Au fost dezvoltate modele pentru conductoare simple, dreptunghiulare și toroidale în care circulă curent continuu și a fost calculată intensitatea câmpului magnetic în diferite puncte, pentru a stabili cea mai bună abordare pentru implementarea unui tip de conductor pentru un senzor de curent magnetorezistiv fără contact.
- Modelul pentru conductorii de tip bobină oferă o uniformitate și o intensitate bune ale câmpului pentru un curent dat, dar, pentru aplicațiile miniaturizate, este dificil de realizat din cauza dimensiunilor inerente ale acestora.
- Este dezvoltat modelul pentru urme rectilinii simple și multiple și este obținută expresia intensității câmpului magnetic creat de curentul care circulă prin urme.
- Metoda analitică a inclus patru cazuri de studiu: neglijarea grosimii urmei, împărțirea grosimii urmei în mai multe straturi, urmă conductoare finită sau foarte lungă și mai multe urme adiacente în zona senzorului.
- Comparația cu studiul experimental arată că cazul modelului analitic atunci când urma are o lungime finită și grosimea urmei este luată în considerare și împărțită într-un număr adecvat de

straturi este cel mai precis. Cu toate acestea, pentru lungimi mai mari ale urmei, modelele care neglijează lungimea urmei se pot dovedi mai precise și sunt mai apropiate de modelul COMSOL FEM.

 Metoda analitică a fost validată folosind simularea prin metoda elementelor finite COMSOL și rezultatele experimentale.

Aceste rezultate se pot dovedi foarte utile pentru proiectarea și optimizarea aplicațiilor care conțin urme de curent, cum ar fi senzorii de curent fără contact și, de asemenea, pentru detectarea nanoparticulelor magnetice, deoarece unele metode de măsurare implică polarizarea nanoparticulelor magnetice cu un câmp de polarizare care poate fi produs fie de o bobină, fie de o urmă de curent.

# **O3.** Dezvoltarea de metode și montaje experimentale pentru detectarea nanoparticulelor magnetice cu senzori magnetorezistivi.

Acest obiectiv de cercetare a fost realizat în principal prin activitățile descrise în capitolul 5 al tezei.

#### a. Sisteme experimentale

A fost efectuat un studiu experimental complex cu senzori GMR pentru optimizarea detectării NPM cu structuri de valvă de spin bazate pe schimb. Scopul acestui studiu a fost de a concepe două montaje experimentale și mai multe metode de îmbunătățire a performanței și caracteristicilor sistemelor de senzori GMR pentru detectarea nanoparticulelor magnetice.

- Prima metodă se bazează pe analiza derivatei semnalului de ieșire al senzorului pentru a determina prezența și concentrația de NPM. S-a estimat că sistemul experimental a determinat un moment magnetic de aproximativ 9.098·10<sup>-5</sup> emu pentru o fluctuație a semnalului de 0,035 V (adică o sensibilitate de detecție de aproximativ 75,81 emu/g).
- A doua metoda implică realizarea unei plăci de circuite imprimate, personalizată, pentru a
  optimiza selectivitatea geometrică și eficiența generală a configurației de detecție. Prin
  intermediul celei de-a doua metode, s-au efectuat experimente de magnetorelaxometrie în
  curent continuu și în curent alternativ pentru detectarea NPM.

Cercetarea în acest domeniu a demonstrat posibilitatea detectării NPM prin utilizarea sistemelor de senzori magnetorezistivi. Au fost analizate mai multe abordări pentru optimizarea configurației pentru detectarea NPM.

Metoda și rezultatele obținute pot fi îmbunătățite și aplicate în continuare pentru a dezvolta configurații de biosenzori magnetorezistivi foarte sensibili și integrați, cu scopul final de a implementa în laborator pe un cip măsurători biologice foarte specializate care vor reduce semnificativ costurile de analiză și vor îmbunătăți accesibilitatea asistenței medicale personalizate.

## **O4.** Dezvoltarea de dispozitive de măsurare a curentului non-contact bazate pe senzori magnetorezistivi.

Acest obiectiv de cercetare a fost realizat în principal prin activitățile descrise în capitolul 6 al tezei.

Principalele contribuții ale autorului sunt proiectarea și construcția de senzori magnetorezistivi bazați pe efectele AMR, GMR și TMR. Sunt descrise montajele experimentale proiectate și realizate, precum și rezultatele determinărilor experimentale efectuate pentru caracterizarea senzorilor și dispozitivelor de măsurare și pentru validarea acestora în măsurătorile fără contact ale curenților electrici și detectarea câmpului magnetic.

#### a. Dispozitiv cu senzori punte AMR

Se propune proiectarea, construirea și caracterizarea unui demonstrator bazat pe un senzor punte AMR pentru măsurarea curentului fără contact. Acesta include doi senzori AMR identici conectați într-o configurație de punte, care pot fi utilizați individual sau în configurație diferențială pentru a minimiza impactul variațiilor de temperatură și al interferențelor câmpului magnetic. Dimensiunea fizică sau cipul și urma de curent sunt stabilite, iar funcționalitatea cipului demonstrativ este verificată prin simulări.

Cipul punte AMR, cu o structură Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>(10 nm)/FeMn a fost microfabricat la ICPE-CA București. Realizarea traseelor de curent și tratamentele termice și magnetice pentru senzori s-au realizat la Laboratorul de Fizică Aplicată al Centrului de cercetare al Departamentului de Inginerie Electrică și Fizică Aplicată.

Determinările experimentale au fost efectuate pentru ambii senzori AMR și apoi în montaj diferențial. Pentru aceasta, autorul a construit un montaj experimental care include cipul demonstrator, sursa de curent de măsurare și curentul de alimentare a senzorului, surse de câmp magnetic (bobine Helmholtz și magneți permanenți), blocuri electronice de amplificare și sisteme de măsurare (curenți, tensiuni, câmp magnetic etc.).

Caracteristicile senzorului sunt efectuate după stabilizarea semnalului și recoacerea magnetică, în prezența și absența curentului măsurat, cu traseul de curent în formă de U a demonstratorului. Analiza efectuată certifică posibilitatea de a măsura cu senzori AMR punte, în configurație diferențială, curenți DC și AC, asigurând liniaritatea și stabilitatea măsurătorilor. Limita de detecție a fost de ± 2 mA atât în curent continuu, cât și în curent alternativ.

Rezultatele pot fi îmbunătățite semnificativ prin utilizarea unor structuri mai complexe bazate pe efectul GMR sau TMR, cu anizotropie pe axa transversală, ceea ce poate duce la îmbunătățirea semnificativă a performanțelor acestui tip de senzor.

#### b. Dispozitiv cu senzori GMR cu un singur traseu de curent

Sunt realizate proiectarea și punerea în aplicare a unei configurații experimentale de măsurare a curentului fără contact, de mare sensibilitate, bazată pe senzori GMR. Pentru a îmbunătăți și a exploata sensibilitatea senzorilor GMR, autorul propune utilizarea senzorilor GMR într-o configurație de conexiune diferențială dublă cu un sistem de polarizare reglabil.

A fost realizată o configurație experimentală de măsurare a curentului fără contact, de mare sensibilitate, bazată pe senzori magnetorezistivi gigant (GMR). Sensibilitatea configurației detectorului variază de la 0,0272 la 0,0307 V/A, cu efecte de histerezis minime (40 mA). Caracteristicile de ieșire ale senzorilor au fost liniarizate prin intermediul unui câmp magnetic de polarizare. În plus, sistemul diferențial GMR este versatil, deoarece poate măsura atât curenți în regim de curent continuu, cât și de curent alternativ. S-a demonstrat că dispozitivul de măsurare a curentului poate măsura atât în curent continuu (75 mA până la aproximativ 4 A), cât și în curent alternativ (150 mA până la 4 A) cu o precizie ridicată și o durată lungă. Aceste rezultate au fost

obținute fără sisteme de ecranare sau filtrare EMF. PCB-ul personalizat pentru sistem a fost proiectat pentru a măsura curenți de până la 10 A (luând în considerare lățimea traseului de cupru). Totuși, s-a observat că măsurarea prelungită a curenților mai mari de 4 A duce la o încălzire apreciabilă.

#### c. Dispozitiv cu senzori GMR cu multi-trasee de curent

O placă de circuit imprimat special concepută cu senzori GMR este propusă pentru un sistem de măsurare a curentului fără contact extrem de sensibil, potrivită pentru aplicații de câmp redus. Sunt utilizați doi senzori GMR comerciali (AA003-02E) într-o configurație diferențială dublă. O bobină plană spiralată asigură, prin cele 7 trasee rectilinii de curent, o concentrare a câmpului magnetic care este măsurat de senzori. Câmpul magnetic de polarizare, pentru liniarizarea răspunsului senzorilor GMR, este alcătuit din două bobine de polarizare plasate într-o configurație cvasi-Helmholtz simetrică pe PCB la o distanță optimă de fiecare senzor GMR. Calibrarea bobinelor este realizată prin măsurători în etapa de asamblare a PCB. Sunt descrise celelalte părți ale sistemului de măsurare: preamplificator, amplificator, sistem de achiziție de date, dispozitive de măsurare și calibrare.

Determinarea experimentală efectuată de autor a servit drept scop pentru a demonstra capacitatea metodei și a configurației propuse pentru măsurarea fără contact a curenților slabi în curent continuu și alternativ. Configurația experimentală a îmbunătățit considerabil domeniul de funcționare al senzorului pentru valori scăzute ale curentului.

#### d. Sonda cu senzor TMR

Activitatea de cercetare a inclus dezvoltarea unei sonde reglabile de curent, concepută pentru măsurarea curentului fără contact pe plăcile cu circuite imprimate, utilizând senzori TMR. Senzorii TMR sunt adecvați pentru aceste tipuri de aplicații, permițând flexibilitate în configurare, sensibilitate ridicată și măsurare a curentului scăzut.

Determinările experimentale au inclus măsurători în curent alternativ la frecvența de 1 kHz și s-au obținut următoarele valori ale sensibilităților:  $S_{\pm 0.4A} = 0.3231 \text{ mV/mA}$  și  $S_{\pm 0.02A} = 0.1696 \text{ mV/mA}$ .

Configurația actuală a sondei TMR, deși oferă o sensibilitate foarte bună, prezintă efecte de neliniaritate, în special la valori scăzute ale câmpului. Rezultatele sunt promițătoare, ca bază pentru o aplicație de sondare automată a curentului fără contact sau pentru aplicații de cartografiere magnetică 2D/3D.

#### 7.2. Contribuții Originale

Pe baza analizei critice ample a literaturii de specialitate, elementele care constituie contribuții originale la teza de doctorat sunt în domeniul sistematizării cunoștințelor și al evaluării critice, metodelor de modelare și simulare, procedurilor și tehnicilor de măsurare, precum și al concepției de noi dispozitive.

## A. Sistematizarea cunoștințelor și evaluare critică

1. Sistematizarea cunoștințelor privind fondul teoretic al efectelor magnetorezistive (AMR, GMR, TMR).

2. Analiza critică a tehnologiilor senzorilor magnetorezistivi, a performanțelor și a implementării materialelor.

3. Revizuirea sistematică a teoriei electromagnetice pentru calcularea câmpului magnetic pentru diferite tipuri de conductoare.

4. Revizuire sistematică privind biosenzorii magnetorezistivi și utilizarea nanoparticulelor magnetice (NPM) în imunocomplexele magnetice și în magnetoforeză.

## B. Metode de modelare și simulare

1. Simulări micromagnetice ale senzorilor Hall planari cu geometrii diferite și în simularea nucleației inverse cauzate de efectele locale ale nanoparticulelor magnetice.

2. Simulări micromagnetice ale senzorilor cu valvă de spin GMR cu și fără NPM pe suprafața senzorului.

3. Model și procedură pentru determinarea intensității câmpului magnetic produs de curentul care circulă într-o singură sau mai multe trasee rectilinii, paralele, de curent.

4. Studiu comparativ de simulare electromagnetică a câmpului magnetic generat de curentul care trece prin trasee de curent cu diferite geometrii.

5. Studiu comparativ de simulare electromagnetică între diferite geometrii de trasee: dependența câmpului magnetic de forma, lățimea și lungimea acestora.

## C. Proceduri și tehnici de măsurare

1. Studiu experimental cu metoda magnetometrului cu probă vibrantă pentru evaluarea proprietăților nanoparticulelor de maghemită funcționalizate.

2. Optimizarea metodei de aplicare a câmpurilor magnetice perpendiculare și stabilirea metodei de analiză a derivatei semnalului de ieșire pentru îmbunătățirea performanțelor senzorilor GMR pentru detectarea nanoparticulelor magnetice.

3. Optimizarea metodei de aplicare a magnetorelaxometriei pentru detectarea nanoparticulelor magnetice cu ajutorul senzorilor GMR.

## D. Conceperea de dispozitive noi bazate pe efectele magnetorezistive

1. Dezvoltarea unui dispozitiv de detectare a NPM bazat pe GMR cu selectivitate geometrică optimizată, dimensiuni reduse și microfluidică integrată. Accentul a fost pus pe provocările specifice ale integrării microfluidelor cu senzori RM miniaturizați. Configurația a demonstrat atât capacitățile de detectare a NPM DC, cât și cele de magnetorelaxometrie AC.

2. Proiectarea, dezvoltarea, microfabricarea și validarea experimentală a unui senzor punte AMR și a unei configurații asociate cu trasee de curent integrate pentru creșterea performanțelor la curenți mici. În configurarea senzorului s-a utilizat metoda cu o singură mască în timpul fabricației. 3. Proiectarea, dezvoltarea și validarea experimentală a unei configurații de măsurare a curentului fără contact pe bază de GMR, bazată pe un singur traseu de curent în formă de U și cu o polarizare reglabilă cu magnet permanent.

4. Proiectarea, dezvoltarea și validarea experimentală a unei sonde cu senzor magnetorezistiv cu efect tunel (TMR) pentru măsurarea non-contact a curenților în circuitele imprimate.

## 7.3. Valorificarea Rezultatelor Cercetării

Rezultatele cercetării au fost valorificate prin publicarea de articole științifice în reviste cotate ISI, reviste BDI și volume ale unor conferințe naționale și internaționale, alături de comunicările susținute în cadrul Școlii Doctorale și a mai multor proiecte de cercetare cu finanțare națională în care autorul a fost implicat ca membru de proiect.

Rezultatele inovatoare ale autorului sunt confirmate prin publicarea unei cereri de brevet și un număr mare de citări pentru articolele publicate.

A. Lucrări publicate în reviste ISI

 Muşuroi C., Oproiu M., Volmer M., Firastrau, I. (2020). High Sensitivity Differential Giant Magnetoresistance (GMR) Based Sensor for Non-Contacting DC/AC Current Measurement. *Sensors*, *20*(1), 323. <u>https://doi.org/10.3390/s20010323</u>. WOS:000510493100323

FI: 3.576/3.735 (2020/5 ani), SRI: 1.254 (2020)

- Oproiu M., Muşuroi C., Volmer M., "Low cost and integrable healthcare services using VoIP for remote patient monitoring", 2020 International Conference on e-Health and Bioengineering (EHB). <u>https://doi.org/10.1109/EHB50910.2020.9280206</u> WOS:000646194100078
- Muşuroi C., Oproiu, M., Volmer, M., Neamtu, J., Avram, M., Helerea, E. (2021). Low Field Optimization of a Non-Contacting High-Sensitivity GMR-Based DC/AC Current Sensor. *Sensors*, *21*(7), 2564. <u>https://doi.org/10.3390/s21072564-</u> WOS:00063885500000

Fl: 3.847/4.050 (2021/5 ani) SRI: 1.309 (2021)

- Muşuroi, C., Volmer, M., Oproiu, M., Neamtu, J., & Helerea, E. (2022). Designing a Spintronic Based Magnetoresistive Bridge Sensor for Current Measurement and Low Field Sensing. Electronics, 11(23), 3888. <u>https://doi.org/10.3390/electronics11233888</u> WOS:000897337500001 Fl: 2.9/2.9 (2022/5 ani), SRI: 0.758 (2022)
- Helerea, E., Calin, M. D., & Musuroi, C. (2023). Water Energy Nexus and Energy Transition—A Review. Energies, 16(4), 1879. <u>https://doi.org/10.3390/en16041879</u> WOS:000944949200001 FI: 3/3 (2023/5 ani), SRI: 0.576 (2023)

Bakhtiaridoost, S., Musuroi, C., Volmer, M., & Florescu, M. (2024). Optoelectronic microfluidic device for point-of-care blood plasma viscosity measurement. Lab on a Chip. <a href="https://doi.org/10.1039/d4lc00211c">https://doi.org/10.1039/d4lc00211c</a>
WOS:001245052700001
Fl: 6.1/6.82 (2023/5 ani), SRI: 2.868 (2023)

Factor de impact cumulat (**FI**): 19.423/20.505 (anul publicației/5 ani); Scor relativ de influență (**SRI**) cumulat: 6.765.

#### B. Lucrări publicate în reviste BDI

- Muşuroi C. L., & Volmer M. (2018). OOMMF Modelling of Magnetization Dynamics in Micrometer Sized Structures for Sensing Applications. Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series I: Engineering Sciences, 47-54.
- Muşuroi C., Volmer M., Oproiu M. "*Optimizing a Non-Contacting High-Sensitivity GMR-based Current Sensor Design for Low Field Applications.*" In Sensors and Electronic Instrumentation Advances, Proceedings of 6th International Conference on Sensors Engineering and Electronics Instrumentation Advances (SEIA' 2020), pag. 127-131, ISBN: 978-84-09-23483-7, oral presentation, Edited by Sergey Y. Yurish.
- Volmer M., Avram M., Oproiu M., Muşuroi C., Firastrau I., Bezergheanu A., "*Planar Hall Effect Sensors for Low Field Detection and Lab on a Chip Applications*", in Sensors and Electronic Instrumentation Advances, Proceedings of 6th International Conference on Sensors Engineering and Electronics Instrumentation Advances (SEIA' 2020), pag. 132-137, ISBN: 978-84-09-23483-7, Edited by Sergey Y. Yurish.
- Oproiu M., Neagu A., Cotfas P. A., Cotfas D. T., Muşuroi C., Volmer M. (2021). "LoRa Wide-Area Network and Live Objects Used in Renewable Energy Monitoring." In 2021 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) & 2021 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) (pp. 505-512). IEEE. https://doi.org/10.1109/OPTIM-ACEMP50812.2021.9590023
- Volmer M., Muşuroi C., Oproiu M., Avram A., Avram, M., Helerea, E. (2021). "On Detection of Magnetic Nanoparticles Using a Commercial GMR Sensor". In 2021 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) & 2021 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) (pp. 1-6). IEEE. https://doi.org/10.1109/OPTIM-ACEMP50812.2021.9590055
- Rekeraho, A., Balan, T., Cotfas, D. T., Cotfas, P. A., Acheampong, R., & Musuroi, C. (2022, November). "Sandbox Integrated Gateway for the Discovery of Cybersecurity Vulnerabilities". In 2022 International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC) (pp. 1-4). IEEE.
- 7. Helerea, E., Călin M. D., & **Mușuroi, C**. (2023). Identificarea și vizualizarea tendințelor emergente în cercetarea științifică folosind metode bibliometrice. Buletinul AGIR, 28(1).

## C. Cerere de brevet

1. EN:

Marius Volmer, Melinda David, Monica Florescu, Adrian Bezergheanu, **Cristian Mușuroi**, **Method for controlling magnetic anisotropy in soft magnetic thin films,** Romania, application number A/00305, 10.06.2024.

RO:

Marius Volmer, Melinda David, Monica Florescu, Adrian Bezergheanu, **Cristian Mușuroi**, **Procedeu pentru controlul anizotropiei magnetice în straturi subțiri feromagnetice moi**, cod depunere A/00305 din 10.06.2024.

D. Proiecte de cercetare (membru)

	Ductoria de		a a manula sublissa	/	f +		mania a da d	Lama: da	<u></u>
Table 7.1.	Projecte de	rerrerare	CONTRIDUTIVE	ангоги а	TOST MP	morto in	perioada	егеі пе	doctorat.
1 4010 7 111	i i oicette ac	cerecure	contendative	laacoi ai a	10501110		penouuuu		abetorati

Nr.	Proiect	Rol	Perioada de		
			implementare		
	Consorțiu complex de proiect CDI (PCCDI) - "Platforma	Asistent de			
1	microfluidică pentru detecția celulelor tumorale circulante	cercetare			
	(CTC) concentrate prin dielectroforeză-magnetoforeză și	Universitatea			
	analizate prin spectroscopie dielectrică și de impedanță	Transilvania	01-03-2018 -		
	electrochimică - uCellDetect", cod CNCSIS ID_ <i>3PCCDI/2018</i> ,	din Brașov	31-12-2020		
	Director de proiect: Prof. Dr. Ing. Marius Andrei Olariu,				
	Coodonator Universitatea Transilvania din Brasov:				
	Conf. Dr. Fiz. Marius Volmer				
	PED - "Senzori cu valvă de spin avansați pentru aplicații de	Asistent de			
	mãsurãtori de precizie non-contact ale curenților DC/AC	cercetare			
2	(SpinCurrentSense),", code CNCSIS ID_ <i>PN-III-P2-2.1-PED-</i>	Universitatea	03-08-2020 -		
2	2019-1804, 315PED/2020, Director proiect: Dr. Phys. Jenica	Transilvania	29-07-2022		
	NEAMTU, Coodonator Universitatea Transilvania din Brasov:	din Brașov			
	Conf. Dr. Fiz. Marius Volmer				
	PED - Structuri spintronice cu MagnetoRezistență	Asistent de			
	Anizotropică (AMR ) și Magneto-Rezistență Gigantică (GMR)	cercetare	22-10-2020		
3	pentru aplicații de senzori robuști - MagSensOnChip", cod	Universitatea			
	CNCSIS ID_ <i>PN-III-P2-2.1-PED-2019-3514, 510PED/2020</i> ,	Transilvania	21-10-2022		
	Director proiect: Conf. Dr. Fiz. Marius Volmer	din Brașov			
	PED – Structuri spintronice pe grafenă pentru aplicații de	Asistent de			
4	senzoristică și procesare de semnal - GrapheneS", code	cercetare	21-07-2022 –		
	CNCSIS ID_ <i>PN-III-P2-2.1-PED-2021-3112, 597PED/2022</i> ,	Universitatea	21-6-2024		
	Director de proiect: Conf. Dr. Fiz. Marius Volmer	Transilvania			
		din Brașov			

- E. Comunicări la Conferințe Naționale și Internaționale
  - Firastrau, I., Volmer, M., Musuroi, C., "Micromagnetic study on reversal nucleation of magnetization induced by magnetic nanoparticles." Joint European Magnetic Symposia, JEMS 2019, August 26-30 2019, Uppsala, Sweeden.
  - Muşuroi C, Volmer M., Oproiu M, "Optimizing a Non-Contacting High-Sensitivity GMR-based Current Sensor Design for Low Field Applications", in Sensors and Electronic Instrumentation Advances, Proceedings of 6th International Conference on Sensors Engineering and Electronics Instrumentation Advances (SEIA' 2020),, pag. 127-131, ISBN: 978-84-09-23483-7, Edited by Sergey Y. Yurish.
  - Volmer M., Avram M, Oproiu M, Muşuroi C.L., Firastrau I., Bezergheanu A., "Planar Hall Effect Sensors for Low Field Detection and Lab on a Chip Applications", in Sensors and Electronic Instrumentation Advances, Proceedings of 6th International Conference on Sensors Engineering and Electronics Instrumentation Advances (SEIA' 2020), pag. 132-137, ISBN: 978-84-09-23483-7, Edited by Sergey Y. Yurish.
  - Muşuroi C, Helerea E., Volmer M., "A Review on using Magnetoresistive Biosensors for Magnetic Nanoparticles Detection", 17th MIKLÓS IVÁNYI INTERNATIONAL PHD & DLA SYMPOSIUM, UNIVERSITY OF PÉCS, Hungary, Section Information Technology 3, article code P-123, 25 Oct. 2020. Program: https://phdsymp.mik.pte.hu/program
  - Volmer M., Bezergheanu A., Prejbeanu L., Muşuroi C. and Oproiu M, Exchange biased structures used for magnetic nanoparticles detection, TIM 20-21 Physics Conference, November 11th - 13th 2021, Timisoara, Romania, Section Applied Physics and Interdisciplinarity (API), Invited (API-103), Friday 12th of November 2021, Final Program, Page 6, https://timconference.uvt.ro/API\_submissions.php
  - Bezergheanu A., Cizmaş C.B., Volmer M., Oproiu M., Muşuroi C., "Magnetic and electric properties of printable perovskite type structures of (La1-xPrx)2/3Ba1/3MnO3 manganites", 12th International Conference on Materials Science and Engineering – BraMat 2022, Brașov, România, 9-12 Martie 2022, https://www.bramat.ro/program.html, https://www.bramat.ro/uploads/7/7/4/0/77408170/1\_program\_bramat2022.pdf
  - Muşuroi C., Volmer M., Helerea E.," *Electromagnetic Field Modelling of Conductive Traces for a High-Precision Non-contacting GMR Current Sensor*", European Magnetic Sensors and Actuators Conference (EMSA) 5-8 Iulie 2022, Madrid, Spain. Program: https://www.emsa2022.com/index.php/programa/scientific-program Abstract book: https://www.emsa2022.com/images/site/Abstracts-Book-EMSA-2022.pdf, pag. 31.
  - Volmer M., Oproiu M., Muşuroi C., "Micromagnetic Simulations and Experimental Results on Magnetic Nanoparticles Detection with Exchange Biased Structures", European Magnetic Sensors and Actuators Conference (EMSA) 5-8 Iulie 2022, Madrid, Spania.

Program: https://www.emsa2022.com/index.php/programa/scientific-program Abstract book: https://www.emsa2022.com/images/site/Abstracts-Book-EMSA-2022.pdf, page 80.

- Muşuroi C., Volmer M., Helerea E., Oproiu M, "An analytical approach for magnetoresistive sensor performance on magnetic nanoparticles detection for biosensing systems", , 6th edition of International Conference on Analytical and Nanoanalytical Methods for Biomedical and Environmental Sciences 8-10 Iunie 2022, Brasov, Romania. Program: https://icanmbes2020.sciforum.net/#custom1150 Abstract book: https://icanmbes.unitbv.ro/abstracts\_book.html, pag. 65, P2.5.
- Volmer M, , David M., Avram M., Florescu M., Bezergheanu A., Muşuroi C., Oproiu M., "Using Magnetic Nanofibers to Control the Magnetic Anisotropy of a Thin Permalloy Film", 13th Joint European Magnetic Symposia (JEMS 2023), Madrid, Spania, 27 August – 1 September 2023.Book of Abstracts, Page 337: https://www.jems2023.es/images/site/JEMS2023-BOOK\_OF\_ABSTRACTS.pdf

## 7.4. Noi Direcții de Cercetare

Analiza critică realizată în această lucrare constituie un fundament teoretic solid pentru identificarea domeniilor de noi dezvoltări privind senzorii magnetorezistivi.

Tematica fiecărei cercetări abordate în cadrul tezei de doctorat constituie baza noilor direcții de cercetare și dezvoltare ulterioară. Astfel, sunt luate în considerare următoarele direcții de cercetare:

- Dezvoltarea de noi modele analitice pentru analiza automată a câmpului magnetic în zona senzorului pentru geometrii mai complexe.
- Introducerea unor ansambluri de simulare hibride pentru nanoparticulele magnetice NPM în soluție care vor evalua răspunsul senzorului simulat în funcție de volumul sau concentrația de suprafață a NPM.
- Dezvoltarea de biosenzori magnetorezistivi complet integrați în aplicații Lab-on-a-chip.
- Dezvoltarea de senzori magnetorezistivi flexibili pentru diverse aplicații. Cu fiabilitatea, reproductibilitatea și sensibilitatea corespunzătoare a dispozitivului, se pot implementa biosenzori Lab-on-a-chip cu costuri reduse pentru aplicații de testare la punctul de îngrijire.
- Dezvoltarea de dispozitive magnetorezistive de măsurare a curentului fără contact, foarte integrate, cu curent redus și cu curent ridicat și certificarea fiabilității dispozitivelor dincolo de utilizarea în laborator în aplicații industriale, auto și științifice de precizie.
- Dezvoltarea unei sonde senzor de curent fără contact pentru testarea automată a plăcilor electronice.
- Dezvoltarea de sisteme de cartografiere magnetică 2D și 3D cu senzori magnetorezistivi. Instalațiile pot fi aplicate pentru testarea conformității câmpului electromagnetic al plăcilor electronice sau pentru cartografierea complexă a câmpului magnetic al surselor de câmp magnetic.

## Bibliografie (Selectivă)

- [1] Horizon Europe 2022-2027. Available online: https://research-andinnovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-opencalls/horizon-europe/cluster-4-digital-industry-and-space\_en
- [2] Planul Național de Cercetare Dezvoltare Inovare 2022-2027, Available online: https://www.mcid.gov.ro/transparenta-decizionala/planul-national-de-cercetare-dezvoltare-siinovare-2022-2027/.
- [3] Chen, C., & Song, M. (2019). Visualizing a field of research: A methodology of systematic scientometric reviews. PloS one, 14(10), e0223994.
- [4] Guide to Searching, Brown University Library. Available online: https://libguides.brown.edu/searching/citation (accessed on 30th June 2023).
- [5] Moher, D., Shamseer, L., Clarke, M., Ghersi, D., Liberati, A., Petticrew, M., ... & Stewart, L. A. (2015). Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. Systematic reviews, 4(1), 1-9.
- [6] Granell, P. N., Wang, G., Cañon Bermudez, G. S., Kosub, T., Golmar, F., Steren, L., ... & Makarov, D. (2019). Highly compliant planar Hall effect sensor with sub 200 nT sensitivity. npj Flexible Electronics, 3(1), 3, https://doi.org/10.1038/s41528-018-0046-9.
- [9] Nalwa, H. S. (Ed.). (2001). Handbook of thin films, Five-volume set. Academic Press. Vol. 5, Chapter Nanomaterials and Magnetic Thin Films, Academic Press, 2002, ISBN 0125129084. [2].
- [10] Weiss, R., Mattheis, R., & Reiss, G. (2013). Advanced giant magnetoresistance technology for measurement applications. Measurement Science and Technology, 24(8), 082001.
- [20] Muşuroi, C., Oproiu, M., Volmer, M., & Firastrau, I. (2020). High sensitivity differential giant magnetoresistance (GMR) based sensor for non-contacting DC/AC current measurement. Sensors, 20(1), 323., https://doi.org/10.3390/s20010323.
- [25] Lenz, J., & Edelstein, S. (2006). Magnetic sensors and their applications. IEEE Sensors journal, 6(3), 631-649, https://doi.org/10.1109/jsen.2006.874493.
- [26] S. Tumanski, Thin Film Magnetoresistive Sensors. Bristol, U.K.: Inst. Phys., 2001.
- [29] Lenz, J. E. (1990). A review of magnetic sensors. Proceedings of the IEEE, 78(6), 973-989.
- [30] Caruso, M. J., Bratland, T., Smith, C. H., & Schneider, R. (1998). A new perspective on magnetic field sensing. SENSORS-PETERBOROUGH-, 15, 34-47.
- [31] Du, W. Y. (2014). Resistive, capacitive, inductive, and magnetic sensor technologies. CRC Press.
- [32] Thomson, W. (1857). XIX. On the electro-dynamic qualities of metals:—Effects of magnetization on the electric conductivity of nickel and of iron. Proceedings of the Royal Society of London, (8), 546-550.
- [33] McGuire, T., & Potter, R. L. (1975). Anisotropic magnetoresistance in ferromagnetic 3d alloys. IEEE Transactions on magnetics, 11(4), 1018-1038.
- [34] Damsgaard, C. D., Freitas, S. C., Freitas, P. P., & Hansen, M. F. (2008). Exchange-biased planar Hall effect sensor optimized for biosensor applications. Journal of Applied Physics, 103(7).
- [35] Elzwawy, A., Rasly, M., Morsy, M., Piskin, H., Volmer, M. (2024). Magnetic Sensors: Principles, Methodologies, and Applications. In: Ali, G.A.M., Chong, K.F., Makhlouf, A.S.H. (eds) Handbook of Nanosensors. Springer, Cham: Springer Nature Switzerland.

- [36] Muşuroi, C., Volmer, M., Oproiu, M., Neamtu, J., & Helerea, E. (2022). Designing a Spintronic Based Magnetoresistive Bridge Sensor for Current Measurement and Low Field Sensing. Electronics, 11(23), 3888.
- [39] Elzwawy, A., Pişkin, H., Akdoğan, N., Volmer, M., Reiss, G., Marnitz, L., ... & Schmalhorst, J. M. (2021). Current trends in planar Hall effect sensors: evolution, optimization, and applications. Journal of Physics D: Applied Physics, 54(35), 353002.
- [42] Samal, D., & Anil Kumar, P. S. (2008). Giant magnetoresistance: Nobel Prize in Physics 2007. Resonance, 13, 343-354.
- [43] Ullah, S. (2017). Optical control and detection of spin coherence in multilayer systems (Doctoral dissertation, Universidade de Sao Paulo).
- [44] Zhang, X., & Butler, W. (2016). Theory of Giant Magnetoresistance and Tunneling Magnetoresistance. Handbook of Spintronics, 3-69.
- [48] Reig, C., & Cubells-Beltrán, M. D. (2017). Giant (gmr) and tunnel (tmr) magnetoresistance sensors: From phenomena to applications. In Magnetic Sensors and Devices (pp. 35-64). CRC Press.
- [49] Gurney, R. W., & Condon, E. U. (1929). Quantum mechanics and radioactive disintegration. Physical Review, 33(2), 127.
- [50] Julliere, M. (1975). Tunneling between ferromagnetic films. Physics letters A, 54(3), 225-226.
- [51] Landauer, R. (1957). Spatial variation of currents and fields due to localized scatterers in metallic conduction. IBM Journal of research and development, 1(3), 223-231.
- [55] Zhang, X. G., Wang, Y., & Han, X. F. (2008). Theory of nonspecular tunneling through magnetic tunnel junctions. Physical Review B, 77(14), 144431.
- [56] Matsumoto, R., Fukushima, A., Nagahama, T., Suzuki, Y., Ando, K., & Yuasa, S. (2007). Oscillation of giant tunneling magnetoresistance with respect to tunneling barrier thickness in fully epitaxial Fe/ MgO/ Fe magnetic tunnel junctions. Applied physics letters, 90(25).
- [57] Fraden, J. (2016). Handbook of Modern Sensors. Springer International Publishing. Chapters Sensor Characteristics. (n.d.). 13–36. Book DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-19303-8.
- [77] Díaz-Michelena, M. (2009). Small magnetic sensors for space applications. Sensors, 9(4), 2271-2288.
- [152] Poon, T. Y., Tse, N. C. F., & Lau, R. W. H. (2013). Extending the GMR current measurement range with a counteracting magnetic field. Sensors, 13(6), 8042–8059.
- [153] Li, Z., & Dixon, S. (2016). A closed-loop operation to improve GMR sensor accuracy. IEEE Sensors Journal, 16(15), 6003-6007.
- [155] García Vidal, E., Ramírez Muñoz, D., Ravelo Arias, S. I., Sánchez Moreno, J., Cardoso, S., Ferreira, R., & Freitas, P. (2017). Electronic energy meter based on a tunnel magnetoresistive effect (TMR) current sensor. Materials, 10(10), 1134.
- [163] Scheinfein, M. R., & Price, E. A. (2003). LLG User Manual v2. 50. Code of the LLG simulator can be found at http://ligmicro. home. mindspring. com. Availability: Software currently discontinued.
- [172] Volmer, M., Avram, M., Oproiu, M., Musuroi, C., Firastrau, I., & Bezergheanu, A. (2020). Planar Hall Effect Sensors for Low Field Detection and Lab on a Chip Applications. Sensors and Electronic Instrumentation Advances, 132.

- [179] Volmer, M., & Avram, M. (2013). Signal dependence on magnetic nanoparticles position over a planar Hall effect biosensor. Microelectronic engineering, 108, 116-120.
- [180] Henriksen, A. D., Rizzi, G., & Hansen, M. F. (2015). Experimental comparison of ring and diamond shaped planar Hall effect bridge magnetic field sensors. Journal of Applied Physics, 118(10).
- [183] National Institute of Standards and Technology. OOMMF User's Guide, Version 1.0; Donahue, M.J., Porter, D.G., Eds.; Interagency Report NISTIR 6376; National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, MD, USA, 1999. Available online: http://math.nist.gov/oommf/
- [184] **Mușuroi, C**., Oproiu, M., Volmer, M., Neamtu, J., Avram, M., & Helerea, E. (2021). Low field optimization of a non-contacting high-sensitivity GMR-based DC/AC current sensor. Sensors, 21(7), 2564.
- [186] Rapoport, E., Montana, D., & Beach, G. S. D. (2012). Integrated capture, transport, and magnetomechanical resonant sensing of superparamagnetic microbeads using magnetic domain walls. Lab on a Chip, 12(21), 4433-4440.
- [188] M. Volmer and M. Avram, "Micromagnetic simulations on detection of magnetic labelled biomolecules using MR sensors," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 321, no. 10, pp. 1683–1685, 2009.
- [189] Musuroi, C. L., & Volmer, M. (2018). OOMMF Modelling of Magnetization Dynamics in Micrometer Sized Structures for Sensing Applications. Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series I-Engineering Sciences, 47-54.
- [191] Nicolaide, A. Electromagnetics. General Theory of the Electromagnetic Field. Classical and Relativistic Approaches, 3rd ed.; Transilvania University Press: Brașov, Romania, 2012.
- [195] Cheng, D. Keun. (1993). Fundamentals of engineering electromagnetics. Reading (Mass.): Addison-Wesley.
- [196] Ling, S. J., Sanny, J., Moebs, W., Friedman, G., Druger, S. D., Kolakowska, A., ... & Wheelock, K. (2016). University Physics Volume 2.
- [197] M. Volmer, Applied Physics for Engineering, Editura Universității Transilvania din Brașov, 2007, ISBN 978-973-598-136-5.
- [198] Volmer, Marius. Electromagnetic field theory. Lecture notes and applications. Brașov: Editura Universității Transilvania, 2022, ISBN 978-606-19-1575-0.
- [199] NVE ALTxxx-10 TMR Sensors Catalogue. Available online: https://www.nve.com/Downloads/ALTxxx-10.pdf
- [200] COMSOL Multiphysics<sup>®</sup> v. 6.1. www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden.
- [201] NVE Sensors Catalogue. Available online: https://www.nve.com/Downloads/catalog.pdf
- [235] Volmer, M., Muşuroi, C., Oproiu, M., Avram, A., Avram, M., & Helerea, E. (2021, September). On detection of magnetic nanoparticles using a commercial GMR sensor. In 2021 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) & 2021 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) (pp. 1-6). IEEE.
- [241] Hansen, M. F., & Rizzi, G. (2016). Exchange-biased AMR bridges for magnetic field sensing and biosensing. IEEE Transactions on Magnetics, 53(4), 1-11.
- [244] LabJack EI1040 Instrumentation Amplifier. Available online: https://labjack.com/products/ei1040-dual-instrumentation-amplifier