



Universitatea
Transilvania
din Brașov

TEZĂ DE ABILITARE

Contribuții la studiul sistemelor magnetice nanostructurate pentru
dezvoltarea de senzori cu aplicații în ingineria electrică

Domeniul: Inginerie Electrică

Autor: Conf. Dr. Ing. Fiz. Marius Volmer

Universitatea Transilvania din Brașov

BRAȘOV, 2025

Cuprins

(A) Summary	3
(B) Realizări științifice și profesionale și planuri de evoluție și dezvoltare a carierei	7
(B-i) Realizări științifice și profesionale	7
Introducere	7
Capitolul 1. Aspecte privind parcursul științific și profesional	10
1.1. Introducere	10
1.2. Aprofundarea domeniului în cadrul studiilor doctorale	10
1.3. Cercetarea științifică integrată în cadrul unor contracte de cercetare	11
1.4. Parcursul didactic	17
Capitolul 2. Studii privind depunerea și caracterizarea magnetică a straturilor subțiri	19
2.1. Introducere	19
2.2. Tehnici de obținere a straturilor subțiri magnetice	20
2.2.1. Depunerea straturilor subțiri prin evaporare termică în vid	21
2.2.2. Depunerea straturilor subțiri prin pulverizare catodică tip magnetron	24
2.3. Rezultate experimentale și discuții	27
2.3.1. Structuri reprezentative depuse prin evaporare termică în vid	27
2.3.2. Structuri polarizate prin interacție de schimb depuse prin pulverizare catodică	34
2.3.3. Utilizarea nanofibrelor polimerice dopate magnetic pentru controlul anizotropiei	36
2.4. Concluzii	36
Capitolul 3. Contribuții la studiul efectelor galvanomagnetice în straturi subțiri magnetice	37
3.1. Aspecte generale	37
3.2. Efectul de magnetorezistență anizotropă și efectul Hall planar	38
3.2.1. Caracteristici experimentale reprezentative ale efectului AMR și discuții	46
I. Aspecte introductive	46
II. Teste pe structuri de tipul $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(10\text{ nm})$ și $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(10\text{ nm})/\text{Cu}(4\text{ nm})/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(10\text{ nm})$...	48
III. Teste de efect AMR pe structuri de tipul $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(20\text{ nm})$ sub formă de disc	49
3.2.2. Caracteristici experimentale reprezentative asupra efectului PHE și discuții	50
I. Teste de efect Hall planar pe structuri de tipul $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(20\text{ nm})$ sub formă de disc	50
II. Senzor de rotație bazat pe efectul Hall planar	53
3.3. Contribuții la studiul efectului de magnetorezistență gigantică	56

3.3.1. Introducere.....	56
3.3.2. Aspecte fundamentale și exemple de caracteristici	56
3.4. Aspecte fundamentale privind efectul de magnetorezistență tunel	62
3.5. Deriva termică și zgomotul electric în senzorii magnetorezistivi.....	63
3.6. Concluzii	66
Capitolul 4. Sistem de măsurare non contact a curentului electric folosind senzori GMR	67
4.1. Introducere.....	67
4.2 Principiul de detecție a curentului	68
4.3. Implementarea unui sistem diferențial de detecție a curentului	70
4.3.1. Teste de detecție a curentului printr-o bandă conductoare.....	70
4.3.2. Implementarea practică a sistemului diferențial de detecție a curentului	72
4.3.3. Rezultate privind performanțele sistemului de măsură și discuții	74
4.4. Optimizarea senzorului de curent în zona câmpurilor scăzute	77
4.4.1. Modelarea bobinei planare	77
4.4.2. Implementarea experimentală	80
4.4.3. Rezultate experimentale și discuții	82
4.5. Concluzii	85
Capitolul 5. Contribuții la dezvoltarea unui cip spintronic pentru detecția curentului	87
5.1. Principiul de funcționare	87
5.2. Realizarea cip-ului demonstrator.....	89
5.2.1. Tratamentul termic și călirea magnetică.....	90
5.2.2. Proiectarea și realizarea traseului conductor in formă de U	91
5.2.3. Asamblarea cip-ului demonstrator	93
5.3. Rezultate și discuții	95
5.3.1. Modelarea micromagnetică a senzorului PHR.....	95
5.3.2. Caracteristica de câmp a senzorului PHR	97
5.3.3. Caracterizarea cip-ului demonstrator ca senzor de curent.....	98
5.4. Concluzii	99
(B-ii) Planuri de evoluție și dezvoltare a carierei.....	101
(B-iii) Bibliografie	105

(A) Summary

This habilitation thesis presents the main scientific and professional achievements starting from PhD studies and the defence of my doctoral thesis entitled “Study of magnetic properties in multilayer structures”, until these days.

My scientific profile helped me to develop studies both from a fundamental and applied point of view. Such an approach is very useful when interdisciplinary fields such as magnetic characterization of nanostructures, microfabrication processes and low-level electrical and magnetic measurements come together to gain more knowledge about the studied phenomena and to develop new applications based on them.

This habilitation thesis presents studies made on magnetic thin films and magnetic multilayers which show interesting galvanomagnetic effects like Anisotropic Magnetoresistance (AMR), Giant Magnetoresistance (GMR) and Tunnelling Magnetoresistance effect (TMR) which have driven many technological developments. A consequence of the AMR effect is the Planar Hall Effect (PHE) which develops in magnetic thin films using a Hall effect configuration but with the magnetic field applied in the film plane. These effects are successfully used both for fundamental studies on magnetic thin films but, more important, for applications like magnetometers, current sensors, magnetic memories or detection of magnetic nanoparticles in lab on a chip applications.

In addition to structures developed in laboratories for fundamental and targeted studies, many commercial devices based on magnetoresistive effects can be found on the market. They help scientists to develop much more easily applications in electrical engineering like magnetometers that can detect magnetic fields down to μT and even lower, current sensing, energy monitoring, rotation sensors for automotive applications, magnetic compass and others.

When I began my doctoral studies in 1992, this was a relatively new field of research, and I thought I could bring valuable contributions to it.

This habilitation thesis is structured in *two main parts*. The first part presents the main contributions and scientific achievements obtained by the author. The second part presents the scientific and didactic development plan.

The first part consists of 5 chapters as follows:

Chapter 1 presents the main aspects of my scientific and didactical achievements.

After defending my PhD thesis, I had the opportunity to start fruitful scientific collaborations in the frame of some scientific research projects. This helped me to continue, at a new scientific level, the work done during the PhD studies. Also, I had the opportunity to acquire scientific equipment and to develop new research directions.

Such that I coordinated 14 research projects as partner from Transilvania University of Braşov (UTBv) or as project manager.

In the frame of these projects were made studies on (i) magnetic thin films and multilayers deposition, structural, magnetic and electrical characterizations, (ii) advanced micromagnetic simulations on such structures to develop some applications like (iii) magnetic field sensors, rotation sensors, detection of magnetic nanoparticles (MNPs) for Lab-on-a-chip (LOC) applications or (iv) non-contacting current sensors. Also, studies on graphene structures were done in the frame of the project 597PED and a magnetic field demonstrator using vertical graphene-based FET structures was developed.

These studies were published in scientific journals and disseminated through communications at Conferences. Besides these scientific achievements, an important aspect was focused on human resources. Such that, I had the possibility to hire, in the frame of the Project 3PCCDI/2008, two young research assistants. They started PhD studies and contributed to the research activities in other projects that I coordinated. One of them has defended his PhD thesis in Electrical Engineering in 2024.

As a result of my scientific achievements, I have published 35 papers in scientific journals with impact factor, and more than 27 papers in Conference volumes, some of which are ISI or IEEE indexed; the h index is 10 (WOS), 11 (SCOPUS) and 13 (Google Scholar).

Chapter 2 presents contributions to magnetic thin films depositions and characterizations. After a brief review of the most important deposition methods, there are presented the most important structures obtained during my research activities. The magnetic and galvanomagnetic properties of these structures were discussed in correlation with their structure and surface quality, obtained by Atomic Force Microscopy. Such that, were highlighted the limitations of the thermal deposition method in deposition of magnetic films thinner than 5 nm. Hall effect measurements were used in addition to magnetic and magnetoresistive measurements to have a complete view of the samples properties. An original method to control the anisotropy of soft magnetic thin films, which is subject to a patent request, is briefly presented. This method uses magnetic doped polymeric nanofibers deposited on the film surface using electrospinning method.

Micromagnetic simulations were employed to give a better understanding of the magnetic behaviour of the magnetic structures used in these studies. An original method used to design the structures for simulations is presented and the results are discussed in relation with experimental data and samples microstructure. This method was used for further studies to develop rotation sensors and applications for magnetic nanoparticles detection. The results were published in scientific journals, books and book chapters.

Chapter 3 presents contributions to MR effects studies both from theoretical and experimental point of view. Anisotropic (AMR) and Giant magnetoresistance (GMR) effects were modelled by micromagnetic simulations to have a better understanding of these phenomena and compared with experimental data for different structures. It is shown that

AMR and PHE can be used to find useful information about some parameters like the coercive and exchange biasing fields. Also, from these measurements, the peak-field, which describes the maximum field for which the PHE sensor delivers a useful signal is determined and is related to the structure, magnetic properties and the shape anisotropy. AMR and PHE experiments on disk-shaped sensors are presented. Two important applications are discussed: (i) development of a rotation sensor and (ii) detection of MNPs with PHE sensors using an original detection setup. This setup allows finding with precision the switching field in these structures and gives a high sensitive method to detect MNPs, 1.87×10^{-5} emu or 1.1 μg of PEG6000 functionalised maghemite nanoparticles. Both micromagnetic and experimental activities were employed for these developments. As a result, a national patent about a rotation sensor was obtained.

The GMR effect was studied both using micromagnetic and experimental activities. Were simulated different structures that present particular field behaviour of the GMR effect and the agreement with experimental data was very good. For experimental measurements were used commercial integrated circuits (ICs) based on GMR structures. Is discussed how the GMR sensors are connected inside the chip and, by micromagnetic simulations, is discussed the role of the used magnetic field concentrator used to enhance the field sensitivity. We showed how can be linearized the field behaviour for sensing applications. More details on using such a GMR magnetic sensor are presented in Chapter 4. Finally, a detailed analysis on thermal drift and noise in MR structures is presented and methods to mitigate these issues are discussed.

Chapter 4 presents contributions on development of a non-contacting current sensor using commercial GMR magnetic field sensors.

There were two implementations. Both are using *an original setup*, denoted by us in published papers, as double differential setup. This setup assures a very good thermal stability and immunity to external magnetic fields that alter the output signal. To implement this type of current sensor, an analytical model was developed that allows the calculation of the magnetic field created by the current that flows through conductive trace(s). The first implementation uses a simple U-shaped current trace above on which are placed two chips with GMR elements that are polarized by using a permanent magnet. With the help of a signal conditioning setup and a low-cost data acquisition board was implemented a non-contacting DC/AC measurement system with a sensitivity between 0.027 to 0.03 V/A. The system was proved to follow accurately the current wave form with a very low harmonic distortion. The detection limit is 10 mA in DC and 25 mA with a maximum applied current of 4 A.

The second implementation uses a similar setup but adapted for low current measurements. For this, a multi-turn U-shaped trace was used. By modelling this type of trace was found the optimal number of turns to be used, related to the experimental limitations. A pair of coils was used so that the optimal polarization field could be precisely adjusted. A sensitivity down to 23 mV/mA with a detection limit of 0.1 mA in DC and 0.2 to 0.3 mA in AC with a bandwidth of

10 Hz to 10 kHz were found. A maximum current of 300 mA can be applied through the current trace.

Chapter 5 presents contributions to the design, microfabrication and testing of a hybrid integrated circuit (IC) that uses exchange biased AMR elements connected in two Wheatstone bridges deposited on the same chip. A single mask was designed and used to deposit, by DC magnetron sputtering, the sensors and the viability of this approach was confirmed by micromagnetic simulations. An U-shaped current trace was directly printed on a thin Kapton layer (0.045 mm thick) that has been attached to the chip. Like in the previous reported implementations with commercial GMR sensors, this is a double differential measurement setup. By using a custom-built characterization system, the demonstrator chip was tested in lab conditions both for DC and AC current detection. The sensors show a sensitivity in magnetic field between 0.0165 to 0.0186 mV/(Oe·mA) with a very good linearity. The low limit of current detection is 2 mA both in DC and AC. As mentioned, both in this chapter and in the published paper that presents these results, further improvements can be implemented. This study emphasizes the possibility of using direct printed circuit elements to simplify the design and implementation of other applications employing magnetic sensors.

The second part of this thesis presents the future scientific and didactic developments plan. There are enumerated some of the new research topics to be developed like: applications with MR sensors for non-contacting monitor of residual currents in electrical installations and analysis of current wave forms in different electrical circuits, innovative methods to reduce the electrical noise in MR sensors, printed electrical circuits and MR sensors for industrial applications and wearable devices, non-contact monitoring of some critical components from power supply sources and others. Improved signal acquisition systems and advanced algorithms employing Machine Learning and A.I will be used to collect and process data. Thus, doctoral students will be attracted to get involved in these interdisciplinary research topics. At the same time, will be consolidated the collaboration with partners from other research institutions and new applications for research projects will be prepared to get access to funding to sustain a high-quality level of the research activity and to improve the available research infrastructure. Such that, objectives like (i) improving the results of the research activity, (ii) gaining more visibility and (iii) improving the quality of the human resource involved, will be beneficial for the field of Electrical Engineering.

Teaching activity plays an important role in training high-quality engineers and attracting students for research activity. Such that, modern teaching methods will continue to be used to present, in an attractive way, phenomena and interesting applications in electrical engineering and other related fields.

(B) Realizări științifice și profesionale și planuri de evoluție și dezvoltare a carierei

(B-i) Realizări științifice și profesionale

Introducere

Studiul sistemelor magnetice nanostructurate reprezintă un domeniu prolific în știință atât în ceea ce privește dinamica *cercetării fundamentale*, cât și în ceea ce privește realizarea unor *aplicații de înaltă complexitate* precum sisteme de stocare a datelor (memorii MRAM, capete de citire din Hard discuri, etc.), senzori magnetici, senzori de curent, busole magnetice, dispozitive de diagnostic medicală de tip "Lab on a Chip" bazate pe detecția nanoparticulelor magnetice atașate de biomolecule de interes și altele. Prin sisteme magnetice nanostructurate înțelegem *straturi subțiri feromagnetice* ori *sisteme multistrat* cu grosimi de câțiva nm, în care alternează straturi feromagnetice cu straturi nemagnetice, sau *sisteme nanogranulare* ce conțin, într-o matrice nemagnetică conductoare sau dielectrică, nanogranule magnetice din Co, Fe, NiFe, Fe₂O₃ și altele.

Cercetări teoretice și experimentale au pus în evidență efecte galvanomagnetice precum, magnetorezistența anizotropă (Anisotropic Magnetoresistance - AMR), magnetorezistența gigantică (Giant Magnetoresistance - GMR) sau efectul de tunelare dependentă de spin (Tunneling Magnetoresistance - TMR) ce permit controlul rezistivității electrice în asemenea structuri sub acțiunea unui câmp magnetic aplicat [1,2]. Efectul AMR este cunoscut încă din 1857 când Thomson a descoperit că rezistivitatea unui metal feromagnetic poate să depindă de unghiul pe care îl formează curentul electric cu direcția magnetizării. Investigații teoretice au arătat că acest efect provine din împrăștierea anizotropă a electronilor datorită interacției spin-orbită. Tehnologia straturilor subțiri magnetice (din Ni₈₀Fe₂₀, NiFeCo și altele) a impulsat dezvoltarea unor aplicații bazate pe acest efect pentru realizarea de senzori magnetici, busole și capete de citire pentru Hard discuri - 2000 biți/in² (în 1956). În ciuda vechimii, chiar și astăzi acest efect este utilizat pentru dezvoltarea de cipuri destinate unor aplicații de magnetometrie, senzori de rotație [3,4] și, notabil, realizarea unor senzori printați ce utilizează o cerneală ce înglobează un fel de "fulgi" din material feromagnetic, cum ar fi NiFe [5]. Bazat pe efectul AMR, se poate observa în structuri feromagnetice, aflate într-o configurație de tip Hall, apariția unei tensiuni, atunci când câmpul magnetic este aplicat în planul structurii. Acesta este efectul Hall planar (PHE) ce este utilizat în aplicații speciale de detecție a câmpului magnetic, a nanoparticulelor magnetice sau în măsurarea unghiului de rotație a câmpului magnetic. Tensiunea PHE este caracterizată printr-un raport semnal zgomot deosebit de mic [6] permițând, în condiții speciale, detecția câmpurilor magnetice extrem de scăzute, de ordinul zecilor-sutelor de nT. Studii privind modelarea, obținerea, caracterizarea și utilizarea structurilor bazate pe efectul Hall planar vor fi prezentate pe larg în capitolele următoare. Începând cu 1988-1989 apar tot mai multe raportări privind

comportarea deosebită a rezistenței electrice în câmp magnetic pentru structurile de tip multistrat, în care alternează straturi magnetice cu straturi nemagnetice. Această modificare deosebită a rezistenței a fost denumită magnetorezistență gigantică (Giant MagnetoResistance effect - GMR). Efectul de MR gigantică, (GMR), a apărut inițial ca fiind o proprietate caracteristică structurilor de tip multistrat magnetice, precum Co/Au, Fe/Cr și Co/Cu/NiFe [1,2] dar comportări asemănătoare au fost găsite și în straturi subțiri granulare (de exemplu sisteme $NM_{100-x}Co_x$ unde $NM = Cu, Ag, Au$) [7]. În toate cazurile, creșteri remarcabile ale rezistenței au fost obținute când magnetizările din straturile feromagnetice vecine erau orientate antiparalel. Notabil este faptul că, pentru dezvoltarea teoriei cuplajului oscilant dintre straturi feromagnetice și descoperirea efectului GMR, Albert Fert și Peter Grunberg au primit premiul Nobel pentru fizică în 2007, ca o recunoaștere a importanței deosebite a acestor realizări care au condus la impulsivitatea studiilor teoretice și experimentale dar și la dezvoltarea de noi dispozitive electronice (<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2007/summary/>). Titluri precum "From Lord Kelvin to nanotechnology", "Towards a universal memory" sau "Nanotechnology gives sensitive read-out heads for compact hard disks" au însoțit anunțul decernării acestui premiu. Acest progres a continuat prin descoperirea efectului de tunelare dependentă de spin (TMR), în care stratul NM metalic din structurile GMR este înlocuit printr-un strat subțire, în jur de 1 nm, din Al_2O_3 sau MgO. Deși funcționarea dispozitivului este asemănătoare cu cea a celui bazat pe efectul GMR, variația rezistenței structurii este cu mult mai mare, fiind, în unele cazuri, de peste 100 %, oferind o sensibilitate crescută în câmp magnetic. Astfel, prin folosirea capetelor de citire bazate pe efectele GMR și apoi TMR, a fost posibilă creșterea densității de stocare a datelor de la 1 Tbit/in² (în 2014) spre 5 Tbit/in² în zilele noastre ([https://en.wikipedia.org/wiki/Density_\(computer_storage\)#cite_note-CompHist1T-2](https://en.wikipedia.org/wiki/Density_(computer_storage)#cite_note-CompHist1T-2)). Efectele magnetorezistive, enumerate mai sus, sunt strâns legate de starea de magnetizare din structură, orientarea curentului relativ la vectorul magnetizare și de împrăștierea dependentă de spin a electronilor în structură și sunt fundamental diferite de efectul Hall sau cel magnetorezistiv (MR) din semiconductori, grafenă sau alte structuri nemagnetice [8,9]. Aceste studii, privind fenomenele de conducție în nanostructuri magnetice, au pus bazele unei noi ramuri în știință, *spintronica*, și au dus la dezvoltarea unor cip-uri produse de către companii precum NXP semiconductors (Olanda), Sensitex (Germania), NVE Corporation (SUA), Micro Magnetics Inc. (SUA), Analog Devices (SUA) și altele. Companii precum Everspin Technologies sau Samsung, dezvoltă elemente de memorie nevolatilă (MRAM). Trebuie menționat că noi tipuri de nanostructuri magnetice sunt descoperite în permanență, impulsivând atât cercetarea fundamentală cât și cea tehnologică. Astfel, pot fi menționate grafenele cu straturi magnetice depuse pe suprafața lor [9,10] ce permit realizarea unor dispozitive precum senzori magnetici, diode sau tranzistori magnetici cu aplicații în procesarea de semnal. Skyrmionii magnetici (magnetic skyrmions), ce pot fi priviți ca solitoni magnetici stabili, cu diametre de câțiva nm, preziși pe cale teoretică și descoperiți în nanostructuri

magnetice, pot fi folosiți la realizarea unor sisteme de stocare a datelor de înaltă densitate [Fert, Magnetic skyrmions: advances in physics and potential applications. Nat Rev Mater 2, 17031 (2017), <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.11019>].

În capitolele următoare sunt prezentate contribuții personale la studiul proprietăților magnetice și galvanomagnetice în nanostructuri magnetice și dezvoltarea de aplicații dedicate obținerii unor senzori destinați detecției câmpului magnetic (magnetometru și senzor de rotație) sau a nanoparticulelor magnetice. Utilizarea de senzori spintronici pentru detecția non contact a curentului electric este, de asemenea, tratată pe larg. Simulările micromagnetice au fost utilizate ca instrument de lucru în proiectarea și dezvoltarea acestor aplicații. Aceste rezultate au fost publicate în reviste cu factor de impact sau în volumele unor conferințe de specialitate și au fost obținute, în mare parte, în cadrul unor contracte de cercetare pe care le-am coordonat ca partener sau ca director de proiect.

Partea (B-i) a acestei *Teze de abilitare* este structurată în 5 capitole după cum urmează:

Capitolul 1, Aspecte privind parcursul științific și profesional, prezintă în mod sintetic activitatea științifică și cea didactică. Sunt evidențiate progresele științifice obținute începând cu perioada studiilor doctorale și până în prezent. Se arată cum cercetarea științifică a fost desfășurată în cadrul unor contracte de cercetare ce au impulsat noi dezvoltări în domeniul structurilor magnetice și utilizarea acestora pentru dezvoltarea de senzori magnetici. Activitatea didactică a avut ca obiectiv nu doar formarea de tineri bine pregătiți dar și atragerea acestora către activitatea de cercetare.

Capitolul 2, Studii privind depunerea și caracterizarea magnetică a straturilor subțiri, prezintă metode de depunere a straturilor subțiri și sunt discutate câteva exemple reprezentative de structuri obținute. Curbele de magnetizare măsurate cu magnetometrul cu probă vibrantă (VSM) sunt corelate cu particularitățile structurale ale acestor straturi. Simulări micromagnetice sunt utilizate pentru a modela aceste curbe de magnetizare.

Capitolul 3, Contribuții la studiul efectelor galvanomagnetice în straturi subțiri magnetice, prezintă principalele efecte magnetorezistive ce apar în structurile magnetice, modelarea micromagnetică a acestora și rezultate experimentale însoțite de câteva aplicații reprezentative pe care le-am dezvoltat și raportat în articole și prezentări la conferințe.

Capitolul 4, Sistem de măsurare non contact a curentului electric folosind senzori GMR, descrie studiile efectuate și rezultatele obținute în dezvoltarea unui sistem de măsurare în DC/AC a curentului electric. Sunt discutate două iterații în această dezvoltare, ce acoperă domenii ale curentului pornind de la 5 A și coborând până la câteva zeci de microamperi.

Capitolul 5, Contribuții la dezvoltarea unui cip spintronic pentru detecția curentului, prezintă studiile teoretice, simulări micromagnetice, design de layout și activitățile experimentale desfășurate pentru proiectarea și realizarea unui cip spintronic cu o structură hibridă, capabil să măsoare curenți în DC și AC.

Capitolul 1. Aspecte privind parcursul științific și profesional

1.1. Introducere

Am absolvit Facultatea de Fizică, secția Fizică Tehnologică, a Universității din București în anul 1985, ca Inginer-Fizician (Diplomă de Inginer în profilul Fizică). În cadrul lucrării de licență am realizat un magnetometru de înaltă sensibilitate folosind magneto-diode. Acestea sunt dispozitive p-i-n a căror caracteristică volt-amperică este puternic influențată de câmpul magnetic aplicat. Dubla specializare, Inginer dar și Fizician, mi-a permis o abordare a acestei teme atât din punct de vedere al cercetării fundamentale, realizând un studiu aprofundat al proprietăților galvanomagnetice ale acestui tip de dispozitiv semiconductor, dar și din punct de vedere aplicativ prin proiectarea și realizarea practică a magnetometrului. Dezvoltări ulterioare au fost aduse în timpul studiilor doctorale și după acestea [1,11,12].

Până în anul 1990 am activat în industrie, la Uzina de Autocamioane din Brașov, în cadrul unui laborator de analiză prin metode spectroscopice a compoziției metalelor utilizate în procese de fabricație, iar din toamna anului 1990 mi-am început cariera universitară, ca asistent, în cadrul Universității Transilvania din Brașov la Catedra de Fizică. Din acest moment, preocupările mele s-au îndreptat către studiul fenomenelor magnetice, cu precădere în straturi subțiri și sisteme multistrat magnetice cu aplicații în domeniul senzorilor magnetici, dar și către realizarea unor sisteme dedicate de caracterizare a proprietăților galvanomagnetice (efecte magnetorezistive și efect Hall) și a unor structuri de tip joncțiuni tunel.

În anul 1992 mi-am început studiile doctorale în cadrul Universității din București, Facultatea de Fizică, coordonator fiind Dl. Prof. Dr. Ioan Ința de la Universitatea Transilvania din Brașov.

1.2. Aprofundarea domeniului în cadrul studiilor doctorale

Perioada studiilor doctorale mi-a permis o aprofundare a fenomenelor ce guvernează proprietățile magnetice și electrice ale sistemelor magnetice nanostructurate, efectele de dimensiune, interacțiile dintre straturile magnetice separate prin straturi nemagnetice, influența metodelor de microfabricație asupra acestor proprietăți și altele. Realizarea experimentelor de obținere dar și de caracterizare a unor asemenea structuri a reprezentat o provocare în cadrul studiilor doctorale. Din anul 1998 am început o fructuoasă colaborare științifică cu Dna. Dr. Jenica Neamțu (IMT-București iar mai apoi ICPE-CA București). Complementaritatea preocupărilor noastre, a dotărilor tehnice dar și a expertizei reprezintă un exemplu de succes în colaborarea științifică. Astfel, am avut posibilitatea de a efectua teste complexe pe nanostructuri magnetice obținute prin microfabricație la IMT și apoi ICPE-CA București, prelucrări ale curbilor de magnetizare (măsurate cu magnetometrul cu probă vibrantă – VSM) corelări între aceste date și simulări pe cale micromagnetică a curbilor de magnetizare. Aceste studii mi-au oferit ocazia de a mă familiariza cu metodele de microfabricație, definirea parametrilor optimi de depunere, metodele de caracterizare

structurală, manipularea și contactarea probelor pentru teste, etc. A fost evidențiată dependența proprietăților magnetice și a celor galvanomagnetice, precum efectul magnetorezistiv (AMR, GMR) și efectul Hall, de microstructura straturilor depuse, de grosimea acestora și de metoda de depunere utilizată. *Ca un rezultat important, am arătat că investigarea efectelor galvanomagnetice oferă un instrument performant de studiu a proprietăților magnetice datorită strânsei legături dintre acestea.* Utilizarea acestui instrument este deosebit de importantă în cazul sistemelor nanostructurate cu grosimi de ordinul nanometrilor și de dimensiuni milimetrice sau chiar mai mici. Datorită grosimilor extrem de mici ale straturilor și, uneori, a suprafețelor reduse, de ordinul mm^2 sau μm^2 , acestea prezintă un moment magnetic foarte mic, sub 10^{-4} emu, ce face ca investigarea pe cale directă a proprietăților magnetice (exemplu, cu magnetometrul cu probă vibrantă - VSM) să fie foarte dificilă, necesitând echipamente speciale, extrem de scumpe precum magnetometrul cu SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) sau magnetometrul bazat pe efectul Kerr (MOKE - Magneto-Optic Kerr Effect). Am arătat în teză că, în cazul straturilor subțiri cu grosimi de ordinul zecilor de nm, *comportarea diamagnetică a substratului*, uzual din Si, sticlă sau alumina, ce are grosimi mult mai mari decât ale stratului magnetic, poate afecta în mod dramatic răspunsul magnetic global, măsurat cu VSM și deci calitatea rezultatelor obținute. Prin caracterizări electrice complexe ale probelor în câmp magnetic, precum măsurători de efect MR și efect Hall și, prin corelarea rezultatelor cu teste structurale – precum microscopul de forță atomică (MFA) și cu teste realizate cu VSM, au putut fi trase concluzii importante referitoare la influența morfologiei, a rugozității stratului, asupra proceselor de magnetizare, amplitudinii efectului MR sau cuplajului dintre straturile magnetice separate prin straturi nemagnetice. Acestea pot afecta în mod direct performanțele senzorilor realizați din asemenea structuri. Spre exemplu, s-a arătat că, măsurătorile de efect Hall pot fi un instrument util în studiul proprietăților magnetice, cum ar fi în determinarea câmpului de comutare a magnetizării în planul stratului pentru diverse unghiuri ale câmpului magnetic aplicat cu normala la suprafața stratului. Aceste studii au fost continuate și în anii următori iar rezultatele au fost publicate în reviste ISI cu factor de impact [13,14].

Astfel, în anul 2001 am obținut, în cadrul Universității din București, titlul de Doctor în Științe exacte, specializarea Fizică, cu teza intitulată "Studiul proprietăților magnetice la structuri tip multistrat", conducător Prof. Dr. Ioan Ința de la Universitatea Transilvania din Brașov.

Obținerea titlului de doctor a fost urmată de ani prolifici atât în ceea ce privește cercetarea științifică cât și activitatea didactică.

1.3. Cercetarea științifică integrată în cadrul unor contracte de cercetare

Cercetările întreprinse în cadrul studiilor doctorale, dar și noile dezvoltări gândite în cadrul colaborărilor științifice, mi-au oferit posibilitatea participării, ca partener, la un prim proiect de

cercetare "Structuri metalice multistrat cu efect de magnetorezistență gigantică pentru aplicații în spintronică și senzori magnetici" în cadrul programului CERES - CERCETARE FUNDAMENTALĂ, DE INTERES SOCIO-ECONOMIC ȘI CULTURAL. Perioada de implementare a proiectului a fost Octombrie 2001 – Decembrie 2005, coordonator fiind ICPE-CA București. Această primă participare într-un proiect de cercetare ca partener a însemnat nu doar familiarizarea cu activitatea de gestionare a fondurilor și coordonare a activității de cercetare a colectivului din partea Universității Transilvania din Brașov (UTBv), implicat în proiect, dar mi-a oferit și posibilitatea de a achiziționa echipamente necesare activității de cercetare. În acest proiect am participat la experimente de depunere a structurilor magnetice multistrat, și de caracterizări magnetice și magnetorezistive ale acestora, evidențiind posibilitatea utilizării lor la realizarea de senzori magnetici.

Acest proiect a fost ca un catalizator, fiind urmat, până în anul 2024, de alte 13 proiecte de cercetare naționale în care am fost implicat ca partener (coordonator din partea UTBv) sau director de proiect cât și de un proiect internațional tip HORIZON, "heteroGeneous integRated magnetic tEchnology using multifunctional standardized sTack (MSS)", acronim GREAT, <https://cordis.europa.eu/project/id/687973>, coordonat din partea UTBv de către Conf. dr. Ioana FIRĂSTRĂU, în care am fost membru. Acest proiect, coordonat de către CEA-Spintec Franța, a avut ca obiectiv principal, pentru UTBv, "Modelarea și simularea oscilatorilor spintronici cu aplicații în telecomunicații".

Din anul 2004 am început o fructuoasă colaborare cu un colectiv de cercetare de la IMT București, coordonat de către Dna. Dr. Fiz. Marioara Avram, CS I. Această colaborare a fost axată pe aspecte de microfabricație, modelări micromagnetice și studiul utilizării senzorilor magnetici, realizați din straturi metalice magnetice, în sisteme microfluidice de captare și detecție a nanoparticulelor magnetice cu aplicații în diagnoză medicală, sisteme de tip Lab-on-a-Chip (LOC) sau pentru detecția impurităților metalice magnetice din apele uzate.

Tabelul 1.1 prezintă o listă cu proiecte, pe care le-am coordonat ca partener sau ca director de proiect.

Tabelul 1.1

Nr. crt.	Programul/Proiectul	Funcția	Perioada
1.	CERES - Structuri metalice multistrat cu efect de magnetorezistență gigantică pentru aplicații în spintronică și senzori magnetici (Contractor ICPE-CA București), Contract nr. 22/24-10-2001	Coordonator din partea Univ. Transilvania din Brașov	01.10.2001 – 20.12.2004
2.	MATNANTECH – Microstructuri și microangrenaje cu detecție magnetică pe bază de nanostructuri cu magnetorezistență gigantică (MAGANGRENA), Contract nr. 266(409)/12-10-2004, (Contractor IMT - București)	Coordonator din partea Univ. Transilvania din Brașov	12-10-2004 – 15-10-2006

3.	CEEX - Microsisteme de multistraturi nanometrice magnetice cu efect de magnetorezistență gigantică (GMR) și tunelare dependentă de spin (TMR) pentru spintronică (NANOMATGIANT), Contract nr. 69/03.10.2005, (Contractor ICPE-CA București) https://www.icpe-ca.ro/microsisteme-de-multistraturi-nanometrice-magnetice-cu-efect-de-magnetorezistenta-giganticagmr-si-tunelare-dependenta-de-spin-tmr-pentru-spintronica/	Coordonator din partea Univ. Transilvania din Brașov	03-10-2005 - 15-09-2008
4.	CEEX - Sistem microfluidic integrat pentru analiza în vitro a fluidelor biologice cu aplicații în diagnostic și tratament medical (MICRO-DIAG), Contract nr. 27/10.10.2005, (Contractor IMT - București) https://www.imt.ro/Microdiag/	Coordonator din partea Univ. Transilvania din Brașov	03-10-2005 - 15-10-2008
5.	Parteneriate în domeniile prioritare - Procesarea inteligentă a nano-dispozitivelor tip "valvă de spin" cu magnetorezistență gigantică pentru aplicații în spintronică, (SPIN-VALVE), Contract 71-127/14.09.2007, (Contractor ICPE-CA București) https://www.icpe-ca.ro/procesarea-inteligenta-a-nano-dispozitivelor-tip-valva-de-spin-cu-magnetorezistenta-gigantica-pentru-aplicatii-in-spintronica/	Coordonator din partea Univ. Transilvania din Brașov	14-09-2007-2010
6.	Parteneriate în domeniile prioritare - Nanostructuri de semiconductori oxidici transparenti cu proprietăți controlabile prin dopaj pentru aplicații în optoelectronică, spintronică și piezotronică (NANOSEMOXI), Contract 72-165/01-10-2008, (Contractor ICPE-CA București) https://www.icpe-ca.ro/nanostructuri-de-semiconductori-oxidici-transparenti-cu-proprietati-controlabile-prin-dopaj-cu-aplicatii-in-optoelectronica-spintronica-si-piezotronica/	Coordonator din partea Univ. Transilvania din Brașov	01-10-2008 – 2011
7.	Parteneriate în domeniile prioritare - Biochip microfluidic pentru caracterizarea reologică a fluidelor biologice newtoniene cu aplicații în diagnostic și tratament medical (MELANOCHIP), 12-094/01-10- 2008, (Contractor IMT - București) https://www.imt.ro/melanochip/index.php	Coordonator din partea Univ. Transilvania din Brașov	01-10-2008 – 01-11-2011
8.	Parteneriate în domeniile prioritare - Sistem micro - electro - mecanic cu aplicații în reconstrucția microchirurgicală a nervilor periferici (RECONNECT), 72-160/01-10-2008, (Contractor IMT - București) https://www.imt.ro/reconnect/	Coordonator din partea Univ. Transilvania din Brașov	01-10-2008 – 01-11-2011
9.	Parteneriate în domeniile prioritare - Lab-on-a-chip pentru studiul apoptozei celulare (CELLIMUNOCHIP), 2/2012, (Contractor IMT - București) https://www.imt.ro/cellimmunochip/index.html	Coordonator din partea Univ. Transilvania din Brașov	02-07-2012 - 31-12-2016
10.	PED - Structuri spintronice cu Magneto-Rezistență Anizotropică (AMR) și Magneto-Rezistență Gigantică (GMR) pentru aplicații de senzori robuști (MAGSENS), 126PED/2017, (Contractor ICPE-CA București) http://www.icpe-ca.ro/icpe-ca/proiecte/proiecte-nationale/pn-2016-2020/magsens/etapa-2.pdf	Coordonator din partea Univ. Transilvania din Brașov	03-01-2017 – 30.09.2018

11.	Proiecte complexe realizate în consorții CDI (PCCDI) - Platformă microfluidică pentru detecția celulelor tumorale circulante (CTC) concentrate prin dielectroforeză-magnetoforeză și analizate prin spectroscopie dielectrică și de impedanță electrochimică (uCellDetect), Contract nr: 3PCCDI/2018 (Contractor Universitatea Tehnică Gh. Asachi, Iași) https://ieeia.tuiasi.ro/cercetare/proiecte-cd/	Coordonator din partea Univ. Transilvania din Brașov	01-03-2018 – 31-12-2021
12.	PED - Senzori cu valvă de spin avansați pentru aplicații de măsurători de precizie non-contact ale curenților DC/AC (SpinCurrentSense), 315PED/2020, (Contractor ICPE-CA București); https://www.icpe-ca.ro/315ped-2020/	Coordonator din partea Univ. Transilvania din Brașov	03-08-2020 – 29-07-2022
13.	PED - Senzori magnetorezistivi optimizați pentru detecția pe cip a nanoparticulelor magnetice (MagSensOnChip), 510PED/2020; https://magsensonchip.unitbv.ro/	Director de Proiect	23-10-2020 – 21-10-2022
14.	PED - Structuri spintronice pe grafenă pentru aplicații de senzorială și procesare de semnal (GrafeneS), 597PED/2022 https://graphenespin.unitbv.ro/	Director de Proiect	21.06.2022 – 21.06.2024

Temele atinse în aceste proiecte, regăsite în articole publicate și prezentări la conferințe internaționale, vor sta la baza conținutului acestei teze de abilitare. În continuare, sunt prezentate, pe scurt, principalele aspecte pe care le-am tratat în aceste proiecte.

Astfel, au fost desfășurate studii privind microsisteme de multistraturi nanometrice magnetice cu efect de magnetorezistență gigantica (GMR) și tunelare dependentă de spin (TMR) pentru spintronică (NANOMATGIANT, Contract nr. 69/03.10.2005) care au necesitat proiectarea unor măști speciale pentru experimentele de depunere și punerea la punct a unui sistem dedicat ce permite caracterizarea joncțiunilor tunel. Fitând caracteristicile I-V ale diferitelor joncțiuni tunel obținute, am putut estima grosimea efectivă a barierei tunel și înălțimea acesteia (eV) – parametri structurali importanți. O atenție aparte a fost acordată dezvoltării de senzori de câmp magnetic bazați pe efectul Hall planar (SPIN-VALVE, Contract 71-127/14.09.2007). ce au dus și la brevetarea unui "Microsenzor magnetorezistiv de rotație" bazat pe acest efect – RO 125187/30-07-2013. Au fost studiate, de asemenea, nanostructuri de semiconductori oxidici transparenti cu proprietăți controlabile ce s-a dovedit că pot prezenta proprietăți feromagnetice la temperatura camerei și pot fi utilizați pentru aplicații în spintronică (NANOSEMOXI, Contract 72-165/01-10-2008).

Pe de altă parte, în cadrul unor contracte desfășurate în colaborare cu IMT-București, am efectuat modelări micromagnetice privind condițiile optime de detecție a nanoparticulelor magnetice (NPM) pe suprafața senzorului spintronic (GMR sau PHE). Au fost identificate poziții optime ale NPM deasupra senzorilor, efectele cuplajelor magnetostatice dintre acestea și senzori precum și efectul câmpului magnetic de pre polarizare asupra sensibilității senzorului.

De asemenea, pe baza acestor studii și simulări realizate la UTBv, au fost proiectate împreună cu colegii de la IMT-București și microfabricate la IMT-București cip-uri cu structuri micrometrice cu efect GMR ce înglobează și benzi metalice de curent pentru pre polarizarea senzorilor și a NPM (MICRO-DIAG, Contract nr. 27/10.10.2005; MELANOCHIP, 12-094/01-10-2008; RECONNECT, 72-160/01-10-2008).

O importanță deosebită o reprezintă proiectele desfășurate după anul 2017, ce au avut, în principal, un pronunțat caracter aplicativ, având ca obiectiv principal realizarea unor demonstratori. Sunt de remarcat proiectele "Structuri spintronice cu Magneto-Rezistență Anizotropică (AMR) și Magneto-Rezistență Gigantică (GMR) pentru aplicații de senzori robuști (MAGSENS)", Contract 126PED/2017 și "Senzori cu valvă de spin avansați pentru aplicații de măsurători de precizie non-contact ale curenților DC/AC (SpinCurrentSense)", Contract 315PED/2020, contractor ICPE-CA București și coordonator Marius Volmer din partea UTBv. Astfel, în urma unor simulări micromagnetice complexe, au fost proiectate cip-uri cu senzori de câmp magnetic sub formă de punți Wheatstone realizate din straturi subțiri feromagnetice prepolarizate prin interacție de schimb cu un strat antiferomagnetic din FeMn [15]. Această arhitectură, ce utilizează un regim diferențial de funcționare, asigură o bună sensibilitate și stabilitate termică, performanțe confirmate după realizarea practică a acestor cip-uri și testate în condiții de laborator. Demonstratorul realizat a prezentat sensibilități între $8 \mu\text{V}/(\text{Oe}\cdot\text{mA})$ și $12 \mu\text{V}/(\text{mA Oe})$, în funcție de forma senzorului, pentru câmpuri aplicate în domeniul $\pm 50 \text{ Oe}$. În proiectul 315PED aceste studii au fost duse mai departe și a fost proiectat, iar apoi realizat practic, un cip demonstrator complex, în structură hibridă ce permite măsurarea non-contact a curentului electric. Senzorii AMR au fost realizați pe plachetă de Si, conform tehnologiei circuitelor integrate, iar traseul de curent din Argint, obținut prin printare pe substrat flexibil, a fost atașat ulterior. Cip-ul astfel realizat permite măsurarea curentului electric DC/AC prin detecția câmpului magnetic produs de trecerea acestuia prin traseul de curent. A fost evidențiată o foarte bună liniaritate a sistemului de detecție atât în DC cât și în AC dar și o urmărire fidelă a formei de undă a curentului pentru semnale dreptunghiulare.

Realizarea unui cip demonstrator cu senzori spintronici, optimizat pentru detecția nanoparticulelor magnetice, a fost tema proiectului MagSensOnChip 510PED/2020 [17] pe care l-am coordonat, având ca partener IMT-București. Activitățile de cercetare (simulări micromagnetice, design de layout, microfabricație și experimente de caracterizare) au fost concentrate pe senzori bazați pe efectul Hall planar (PHE) ce oferă suprafețe mari de detecție, un raport semnal/zgomot ridicat și stabilitate termică foarte bună [art rev Amir]. Cip-ul demonstrator a fost realizat din Permalloy a cărei anizotropie a fost controlată folosind nanofibre polimerice dopate cu nanoparticule magnetice (NPM) din NiFeO. Demonstratorul realizat a dovedit că este capabil să detecteze fără probleme o cantitate de $0,4 \mu\text{g}$ NPM de

maghemită în câmp magnetic aplicat mai mic de 20 Oe folosind atât discriminarea în amplitudine cât și în timp (fază) a semnalului achiziționat.

Studii complexe privind realizarea prin microfabricație a unui cip demonstrator cu structuri spintronice pe grafenă, pentru procesare de semnal și detecția câmpului magnetic, au fost întreprinse în cadrul proiectului GrapheneS 597PED/2022 [18] pe care l-am coordonat, având ca partener IMT-București. Au fost realizate și testate cipuri cu grafenă monostrat pe care au fost depuse contacte de Au și contacte feromagnetice sau cipuri cu structuri FET cu grafenă verticală. Realizarea acestor structuri a însemnat o importantă provocare tehnologică. Testele de conducție la temperaturi diferite au pus în evidență mecanismele de conducție iar cele în câmp magnetic au pus în evidență un efect de magnetorezistență anizotropă. A fost implementată o aplicație de tip magnetometru ce folosește structuri FET cu grafenă verticală (GV) a căror suprafață a fost funcționalizată cu nanofibre polimerice dopate cu nanoparticule magnetice. S-a obținut o caracteristică de detecție liniară în domeniul $\pm 0,25$ T folosind o configurație de tip punte Wheatstone, în care doi senzori sunt plasați în câmp magnetic iar alte două FET-uri cu GV, ca rezistențe de completare pentru echilibrarea punții, au fost plasate în afara câmpului magnetic.

În final, trebuie menționat un proiect complex în care am fost implicat ca partener (P3), uCellDetect, Contract nr. 3PCCDI/2018, în cadrul programului Proiecte complexe realizate în consorții CDI (PCCDI), Director de proiect Prof. Dr. ing. Marius Olariu de la Universitatea Tehnică Gh. Asachi din Iași. Acest proiect a avut ca obiective: (i) Dezvoltarea unor modele experimentale specifice de manipulare (dielectroforeză, magnetoforeză) și detecție cu ajutorul spectroscopiei dielectrice, spectroscopie de impedanță electrochimică și detecție spintronică a celulelor tumorale circulante CTC; (ii) Dezvoltare instituțională și (iii) Formare resursă umană înalt specializată. Astfel, am avut ocazia (i) să coordonez proiectul component 3 ***Lab-on-a chip pentru sortarea celulelor tumorale circulante bazat pe focalizare magnetoforetică și detecție spintronică*** în cadrul consorțiului și (ii) să angajez în cadrul proiectului doi tineri absolvenți de facultate, ca asistenți de cercetare. Prin implicarea lor în cadrul proiectului, au putut să se familiarizeze cu tehnici avansate de măsurare, achiziții de date, utilizarea senzorilor spintronici pentru detecția câmpurilor magnetice extrem de mici, detecția NPM, tehnici de printare a unor circuite electrice, să participe la Conferințe internaționale de specialitate și să fie admiși ca studenți doctoranzi. Unul dintre ei, a obținut titlul de doctor în Științe ingineresti, domeniul Inginerie Electrică cu calificativul foarte bine, iar celălalt este în stadiu avansat de pregătire. Acești tineri au fost implicați și în proiectele 315PED, 510PED și 597PED, prezentate mai sus, pe poziții de doctoranzi. Participarea în aceste proiecte le-a fost de un real ajutor în cadrul studiilor doctorale. În particular, ei au participat la realizarea demonstratorilor cu senzori magnetici și la experimentele de depunere prin electrofilare a nanofibrelor polimerice dopate cu nanoparticule magnetice ce au stat la baza propunerii de proiect înregistrată la OSIM:

Procedeu pentru controlul anizotropiei magnetice în straturi subțiri feromagnetice moi, cod depunere A/00305 din 10.06.2024 [19].

În perioada 01-07-2010 - 31-03-2013 am beneficiat, la IMT București, de o Bursă Postdoctorală în cadrul programului POSDRU/89/1.5/S/63700 în domeniul micro și nanotehnologiilor, cu tema "Dezvoltarea unui sistem integrat de manipulare și detecție a particulelor biologice marcate magnetic". Cu această ocazie am participat și la câteva stagii de pregătire precum (i) "Microfabrication Processes" oferit de EuroTraining FSRM și IMT București în perioada 11-11-2010 - 12-11-2010 și (ii) "MEMS design and prototyping" oferit de IMEC Belgium și IMT București în perioada 07-05-2012 - 11-05-2012.

Am fost evaluator pentru competiții deschise de UEFISCDI precum PD (Post Doc) și TE (Tânără Echipă).

Am publicat 35 de articole în reviste indexate ISI cu factor de impact, peste 6 articole în jurnale de specialitate indexate BDI și peste 27 de articole în volumele unor conferințe internaționale, din care 12 se regăsesc în baze de date ISI și IEEE. Indicii Hirsch, la 31 Ianuarie 2025 sunt: h=10 (WOS), h=11 (Scopus) și h=13 (Google Scholar).

De-a lungul anilor am recenzat articole pentru reviste precum IEEE Transactions on Magnetics, IEEE Sensors Letters, IEEE Sensors Journal, Copernicus, Microelectronic Engineering, Sensors and Actuators A: Physical, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Sensors, Nanomaterials, Electronics, Materials, Micromachines, Scientific Reports, și altele.

1.4. Parcursul didactic

În prezent, dețin gradul didactic de Conferențiar în cadrul Departamentului de Inginerie Electrică și Fizică Aplicată. Așa cum în cercetarea științifică cele două laturi, de Fizician și de Inginer, s-au împletit într-un mod armonios, așa s-a întâmplat și în cariera didactică. În cadrul programului de studii de licență, Inginerie Electrică și Calculatoare în limba engleză, predau cursuri precum Physics, Electromagnetic Field Theory, Microsensors and Actuators (curs opțional) iar la programul de studii de masterat Sisteme Electrice Avansate, în limba engleză, predau cursul opțional Embedded Microsensors for Electrical Engineering.

În cadrul Școlii doctorale interdisciplinare a Universității Transilvania din Brașov, predau cursul Acquisition and Processing of Experimental Data pentru studenții doctoranzi din anul I.

De-a lungul timpului am mai fost titularul unor cursuri de specialitate precum Aparatură de măsură și control, Fizica stării solide, Nanomateriale, Fizica și tehnologia straturilor subțiri, în cadrul unor programe de studii anterioare precum Fizică-Chimie, Matematică-Fizică și Inginerie Fizică.

În acest context, am coordonat o mulțime de lucrări de licență cu subiecte în zona cursurilor predate: sisteme cu senzori magnetici spintronici ce detectează câmpul magnetic ca amplitudine și ca orientare (senzori de rotație), senzori de curent, sisteme pentru detectarea timpurie a unui incendiu folosind o arie de senzori, demonstrator de levitație magnetică și altele.

Aceste discipline au fost acoperite atât de materiale didactice și resurse suplimentare postate pe platforma elearning a Universității Transilvania din Brașov cât și de 10 cărți sau capitole de cărți, cu ISBN, pe care le-am publicat.

Sunt membru în comisii de îndrumare a activității unor doctoranzi. De asemenea, am participat, ca referent oficial, în comisii de susținere a tezei de doctorat în cadrul Universității Transilvania din Brașov și Universitatea din București.

Capitolul 2. Studii privind depunerea și caracterizarea magnetică a straturilor subțiri

2.1. Introducere

Aspectele prezentate în acest capitol vor permite o mai bună înțelegere a rezultatelor activității de cercetare prezentate în capitolele următoare. Sunt tratate aspecte privind tehnicile de obținere a straturilor subțiri magnetice și sunt prezentate câteva exemple de structuri, relevante pentru studiile realizate de către autor, raportate în articole, prezentări la conferințe științifice internaționale sau în cadrul unor contracte de cercetare.

Se consideră straturi subțiri magnetice (sau filme subțiri), structurile care prezintă o grosime mult mai mică decât întinderea lor în plan. Uzual, se consideră că această grosime nu trebuie să depășească 100 nm [1, 5] pentru a putea exploata proprietățile specifice unor asemenea sisteme, precum efecte de dimensiune ce conduc la influențele suprafețelor și ale interfețelor asupra proprietăților electrice, optice, chimice, etc., dar și la apariția anizotropiei de formă ce menține magnetizarea în planul stratului. Spre exemplu, straturile subțiri din Fe, Ni, Co sau aliaje cu aceste elemente, precum $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (Permalloy), NiFeCo, etc., cu grosimi de până la sute de nm, prezintă proprietăți magnetice, precum constantele de schimb, valorile momentului magnetic sau anizotropii magnetice diferite față de cele caracteristice acestor materiale în stare masivă (bulk).

S-a arătat că anizotropia magnetică a stratului poate fi puternic influențată de aspectul substratului (exemplu substrat cu aspect de terase la nivel atomic) sau prin plasarea unui alt strat, de exemplu, din material antiferomagnetic AFM [20, 21, 22], sau din nanofibre polimerice dopate cu nanoparticule magnetice [19].

Aceste structuri sunt obținute prin procedee specifice numite *tehnici de depunere* [20]. În [1] am realizat o documentare complexă privind tehnicile de depunere a straturilor subțiri, elemente de tehnica vidului (instalații de vidare, joje de vid), influența gazelor reziduale asupra calității straturilor, formarea straturilor pe substrat, etc. Materialele din care sunt obținute straturile subțiri sunt diverse: materiale metalice (magnetice și nemagnetice), semiconductoare, izolatoare, organice, etc. Depunerea se face pe un suport, numit și **substrat**, a cărui grosime este, de regulă, mult mai mare decât grosimea stratului. Alegerea tipului de material pentru substrat este impusă de aplicație. Cele mai utilizate materiale ca substrat sunt: Si monocristalin, sau Si/SiO₂, NaCl, sticla de microscop, Al₂O₃. Acestea au grosimi nu mai mari de 1 mm. Dacă prin procedee specifice se depun pe același suport mai multe straturi, de naturi și grosimi diferite, se obțin așa numitele structuri multistrat (multilayer). În final, trebuie menționat că procesul de depunere a straturilor subțiri este precedat de procedee complexe de pregătire a substratului, precum curățare, degresare în băi ultrasonice cu acetonă, alcool etilic cu puritate de peste 99,9 %, decapare în acid fluorhidric (2 %) pentru a elimina stratul de oxid de pe suprafață, clătire în apă deionizată, uscare în argon sau azot, etc. Atunci când se dorește studiul unor proprietăți fizice fundamentale, precum cele magnetice,

galvanomagnetice, și altele, stratul poate fi depus direct pe substrat care, de regulă, are formă rectangulară cu laturi între 10 și 20 mm. Pentru aplicații speciale, precum ar fi studii de efect magnetorezistiv, efect Hall sau realizarea unor dispozitive, se utilizează tehnici de fotolitografie, corodare, etc., ce permit obținerea unor structuri cu geometrii bine definite [2, 6, 22].

2.2. Tehnici de obținere a straturilor subțiri magnetice

Proprietățile fizice ale straturilor subțiri sunt determinate de o serie de parametri precum:

- proprietățile materialelor sursă aflate în stare masivă utilizate la prepararea straturilor;
- calitatea substratului: rugozitate, ordonare cristalină, cantitatea de impurități pe suprafață (contaminare), temperatura suprafeței în timpul depunerii;
- metoda utilizată pentru depunerea straturilor;
- calitatea vidului.

Metodele cele mai utilizate de obținere a straturilor subțiri se bazează pe depunerea din fază de vapori (Physical Vapour Deposition - PVD). Astfel, pot fi enumerate [1, 20, 23, 24]:

- depunerea prin evaporare termică în vid folosind încălzire prin efect Joule, inductivă sau în fascicul de electroni;
- depunerea prin pulverizare catodică;
- depunerea prin pulverizare în fascicul LASER (Pulsed Laser Vapour Deposition - PLD);
- creșterea în fascicul molecular (Molecular beam epitaxy - MBE);

Aceste metode asigură un control foarte bun al calității straturilor depuse dar necesită echipamente foarte scumpe și o infrastructură adecvată. Creșterea unor straturi subțiri magnetice de înaltă calitate necesită un control precis al ratei de depunere, implicit a grosimii stratului și, în multe cazuri, controlul compoziției stratului atunci când sunt depuse aliaje sau se utilizează mai multe surse de depunere. Primele două metode de depunere au fost utilizate în cadrul studiilor întreprinse de către autor și vor fi prezentate pe scurt în continuare.

Trebuie precizat că, pe lângă metodele enumerate mai sus, obținerea filmelor subțiri prin *depunere electrochimică* poate fi o variantă foarte atractivă în multe situații. Această metodă este de departe mai comodă și mai ieftină și, în plus, nu necesită instalații de vidare [1, 25, 26]. Problema care se pune este în ce măsură poate să asigure obținerea unor filme cu compoziții, structură și grosimi perfect controlabile, comparabile calitativ cu cele obținute prin metoda PVD, și poate fi evitată contaminarea, respectiv oxidarea substratului înaintea depunerii. Totuși, această metodă permite obținerea facilă de nanofire magnetice (dintr-un singur material sau alternare de material magnetic/nemagnetic) depunând materialul prin micro-nanocanale (100 nm în diametru) obținute prin iradierea cu ioni de înaltă energie a unei membrane din alumina cu grosimi de câțiva zeci de microni. Pentru depunere se folosește o celulă de electroliză cu trei electrozi, în care electrodul de referință este din Calomel saturat iar

contraelectrodul este din Pt, conectați la un Galvanostat/Potențostat [25, 26]. În celula de electroliză se află o soluție apoasă cu săruri ale metalelor ce trebuie depuse. Prin controlul potențialului la care se află catodul, pot fi extrase din soluție elementele dorite. Grosimea stratului depus este controlată prin densitatea de sarcină transportată și timpul de depunere [1]. Se arată că această metodă permite controlul grosimii straturilor depuse la nivel de nm și obținerea unor sisteme multistrat ce prezintă efectul de magnetorezistență gigantică. Aceste nanofire, cu alternare de straturi magnetice și nemagnetice, de grosimi nanometrice, reprezintă un exemplu de structuri ce pot fi obținute *doar prin depunere electrochimică* [25, 26]. Ele sunt studiate pentru aplicații în domeniul senzorilor și în sisteme de stocare a datelor.

2.2.1. Depunerea straturilor subțiri prin evaporare termică în vid

Metalul este adus în *stare de vapori* prin topire și evaporare într-un spațiu vidat, numit *incintă de depunere*, Fig. 2.1. Metoda exploatează scăderea temperaturilor de topire și de vaporizare, în incinte aflate la presiuni foarte scăzute, sub 10^{-2} Pa, Tabelul 2.1, [1,27]. Acești vapori vor condensa pe un suport (*substratul*) mai rece decât temperatura lor. Uneori, acest substrat poate fi rotit în timpul depunerii și încălzit pentru a asigura o creștere mai uniformă a stratului, cu o rugozitate mai mică, dar cu prețul micșorării ratei de depunere. Uzual, materialul este adus în stare de vapori folosind metoda încălzirii rezistive sau în fascicul de electroni. Cea mai simplă metodă, este cea a încălzirii prin efect Joule, Fig. 2.1(a), și constă în topirea și evaporarea metalului folosind (i) cuptorașe din fire de W (cu diverse geometrii) ce pot reține în interior topitura de metal datorită tensiunilor superficiale sau (ii) folii din metal refractar din W, Ta sau Mo în cazul pulberilor sau când metalul topit nu udă cuptorașul, Fig. 2.1(b), [28]. Datorită formei specifice, uneori acestea sunt numite "bărcuțe" [23]. Temperaturile de topire pentru Ta și W sunt 2996 °C, respectiv 3382 °C astfel încât acestea pot opera la temperaturi de 2400-2500 °C pentru care presiunea de vapori a celor mai multe metale este suficient de mare pentru a putea fi evaporate și depuse pe substrat. Atunci când metalul topit poate alia cu cuptorașul din W sau Ta, se folosesc *creuzete* precum cele din Al_2O_3 , BN pirolitic, grafit, și altele, sub formă de cupe cilindrice, încălzite cu fire sau folii din W, Fig. 2.1(b), [28]. Filamentul este alimentat la tensiuni mici, dar curenți de ordinul a 100 A. Pot fi depuse și aliaje, cu o bună păstrare a compoziției în filmul depus, dacă temperaturile de evaporare ale elementelor componente sunt apropiate sau se alege metoda evaporării de tip "flash". Totuși, această metodă vine cu riscul degajării de gaze reziduale ce au fost reținute în grăunții sau în pulberea materialului ce alimentează în mod continuu cuptorașul supraîncălzit [1, 23]. O altă variantă pentru controlul compoziției filmelor depuse, constă în utilizarea mai multor surse din care se evaporă metale pure însă metoda este laborioasă căci necesită un control precis al ratei de evaporare pentru fiecare în parte [1].

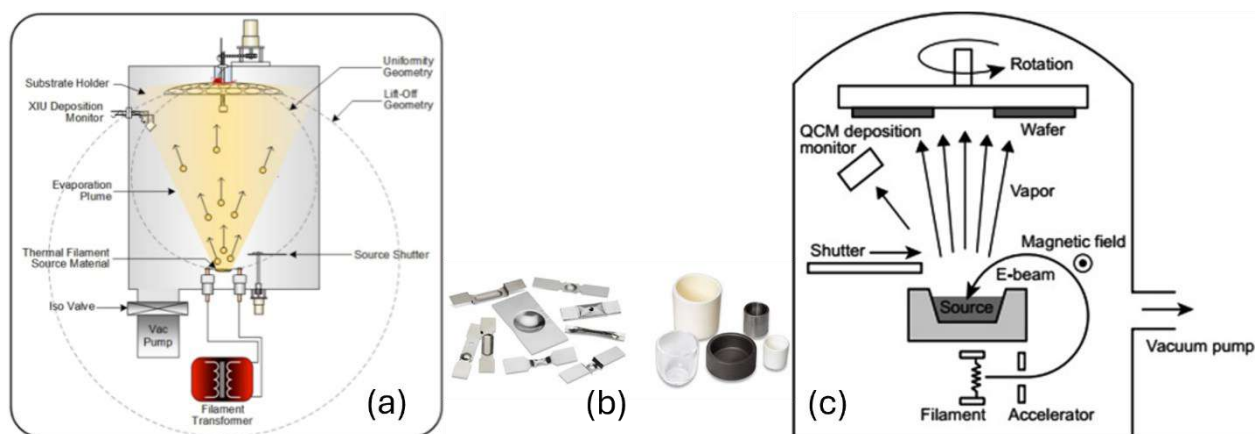


Fig. 2.1. Structura schematică a unei instalații de depunere prin evaporare termică în vid folosind (a) metoda încălzirii rezistive [23] cu (b) diverse surse de evaporare (cuptorașe și creuzete) [1,28] respectiv, (c) metoda evaporării prin topire în fascicul de electroni [29].

Încălzirea pe cale inductivă este posibilă prin plasarea creuzetului din material refractar, Fig. 2.1(b), în interiorul unei bobine prin care trece curentul de RF. Această metodă permite evaporarea unor metale cu temperaturi ridicate de topire dar necesită puteri mari, de ordinul kW în RF ceea ce poate complica structura instalației de depunere. Se pot topi cantități de 10-15 g de metal la puteri de aproximativ 2 kW [1, 30].

O variantă ce permite obținerea de straturi foarte curate, necontaminate, este aceea a depunerii în *fascicul de electroni* [22, 29], în care topirea și evaporarea substanței se fac local evitând topirea întregii cantități și deci contaminarea din partea pereților creuzetului, așa cum este ilustrat în Fig.2.1(c). Pe scurt, filamentul încins permite emisia de electroni care, în urma accelerării într-un câmp electric intens, capătă o energie suficientă ce permite evaporarea oricărui material. Uzual, curentul de electroni ajunge la 1 A sub o tensiune de accelerare de 10 kV. Pentru a evita distrugerea filamentului de către materialul evaporat, fasciculul de electroni este deviat sub acțiunea unui câmp magnetic astfel încât tunul electronic nu este în calea sursei de vapori, Fig. 2.1(c), [1, 29]. Pentru a evita contaminarea și oxidarea materialului evaporat, trebuie ca presiunea în incinta de depunere să fie mai mică de 10^{-2} Pa, în cazul evaporării prin încălzire rezistivă, dar ajunge la 10^{-6} Pa în cazul e-beam [29]. Orice substanță are o presiune de vapori $p_v(T)$, unde T este temperatura evaporatorului. La o temperatură suficient de ridicată, fluxul de molecule incidente pe substrat poate fi suficient de ridicat pentru a produce o depunere a stratului subțire pe substratul aflat la temperatura $T_s < T$. Pentru a completa aspectele discutate mai sus, sunt prezentate în Tabelul 2.1, temperaturile de *topire*, la *presiune atmosferică normală*, și de *evaporare*, pentru o presiune de vapori de 10^{-4} torr ($1,33 \times 10^{-2}$ Pa), pentru o selecție de materiale utilizate în acest domeniu, precum și tipurile de cuptorașe recomandate pentru depunerea lor [27].

Tabelul 2.1. (adaptat după [27])

Substanța	Temp. de topire (°C) ^a	Temperatura minimă de evaporare (°C) ^b	Evaporarea are loc din...	Materialul recomandat pentru cuptoraș	Fascicul de electroni ^c	
					Rata de depunere (Å/s)	Puterea (kW)
Aluminiu	660	1010	Topitură	BN pirolitic	20	5
Al ₂ O ₃	2072	1325	Semi topitură	BN pirolitic	10	0,5
Stibiu	631	425	Topitură	BN pirolitic, Al ₂ O ₃	50	0,5
Crom	1907	1157	Sublimare	W	15	0,3
Cobalt	1495	1200	Topitură	Al ₂ O ₃ , BeO	20	2,0
Cupru	1085	1017	Topitură	Grafit, Al ₂ O ₃	50	0,2
Germaniu	938	1167	Topitură	Grafit	25	3,0
Aur	1064	1132	Topitură	Al ₂ O ₃ , BN	30	6,0
Indiu	157	742	Topitură	Al ₂ O ₃	100	0,1
Fier	1538	1180	Topitură	Al ₂ O ₃ , BeO	50	2,5
Magneziu	650	327	Sublimare	Grafit	100	0,04
Molibden	2623	2117	Topitură	Al ₂ O ₃	40	4,0
Nichel	1455	1262	Topitură	Al ₂ O ₃	25	2,0
Permalloy	1454	1300	Topitură	Al ₂ O ₃	30	2,0
Platina	1768	1747	Topitură	Grafit	20	4,0
Siliciu	1414	1337	Topitură	BeO	15	0,15
(SiO ₂)	1710	850	Semi topitură	Ta	20	0,7
Staniu	232	997	Topitură	Al ₂ O ₃ , grafit	10	2,0
Tantal	3020	2590	Semi topitură	Cu, W, Al ₂ O ₃ (e-beam)	100	5,0
Titan	1725	1453	Topitură	W	20	1,5
Wolfram	3422	2757	Topitură	Cu, W, Al ₂ O ₃ (e-beam)	20	5,5

^a La $p=10^5$ Pa (760 torr); ^b Temperatura pentru care $p_v=10^{-4}$ torr; ^c Pentru evaporare în fascicul de electroni la o tensiune de accelerare de 10 kV.

Au fost evidențiate câteva aspecte importante precum: (i) încorporarea de O₂ sau N₂ în straturi metalice conduce la micșorarea conductivității electrice a reflexivității optice a acestora și alterează proprietățile magnetice dar (ii) această încorporare conduce la mărirea durității mecanice a straturilor (exemplu straturi de Al în care se încorporează O₂ sau N₂). Pentru a micșora efectul gazelor încorporate asupra proprietăților electrice și magnetice pot fi utilizate câteva metode precum: (i) creșterea temperaturii substratului în timpul depunerii pentru a crește rata de desorbție a gazelor (cu costul micșorării ratei de depunere), (ii) rata de depunere sa fie cât mai mare în timp ce presiunea gazelor reziduale precum O₂, CO, CO₂, N₂, H₂O, etc., să fie cât mai mică (incintă cu vid înalt) și (iii) realizarea unui tratament termic în vid sau în atmosferă inertă a straturilor depuse. Uneori, acest tratament poate fi completat de un tratament termic, în câmp magnetic, dar la temperaturi mai scăzute.

Un aspect important îl reprezintă *mecanismul de creștere a straturilor subțiri* pe substrat ce afectează calitatea suprafeței, a interfețelor și, care se reflectă în proprietățile electrice și magnetice ale straturilor depuse. Ca un numitor comun al abordărilor teoretice, completate de rezultate experimentale, se remarcă faptul că, creșterea straturilor pe substrat se face un jurul unor centri de condensare (germeni) ale căror dimensiuni minime depind de natura substratului, de temperatura acestuia cât și de natura substanței evaporate [1, 27]. Aceste insulițe de atomi se dezvoltă ducând la apariția punților de legătură dintre ele, fenomen ce poartă numele de coalescență. Dacă depunerea continuă, suprafețele insulelor se măresc suficient astfel încât rezultă un strat continuu. Acest mecanism de formare a stratului poate fi pus în evidență prin diverse metode precum observare la microscopul electronic sau, in situ, prin măsurători de conductivitate electrică în timpul depunerii [31]. Prin urmare, creșterea filmelor subțiri nu se face sub forma unor succesiuni de straturi mono moleculare (monoatomice) ci în *jurul unor germeni de condensare*. Creșterea straturilor de permalloy ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) poate fi bine descrisă pe baza acestui model și explică de ce, la grosimi mici, sub 10 nm, aceste straturi au o rugozitate crescută, ce poate ajunge la 17 nm [1, 31, 32, 33]. Structurile FM/NM/FM cu rugozități crescute prezintă un cuplaj pozitiv, între straturile FM datorită punților de material FM ce se stabilesc prin stratul NM și datorită unui cuplaj magnetostatic tip "coajă de portocală" ce se datorează caracterului vălurit al suprafețelor de separare [1, 31]. Astfel, magnetizările din straturile FM adiacente se comportă aproape identic în funcție de câmpul magnetic aplicat. Din acest motiv, amplitudinea efectului GMR, în asemenea structuri, este foarte mică. Așa cum se va arăta în Cap. 3, efectul GMR prezintă o amplitudine maximă atunci când magnetizările din straturile FM adiacente sunt orientate antiparalele. Acest lucru este posibil când suprafețele prezintă rugozități scăzute, mai mici de 1 nm, iar între straturile FM se poate stabili un cuplaj antiferomagnetic (AFM). În unele cazuri, s-a putut observa un efect GMR în structuri multistrat depuse prin evaporare termică doar după un proces de post călire ce conduce la micșorarea rugozității stratului dar cu prețul apariției inter difuziei între straturile adiacente ceea ce face ca interfețele să nu mai fie clar definite. Toate aceste aspecte conduc la micșorarea amplitudinii efectelor magnetorezistive GMR sau TMR.

În cazul acestei metode de depunere este practic imposibil să se facă o calibrare a sursei de depunere deoarece rata de depunere este puternic influențată de cantitatea de material aflată în cuptoraș/creuzetul de depunere. De aceea, pentru controlul grosimii stratului depus, se utilizează, de regulă, un senzor de tipul microbalanță cu cristal de cuarț (QCM) ce se plasează în apropierea substratului, Fig. 2.1, [23, 29].

2.2.2. Depunerea straturilor subțiri prin pulverizare catodică tip magnetron

În esență, metoda depunerii prin *pulverizare catodică* constă într-o descărcare luminiscentă într-un mediu inert, Ar, de joasă presiune (10^{-4} - 10^{-1} torr) între doi electrozi. Catodul constituie

sursa (materialul de depus) iar substratul se plasează pe anod sau în spațiul dintre electrozi, Fig. 2.2(a). Se folosește fenomenul de erodare a catodului (sursa) prin bombardarea acestuia cu moleculele ionizate ale gazului din incinta de descărcare. În urma acestui bombardament, sunt ejectate de pe suprafața catodului particule de material, cu energii de ordinul zecilor de eV, care ajung pe substrat. De regulă, tensiunea în timpul descărcării este mai mare de 400 V, iar acest regim se numește "pulverizare fizică". Distribuția grosimii filmului depinde de suprafața electrodului, de distanța dintre electrozi și de tensiunea aplicată. Spre exemplu, în cazul unui catod cu o suprafață de aproximativ 15 cm², o distanță catod-substrat de 2,5 cm și o tensiune de 3500 V, se obține o neuniformitate a grosimii stratului depus de 2 % pentru o suprafață de 7,5 cm², situată în centrul anodului. [27]. Se disting două moduri de obținere a plasmei în care are loc depunerea: descărcare în DC sau în RF.

Depunerea prin *pulverizare catodică în DC* este destinată utilizării unor ținte din material conductor. În acest caz se realizează o descărcare electrică între țintă (catod) și substrat (anod) prin aplicarea unei tensiuni de ordinul 2-5 kV, pentru o presiune a gazului de 1 – 10 mTorr. Ionii pozitivi de Argon, ce bombardează suprafața țintei, sunt accelerați în câmp electric și extrag atomii/moleculele de material din țintă ce vor ajunge pe substrat. Această tehnică nu se poate aplica țintelor din material dielectric întrucât se obține o acumulare de ioni pozitivi pe suprafața țintei [24]. Utilizarea țintelor din material dielectric sau semiconductor este posibilă prin realizarea descărcării în gaz în câmp de radiofrecvență ce ionizează gazul de lucru. Se utilizează surse de putere în RF, cu frecvențe până la 14 MHz. Astfel, într-o primă semialternanță, ionii de gaz sunt accelerați spre suprafața țintei care este încărcată negativ și extrag particule de material din ea. În cealaltă semialternanță, ionii de gaz ce s-au acumulat pe suprafața țintei sunt respinși și accelerați, împreună cu particulele de material, către substrat [24]. Trebuie menționat că metoda ionizării gazului în câmp de radiofrecvență este utilizată și pentru curățarea de oxizi a suprafețelor plachetelor de Si înainte de a se efectua depunerea straturilor. Întrucât atomii/particulele de material au energii cinetice ridicate când ajung pe substrat, metoda pulverizării catodice permite obținerea unor straturi subțiri cu o aderență foarte bună la substrat și cu o rugozitate scăzută comparativ cu metoda evaporării termice în vid. Totuși, metoda suferă de o rată de depunere mai scăzută decât în cazul evaporării termice în vid [1, 24, 27]. În plus, substratul este supus nu numai acțiunii materialului pulverizat dinspre catod ci și bombardamentului electronic. Particulele de energie înaltă, așa numitele "particule fierbinți" cum ar fi electronii- γ , ionii negativi și atomii de recul sunt ejectați de pe suprafața țintei (catodului) prin bombardare cu ioni de Ar⁺ ce prezintă un impuls mare. Aceste particule cu energii cinetice mari bombardează substratul și stratul depus conducând la defecte de structură, variații de compoziție și deteriorarea caracteristicilor structurale și magnetice ale filmelor.

Prin adăugarea unui câmp magnetic în zona catodului, ce forțează particulele încărcate electric (ionii de Ar din plasmă și electronii) să se deplaseze pe traiectorii închise în apropierea acestuia, poate crește densitatea plasmei, se îmbunătățește rata de depunere și calitatea stratului

depus, Fig. 2.2(b). Această variantă se numește *pulverizare catodică tip magnetron* [24, 27]. Se obține o eficiență ridicată în utilizarea țintei și o bună reproductibilitate a parametrilor de depunere.

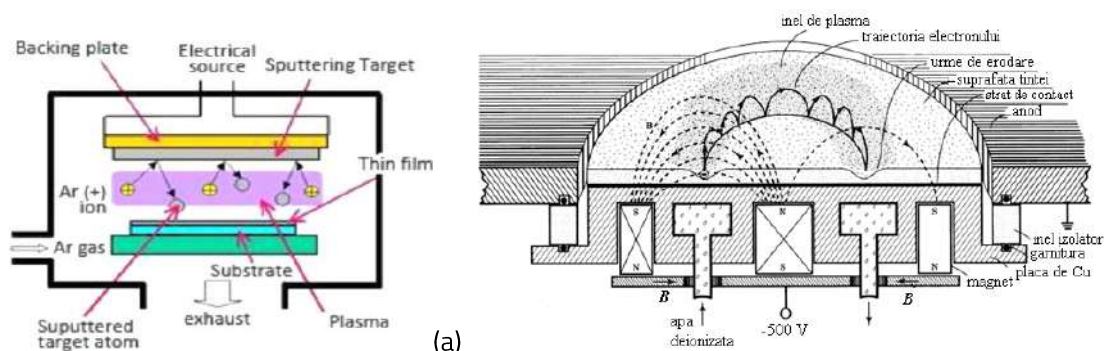


Fig. 2.2. (a) Tehnica depunerii prin pulverizare catodică și (b) sursă de depunere magnetron planară; descărcarea are loc între catod (materialul de depus) și un ecran coaxial, de regulă din inox, legat la masă – anodul – ce înconjoară ținta (adaptat din [1]).

Ca substrat se utilizează sticla amorfă, Al_2O_3 , NaCl monocristalin (clivat), mica, Si sau Si oxidat și altele. Substratul poate fi plasat în diverse zone ale descărcării luminescente, obținând diverse caracteristici ale filmelor depuse. Filmele obținute sunt policristaline.

Aspectul catodului-țintă (sursa) și orientarea liniilor de câmp magnetic stau la baza realizării diverselor tipuri de surse de pulverizare precum magnetron planar sau cilindric [1, 24, 34]. În Fig.2.2(b), este prezentată o secțiune transversală printr-o sursă de depunere DC de tip magnetron planară. Spre deosebire de metoda evaporării termice în vid unde se utilizează o microbalanță cu cristal de cuarț pentru controlul depunerii, Fig. 2.1, metoda pulverizării catodice permite controlul intensității plasmă și, deci, a ratei de depunere, prin controlul puterii consumate în timpul descărcării electrice [1, 34]. Și alți parametri precum, natura materialului țintei, distanța până la substrat sau presiunea din incinta de depunere, influențează rata de depunere dar, uzual, aceștia rămân constanți. Prin urmare, metoda pulverizării catodice tip magnetron asigură o foarte bună reproductibilitate în controlul grosimii straturilor depuse prin controlul timpului cât are loc descărcarea. Obținerea unor filme cu rugozitate scăzută și grosimi precis controlabile (zecimi de nm) reprezintă o cerință fundamentală în controlul cuplajului dintre straturile magnetice separate prin straturi nemagnetice și deci controlul efectelor GMR sau TMR. Grosimea stratului nemagnetic decide tipul interacției, fero- antiferomagnetică dintre straturile magnetice și intensitatea acesteia.

Calitatea filmelor depuse, ce va fi evidențiată prin caracterizări structurale, magnetice și electrice realizate de către autor, este condiționată de gradul de texturare, rugozitatea interfeței și întrepătrunderea dintre straturi la interfață (interface intermixing).

Gradul de texturare depinde de alegerea substratului și a stratului buffer. S-a observat că un strat subțire (buffer) de Ta, Nb, Ti, Zr, Hf, Mo sau W poate induce o puternică texturare (111) filmelor, relativ la substratul utilizat. Caracteristic pentru filmele Ni-Fe-Co cu o textură (111)

este o foarte mică anizotropie magnetocristalină. În plus, s-a observat că o textură (111) este favorabilă pentru a obține un câmp de polarizare maxim la un câmp coercitiv minim în cazul structurilor cu stratul superior polarizat prin interacție de schimb. *Pentru structurile depuse și prezentate în această teză, a fost utilizat Ta ca strat buffer.*

Gradul de rugozitate interfacială și întrepătrunderea dintre straturi este determinată în cea mai mare parte de energia cinetică a atomilor în momentul impactului cu substratul și depinde în principal de presiunea gazului din incintă dar și de distanța sursă-substrat. La *presiuni scăzute* ale Ar, apar regiuni mixte la interfețe (trecerea de la un strat la celălalt nu se face brusc). Pe de altă parte, marea mobilitate a atomilor pe suprafața substratului, duce la obținerea de filme dense, cu rugozitate redusă. La *presiuni mari* ale Ar, interfețele tind să fie abrupte dar, datorită mobilității mici pe suprafață a atomilor, filmele au o structură fibroasă conținând porozități și au un aspect vălurit. Se arată că, o presiune de aproximativ 5 mTorr, reprezintă un bun compromis între cele două extreme prezentate [1, 31].

Dacă se folosesc gaze reactive, precum oxigen, azot, sau H_2S , (Hidrogen sulfurat) în amestec cu Ar (gaz inert), acestea vor reacționa cu materialul țintei și vor forma molecule precum oxizi, nitruri, etc., ce se vor depune pe substrat. Această variantă a metodei de depunere tip magnetron se numește *depunere reactivă* (în regim magnetron) și permite fabricarea de afișaje, celule solare, componente electronice sau funcționalizarea unor suprafețe.

2.3. Rezultate experimentale și discuții

Vor fi prezentate câteva structuri reprezentative obținute în cadrul unor proiecte desfășurate în colaborare cu ICPE-CA București și IMT-București.

2.3.1. Structuri reprezentative depuse prin evaporare termică in vid

Aspectele tratate în acest subcapitol, se regăsesc în [1, 14, 32, 33, 36, 37].

Au fost crescute straturi subțiri de Permalloy, Py, și structuri tip multistrat Py/Cu/Py pe substrat de Si oxidat; Py semnifică Permalloy, adică aliajul $Ni_{80}Fe_{20}$.

Aceste probe au fost obținute în cadrul Institutului de Microtehnologie București pe o instalație Balzers-2000 High Vacuum Deposition. Ca substrat au fost utilizate plachete de Si(100) cu o grosime de 0,5 mm, și dimensiuni $5 \times 10 \text{ mm}^2$. Pregătirea acestora pentru depunere a urmat procesul standard de tăiere și curățare utilizat în tehnica microelectronică. Plachetele au fost decapate chimic într-o soluție de 2% HF. În acest fel pot fi înlăturate micile asperități ce rezultă în urma procesului de tăiere și șlefuire a plachetelor. După pasivare în atmosferă de H se crește un strat de SiO_2 pe suprafața plachetei care apoi este introdusă în instalația de depunere. Presiunea de bază în instalație a fost $2 \cdot 10^{-9}$ torr. După degazarea pereților, a pieselor metalice și a probei la o temperatură mai mare de 200°C s-au depus straturi de Py respectiv structuri Py/Cu/Py din creuzet de Al_2O_3 pentru Py, respectiv de W pentru Cu. Temperatura creuzetului de Al_2O_3 a fost mai mare de 1200°C iar a celui de W mai mare de 900°C . În planul plachetei a

fost aplicat un câmp magnetic de 15 kA/m (aproximativ 200 Oe) pentru a induce o axă de ușoară magnetizare, prin orientarea micro cristalitelor de Py în planul probei. Grosimea a fost măsurată cu un profilometru Talystep. Tot cu acest profilometru s-a efectuat o calibrare inițială a instalației astfel încât să se poată obține straturi de grosimi apropiate celor dorite.

Au fost obținute următoarele probe:

- Si/SiO₂/Py (5 nm)
- Si/SiO₂/Py (10 nm)
- Si/SiO₂/Py (100 nm)
- Si/SiO₂/Py (4 nm)/Cu(t_{Cu})/Py(4 nm), unde t_{Cu}=4, 8 nm
- Si/SiO₂/Py (10 nm)/Cu(4 nm)/Py(10 nm)

Sunt prezentate rezultate reprezentative:

a) Si/SiO₂/Ni₈₀Fe₂₀(5 nm)

Folosind microscopia de forță atomică [1, 36] se poate studia topografia suprafeței straturilor depuse la scară nanometrică. În continuare, vom utiliza acronimul MFA pentru a se evita confuzia cu termenul AFM folosit pentru a descrie stratul antiferomagnetic.

Imaginile de MFA pentru sistemul Si/SiO₂/Py(5 nm), prezentate în Fig.2.3, confirmă modul de creștere în jurul germenilor de condensare al straturilor depuse termic, descris anterior.

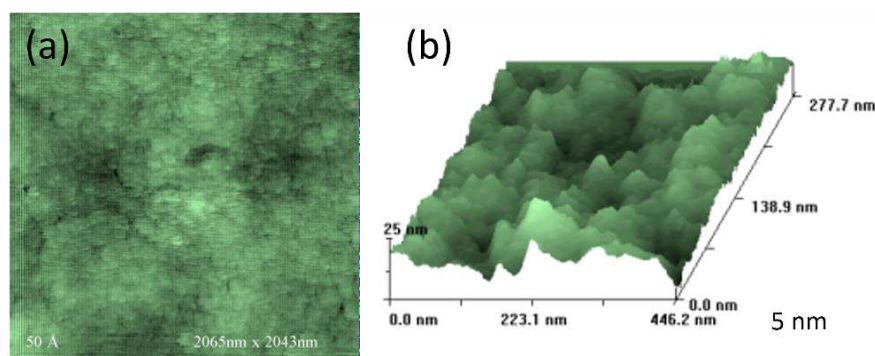


Fig. 2.3. Imagini MFA pentru un strat de Py(5 nm) ce relevă (a) suprafața probei (plan-view) și (b) aspectul tridimensional al acesteia.

Suprafața scanată a fost 2065,4x2043,4 nm². Valoarea maximă a rugozității suprafeței este de 10,7 nm. Valoarea pătratică medie a denivelărilor (rms) este de 1,09 nm iar valoarea medie a rugozității este 0,88 nm. Aceste rezultate sunt în bun acord teoria creșterii straturilor în jurul unor germeni de condensare, așa cum a fost prezentată în [1, 31], rezultând o suprafață rugoasă, cu structuri columnare, în cazul grosimilor mici. Dimensiunile laterale medii ale grăunțurilor sunt de aproximativ 50 nm. Așa cum s-a subliniat în aceste studii, se poate considera că stratul de Py este continuu pentru grosimi de cel puțin 2 nm, în cazul depunerii pe substrat de SiO₂. Pentru Si monocristalin, ca substrat, această grosime critică este de 1 nm. Pentru aceste "grosimi", măsurate folosind microbalanța cu cuarț în timpul depunerii, apare fenomenul de percolare, adică insulițele de Py se unesc. Această grosime critică, t_{OM}, definește așa numitul strat magnetic "mort" ce nu prezintă proprietăți feromagnetice fiind, mai degrabă,

superparamagnetic. Astfel, *grosimea efectivă* a stratului ce prezintă proprietăți feromagnetice bine definite va fi $t_{FM}-t_{OM}$. Din acest motiv, și câmpul de anizotropie uniaxială, H_K , este mai mic în cazul straturilor foarte subțiri decât în cazul straturilor cu grosimi mari.

b) Si/SiO₂/Ni₈₀Fe₂₀(100 nm)

Pentru un strat de Py(100 nm) depus pe substrat de Si oxidat topografia suprafeței scanată cu MFA arată ca în Fig.2.4.

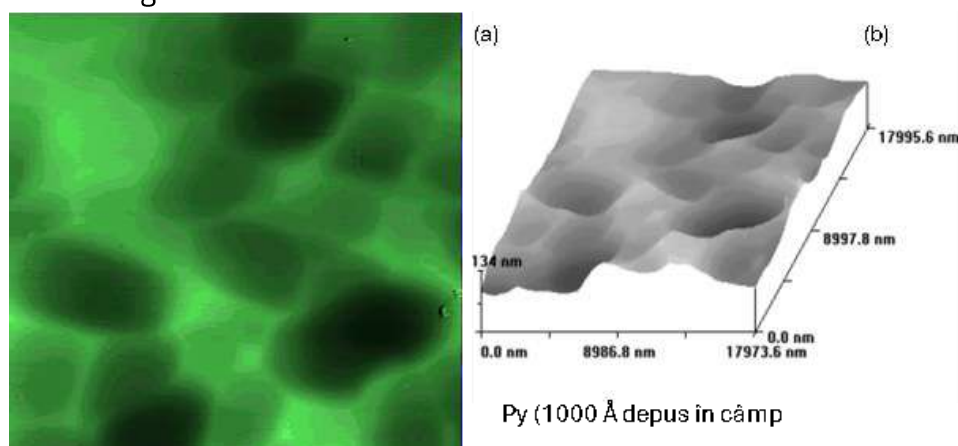


Fig. 2.4. Imagini MFA pentru un strat de Py(100 nm) ce relevă (a) suprafața probei (plan-view) și (b) aspectul tridimensional al acesteia.

În acest caz, pentru o suprafață scanată de 17973.633 x 17995.605 nm² s-a obținut o valoare maximă a rugozității de 133,59 nm. Valoarea pătratică medie a denivelărilor (rms) este de 15,25 nm iar valoarea medie a rugozității este 12,84 nm. Diametrul mediu al grăunților este de 1000 nm. Dacă ne raportăm la grosimea stratului se observă, cum era de așteptat, o scădere a valorii relative a rugozității maxime de la 2,14 la 1,336. La fel, valoarea pătratică medie a denivelărilor (rms) scade de la 0,22 pentru stratul de 5 nm la 0,153 pentru stratul de 100 nm. Cel mai important, suprafața nu prezintă denivelări ascuțite, prezentând un aspect ușor vâluit. Curbele de magnetizare, măsurate cu magnetometrul cu probă vibrantă (VSM), când H este aplicat în planul stratului magnetic, respectiv perpendicular pe suprafață, sunt prezentate în Fig. 2.5(a,b). În Fig. 2.5(c) este ilustrată structura simplificată a unui VSM ce determină, pe cale inductivă, momentul magnetic total al probei ce vibrează în câmpul magnetic aplicat. Tensiunea indusă în sistemul diferențial al bobinelor de detecție este proporțională cu momentul magnetic al probei. Câmpul magnetic aplicat este controlat cu ajutorul unui senzor Hall plasat între polii electromagnetului, în vecinătatea probei. În [1] am prezentat detalii privind modul de funcționare a unui VSM.

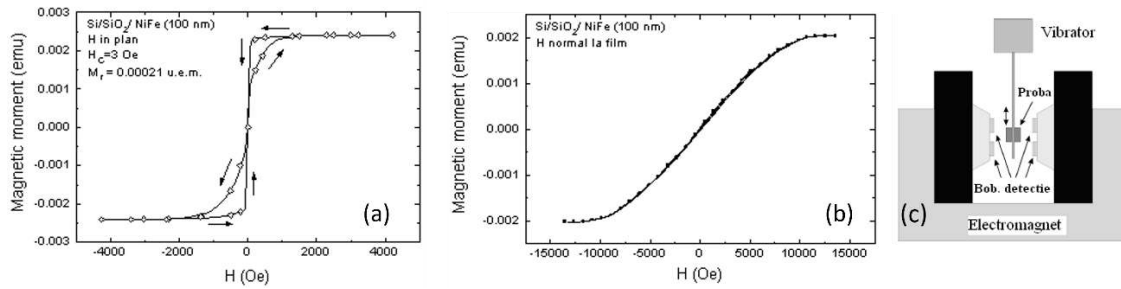


Fig. 2.5. Curba de magnetizare obținută cu VSM pentru un strat de NiFe (100 nm) când (a) H este în planul probei și (b) când H se aplică normal la planul filmului. În (c) este prezentată structura simplificată a unui VSM.

Imaginile de MFA și curbele de magnetizare arată că, la această grosime, stratul magnetic se comportă ca un strat magnetic bine definit, cu suprafețe netede. Spre exemplu, pentru un strat cu dimensiunile $10 \times 10 \times 0,1 \mu\text{m}^3$, coeficienții de demagnetizare sunt în S.I. $(N_x, N_y, N_z) = (0,017; 0,017; 0,966)$. Astfel, pentru un strat cu dimensiunile $5 \times 10 \text{ nm}^2$ și cu grosime de 100 nm, $N_z \approx 1$ ceea înseamnă un câmp de demagnetizare $H_D = -N_z M_S = -800 \text{ kA/m}$ adică 10^4 Oe (1 T în aer), pentru $M_S = 800 \text{ kA/m} = 800 \text{ emu/cm}^3$. Când $H > H_D$ magnetizarea devine perpendiculară pe planul stratului magnetic și se ajunge la saturație, iar pentru $H < H_D$ magnetizarea revine în planul stratului magnetic, Fig. 2.5(b). Astfel, după această direcție, curba $M(H)$ nu prezintă histerezis, fiind asociată cu o axă de grea magnetizare datorită anizotropiei de formă.

Valoarea câmpului coercitiv, când H este aplicat în planul filmului, $H_c = 3 \text{ Oe}$, este ușor mai mare decât cea a materialului în stare masivă, pentru care valoarea câmpului coercitiv se poate situa chiar sub 1 Oe. Valorile sensibil mai mari pentru H_c în cazul straturilor subțiri se datorează, în principal, structurii policristaline a filmului, defectelor structurale și a efectelor suprafețelor/interfețelor neregulate asupra proprietăților magnetice și de conducție.

Ca un comentariu referitor la valoarea câmpului H_c din Fig. 2.5(a), această valoare a fost obținută prin fitarea curbei de magnetizare pe porțiuni, folosind o metodă dezvoltată de autor, [33] iar apoi confirmată din măsurători de efect magnetorezistiv unde se poate face o corelare precisă a procesului de comutare a magnetizării cu forma curbei de efect MR.

Un alt aspect important, referitor la aspectul vălurit al suprafeței, este acela că, în cazul structurilor ML în care straturile FM sunt separate prin strat de Cu, între straturile FM mai apare și un cuplaj magnetostatic pozitiv de tip coajă de portocală. Acest cuplaj poate fi mai important, în cazul straturilor de Cu cu grosimi mai mari de 2 nm, decât cel prin interacție de schimb, așa cum am subliniat în [1] și în studiile privind simularea curbelor de magnetizare [38] publicate de către autor în [37, 39]. În aceste studii a fost propusă o metodă simplă și originală de simulare a curbelor de magnetizare pe baza metodei Stoner–Wohlfarth implementată în simulatorul freeware SimulMag [40]. Cu acest soft sunt simulate, în mod uzual, doar structuri monodomeniale. Astfel, pentru un strat de Py(100 nm), s-a considerat o structură alcătuită dintr-un ansamblu de 12×12 monodomenii magnetice, cu latura de 900 nm și grosime de 100 nm (în realitate este vorba despre elipsoizi de rotație cu axa mare de 900 nm iar axa mică 100 nm). Aceste dimensiuni sunt inspirate din structura tipică pentru un asemenea strat unde diametrul mediu al grăunților este în jur de 1000 nm. Dacă presupunem

că frontierele dintre grăunți nu sunt omogene, în structura simulată a fost introdusă o spațiere, d , între monodomeniile magnetice, Fig. 2.6(a), pentru a testa influența acesteia asupra tăriei cuplajului magnetostatic dintre monodomenii; au fost testate valorile $d=0, 100, 200$ nm.

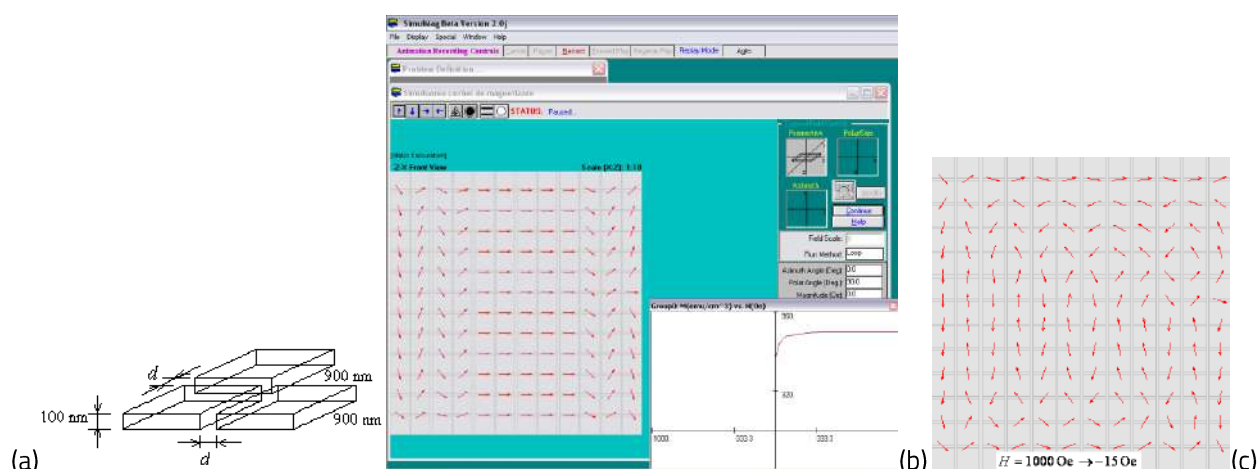


Fig. 2.6 (a) Aranjarea monodomeniilor magnetice în structura simulată, (b) Imagine din timpul simulării efectuate cu programul SimulMag. Este surprins momentul $H=0$, adică starea remanentă și (c) Orientarea momentelor magnetice pentru $H=-15$ Oe. Se observă apariția domeniilor de închidere ce favorizează o stare de energie minimă

Rezultatele simulărilor micromagnetice sunt prezentate în Fig. 2.7 atunci când (a) H este aplicat în planul stratului respectiv, (b) perpendicular pe planul stratului magnetic [37].

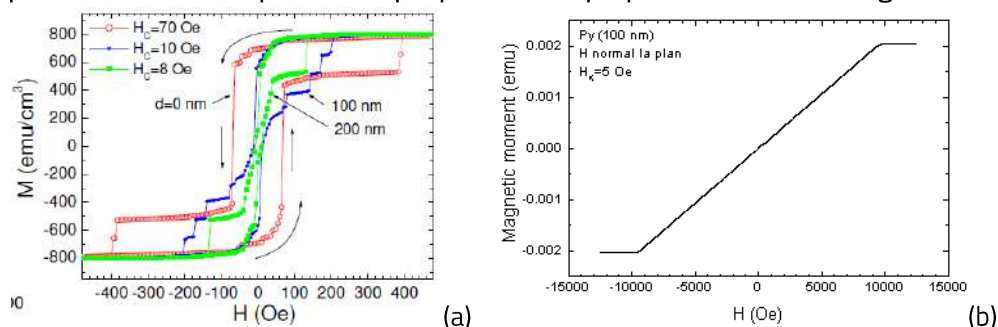


Fig. 2.7. (a) Simulări micromagnetice, cu H în plan, pentru un ansamblu de 12×12 monodomenii magnetice de Py(100 nm) de formă pătrată și latura 900 nm pentru diverse spațieri d între ele. Pentru $d=100$ nm, $H_c=10$ Oe, $M_r/M_s=0,725$ (b) Simularea curbei de magnetizare când H se aplică normal la planul filmului

Când H este în planul filmului magnetic, rezultatele au avut un caracter mai mult calitativ având în vedere că, din măsurătorile experimentale s-a obținut $H_c=3$ Oe și $M_r/M_s=0,09$ iar din simulare $H_c \approx 8-10$ Oe iar $M_r/M_s=0,73$. Aceasta se datorează faptului că în cazul filmelor magnetice de grosimi mari procesele de remagnetizare prin deplasare de pereți de domeniu joacă un rol important. Când H este perpendicular pe suprafața stratului simularea este în acord foarte bun cu Fig. 2.5(b).

În cazul straturilor de grosimi mici (zeci de nm) se pot obține simulări, când H este aplicat în plan, care să fie în bun acord cu rezultatele experimentale.

Astfel, pentru un film de Py(10 nm) se poate considera o structură compusă din 12×12 monodomenii de Py cu dimensiunile $95 \times 95 \times 10$ nm³. Distanța dintre elemente a fost $d=5$ nm,

conform Fig. 2.6(a). Acest model este inspirat, ca și în cazul precedent, de teste structurale, unde s-au obțin dimensiuni ale grăunților cuprinse între 70-100 nm.

Sunt prezentate în Fig. 2.8(a,b), două imagini din timpul simulării, ce arată orientarea momentelor magnetice pentru $H=0$ (starea de magnetizare remanentă) și $H=-15$ Oe (câmp coercitiv).

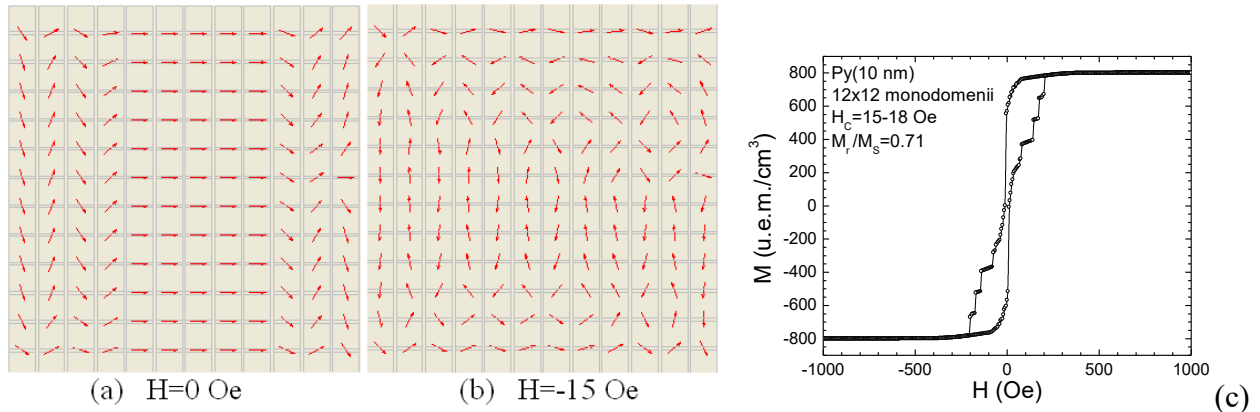


Fig. 2.8. Orientarea momentelor magnetice la (a) $H=0$ și (b) $H=-15$ Oe și (c) Curba de magnetizare simulată [1,37].

Curba de magnetizare din Fig. 2.8(c) este în bun acord calitativ și cantitativ cu măsurători experimentale magnetice și de efect MR ce pot furniza informații despre H_c și raportul M_r/M_s [37]. Valoarea obținută din această simulare pentru H_c este în concordanță foarte bună cu raportările din literatură și cu valoarea obținută din măsurători de efect magnetorezistiv pe straturi de Py(10 nm) așa cum vor fi prezentate în Cap.3.

c) $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(4 \text{ nm})/\text{Cu}(4 \text{ nm})/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(4 \text{ nm})$ și $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(10 \text{ nm})/\text{Cu}(4 \text{ nm})/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(10 \text{ nm})$

Importanța calității structurii ML, decisă în mare parte de calitatea stratului FM, a fost pusă în evidență prin depunerea sistemelor $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(t_{\text{FM}})/\text{Cu}(t_{\text{Cu}})/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(t_{\text{FM}})$ unde $t_{\text{FM}}=4, 10$ nm iar $t_{\text{Cu}}=4$ nm. Figura 2.9 prezintă curbele de magnetizare pentru cele două sisteme multistrat, $t_{\text{FM}}=4, 10$ nm raportate în studiile [1, 32, 37].

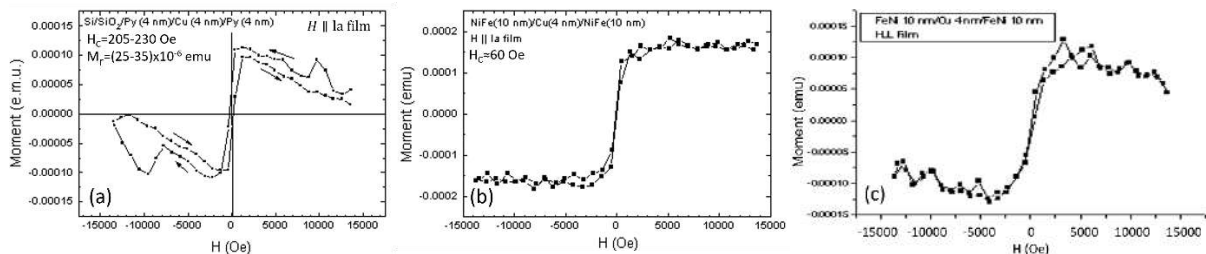


Fig. 2.9. Curbele de magnetizare în plan pentru (a) un ML $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Py}(4 \text{ nm})/\text{Cu}(4 \text{ nm})/\text{Py}(4 \text{ nm})$ și (b) $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Py}(10 \text{ nm})/\text{Cu}(4 \text{ nm})/\text{Py}(10 \text{ nm})$. În (c) este curba de magnetizare pentru același strat (din b) când H este aplicat perpendicular pe suprafața acestuia.

Având în vedere aspectul structurii $\text{NiFe}(5 \text{ nm})$, este de așteptat ca sistemul multistrat $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Py}(4 \text{ nm})/\text{Cu}(4 \text{ nm})/\text{Py}(4 \text{ nm})$ să fie o structură puternic distorsionată, un amestec între straturile de Py și Cu. Acest lucru mărește rata de împrăștiere a electronilor pe grăunți și

interfețele atât de rugoase. Este de așteptat, în acest caz să scadă amplitudinea efectelor galvanomagnetice și valoarea magnetizării comparativ cu structurile multistrat bine definite, cum ar fi Si/SiO₂/Py (10 nm)/Cu(4 nm)/Py(10 nm), Fig. 2.9(b). Pentru acest sistem, valoarea medie a rugozității este de aproximativ 0,9 nm iar dimensiunile medii ale grăunților sunt 15-20 nm. Panta negativă din caracteristicile de magnetizare, la câmpuri mari, din Fig. 2.9(a) se datorează stratului de Cu și substratului de Si ce prezintă o comportare diamagnetică și care, după atingerea saturației pentru stratul feromagnetic, începe să aducă o contribuție importantă la valoarea totală a momentului magnetic.

Din Fig. 2.9(c) se remarcă o valoare surprinzător de mică pentru câmpul de saturație, H_s , dacă ne raportăm la stratul de Py(100 nm), pentru care $H_s=10^4$ Oe. Acest lucru se datorează rugozității stratului ce conduce la o reducere a anizotropiei perpendiculare. În [1] am arătat că se poate corela câmpul de saturație, când H este aplicat normal la suprafață, cu valoarea medie a rugozității filmului și cu dimensiunea medie a grăunților din cristalite. Folosind acest model, am obținut din calcul o valoare $H_s=6,7$ kOe în bun acord cu rezultatul măsurătorii cu VSM din Fig.2.9(c). Astfel, am arătat că, din măsurători ale curbelor de magnetizare se pot trage concluzii referitoare la calitatea structurii filmului magnetic.

În [1, 13, 14, 36, 41] am evidențiat faptul că măsurătorile de efect Hall (când H este normal la suprafața filmului) pot fi folosite pentru a evidenția dependența de câmp a magnetizării din strat și calitatea stratului magnetic. După cum se știe, rezistivitatea Hall în substanțele feromagnetice este o măsură a stării de magnetizare conform relației:

$$\rho_H = R_0 B + R_S \mu_0 M \quad (1)$$

unde ρ_H este rezistivitatea Hall, B este inducția magnetică, M magnetizarea stratului (momentul magnetic total/volum), R_0 este constanta Hall normală iar R_S este constanta Hall extraordinară. Uzual, R_S este mult mai mare (10-100 de ori) decât R_0 astfel că tensiunea Hall poate servi ca o măsură directă a magnetizării stratului magnetic.

Fig. 2.10 prezintă măsurătorile de efect Hall efectuate pe cele două structuri Py/Cu/Py [1, 36, 41]; Py semnifică Permalloy, denumirea sub care este cunoscut aliajul Ni₈₀Fe₂₀.

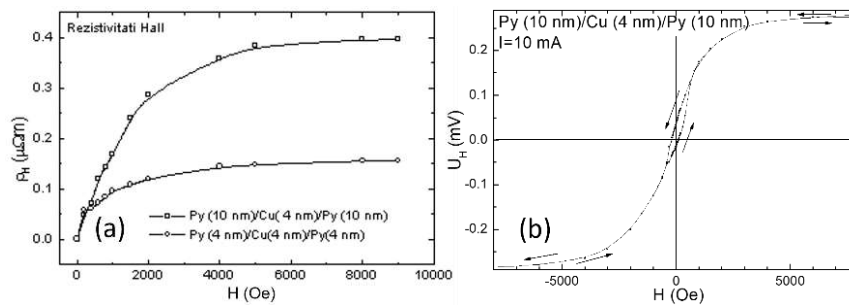


Fig. 2.10. Măsurători de efect Hall pe structurile Si/SiO₂/Py(t_{Py})/Cu(4 nm)/Py(t_{Py}) unde $t_{Py}=4, 10$ nm [1, 36]

Astfel, analiza dependențelor din Fig. 2.10(a) arată că (i) magnetizarea sistemului ML pentru care $t_{Py}=10$ nm este mai mare decât cea a sistemului cu $t_{Py}=4$ nm și (ii) câmpul de saturație

pentru sistemul ML cu $t_{Py}=4$ nm este mai mic. Toate acestea confirmă observațiile anterioare desprinse din analiza imaginilor MFA și a curbelor VSM referitoare la morfologia suprafețelor și calitatea straturilor în sistemele ML în funcție de grosimea straturilor FM depuse prin evaporare termică în vid. Se remarcă, pentru structura ML cu $t_{Py}=10$ nm similitudinea curbelor de efect Hall cu cea a curbei M-H din Fig. 2.9(c), valorile câmpului de saturație a magnetizării din aceste figuri fiind aceleași, aproximativ 6 kOe. Astfel, am arătat că metodele galvanomagnetice pot fi un instrument valoros de caracterizare a proceselor de magnetizare din straturi și nanostructuri magnetice. Ca un aspect interesant, această abordare a permis investigarea unor probe pentru care momentul magnetic al stratului FM este foarte redus iar componenta diamagnetică a substratului, observată la câmpuri ridicate, devine importantă în semnalul VSM. Se remarcă un mic histerezis în curba de efect Hall din Fig. 2.10(b) ce se datorează unei mici componente în plan a câmpului magnetic aplicat. Aceasta produce un proces de comutare a magnetizării în planul structurii ce este pus în evidență de semnalul măsurat. În [42] a fost studiat experimental acest aspect. În plus, a fost simulat micromagnetic răspunsul Hall în condițiile unei abateri de 1° de la normala la plan a câmpului magnetic aplicat și a fost pus în evidență această histereză din Fig. 2.10(b).

În final, sunt prezentate în Fig. 2.11, pentru comparație, curbele de magnetizare măsurată, respectiv simulată, folosind aceeași abordare descrisă mai sus și detaliată în [37, 39]. Curba de magnetizare din Fig. 2.11(a) este obținută prin fitarea datelor din Fig. 2.9(b) [1]. Se remarcă un acord foarte bun între rezultatele experimentale și cele obținute prin simulare.

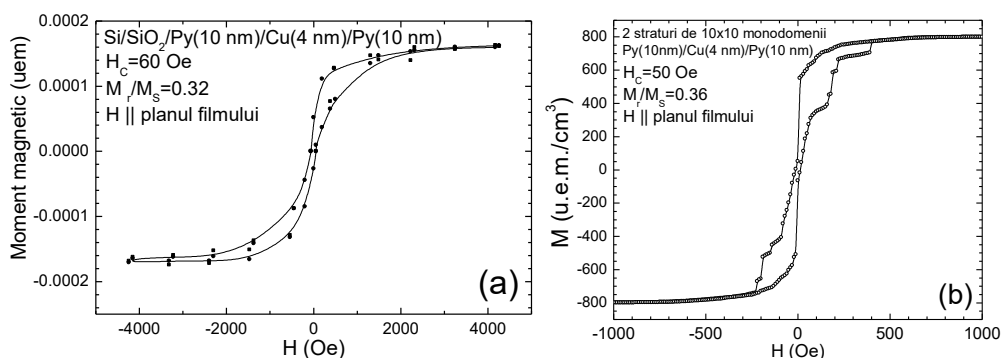


Fig. 2.11. (a) Curba de histerezis pentru $Si/SiO_2/Py(10\text{ nm})/Cu(4\text{ nm})/Py(10\text{ nm})$ măsurată cu VSM și prelucrată și (b) Rezultatele simulării micromagnetice; H este aplicat în planul filmului [37].

2.3.2. Structuri polarizate prin interacție de schimb depuse prin pulverizare catodică

Întrucât asemenea structuri au fost utilizate în studiile prezentate în această teză, vor fi prezentate aspecte fundamentale privind obținerea lor.

Pentru anumite aplicații este necesară orientarea inițială a magnetizării din stratul FM după o anumită direcție. Spre exemplu, senzorii magnetici din cip-urile AFF755 sau AFF756 [3] sau HMC1021S-TR de la Honeywell, au o bobină internă (flip coil) ce realizează această funcție.

Pentru alte aplicații, dezvoltate de autor [43-45], se poate utiliza un câmp magnetic extern de polarizare cu valori ajustabile.

Pe de altă parte, în structurile de tip FM/AFM sau FM/NM/AFM se poate stabili o interacție de schimb între stratul AFM (antiferomagnetic – IrMn, FeMn) și cel feromagnetic ce este responsabilă de orientarea magnetizării din stratul FM în *absența unui câmp magnetic extern* [1, 2, 6].

Tăria acestei interacții de schimb se poate exprima printr-un câmp magnetic denumit H_{pin} (pinning – pentru că fixează momentele magnetice din stratul FM) sau, mai sugestiv, H_{EB} (exchange bias). Valoarea acestui câmp este situată în intervalul 5-100 Oe, depinzând de natura stratului AFM și de grosimea stratului NM, ce uneori este inserat între straturile FM și AFM pentru a controla tăria interacției de schimb la valoarea dorită în funcție de aplicație [2, 6, 46]. Astfel, prezența acestui câmp se traduce printr-o deplasare a curbei de magnetizare după direcția interacției de schimb cu H_{EB} . Direcția acestui câmp poate fi stabilită în timpul depunerii (prin aplicarea unui câmp magnetic de aproximativ 200-1000 Oe) sau după depunere printr-un proces de călire magnetică. Procesul de călire magnetică este ilustrat în Fig. 2.12(a). Stratul este încălzit la o temperatură mai mare decât temperatura Néel a metalului AFM (uzual 200-400 °C), menținut în câmp magnetic de aproximativ 0,1-1 T, timp de 10-30 min iar apoi răcit în câmp magnetic până la temperatura camerei, Fig. 2.12(b). Deplasarea curbei de magnetizare, cu H_{EB} , este prezentată în Fig. 2.12(c). Acest grafic a fost obținut prin simulare micromagnetică [40] pe un strat Permalloy de $1000 \times 1000 \times 10 \text{ nm}^3$.

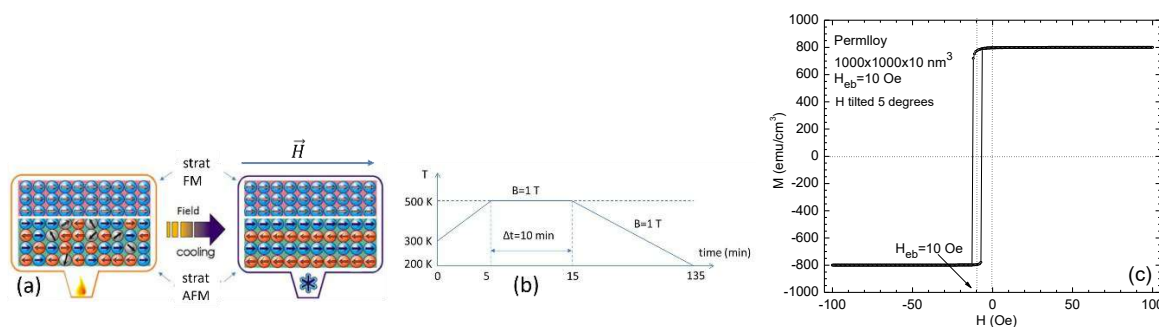


Fig.2.12. (a) Ilustrarea procesului de călire magnetică, (b) graficul procesului de călire termică folosit în cadrul studiilor întreprinse și (c) ilustrarea deplasării curbei de magnetizare cu H_{eb} obținută prin simulare micromagnetică folosind Simulmag [Simulmag].

În cadrul proiectelor 126PED/2017 și 315PED/2020 [15, 16], au fost depuse prin pulverizare catodică tip magnetron DC, structuri Si/SiO₂/Ta(3 nm)/Py(10 nm)/Cu(x)/IrMn(10 nm). Straturile au fost depuse la ICPE-CA București, pe plachete de Si oxidat cu dimensiuni de 5×5 mm², folosind un echipament UHV Magnetron Sputtering ATC2200 AJA INT (USA). Imaginea MFA a stratului de Permalloy dar și curba de magnetizare a stratului, în urma procesului de călire magnetică, sunt prezentate în Fig. 2.13 [47]. Este remarcată o suprafață cu rugozitate mai redusă decât în cazul structurilor depuse prin evaporare termică în vid. Abaterea pătratică

medie a denivelărilor este 0,5 nm. De asemenea, este evidențiată deplasarea curbei de magnetizare cu valoarea câmpului H_{EB} .

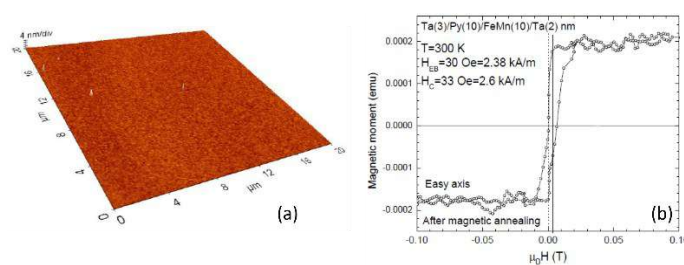


Fig. 2.13. (a) Imaginea MFA pentru stratul de Permalloy 10 nm și (b) curba de magnetizare măsurată cu VSM "7T Mini Cryogen Free Measurement" - Cryogenic LTD de la UTBv [47].

2.3.3. Utilizarea nanofibrelor polimerice dopate magnetic pentru controlul anizotropiei

În final, este prezentată, pe scurt, o *metodă originală de control a anizotropiei magnetice* a straturilor magnetice moi, aceasta fiind subiectul unei propuneri de brevet [Procedeu pentru controlul anizotropiei magnetice în straturi subțiri feromagnetice moi, A/00305 /10.06.2024]. Aceasta constă în depunerea, prin electrofilare, pe suprafața stratului magnetic moale, de nanofibre polimerice în care sunt încorporate nanoparticule magnetice de NiFeO. Depunerea se face în câmp magnetic, rezultând nanofibre dopate magnetic orientate după direcția câmpului magnetic aplicat în timpul depunerii. Acestea induc stratului, prin cuplaj magnetostatic, o anizotropie magnetică uniaxială după direcția câmpului magnetic aplicat în timpul depunerii. Am arătat, prin teste experimentale, că metoda este utilă în cazul straturilor subțiri ce nu prezintă o anizotropie de formă în planul filmului iar anizotropia magnetocristalină este redusă. Ca și polarizarea stratului FM prin interacție de schimb, această anizotropie indusă este legată de efecte de interfață. Cum nanoparticulele magnetice sunt încapsulate în nanofibrele de polimer *nu afectează conductivitatea electrică* a stratului magnetic, așa cum se întâmplă în cazul sistemelor FM/AFM sau FM/NM/AFM polarizate prin interacție de schimb.

2.4. Concluzii

În acest capitol au fost prezentate principalele metode utilizate pentru depunerea straturilor subțiri feromagnetice și a sistemelor multistrat. A fost evidențiată influența metodei de depunere și a structurii asupra proprietăților magnetice ale straturilor depuse. Curbele de magnetizare obținute cu VSM dar și dependențele tensiunii Hall de câmpul magnetic aplicat evidențiază, la rândul lor, această influență.

Folosind o metodă originală, curbele de magnetizare au fost simulate micromagnetic, rezultatele fiind în bun acord cu datele experimentale. Această metodă a fost folosită cu succes și în studii privind simularea unor senzori de rotație [48-50] și detecția nanoparticulelor magnetice folosind senzori GMR și PHE [44, 51-53].

Capitolul 3. Contribuții la studiul efectelor galvanomagnetice în straturi subțiri magnetice

În acest capitol vor fi prezentate contribuții la descrierea aspectelor fundamentale privind principalele efecte galvanomagnetice (efecte MR, efect Hall) ce se pot manifesta în straturi subțiri magnetice sau sisteme multistrat magnetice și care au aplicații directe în senzorială. Simulări micromagnetice, realizate de către autor, vin în completarea celor prezentate iar aceste rezultate vor fi utilizate și în activitățile de modelare a unor senzori magnetici. Conținutul acestui capitol are la bază articolul de review [6], capitolul [2] din Handbook of Nanosensors. Springer, și prezentarea complexă a fenomenelor de conducție în straturi subțiri magnetice din [1] dar și raportări în cadrul unor proiecte de cercetare pe care le-am coordonat. Rezultate experimentale vor fi folosite pentru exemplificare. Și acestea au făcut obiectul unor articole publicate și prezentări la conferințe de specialitate.

Efectele galvanomagnetice specifice sistemelor magnetice nanostructurate (straturi subțiri magnetice simple și multistrat, straturi subțiri nanogranulare) sunt importante nu doar prin prisma dezvoltării unor aplicații practice dar și pentru studiul unor proprietăți fundamentale ale acestor sisteme datorită strânsei legături dintre aceste proprietăți și starea de magnetizare. Această legătură este exploatată în cazul sistemelor nanostructurate, de dimensiuni mili- micrometrice, pentru care este foarte dificil, uneori imposibil, să fie probate anumite proprietăți magnetice folosind metode de investigație inductive precum histerezisgraful, fluxmetrul sau magnetometrul cu probă vibrantă (VSM). Mai mult, contribuția substratului la momentul magnetic total, detectat de către magnetometru, poate masca semnalul util provenit de la structura magnetică. Pentru asemenea sisteme, studiul dependenței de câmp a efectelor magnetorezistive sau a efectului Hall, poate oferi informații importante asupra unor parametri precum câmpul de saturație sau cel coercitiv, orientarea axei de ușoară magnetizare dar și informații mai subtile, precum lățimea/înălțimea barierei de potențial pentru o joncțiune tunel sau rugozitatea stratului magnetic [13, 14, 41]. Spre exemplu, în [54] se arată că se poate determina susceptibilitatea magnetică în AC pentru straturi subțiri de Permalloy, Co sau Ni, pe baza unor măsurători de magnetorezistență anizotropă. Nu în ultimul rând, trebuie menționată importanța testelor de conducție în câmp magnetic pe structuri bidimensionale, cum ar fi structuri grafenice pe care sunt depuse straturi magnetice, pentru a pune în evidență fenomene precum injecția/detecția electronilor cu spin polarizat cu aplicații în dezvoltarea unor noi dispozitive spintronice, precum senzori sau elemente de memorie [9, 10].

3.1. Aspecte generale

Efectul magnetorezistiv (MR) reprezintă o schimbare a rezistivității electrice a unui material plasat în câmp magnetic. Pentru materiale nemagnetice, efectul MR se poate exprima cu relația [1, 6]:

$$MR(H) = \frac{R(H) - R(H=0)}{R(H=0)} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

unde $R(H)$ și $R(H=0)$ reprezintă rezistența materialului pentru un câmp aplicat H , respectiv pentru $H=0$. Având în vedere că, $R = f_g \times \rho$, unde f_g este un factor geometric, vom descrie, în continuare aceste efecte în termeni de variație a rezistenței, deși efectul MR are la origine variația rezistivității în câmp magnetic. Pentru metale nemagnetice, plasate în câmpuri de până la 1 T, amplitudinea efectului MR este mai mare ca zero dar este mai mică de 1 %. Uzual, dependența de câmp a efectului MR urmează o lege pătratică în H sau în B cunoscută ca *legea lui Kohler* [1], descoperită inițial pe cale experimentală. În cazul semiconductorilor amplitudinea efectului MR este mai mare însă este afectată de către variația puternică a rezistivității cu temperatura. Efectul MR, în acest caz, este datorat forței Lorentz care curbează traiectoriile electronilor de conducție și micșorează, în acest fel, parcursul liber mediu al acestora. Din acest motiv efectul MR este maxim când H este perpendicular pe planul probei și deci pe curent. Efectele longitudinale se pot manifesta doar la câmpuri foarte mari (uzual mai mari de 5 T).

Pe de altă parte, pentru *materiale magnetice*, $H=0$ reprezintă starea remanentă ce poate depinde de procesele de magnetizare anterioare. Astfel, pentru materialele magnetice este mai convenabil să fie luată ca valoare de referință valoarea rezistenței la saturație, H_{sat} . Cuantificarea efectului MR, în acest caz, poate fi descrisă cu relația [2, 6]:

$$MR(H) = \left(\frac{R(H) - R(H_{sat})}{R(H_{sat})} \right) \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

3.2. Efectul de magnetorezistență anizotropă și efectul Hall planar

În [1, 2, 6] am documentat pe larg aceste efecte, simulări micromagnetice cât și teste experimentale, pe care le-am realizat, completând aspectele teoretice prezentate. Efectul de *magnetorezistență anizotropă* (AMR) a fost descoperit de către William Thomson (Lord Kelvin) în 1856 și apare în metale feromagnetice 3d în stare masivă sau straturi subțiri din Ni, Co, Fe sau aliaje ce conțin asemenea elemente feromagnetice. Acest efect se datorează dependenței rezistivității electrice (și deci a rezistenței ca valoare măsurabilă) a unui material feromagnetic de unghiul dintre direcția curentului electric și magnetizarea ce se stabilește în material. Efectul este de natură cuantică. Astfel, asimetria orbitei electronilor din banda 3d, datorită cuplajului spin-orbită, conduce la secțiuni de împrăștiere diferite ale electronilor de conducție, din banda 4s, ce se deplasează paralel, respectiv perpendicular, pe direcția magnetizării [1, 2, 6, 55]. Ca o consecință, rezistența electrică are o valoare maximă când curentul, I , este paralel (antiparalel) cu direcția magnetizării, M , și este minimă când curentul este perpendicular pe direcția magnetizării. Astfel, amplitudinea efectului AMR se exprimă [2, 6]:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho_{\perp}} = \left(\frac{\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}}{\rho_{\perp}} \right) \times 100 \quad \% \quad (3)$$

unde $\rho_{||}$ și $\rho_{\perp}$ reprezintă rezistivitățile la saturație când curentul, I , este paralel (antiparalel) cu M respectiv perpendicular pe M .

Pentru materiale precum NiFe, NiCo, NiFeCo, amplitudinea efectului AMR este în jur 5 % pentru variații de câțiva zeci de Oe (1-2 mT în aer) ale câmpului magnetic aplicat. Pentru straturi subțiri, amplitudinea efectului AMR poate atinge valori mai mici, 2-2,5 % pentru NiFe, datorită proceselor de împrăștiere difuză a electronilor pe suprafețele stratului care devin importante în acest caz; tehnica de microfabricație joacă, de asemenea, un rol important [5, 56]. Tehnologia straturilor subțiri și procesele de microfabricație permit obținerea unor structuri de dimensiuni reduse (mm- μ m), cu geometrii adecvate aplicațiilor (în care poate fi exploatată anizotropia de formă) și cu rezistențe suficient de mari, de ordinul sutelor-miilor de ohmi ce pot furniza semnale ușor de interfațat cu un sistem de achiziție de date. Un aspect important, aceste structuri sunt compatibile cu tehnologia circuitelor integrate (IC). Astfel, sensibilitatea crescută în câmp magnetic și simplitatea constructivă, reflectată în prețul de cost scăzut, au generat de-a lungul timpului și încă generează aplicații de senzori magnetici de rotație, magnetometre, sau senzori de curent bazați pe efectul AMR raportate atât ca studii publicate cât și ca senzori comerciali [3, 5, 54, 56-60]. Pot fi menționate, în acest sens, și studii pe care le-am realizat și raportat (i) în cadrul unor contracte de cercetare pe care le-am coordonat respectiv (ii) publicat în reviste ISI cu factor de impact sau în volumele unor conferințe de specialitate precum [15-17, 33, 36, 38, 39, 43, 45]. Așa cum va fi detaliat în continuare, efectul AMR este responsabil de apariția unei tensiuni într-un setup similar celui efectului Hall doar că, în acest caz, câmpul magnetic este aplicat în planul stratului magnetic. Acesta este efectul Hall planar (PHE). Tensiunea ce apare este funcție de unghiul dintre direcția magnetizării și curentul din strat. Un aliaj larg utilizat pentru depunerea de straturi subțiri ce prezintă efectele AMR și PHE este Permalloy ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) datorită bunei sale compatibilități cu substratul de Si, prezentând un efect magnetostrictiv aproape de 0 pentru această compoziție [6]. Acest lucru îl face atractiv și pentru depunerea unor structuri magnetorezistive pe substrat flexibil, chiar și printate [5, 61]. Pentru a descrie aceste efecte magnetorezistive, am considerat un strat subțire magnetic, de formă dreptunghiulară, de lungime l , lățime w și grosime t (după axa z), unde sunt ilustrate câmpurile implicate în descrierea comportării magnetice și a efectelor magnetorezistive. Este prezentat și modul tipic de conectare pentru a pune în evidență efectele AMR și PHE, Fig. 3.1(a) [2, 6, 16].

În aceste structuri se definește o axă de ușoară magnetizare, caracterizată prin constanta de anizotropie uniaxială K_u (sau prin câmpul de anizotropie H_k) ce se datorează anizotropiei magnetocristaline a stratului, a tensiunilor interne din strat, a tehnicii de depunere/călire magnetică, etc. Un alt parametru important, ce uneori este definitoriu, îl constituie anizotropia de formă ce forțează magnetizarea să rămână în planul stratului, cu orientare preferențială după axa lungă a structurii, atunci când $l \gg w \gg t$, Fig. 3.1(a); t reprezintă grosimea stratului, de-a lungul axei z . Spre exemplu, am arătat că, pentru un strat ($l \times w \times t$) = (1000 nm $\times$ 500 nm $\times$ 100 nm), coeficienții tensorului de demagnetizare sunt $(N_x, N_y, N_z) = (0,0834; 0,172; 0,7443)$ în timp

ce, pentru $(l \times w \times t) = (1000 \text{ nm} \times 500 \text{ nm} \times 10 \text{ nm})$, adică grosime $t = 10 \text{ nm}$, avem $(N_x, N_y, N_z) = (1,5487\text{E-}02, 3,2626\text{E-}02, 0,9518883)$ în S.I. Astfel, pentru aceste structuri, cu grosimi foarte mici, sub 100 nm , magnetizarea se plasează, în mod natural, în planul filmului, datorită anizotropiei de formă ce este responsabilă pentru un coeficient de demagnetizare după axa Oz (perpendiculară pe plan), foarte apropiat de 1 ($N_z \approx 1$). Astfel, pentru structura prezentată, axa Ox devine axă de ușoară magnetizare iar problema poate fi redusă la una bidimensională. O excepție notabilă o constituie straturile foarte subțiri de Co ($t < 10 \text{ nm}$) unde structura cristalină generează o puternică anizotropie magnetocristalină perpendiculară pe planul stratului, ce este exploatată în aplicații în sisteme de stocare a datelor.

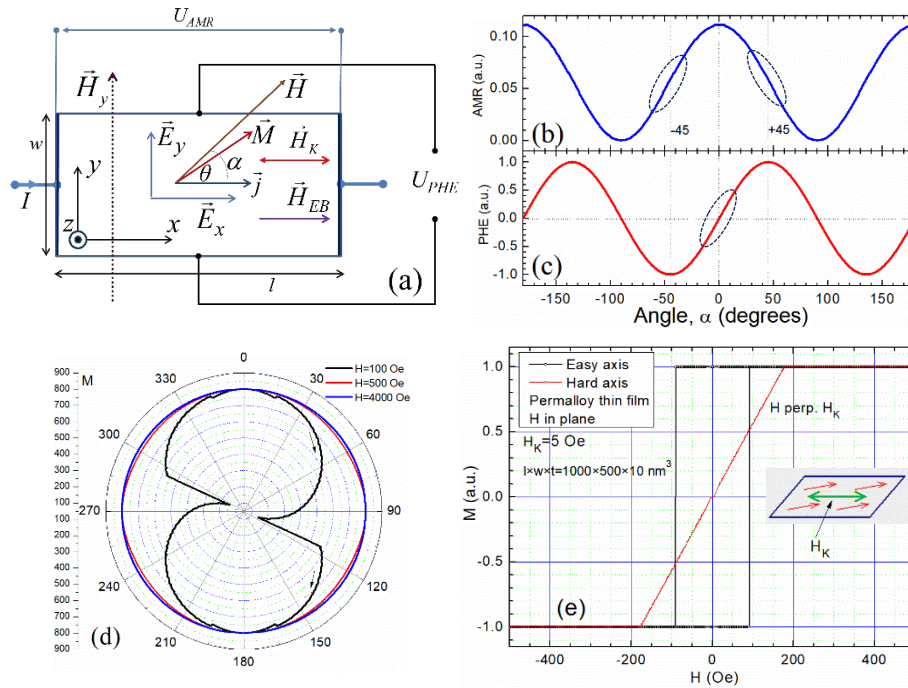


Fig. 3.1. (a) Structura schematică a unui strat subțire FM unde sunt prezentate câmpurile implicate în explicarea fenomenelor AMR și PHE, precum și modurile de contactare pentru evidențierea acestor semnale, (b, c) dependențele de unghiul α ale efectelor AMR și PHE (d) dependențele magnetizării (de-a lungul câmpului H) de unghiul α pe care îl face un câmp magnetic rotitor $H = 100, 500$ respectiv 4000 Oe , cu direcția curentului din strat și (e) curbele de magnetizare din strat după axa ușoară, respectiv axa grea de magnetizare; dependențele b-e sunt obținute prin simulare micromagnetică (adaptată după [6]).

Revenind la modelul prezentat, sub acțiunea câmpului magnetic H , magnetizarea va fi localizată în planul stratului și va face un unghi θ cu direcția curentului. În strat este aplicat un curent după axa Ox, exprimat prin densitatea de curent $\vec{j}$, de regulă paralel cu axa lungă și deci, cu $\vec{H}_K$. Uzual, câmpul magnetic extern se aplică în planul stratului magnetic (i) perpendicular pe direcția curentului (după axa Oy) sau (ii) după un unghi α față de direcția curentului, Fig. 3.1(a) [6, 7, 56]. Prima variantă este utilizată pentru aplicații de *detecție a câmpului magnetic*, iar a doua pentru aplicații de *senzori de rotație*, când un câmp magnetic constant, rotitor, face diverse unghiuri cu direcția curentului din strat [39, 49, 50].

Câmpurile longitudinal, E_x , și transversal, E_y , se pot obține considerând dependența de unghiul θ a componentelor ρ_{xx} și ρ_{xy} ale tensorului rezistivității electrice [2, 6, 7, 62]:

$$\vec{E} = \rho \vec{j} \quad ; \quad \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{xx} & \rho_{xy} \\ \rho_{xy} & \rho_{yy} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} j_x \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

unde $\rho_{xx} = \rho_{\perp} + (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \cos^2 \theta$, $\rho_{xy} = (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \sin \theta \cos \theta$ (5)

iar $\rho_{\parallel}$ și $\rho_{\perp}$ reprezintă rezistivitățile când curentul este paralel (sau antiparalel) respectiv perpendicular pe direcția magnetizării.

Termenul $\Delta\rho = \rho_{\parallel} - \rho_{\perp}$ reprezintă amplitudinea efectului de magnetorezistență anizotropă și decide amplitudinea efectelor AMR și PHE din structură.

Astfel:

$$E_x = j_x \rho_{xx} = j_x \rho_{\perp} + j_x (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \cos^2 \theta, \quad (6)$$

$$E_y = j_x \rho_{xy} = j_x (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \sin \theta \cos \theta \quad (7)$$

Variația componentei longitudinale a rezistivității, ρ_{xx} , măsurată prin $U_{AMR} = E_x \times l$, caracterizează efectul AMR. Astfel, variația rezistenței, ca valoare măsurabilă și care descrie acest efect, este exprimată prin

$$R(\theta) = R_{\perp} + \Delta R_{AMR} \cos^2(\theta) \quad (8)$$

unde $\Delta R_{AMR} = R_{\parallel} - R_{\perp}$ reprezintă amplitudinea efectului AMR (în termeni de rezistență electrică); $R_{\parallel}$, $R_{\perp}$ reprezintă rezistențele structurii atunci când $\theta = 0$ sau $\pi/2$ respectiv.

E_y , ec. (7), reprezintă un *semnal perpendicular pe direcția curentului*, măsurat într-un setup tipic pentru efectul Hall, Fig. 3.1(a), dar în care câmpul magnetic este aplicat în planul filmului. Acesta este semnalul de *efect Hall planar*, U_{PHE} , care se exprimă prin [1, 6]:

$$U_{PHE} = I \frac{(\rho_{\parallel} - \rho_{\perp})}{t} \sin \theta \cos \theta \quad (9)$$

Dependențele efectelor AMR și PHE de câmpul magnetic aplicat, ec. 6-9, pot fi obținute știind valoarea unghiului $\theta(H)$ care reprezintă orientarea la echilibru a magnetizării în stratul subțire feromagnetic (sensing layer).

Așa cum am arătat în [6], valoarea unghiului θ se poate calcula din condiția de minimum a energiei libere, E_M [63]:

$$E_M = K_u \sin^2 \theta - M_s H \cos(\alpha - \theta) - M_s H_{EB} \cos(\beta - \theta) \quad (10)$$

unde K_u este constanta de anizotropie uniaxială, $H_K = 2K_u/M_s$, M_s magnetizarea la saturație iar H_{EB} este *câmpul de polarizare prin interacție de schimb* (unidirecțional) ce acționează ca un *câmp magnetic de polarizare aplicat stratului sensibil feromagnetic*. Acest tip de interacție se

stabilește la interfața dintre un strat FM și unul AFM. β este unghiul dintre H_{EB} și H_K . Uzual, în aplicații de senzorială, $\beta=0$. Astfel, în câmp magnetic 0, M este paralelă la direcția curentului. Ca un dezavantaj, acest tip de polarizare prin interacție de schimb, care implică prezența unor straturi NM și AFM, conduce la efecte de șuntare a stratului FM și, pentru a controla tăria acestei interacțiuni, este necesar controlul deosebit de precis (la nivel de 0,1 nm) a grosimii stratului NM inserat între cel FM și AFM [46].

Poziția la echilibru a magnetizării, din Fig. 3.1(a), a fost calculată din condiția de minim a energiei, $dE_M/d\theta = 0$, în care am utilizat un model semi-analitic Stoner-Wohlfarth (SW) implementat în SimulMag (<https://math.nist.gov/oommf/contrib/simulmag/>). SimulMag este un soft gratuit, cu o interfață grafică prietenoasă, ce implementează cu succes modelul SW pornind de la sisteme simple, precum un strat subțire sau sistem multistrat până la sisteme mai complexe, aranjate în grupuri precum straturi magnetice, magneți permanenți, trasee conductoare, etc., pentru care poate evalua interacția dintre acestea [6, 37, 39, 64].

Fig. 3.1(b, c) prezintă dependențele de unghiul α dintre câmpul magnetic rotitor H și direcția curentului, pentru efectele AMR și PHE, respectiv. Aceste reprezentări [6], ce au un caracter calitativ, au fost obținute utilizând SimulMag într-o aproximație monodomenială pentru un strat de Permalloy cu $l \times w \times t = 1000 \times 500 \times 10 \text{ nm}^3$, $M_s = 800 \text{ emu/cm}^3$ și un câmp de anizotropie uniaxială $H_K = 5 \text{ Oe}$ orientat după axa Ox . În aceste simulări, a fost considerat un câmp rotitor $H = 4000 \text{ Oe}$. Fig. 3.1(d) arată că, pentru un câmp suficient de mare, adică mai mare decât *câmpul efectiv de anizotropie*, ce include și anizotropia de formă, M urmează fidel orientarea câmpului aplicat, adică $\theta = \alpha$. Acest rezultat sugerează aplicarea efectelor AMR și PHE la construcția senzorilor de rotație [3, 4, 39, 49, 50, 65]. Valoarea câmpului efectiv de anizotropie, în jur de 155 Oe pentru această structură, se poate estima din analiza curbelor de magnetizare din strat după axa ușoară, respectiv axa grea de magnetizare, Fig. 3.1(e), și arată importanța anizotropiei de formă.

Pentru aplicații de detecție a câmpului magnetic, H se aplică după axa Oy , *adică perpendicular pe direcția de ușoară magnetizare* și produce variații ale semnalelor AMR și PHE corespunzătoare *rotației magnetizării* în intervalul $\theta = \pm 90^\circ$, Fig. 3.1(b-c).

În Fig. 3.2(a,b) sunt prezentate dependențele efectelor AMR și PHE de câmpul H (aplicat după axa Oy), obținute prin simulare micromagnetică în condițiile prezentate mai sus, pentru o structură $l \times w \times t = 1000 \times 800 \times 10 \text{ nm}^3$ și raportate în [6]. Simulările au fost rulate pentru două valori ale câmpului de polarizare, $H_{bias} = 0, 10 \text{ Oe}$, aplicat după axa Ox . Aceste rezultate sunt în bun acord cu [7, 56, 66].

Caracteristica de câmp a semnalului PHE când H este *paralel la direcția curentului*, simulată micromagnetic, este prezentată în Fig. 3.2(c). Aceasta prezintă *variații abrupte în zona câmpului de comutare* iar *caracteristica este centrată pe valoarea câmpului de polarizare*. Prin studiile efectuate, validate prin experimente și raportate în [44, 45, 51] am arătat că procesul de comutare a magnetizării în acest regim poate fi foarte sensibil la diverse perturbații, precum prezența nanoparticulelor magnetice (NPM) pe suprafața structurii, cu aplicații în biodetecție.

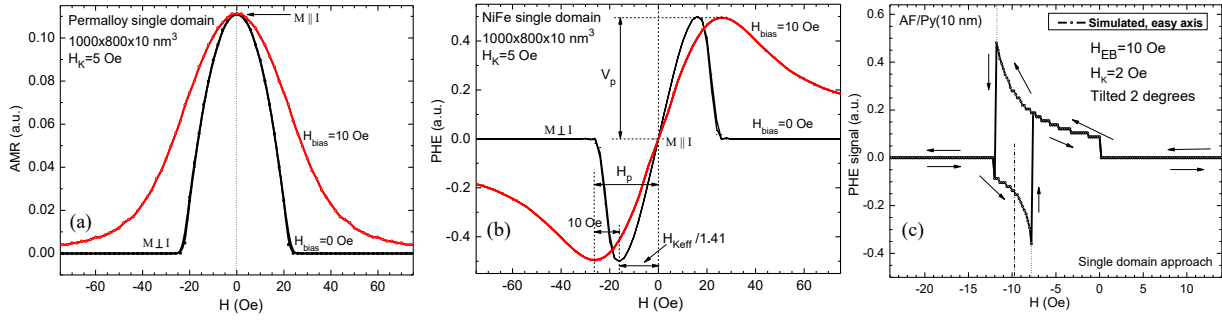


Fig. 3.2. Dependințele de câmpul aplicat, H , obținute prin simulare micromagnetică pentru (a) semnalul AMR (b) semnalul PHE când H este aplicat după axa de grea magnetizare [6] respectiv, (c) după axa de ușoară magnetizare. Se remarcă influența câmpului de polarizare H_{bias} asupra acestor caracteristici. H_{bias} poate fi generat de o sursă externă de câmp sau poate fi H_{EB} în cazul structurilor AFM/FM sau FM/NM/AFM.

Comparând rezultatele simulărilor efectuate și prezentate din Fig. 3.1(b-d) și Fig. 3.2, se pot trage câteva concluzii utile în dezvoltarea senzorilor magnetici: (i) sensibilitatea efectului AMR în jurul câmpului magnetic 0 (care se poate traduce și prin $\theta = 0$) este foarte mică (practic este 0 la $H=0$) pe când răspunsul semnalului PHE este linear în jurul câmpului magnetic 0 cu o sensibilitate constantă; (ii) semnalul AMR este *unipolar* cu o dependență pătratică de câmp iar semnalul PHE este *bipolar* atât pentru dependența de câmp cât și pentru cea de unghi; (iii) aplicarea unui câmp de polarizare H_{bias} (sau existența câmpului H_{EB}) de-a lungul axei de ușoară magnetizare, poate ajusta caracteristicile de răspuns pentru semnalele AMR și PHE.

Un parametru important, câmpul H_p , Fig. 3.2(b), reprezintă valoarea maximă a câmpului magnetic aplicat pentru care senzorul PHE produce un semnal util, de amplitudine maximă. Conform ecuației (9), ce descrie efectul Hall planar, unghiul de rotație a magnetizării, pentru care se obține un semnal maxim în amplitudine, este $\theta = \pm 45^\circ$. H_p este legat de câmpul efectiv de anizotropie și de câmpul de polarizare prin relația [6]:

$$H_p = H_{EB} + H_{Keff}/\sqrt{2} \quad (11)$$

Deci, prin ajustarea valorilor câmpurilor H_K , H_{EB} (sau H_{bias}) și a anizotropiei de formă, se pot obține structuri cu sensibilități și valori ale intervalului câmpului aplicat ($2 \cdot H_p$) dorite. Pe de altă parte, așa cum se vede din Fig. 3.2(b,c), pe lângă utilizarea în domeniul senzorilor, efectul Hall planar poate fi un instrument util în caracterizarea pe cale electrică a straturilor subțiri magnetice, permițând obținerea de informații privind valoarea câmpului de comutare a magnetizării și de saturare, a câmpului de anizotropie magnetică și tăria polarizării prin interacție de schimb, H_{EB} (dacă este prezentă) Această proprietate a fost exploatată în studii pe care le-am realizat.

Aproximația monodomenială oferă informații importante privind efectele galvanomagnetice din straturile subțiri magnetice, în special în cazul structurilor de dimensiuni (sub)micrometrice și caracterizate printr-o *anizotropie de formă ridicată* utilizate pentru aplicații de senzori [63, 66] și elemente de memorie [1, 6]. Totuși, în structurile reale, de dimensiuni macroscopice,

procese de magnetizare și efectele magnetorezistive pot fi afectate de histerezis întrucât acestea nu sunt monodomeniale chiar și în ipoteza unei anizotropii uniaxiale ridicate. În plus, aproximația monodomenială nu poate explica procesul de detecție a NPM și dependența acestuia de poziția NPM pe suprafața senzorului, așa cum a fost evidențiat în [44, 52, 53]. În plus, așa cum am arătat în [39,48-50], această abordare permite descrierea comportării senzorilor de rotație realizați din straturi subțiri feromagnetice [65].

În [17, 67] am prezentat rezultate privind simularea micromagnetică a efectului Hall planar (PHE) în straturi feromagnetice polarizate prin interacție de schimb, în care mecanismele complexe de comutare a magnetizării și structura de domenii magnetice pot fi evidențiate. Simulările micromagnetice au fost realizate cu programul LLg Micromagnetics Simulator v.4 [6, 62, 68] care implementează numeric rezolvarea ecuației Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) ce descrie dinamica unui ansamblu de momente magnetice ce interacționează între ele [69]:

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma \vec{M} \times \vec{H}_{eff} + \frac{\alpha}{M_s} \vec{M} \times \frac{d\vec{M}}{dt} \quad (12)$$

unde α este coeficientul de amortizare Gilbert, γ este factorul giromagnetic iar M_s este magnetizarea la saturație.

Câmpul efectiv din interiorul stratului este compus din câmpul extern aplicat, H_{ext} , câmpul de demagnetizare, H_d , H_{EB} câmpul de polarizare prin interacție de schimb iar H_K este câmpul de anizotropie [68, 69]:

$$\vec{H}_{eff} = \vec{H}_{ext} + \vec{H}_d + \vec{H}_{EB} + \vec{H}_K \quad (13)$$

a) Simularea pe cale micromagnetică a PHE pentru o structură de formă pătrată

Stratul magnetic, este din Permalloy, cu dimensiunile 500x500x10 nm³. Parametrii utilizați pentru simulare sunt: $M_s=710$ kA/m (710 emu/cm³), constanta de schimb $A = 1.3 \times 10^{-11}$ J/m, constanta de anizotropie $K_u=500$ J/m³, $H_{EB}=150$ Oe; $T=0$ K; celula de discretizare: 10x10x10 nm³. Condiția de convergență a fost menținută la 1×10^{-4} [68]. Între K_u și H_K este relația: $H_K=2K_u/M_s=14$ Oe. În general, simulatoarele micromagnetice modelează structuri la 0 K adică nu sunt considerate fluctuațiile termice. Acestea îngreunează obținerea convergenței soluției mai ales în cadrul structurilor cu un număr mare de spini magnetici. De asemenea, în general nu sunt simulate structuri mai mari de 2x2 μm² întrucât timpul de simulare crește foarte mult fără a obține informații fundamentale diferite privind procesele de magnetizare.

Fig. 3.3 prezintă rezultatele simulării micromagnetice când H este aplicat după axa de grea magnetizare.

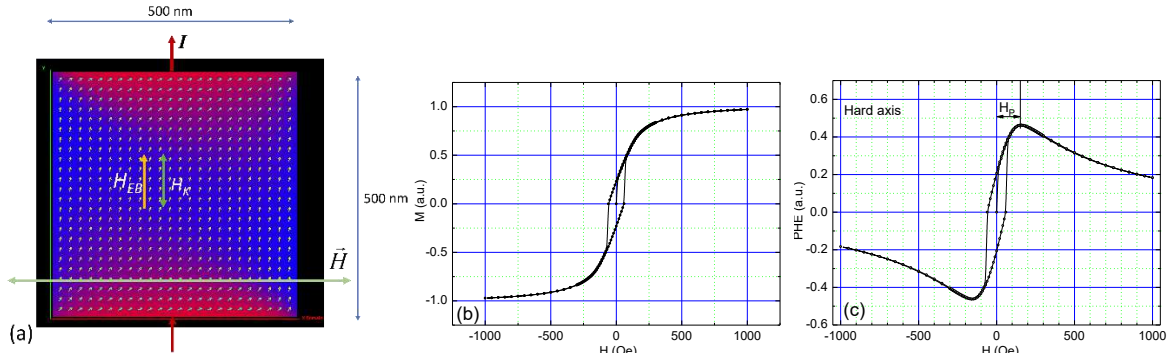


Fig. 3.3. (a) Structura simulată pentru $H=0$ (b) curba de magnetizare și (c) semnalul PHE calculat când H este aplicat după axa de grea magnetizare

Se remarcă, spre deosebire de simularea pe o structură monodomenială, un ușor efect de histererez datorat structurii complexe de momente magnetice, interacției de schimb și lipsei anizotropiei de formă.

Fig. 3.4 prezintă rezultatele simulării micromagnetice când H este aplicat după axa de ușoară magnetizare din strat.

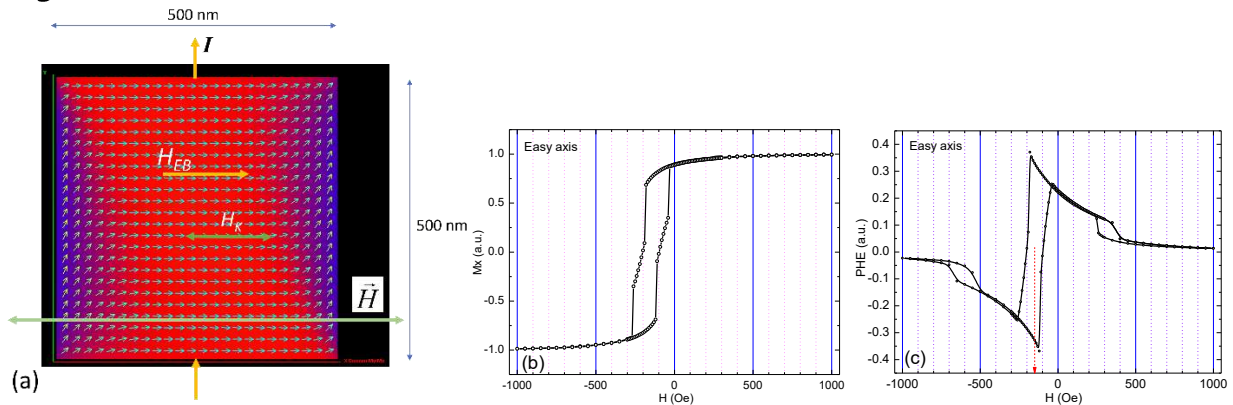


Fig. 3.4. (a) Structura simulată în starea inițială, la $H=0$ (b) curba de magnetizare și (c) semnalul PHE calculat când H este aplicat după axa de ușoară magnetizare

În ambele cazuri, semnalul PHE este calculat prin estimarea unghiului θ folosind valorile componentelor în plan, M_x și M_y furnizate de către simulator. Se remarcă, în Fig. 3.4(b,c), procesul abrupt de comutare a magnetizării datorat, mai degrabă, deplasării de pereți de domenii decât procesului de rotație reversibilă a momentelor magnetice, Fig. 3.3(b,c). De asemenea, se observă că, din dependențele tensiunii PHE de H , se pot obține informații precum câmpul coercitiv, H_{EB} și valoarea câmpului ce definește zona de utilizare, $H_p=160$ Oe – în bun acord cu formula 11 [6].

b) Senzor PHE sub formă de cruce

Aceasta este geometria des utilizată în aplicații de detecție a câmpului magnetic sau a NPM. Fig. 3.5(a) prezintă dimensiunile structurii simulate în condițiile deja prezentate. În Fig. 3.5(b) sunt prezentate dependențele de câmp ale magnetizării și PHE obținute prin simulare micromagnetică când H este aplicat după axa de grea magnetizare.

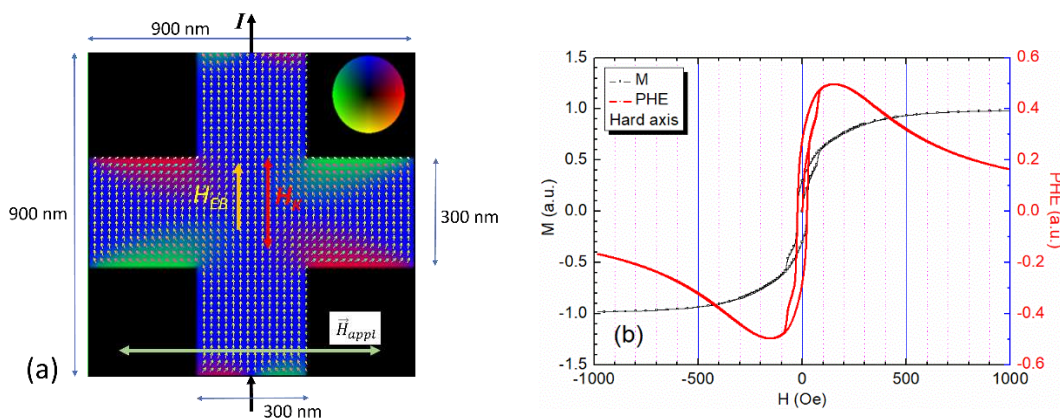


Fig. 3.5. (a) Structura simulată în starea inițială, la $H=0$ și (b) curba de magnetizare și semnalul PHE calculat când H este aplicat după axa de grea magnetizare

Rezultatele prezentate în Fig. 3.5(b) scot în evidență importanța anizotropiei de formă indusă de brațele structurii în micșorarea efectelor de histerezis magnetic.

3.2.1. Caracteristici experimentele reprezentative ale efectului AMR și discuții

În [1, 15, 16] am documentat pe larg metodele electrice utilizate pentru studiul fenomenelor galvanomagnetice în straturi subțiri feromagnetice. Vor fi prezentate caracteristici experimentale obținute pe structuri reprezentative și raportate în articole sau în cadrul unor conferințe de specialitate.

I. Aspecte introductive

Având în vedere dimensiunile sistemelor investigate, în special grosimea stratului magnetic, tehnicile de măsură necesită precauții speciale în ceea ce privește realizarea contactelor electrice, geometria de măsură și valorile maxime ale curenților prin structură. Ca un numitor comun, pentru a putea asigura măsurători de precizie care să poată pune în evidență și cele mai mici variații ale mărimilor electrice investigate, am folosit metoda celor patru contacte ce permite eliminarea semnalelor perturbatorii datorate rezistentelor de contact, rezistențelor firelor de conexiune, etc. Pentru experimente, au fost folosite două tipuri de geometrii: contacte dispuse în linie și contacte dispuse în colțurile unui pătrat (metoda van der Pauw).

În cazul straturilor subțiri ce au fost depuse fără utilizarea unor măști cu geometrii specifice, au fost tăiate, după depunere, plachete dreptunghiulare cu lungimi de 5-10 mm și lățimi de 2-5 mm sau plachete pătrate cu dimensiuni aproximative de $5 \times 5 \text{ mm}^2$. În aceste cazuri au fost folosite fire de Au sau Cu lipite pe strat cu pastă de Ag. În cazul unor structuri circulare, obținute prin metode de microfabricație, pe stratul magnetic au fost depuse pad-uri din Au la care au fost, mai apoi, atașate firele de conexiune. Fig. 3.6. prezintă, schematic, modul de conectare folosind metoda celor patru contacte dispuse în linie [1, 5]. La acestea, au mai fost adăugate încă două contacte pentru caracterizări de efect Hall. Curentul prin strat nu este mai mare de 10-20 mA acesta fiind asigurat de surse de curent dedicate – realizate în laborator [1] sau

surse de curent programabile, precum Keithley 6221. Măsurarea tensiunii s-a făcut cu nanovoltmetrul Keithley 2182A.

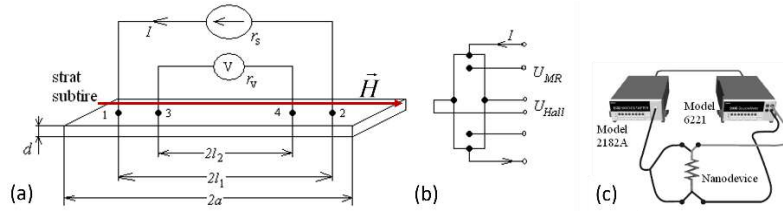


Fig. 3. 6. (a) Amplasarea contactelor în cadrul metodei celor patru contacte dispuse în linie și (b) amplasarea contactelor suplimentare pentru măsurători de efect Hall și (c) schema de principiu de conectare

Sursa programabilă asigură o impedanță de ieșire de $10^{14} \Omega$ și controlează curenți DC/AC cuprinși în intervalul 100 fA – 100 mA astfel încât permite realizarea de măsurători cu disipare minimă de energie pe sistemul de investigat. Nanovoltmetrul măsoară tensiuni flotante cu o rezoluție de 7 digiți și o sensibilitate de 1 nV. El asigură o impedanță de intrare de 10 G Ω .

Tehnica van der Pauw utilizează, de asemenea, metoda celor patru contacte plasate pe marginile unei probe plane ce poate avea o formă arbitrară însă, uzual, aceasta este *pătrată* sau *circulară*. În cazul straturilor magnetice această tehnică prezintă avantajul că permite investigarea facilă a efectului AMR și PHE, așa cum se remarcă din Fig. 3.7(a-c) fără a fi nevoie ca proba să fie rotită în câmp. De asemenea, în acest setup, se pot efectua și măsurători de efect Hall atunci când câmpul magnetic este aplicat perpendicular pe planul filmului. Așa cum se observă, configurația din Fig. 3.7(c) oferă acces direct la componenta anizotropă a efectul MR, fiind un setup tipic pentru PHE [1, 70].

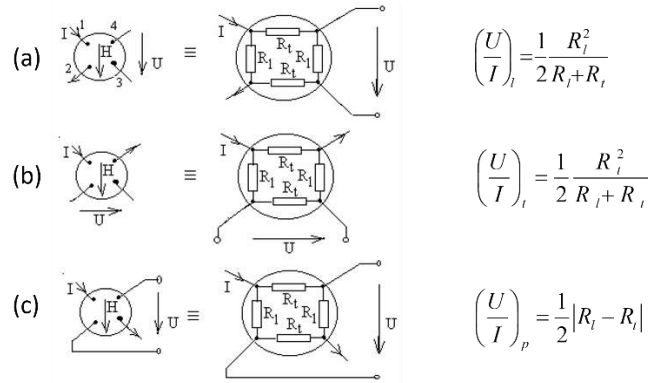


Fig. 3. 7. Schema de măsură în configurație van der Pauw ce permite punerea în evidență a efectului de MR (a) longitudinal, (b) transversal și (c) a efectului de magnetorezistență anizotropă; adaptat după [70].

Astfel, folosind configurațiile din Fig. 3.7, se pot calcula rezistențele R_l și R_t folosind expresiile [1, 70]:

$$R_l = 2 \cdot \left[\left(\frac{U}{I} \right)_l + \sqrt{\left(\frac{U}{I} \right)_l \left(\frac{U}{I} \right)_t} \right] \quad (14)$$

$$R_t = 2 \cdot \left[\left(\frac{U}{I} \right)_t + \sqrt{\left(\frac{U}{I} \right)_l \left(\frac{U}{I} \right)_t} \right] \quad (15)$$

II. Teste pe structuri de tipul $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(10 \text{ nm})$ și $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(10 \text{ nm})/\text{Cu}(4 \text{ nm})/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(10 \text{ nm})$

Aceste structuri au fost depuse prin evaporare termică în vid pe plachete din $\text{Si}(100)$ oxidat, cu diametrul de 4 inch, așa cum a fost prezentat în Cap.2. Din acestea, au fost tăiate plăcuțe pătrate cu laturi de $5 \times 5 \text{ mm}^2$ (pentru structura simplă cu Permalloy) și plachete dreptunghiulare $5 \times 3 \text{ mm}^2$ pentru sistemul multistrat.

Fig. 3.8 prezintă efectul MR longitudinal, când H este aplicat paralel la direcția câmpului magnetic, respectiv transversal, când H este aplicat perpendicular pe direcția câmpului magnetic, pentru cele două structuri. Așa cum a fost prezentat mai sus, Fig. 3.1(c) și ec. 5, când $M \parallel H$, rezistența structurii este maximă iar când $M \perp H$ rezistența structurii devine minimă.

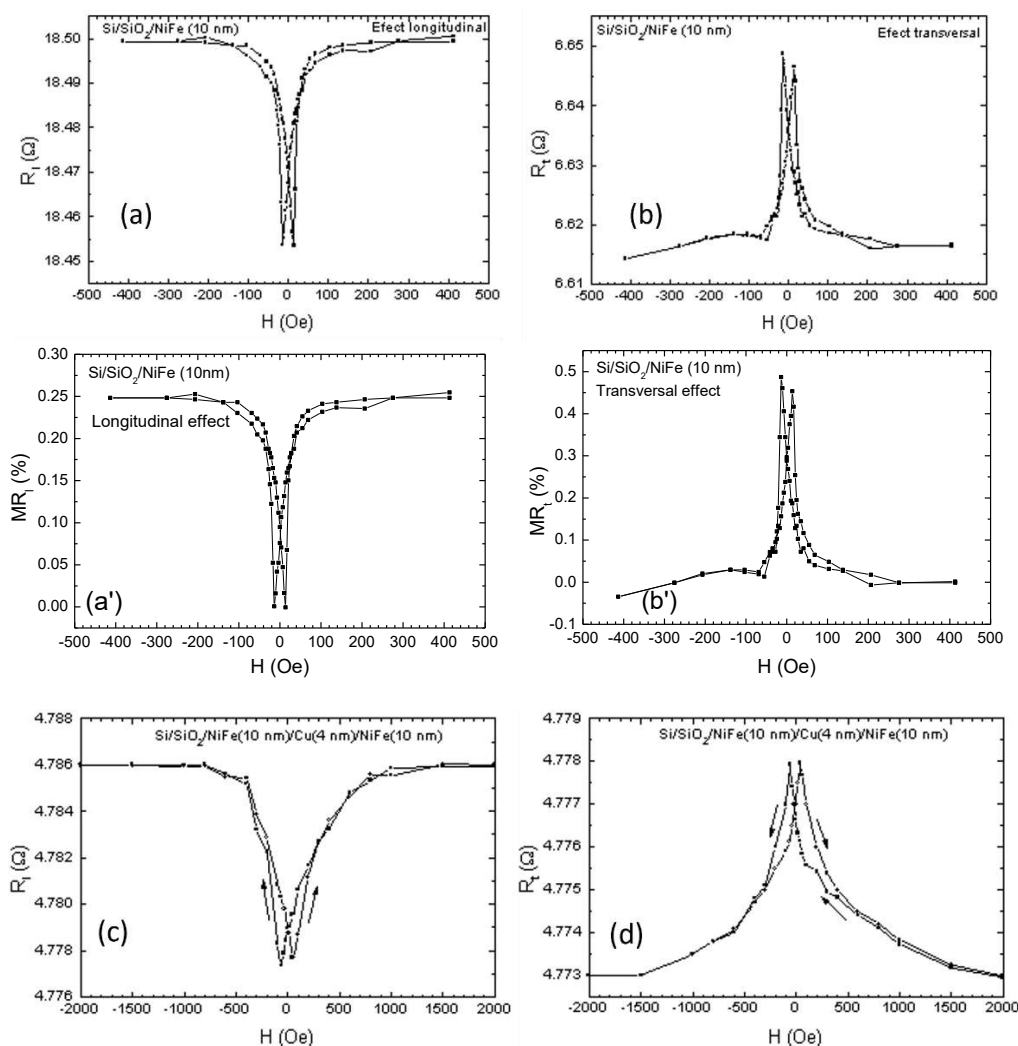


Fig. 3.8. Efectele de MR longitudinală (graficele a, a' și c) și transversală (graficele b, b' și d) în două tipuri de structuri de tip strat subțire; (a') și (b') reprezintă variațiile procentuale ale efectelor MR_l și MR_t din stratul $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(10 \text{ nm})$. Săgețile arată modul de parcurgere a ciclului.

Figura 3.9(a) prezintă, pe același grafic, ambele dependențe când $H \parallel I$ și $H \perp I$ iar Fig.3.9(b) prezintă dependența de câmp a efectului AMR pentru $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(10 \text{ nm})/\text{Cu}(4 \text{ nm})/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(10 \text{ nm})$.

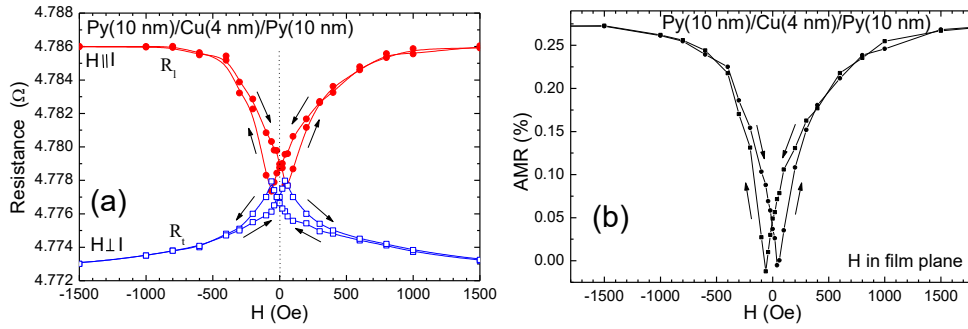


Fig. 3.9. Efectul AMR evidențiat pentru structura $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(10 \text{ nm})/\text{Cu}(4 \text{ nm})/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(10 \text{ nm})$.

Așa cum am menționat, caracteristicile efectelor MR pot furniza informații utile privind procesele de magnetizare din strat. Astfel, din dependențele prezentate pot fi estimate câmpurile coercitive ca fiind 20 Oe pentru structura $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(10 \text{ nm})$, respectiv 60 Oe pentru structura $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(10 \text{ nm})/\text{Cu}(4 \text{ nm})/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(10 \text{ nm})$. Aceste valori sunt în bun acord cu măsurătorile VSM și cu rezultatele simulărilor micromagnetice prezentate în secțiunea 2.3.1.

III. Teste de efect AMR pe structuri de tipul $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(20 \text{ nm})$ sub formă de disc

În [44, 45] au fost utilizați senzori PHE sub formă de disc pentru detecția nanoparticulelor magnetice. Acești senzori au fost obținuți, în cadrul IMT-București, folosind proceduri tipice microtehnologiei, precum: proiectare măști, pregătire substrat de Si, depunere strat de SiO_2 , depunere fotorezist, fotolitografie, depunerea stratului de Permalloy (Py), liftoff (pentru a rămâne doar structura din Py sub formă de disc), depunerea contactelor de Au și apoi conectarea cu fire de Au. Astfel, pe fiecare plachetă de Si, $5 \times 5 \text{ mm}^2$, au fost definiți câte patru senzori $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(20 \text{ nm})$ sub formă de disc cu diametrul de 1 mm. Se observă că setup-ul de măsură este tip van der Pauw și este ideal pentru teste AMR, respectiv PHE. În acest setup, pentru a efectua caracterizări de efect AMR, curentul face un unghi θ de 45 sau 135 de grade cu direcția câmpului magnetic aplicat în plan [44, 70]. Pentru teste PHE, H este în planul filmului dar perpendicular pe direcția curentului. Caracteristicile AMR pentru doi senzori, notați ca S_1 , respectiv S_2 , sunt prezentate în Fig. 3.10 [44].

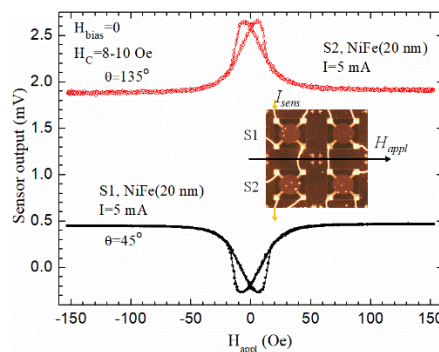


Fig. 3.10. Caracteristicile de câmp ale efectului AMR pentru doi senzori din $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ sub formă de disc [44]

Inserat în figură este cip-ul cu patru senzori magnetorezistivi unde este prezentat modul de conectare și sunt evidențiate direcțiile pe care le face curentul cu H_{appl} pentru fiecare senzor. Se remarcă variațiile opuse pentru cele două semnale, această comportare fiind utilă pentru dezvoltarea de senzori diferențiali. Rezultatele obținute sunt în bun acord cu [5, 7] și cu simulările prezentate în Fig. 3.2(a) rulate pentru un sistem monodomenial. De asemenea, din aceste grafice se poate estima câmpul coercitiv, $H_c=8-10$ Oe, și se poate observa că senzorii saturează pentru $H_{\text{appl}} > 50$ Oe. Senzorii cu această geometrie nu prezintă anizotropie de formă, această proprietate fiind exploatată în propunerea de brevet [19], descrisă pe scurt la finalul Cap.2, dar și pentru dezvoltarea unor aplicații, precum senzor de rotație.

3.2.2. Caracteristici experimentele reprezentative asupra efectului PHE și discuții

Așa cum s-a putut remarca, în cazul configurației van der Pauw, este o legătură strânsă între efectele AMR și PHE cu atât mai mult cu cât în funcție de orientarea câmpului magnetic aplicat, semnalul măsurat reprezintă efectul AMR, Fig. 3.10 sau efectul Hall planar, Fig. 3.11 [44, 45].

I. Teste de efect Hall planar pe structuri de tipul $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (20 nm) sub formă de disc

a. Câmpul magnetic aplicat este perpendicular pe direcția curentului

Pentru teste de efect Hall planar, placheta cu senzori a fost orientată astfel încât H_{appl} să fie perpendicular pe direcția curentului, ca în configurația din Fig. 3.11(a). Pentru acest tip de structuri este necesar un câmp de polarizare, H_{bias} , care să asigure o stare de magnetizare inițială în strat. Fig. 3.11(b) prezintă sistemul experimental. Caracteristicile de răspuns în câmp magnetic, pentru diverse valori ale câmpului de polarizare, H_{bias} , sunt prezentate în Fig. 3.11(c) iar în Fig. 3.11(d) este reprezentată dependența sensibilității, în zona liniară, de H_{bias} [71]. Așa cum am evidențiat în [45], liniaritatea caracteristicii se îmbunătățește cu H_{bias} dar sensibilitatea scade, rezultatul fiind în bun acord cu [J. Appl. Phys. 122, (2017) 123901] și cu simulările prezentate în Fig. 3.2(b) raportate în [6]. Sensibilitatea caracteristicii în zona liniară de răspuns, definită ca $S_{\text{PHE}} = \Delta V / \Delta H$, variază între $15.4 \pm 2.7 \times 10^{-2} \mu\text{V/Oe}$ pentru $H_{\text{bias}}=50$ Oe ($R^2=0.993$) și $5.35 \pm 4.1 \times 10^{-3} \mu\text{V/Oe}$ pentru $H_{\text{bias}}=150$ Oe, cu un coeficient de corelare $R^2=0.999$, pentru un câmp aplicat în domeniul ± 13 Oe. Ca valori normalizate la mărimea curentului de alimentare, sensibilitatea este în jur de $3,75 \mu\text{V}/(\text{Oe}\cdot\text{mA})$ pentru $H_{\text{bias}}=50$ Oe dar poate crește la aproximativ $6 \mu\text{V}/(\text{Oe}\cdot\text{mA})$, pentru $H_{\text{bias}}=25$ Oe, însă pentru o variație a câmpului aplicat în domeniul ± 5 Oe. Aceste sensibilități sunt printre cele mai mari raportate pentru acest tip de senzori. Liniaritatea dependenței de câmp a semnalului PHE în acest setup, pentru $H_{\text{bias}} > 25$ Oe, arată că procesul de comutare a magnetizării este bazat pe rotația momentelor magnetice.

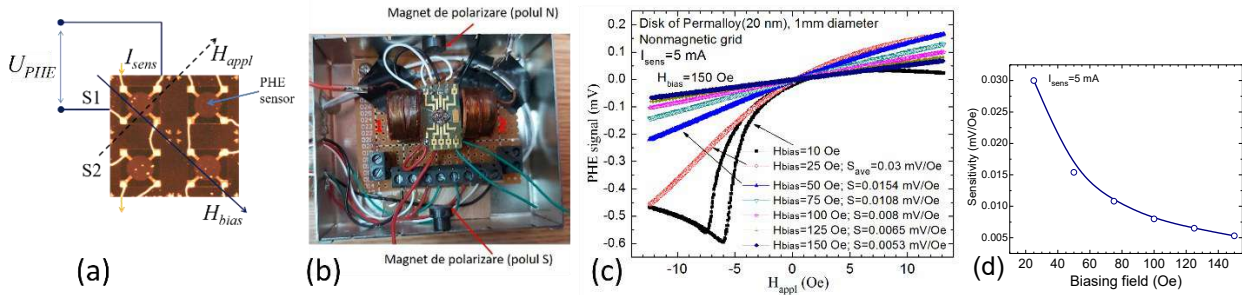


Fig. 3.11. (a) Cipul cu senzori PHE și exemplu tipic de conectare electrică, respectiv de aplicare a câmpurilor magnetice. (b) Cipul este plasat într-un sistem de bobine Helmholtz aflat într-o cutie din metal feromagnetic unde sunt utilizați doi magneți ce creează câmpul de polarizare, H_{bias} , ca în (a). În (c) sunt prezentate caracteristicile de răspuns în câmp magnetic, pentru diverse valori ale câmpului de polarizare, H_{bias} [45]. Sensibilitatea senzorului în funcție de câmpul de polarizare este prezentată în (d) [71].

Pentru teste, senzorul a fost alimentat în regim de curent constant folosind sursa Keithley 2635A iar pentru citirea semnalelor lent variabile a fost folosit nanovoltmetrul Keithley 2182A. Curentul prin bobine a fost furnizat de surse programabile Kepco BOP 100-10MG sau Keithley 6221 în funcție de regimul de lucru. Pentru calibrarea bobinelor și măsurarea câmpului magnetic creat de către magneți, a fost folosit un gaussmetru digital Lakeshore 475 DSP. Pentru fiecare caracteristică au fost baleiate 2 cicluri complete de magnetizare pentru a verifica stabilitatea semnalului. Durata unui ciclu este de 100 s. Datele au fost achiziționate pe calculator.

b. Câmpul magnetic aplicat este paralel la direcția curentului

Această metodă originală de investigare a semnalului PHE a fost raportată în [45, 72] unde am arătat că este un instrument deosebit de facil și precis de determinare a câmpului coercitiv din straturi subțiri feromagnetice. Așa cum se remarcă la curba de magnetizare, Fig. 3.12(a) [44], obținută cu VSM, în cadrul ICDT al Universității Transilvania din Brașov, momentul magnetic este deosebit de scăzut iar determinarea câmpului coercitiv devine dificilă. Acest lucru se datorează faptului că semnalul provine de la patru discuri de Permalloy, 20 nm grosime, 1 mm diametru fiecare. Referindu-ne la Fig. 3.11(a), $H_{appl}=0$ iar H_{bias} variază între ± 150 Oe iar magnetizarea devine paralelă respectiv antiparalelă la curent în S_1 . Procesele de magnetizare pentru acest tip de structură, fără anizotropie de formă și cu o anizotropie magnetocristalină redusă se datorează, în mare parte, deplasării de pereți de domenii. Comutarea magnetizării, ce are loc la $H_{bias}=H_C=\pm 9$ Oe, se traduce prin cele două picuri abrupte din semnalul PHE, Fig. 3.12(b), a căror poziție depinde de factori de influență externi precum prezența unor NPM pe suprafața senzorului, așa cum am arătat în [45].

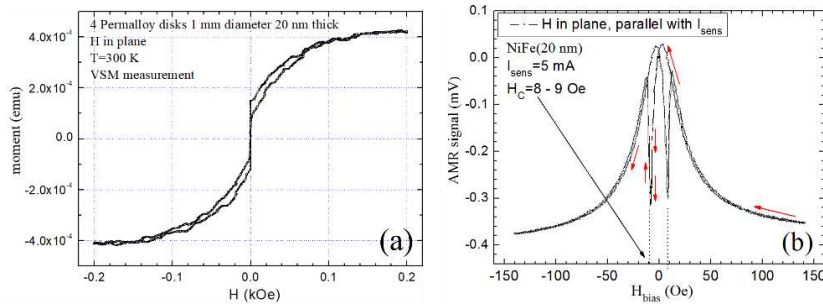


Fig. 3.12. (a) Curba de magnetizare a senzorilor măsurată cu VSM (b) semnalul PHE când $H_{appl}=0$ iar H_{bias} este variat între ± 150 Oe [JMMM2015].

Această metodă de evidențiere a procesului de comutare a magnetizării, descris și în [73], a fost exploatată de către autor la studiul detecției nanoparticulelor super paramagnetice (NPM) de maghemită folosind senzori PHE de formă circulară caracterizați printr-o anizotropie magnetică foarte redusă [44, 45]. În aceste experimente, ce exploatează caracteristica prezentată în Fig. 3.12(b), au fost folosite nanoparticule (magnetic nanoparticles - MNP) de maghemită (Fe_2O_3) cu diametrul mediu de 11 nm, funcționalizate cu molecule de Polietilen-glicol 6000 (PEG 6000). Aceste NPM sunt superparamagnetice la temperatura camerei și sunt folosite în experimente de biodetecție ce utilizează senzori magnetici precum AMR, PHE sau GMR. Temperatura de blocare, $T_B=252$ K, deasupra căreia comportarea este superparamagnetică, a fost determinată din măsurători ZFC-FC în cadrul ICDT-UNITBV. Curba de magnetizare a acestor NPM, măsurată cu VSM în cadrul ICDT-UNITBV, este prezentată în Fig. 3.13(a) și confirmă comportarea superparamagnetică prin fitarea acestei curbe cu o funcție Langevin [45, 71]. De asemenea, prin această fitare a fost determinat diametrul mediu al acestor MNP, $d_{mag}=11,48$ nm, care este în bun acord cu datele obținute la IMT-București prin caracterizări XRD. Astfel, au fost pipetate 0,7 μL de soluție apoasă, ce conține aceste MNP funcționalizate cu PEG-6000, pe suprafața senzorului PHE, S_1 , din Fig. 3.11(a). După uscarea soluției (detalii în [45]) a fost ridicată curba de răspuns a semnalului furnizat de senzor într-un setup în care este baleiat un câmp, H_{appl} , paralel la direcția curentului iar un câmp magnetic, H_{bias} , poate fi aplicat *perpendicular* pe suprafața acestuia. Setup-ul este prezentat în detaliul Fig. 3.13(b). Fig. 3.13(b) prezintă semnalul de ieșire în absența și în prezența MNP pe suprafața senzorului, la $H_{bias}=0$.

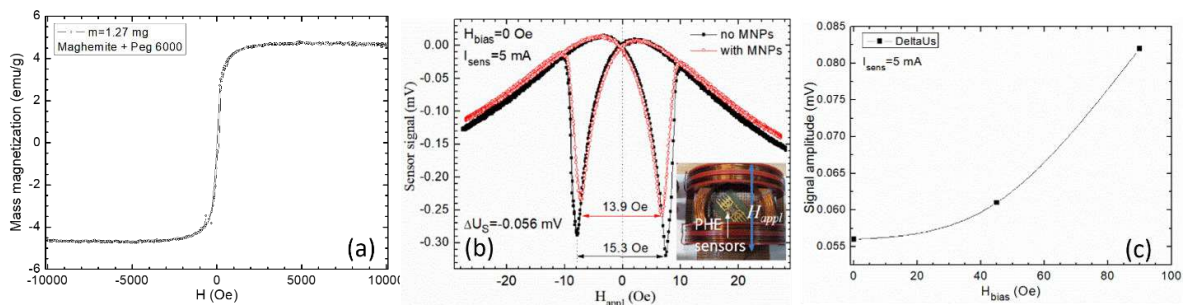


Fig. 3.13. (a) Curba de magnetizare a MNP măsurată cu VSM la temperatura camerei, (b) semnalul furnizat de senzor în absența și în prezența MNP pe suprafața acestuia și (c) dependența semnalului furnizat de senzor, ΔU_S , de câmpul de polarizare aplicat perpendicular pe suprafața acestuia.

Din Fig. 3.13(b) se remarcă influența NPM asupra procesului de magnetizare din senzor prin modificarea valorii câmpului coercitiv (și deci a distanței dintre cele două picuri) și prin modificarea amplitudinii acestor picuri, prin intermediul valorii ΔU_s . Prin aplicarea unui câmp magnetic perpendicular pe suprafața senzorului, MNP sunt polarizate. Aceste momente magnetice, localizate pe suprafața senzorului, favorizează procesul de comutare a magnetizării iar amplitudinea picurilor crește. Discuții detaliate privind aceste rezultate au fost prezentate în [45].

Fig. 3.13(c) prezintă dependența semnalului ΔU_s furnizat de senzor în funcție de H_{bias} . În [45] am prezentat o metodă de evaluare a sensibilității senzorului prin estimarea momentului magnetic al nanoparticulelor de maghemită funcționalizate cu PEG-6000 în câmpul magnetic de polarizare $H_{bias}=90$ Oe. Acest lucru a fost posibil prin analiza curbei de magnetizare a soluției apoase de maghemită, identică cu cea utilizată în testele de detecție. Din această curbă, s-a obținut că, pentru 0,7 μ L de soluție, momentul magnetic total la 90 Oe este $1,87 \times 10^{-5}$ emu ceea ce corespunde unei mase de 1,1 μ g de nanoparticule de maghemită funcționalizate cu PEG-6000 [45]. Întrucât această estimare se face la un câmp magnetic scăzut, componenta diamagnetică a apei în semnalul VSM este nesemnificativă. Astfel, s-a putut calcula sensibilitatea senzorului PHE care este de $0,22 \times 10^{-3}$ emu/mV. Această metodă de detecție, bazată pe nuclearea procesului de comutare a magnetizării [73], este deosebit de sensibilă și face apel la o structură PHE simplă. Detecția NPM este evidențiată prin modificarea câmpului de comutare a magnetizării și a amplitudinii semnalului PHE când are loc acest proces. Acest mecanism a fost prezentat pe larg prin simulări micromagnetice și teste experimentale [44, 45] și în cadrul unei prezentări orale [<https://doi.org/10.1109/SMICND.2015.7355180>] la CAS 2015

II. Senzor de rotație bazat pe efectul Hall planar

Senzorul Hall planar poate fi utilizat, așa cum rezultă din Fig. 3.1, atât ca senzor de câmp magnetic cât și ca senzor de rotație întrucât $U_{PHE} \sim \sin 2\theta$ unde θ este unghiul pe care îl face magnetizarea cu direcția curentului, ec. 9. La rândul lui, unghiul θ urmărește câmpul rotitor H , Fig. 3.1(a). Această proprietate a inspirat mai multe studii pe care le-am întreprins, în cadrul unor contracte de cercetare precum [38] sau Spin-Valve 71-127/14.09.2007, pentru a simula micromagnetic și realiza experimental [39, 48, 50, 72] senzori de rotație bazați pe PHE. A fost evidențiată dependența amplitudinii și a formei semnalului $U_{PHE}(\theta)$ de forma senzorului (pătrat, disc, inelar), de poziționarea cât mai precisă a contactelor și, nu în ultimul rând, de amplitudinea câmpului magnetic rotitor. Fig. 3.14(a) prezintă setup-ul de măsură ce permite corecția formei de undă a semnalului PHE iar în Fig. 3.14(b) sunt prezentate rezultatele testelor $U_{PHE}(\theta)$ pentru două plachete de Si/SiO₂ de formă pătrată, 5×5 mm², pe care au fost depuse prin evaporare termică în vid structurile (i) strat subțire Ni₈₀Fe₂₀(10 nm) și (ii) multistrat FeMn(3 nm)/Ni₈₀Fe₂₀(10 nm)/Cu(4 nm)/Ni₈₀Fe₂₀(10 nm) [50]. Contactele au fost plasate manual,

folosind pastă de Ag, pe colțurile probelor. Datorită erorilor inerente de amplasare a contactelor, semnalele U_{PHE} pot prezenta distorsiuni. Am arătat că se poate corecta acest lucru măsurând, pentru fiecare unghi, două semnale (i) U_1 , când sursa I_1 este ON, sursa I_2 OFF și (ii) U_2 când sursa I_1 este OFF iar sursa I_2 ON, Fig. 3.14(a). În urma acestor măsurători după două direcții ortogonale, se obține un semnal $U=(U_1+U_2)/2$ cu o formă de undă corectată, Fig. 3.14(b) [48, 50].

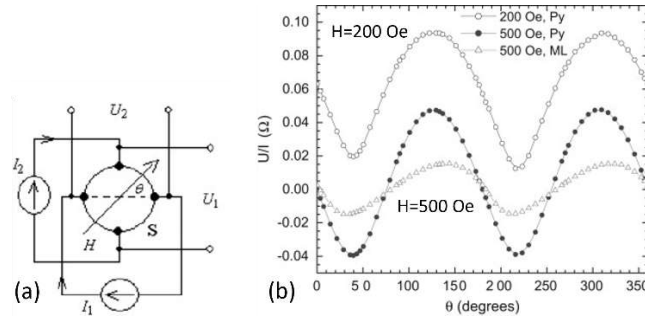


Fig. 3.14. (a) Setup-ul de măsură și (b) dependența unghiulară a semnalului Hall planar pentru două probe de formă pătrată. Semnalul pentru proba Py, la $H=200$ Oe, a fost decalat în grafic pentru a putea fi ușor vizibil [48,50].

Din aceste teste este pusă în evidență importanța amplitudinii câmpului magnetic rotitor asupra formei de undă a semnalului. Aceste date sunt în acord și cu simulările prezentate în Fig. 3.1(d). Pe de altă parte, așa cum am arătat prin simulări micromagnetice și teste experimentale [39, 48, 50], probele sub formă de disc prezintă o formă de undă mult mai apropiată de una sinusoidală pentru tensiunea U_{PHE} , chiar și când *contactele sunt plasate manual* iar metoda de măsură este cea din Fig. 3.14(a). Structura sub forma unui disc prezintă aceeași valoare a coeficientului de demagnetizare după orice direcție în plan.

Senzori PHE din $Ni_{80}Fe_{20}(20\text{ nm})$ și $Co(30\text{ nm})/Cu(7\text{ nm})/Ni_{80}Fe_{20}(70\text{ nm})$ sub formă de disc

În studiile publicate în [43, 49, 72] am arătat că senzorul de rotație realizat cu structuri PHE din $Ni_{80}Fe_{20}(20\text{ nm})$ sau $Co(30\text{ nm})/Cu(7\text{ nm})/Ni_{80}Fe_{20}(70\text{ nm})$, sub formă de disc, cu pad-urile pentru contactare depuse, poate furniza un semnal electric foarte apropiat de o dependență sinusoidală, chiar și pentru un câmp magnetic rotitor de 100 Oe. Senzorul PHE din $Ni_{80}Fe_{20}(20\text{ nm})$ este cel prezentat în Fig. 3.11(a) iar cel cu structura $Co(30\text{ nm})/Cu(7\text{ nm})/Ni_{80}Fe_{20}(70\text{ nm})$ este o "valvă de spin" obținută prin pulverizare catodică magnetron; diametrul discului este de 5 mm [43, 49]. Rezultatele simulării pentru un disc din Permalloy cu grosime de 10 nm aflat într-un câmp magnetic rotitor de 150 Oe și de 300 Oe și raportate în [72] sunt prezentate în Fig. 3.15(a,b).

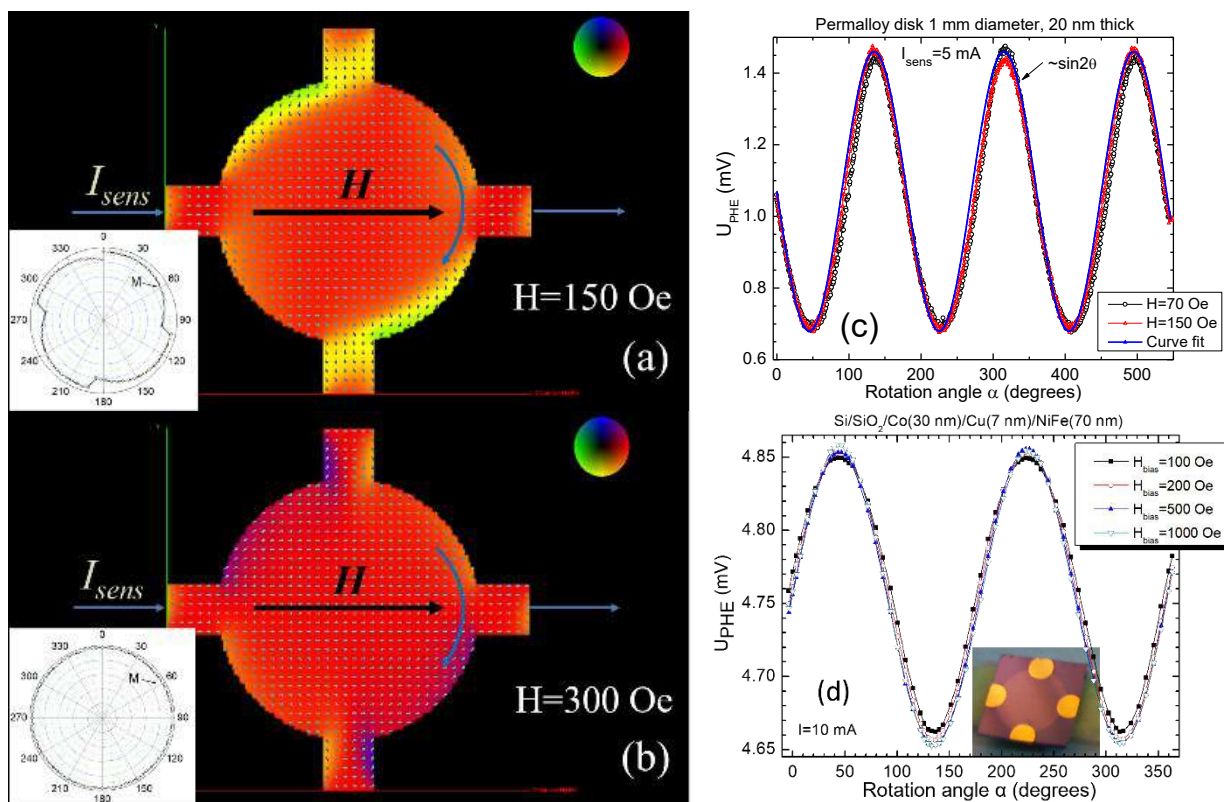


Fig. 3.15. Simulări micromagnetice ce ilustrează comportarea unui senzor de rotație din $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (10 nm) pentru (a) $H=150$ Oe și (b) pentru $H=300$ Oe și teste experimentale privind răspunsul unui senzor de rotație bazat pe efectul Hall planar realizat din (c) $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (20 nm) și (d) din $\text{Co}(30 \text{ nm})/\text{Cu}(7 \text{ nm})/\text{NiFe}(70 \text{ nm})$, adaptat din [49,72].

Simulările au fost efectuate cu softul comercial Llg micromagnetics v4. Structura simulată a fost încadrată într-un paralelipiped dreptunghic $1000 \times 1000 \times 10 \text{ nm}^3$ din Permalloy în care a fost proiectat modelul senzorului PHE cu un diametru de 700 nm. Mărima celulei de discretizare este $5 \times 5 \times 5 \text{ nm}^3$. S-a considerat: $M_s=710 \text{ kA/m}$, constanta de schimb $A=1.3 \times 10^{-11} \text{ J/m}$, constanta de anizotropie uniaxială $K_u=0 \text{ J/m}^3$ și $T=0 \text{ K}$ (pentru a nu lua în calcul fluctuațiile termice). Inserturile din Fig. 3.15(a,b) prezintă dependența magnetizării din stratul de Permalloy de unghiul de rotație a câmpului magnetic. Din aceste simulări rezultă că, pentru $H > 150 \text{ Oe}$, magnetizarea urmărește fidel câmpul magnetic rotitor, aspect confirmat și de caracteristica experimentală, Fig. 3.15(c) [72]. Distorsiunile apar, la $H < 100 \text{ Oe}$, pentru unghiuri unde se încheie procesul de comutare a magnetizării după direcția lui H , așa cum a fost prezentat în [39, 48, 50]. Momentele magnetice ilustrate în Fig. 3.15(a,b) reprezintă starea structurii după o rotație completă. Pentru un câmp suficient de ridicat magnetizarea suferă un proces de rotație coerentă și urmărește fidel direcția lui H , adică $\alpha = \theta$ în Fig. 3.1(a,b,c). Așa cum am scos în evidență și în [6] și ilustrat în Fig. 3.1(d), acest aspect este decis de proprietățile magnetice ale structurii. Simulările sunt realizate pentru o structură micrometrică și au rolul de a explica comportarea senzorului PHE pentru diverse valori ale câmpului rotitor. Fiind structuri fără anizotropie de formă, valoarea câmpului minim pentru care M urmărește fidel H este legată de câmpul coercitiv. Din teste experimentale, s-a obținut $H_c=9 \text{ Oe}$ pentru structura din Fig. 3.15(c) [45] și $H_c \approx 125 \text{ Oe}$ pentru structura din Fig. 3.15(d) [49]. Aceste valori explică (i)

curbele suprapuse pentru $H=70$ și 150 Oe din Fig. 3.15(c) unde M este la saturație și urmărește H și (ii) amplitudinea crescătoare a curbelor pentru $H=100, 200, 500$ Oe din Fig. 3.15(d); curbele pentru $H=500$ și 1000 Oe se suprapun [49]. Cuplajul dintre straturile de Co și NiFe și valoarea mai mare a constatei de anizotropie cristaline a stratului de Co sunt responsabile de o valoare crescută a câmpului coercitiv pentru această structură. Studiile prezentate au fost valorificate și prin brevetarea unui microsenzor magnetorezistiv de rotație [65] ce prezintă avantajul simplității constructive și a unui semnal de ieșire $U_{PHE} \sim \sin 2\theta$ independent de amplitudinea câmpului magnetic rotitor când acesta este mai mare decât o valoare minimă, dependentă de tipul structurii.

Exemplele prezentate arată versatilitatea structurilor PHE ce pot fi utilizate atât pentru studii ale proceselor de magnetizare din straturi subțiri sau sisteme nanostructurate cât și pentru dezvoltarea unor senzori magnetici ce pot fi utilizați în detecția câmpului magnetic, ca senzori de rotație sau în detecția nanoparticulelor magnetice pentru aplicații de diagnoză medicală.

3.3. Contribuții la studiul efectului de magnetorezistență gigantică

3.3.1. Introducere

În [1, 2, 6, 51, 52, 74, 75, 76] am documentat, simulat micromagnetic dar și implementat acest efect magnetorezistiv de importanță deosebită în dezvoltarea de aplicații în domeniul senzorilor magnetici. Acest efect a contribuit la dezvoltarea sistemelor de stocare a datelor de înaltă capacitate (capete de citire la HDDuri sau memorii MRAM).

Efectul de magnetorezistență gigantică (Giant Magnetoresistance effect - GMR) a fost descoperit independent, în anul 1988, de grupurile conduse de către Albert Fert [77] și Peter Grünberg [78] în structuri magnetice multistrat de tipul $[\text{Fe/Cr}]_n$, de grosimi nanometrice, cuplate prin interacție de schimb. Cei doi cercetători au primit premiul Nobel pentru Fizică, în anul 2007, ca o recunoaștere a impactului deosebit al acestei descoperiri în domeniul cercetării fundamentale și apariției unei noi ramuri în știință, *spintronica*, ce a condus la dezvoltări tehnologice în domeniul senzorilor și a sistemelor de stocare a datelor. Se estimează o creștere accentuată a cotei de piață asociată dispozitivelor spintronice de la 633 milioane USD în 2021 la 5,69 miliarde USD pentru 2031 [79]. Companii precum NVE Corporation (SUA), Everspin Technologies Inc. (SUA), Crocus Technology Inc. (SUA, Franța), Synopsis Inc. (SUA), Avalanche Technology Inc. (SUA), Infineon Technologies AG (Germania), TDK Corporation (Japonia) și altele, sunt jucători importanți în acest domeniu [80].

3.3.2. Aspecte fundamentale și exemple de caracteristici

Pe scurt, rezistența structurii multistrat, când magnetizările sunt orientate, antiparalele este mai mare decât rezistența structurii când magnetizările sunt orientate paralele, $R_{ap} > R_p$. Mecanismul fizic are la bază împrăștierea dependentă de spin, la interfețe și în straturile FM,

a electronilor cu spin-sus (spin-up) – paralel cu direcția magnetizării din strat, respectiv a electronilor cu spin-jos (spin-down) – antiparalel cu direcția magnetizării din strat. În Fig. 3.16 este ilustrat, într-un mod intuitiv, acest efect pentru un sistem multistrat simplu.

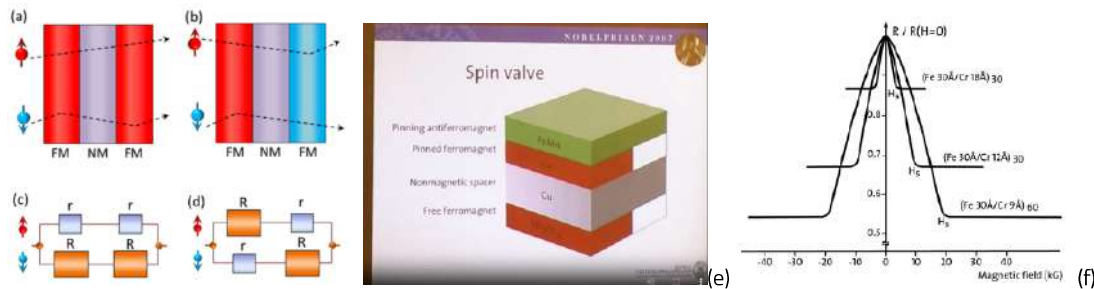


Fig. 3.16. Ilustrarea simplificată a efectului GMR. Împrăștierea dependentă de spin a electronilor în sistemul trilayer în cazul configurației cu magnetizările orientate (a) paralel și (b) antiparalel și circuitul electric echivalent pentru (c) R_p , respectiv R_{ap} (d) corespunzătoare configurațiilor din (a) și (b); În (e-f) este prezentată descriere efectului GMR de pe site-ul <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2007/prize-announcement/>

Astfel, amplitudinea efectului GMR se poate defini ca [2]:

$$GMR = \frac{R_{ap} - R_p}{R_p} \cdot 100 \quad [\%] \quad (16)$$

unde $\Delta R_{GMR} = R_{ap} - R_p$.

Efectul GMR se poate manifesta în diferite structuri precum sisteme multistrat, structuri de tip valvă de spin (spin-valve structures) sau structuri granulare [1, 2, 6, 7] în care, nanogranule magnetice sunt încorporate într-o matrice conductoare nemagnetică, Fig. 3.17.

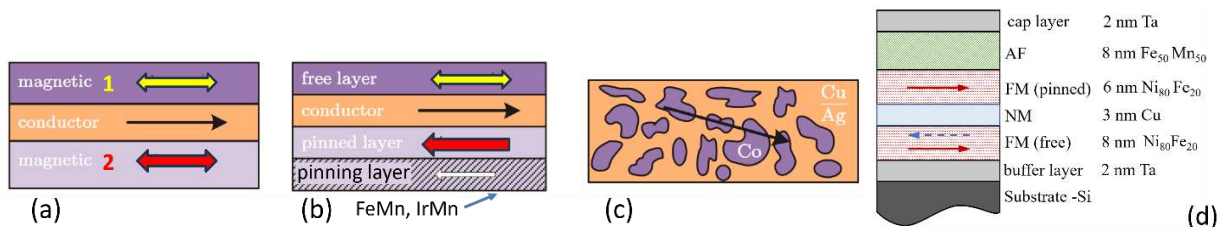


Fig. 3.17. Structuri tipice în care se poate manifesta efectul GMR: (a) structură multistrat (b) valvă de spin și (c) film subțire nanogranular. În (d) este ilustrată o structură GMR concretă. (Fig. a-c, adaptate după [MR_descr])

Amplitudinea efectului GMR cât și intervalul de câmp pentru care se manifestă acest efect depind de variantele constructive adoptate. Tipic, se obțin valori ale amplitudinii efectului GMR între 10 și 20% (ajungând chiar la 60-80 % în cazul sistemelor multistrat la 4,2 K dar variații mari ale câmpului magnetic [77]) pentru variații ale câmpului aplicat între 1 și 10 mT. Această variație a rezistenței structurii a fost numită "Giant magnetoresistance effect" fiind mult mai mare în amplitudine decât ceea ce se observă în metale nemagnetice sau în semiconductori raportată și la variația câmpului magnetic.

Dependența de câmpul magnetic aplicat a efectului GMR se poate cuantifica cu relația [1, 2, 6, 7]:

$$R = R_p + \frac{\Delta R_{GMR}}{2} [1 - \cos \theta] \quad (17)$$

unde θ reprezintă unghiul dintre direcțiile magnetizărilor din straturile FM adiacente.

Astfel, pentru $\theta = 180^\circ$, $\cos\theta = -1 \rightarrow R = R_{ap} = R_{High}$ în vreme ce, pentru configurație paralelă a magnetizărilor, $\theta = 0^\circ$, $\cos\theta = 1 \rightarrow R = R_p = R_{Low}$.

Cuplajul dintre straturile FM adiacente, precum Co, Fe, NiFe, are o comportare oscilantă iar, pentru anumite valori ale grosimii stratului de separare NM (Cr, Cu), acesta este antiferomagnetic, facilitând orientarea antiparalelă a momentelor magnetice din straturile FM adiacente [1, 6], Fig. 3.18(a). Spre exemplu, prima grosime a stratului de separare NM pentru care se obține această condiție, este de aproximativ 1 nm. În acest sens, pentru a oferi o mai bună înțelegere asupra acestui efect, și în scopul dezvoltării unor aplicații de detecție a curentului sau a nanoparticulelor magnetice, am rulat simulări micromagnetice pentru o structură multistrat, folosind LLg Micromagnetics Simulator v.4 [6, 62, 75, 76], datele fiind validate folosind și un alt simulator, OOMMF [<https://math.nist.gov/oommf/>]. Curba de magnetizare și dependența de câmp a efectului GMR sunt prezentate în Fig. 3.18(b) [6, 76].

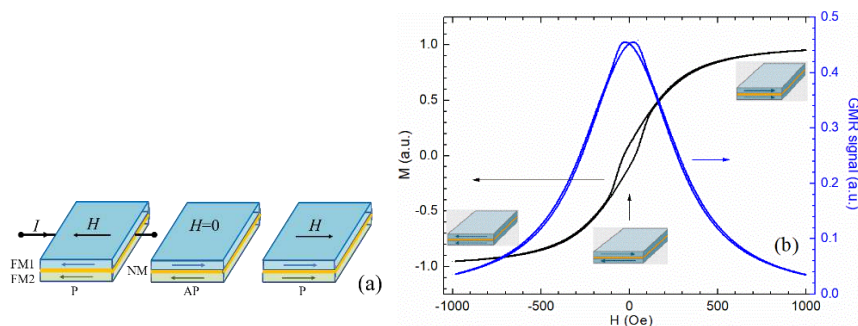


Fig. 3.18. (a) O structură GMR cu 2 straturi feromagnetice între care există cuplaj AFM, în trei stări distincte și (b) curba de magnetizare a structurii și efectul GMR obținute prin simulare micromagnetică [6, 76].

Parametrii utilizați pentru simulare au fost detaliați în [6, 75, 76]. Fiecare strat FM este din NiFe, cu dimensiunile $1000 \times 500 \times 10 \text{ nm}^3$ iar celula de discretizare este $5 \times 5 \times 5 \text{ nm}^3$. Straturile FM sunt cuplate antiferomagnetic. Câmpul magnetic este aplicat în planul statului, *perpendicular pe axa lungă* care este și axă de ușoară magnetizare. Parametrii de material: $M_s = 710 \text{ kA/m}$, constanta de schimb, $A = 1.3 \times 10^{-11} \text{ J/m}$, iar constanta de anizotropie uniaxială $K_u = 804 \text{ J/m}^3$. Un rezultat asemănător s-a obținut și în aproximația monodomenială dar în care efectul de histeresis nu mai este pus în evidență, apărând un singur vârf pentru $H=0$.

În sistemele multistrat, precum structurile $(\text{Fe/Cr})_n$ utilizate în experimentele ce au dus la descoperirea acestui efect [77, 78], câmpul necesar alinierii momentelor magnetice din straturile FM adiacente este mare, ajungând spre 1 T (10^4 Oe) acest lucru datorându-se cuplajului de schimb puternic dintre straturile FM. Pentru a depăși acest neajuns, se utilizează așa numitele structuri "pseudo spin-valves" adică valve de spin cu structuri ca cele din Fig. 3.17(a) dar în care se utilizează straturi FM cu coercivități diferite (dure și moi), precum $\text{Co}/\text{NM}(t_{\text{NM}})/\text{NiFe}$ sau prin "fixarea" magnetizării unuia dintre straturile FM utilizând un strat AFM de tipul FeMn sau Ir Mn – polarizare prin interacție de schimb – așa cum a fost descrisă

anterior. Acestea sunt structurile GMR de tip valvă de spin (exchange biased spin valves), Fig. 3.17(b,d). Aceste soluții tehnologice permit obținerea unor structuri cu $t_{\text{NM}} > 1$ nm în care să se poată manifesta efectul GMR (adică definirea stărilor "ap", respectiv "p" – Fig. 3.16, 3.17 și 3.18) și pentru care tăria cuplajului dintre straturile FM să fie mai mic, reglabil în funcție de t_{NM} , permițând operarea la câmpuri mici (sub 10 mT). Astfel, se obțin structuri cu sensibilități crescute, ale căror domenii de operare și sensibilități, $\frac{\Delta R}{R} / \Delta H$ pot fi setate tehnologic, în funcție de aplicații. În termeni de semnal și valori ale câmpului de saturație, această sensibilitate poate varia între 1-150 (mV/V)/mT pentru valori ale câmpului de saturație cuprins între 0,6-20 mT (6-200 Oe) și un domeniu de liniaritate a semnalului în intervalul 1-10 mT [81-83].

Structurile GMR de tip multistrat, ca cele descrise și simulate, Fig. 3.18, necesită un câmp magnetic de polarizare pentru a fi plasate în zona liniaritate a răspunsului [2, 83], așa cum am arătat și în aplicațiile dezvoltate [74, 75]. Mai mult, așa cum se remarcă din Fig. 3.18(b), sensibilitatea este redusă în zona câmpului 0.

Pentru aplicații practice, se realizează senzori de câmp magnetic sub formă de circuite integrate ce conțin patru structuri GMR *identice* conectate în punte Wheatstone, ca în Fig. 3.19(a) [81]. Astfel, la $H=0$, puntea este, în mod ideal, echilibrată. Doi senzori sunt ecranați, plasați sub concentratorul de flux magnetic. Aceștia au rolul de a asigura completarea punții (reference elements) și compensarea termică a acesteia. Senzorii activi sunt plasați în întrefierul concentratorului de flux ce are rolul de a amplifica câmpul magnetic aplicat elementelor sensitive, Fig. 3.19(b) [74, 81]. Și senzorul GF705, de la Sensitec, are aceeași schema electrică iar structura internă este asemănătoare cu cea din Fig. 3.19(a,b). Acești senzori pot fi alimentați în regim de curent constant sau de tensiune constantă. Uzual, rezistența punții, pe oricare diagonală, este de 5 k Ω .

Senzorul AA003-02 de la NVE a fost utilizat pentru dezvoltarea unei aplicații de măsurare non-contact a curentului electric [16, 74, 75]. În acest sens, senzorul a fost caracterizat în câmp magnetic pentru diverse valori ale curentului de alimentare, Fig. 3.19(c). Se remarcă o zonă de liniaritate în intervalul $\pm(4-18)$ Oe și o sensibilitate medie de 14 mV/Oe pentru un curent de alimentare de 1 mA. Am identificat un câmp coercitiv de ± 2 Oe iar în acest interval senzorul nu poate furniza un semnal util. Pentru comparație, este prezentată, în Fig. 3.19(d), caracteristica de răspuns a senzorului GF705 [82] atât după axa de maximă sensibilitate cât și după o direcție perpendiculară pe aceasta. Se remarcă un interval de lucru diferit față de cel din Fig. 3.19(c), cu o zonă de liniaritate, $\Delta H_{\text{lin}}=85$ Oe, și o sensibilitate $S=4.87$ mV/Oe. Aceste caracteristici depind de natura materialelor utilizate în depunerea straturilor și de procesele de microfabricație. Prin urmare, alegerea senzorului este decisă de aplicația urmărită.

Rezultatele din Fig. 3.19(c,d) sunt în concordanță cu observațiile făcute în acest capitol referitoare la compromisul liniaritate/sensibilitate. În ambele cazuri, există o direcție de maximă sensibilitate, de-a lungul concentratorului de flux magnetic.

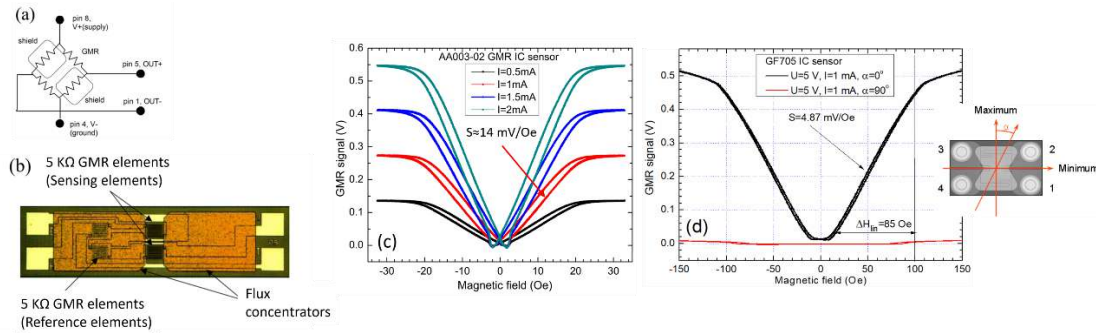


Fig. 3.19. (a) Schema electrică a senzorilor AA003-02 (NVE) și GF705 (Sensitec), (b) Structura CI AA003-02 și caracteristicile de răspuns pentru (c) AA003-02 respectiv, (d) GF705. Fig. (a-c) sunt adaptate din [74]

Aspectul "inversat" al caracteristicilor din Fig. 3.19(c,d), față de Fig. 3.18(b), se datorează modului de conectare în punte a structurilor GMR. La $H=0$, rezistențele sunt, ideal, egale astfel încât puntea este echilibrată, tensiunea de ieșire fiind apropiată de 0. Când H crește cei doi senzori activi își modifică rezistențele, scăzând în mod egal, iar puntea se dezechilibrează urmând o lege de variație ca în Fig. 3.18(b). La saturație, rezistențele elementelor GMR nu mai variază și apare platoul din Fig. 3.19(c,d).

Diverse tehnici sunt utilizate pentru liniarizarea structurilor GMR. Spre exemplu, în [74] am utilizat, pentru senzorul AA003-02, un câmp magnetic de polarizare de 8 Oe care fixează punctul static de funcționare la jumătatea intervalului de variație liniară a tensiunii de ieșire. Prin urmare, un câmp magnetic extern, ce variază între ± 4 Oe, va produce o variație liniară a tensiunii de ieșire.

O altă posibilitate de liniarizare a caracteristicii de răspuns în jurul câmpului 0 constă în utilizarea unor structuri GMR de tip valvă de spin (exchange biased spin valves), cu anizotropiile din cele două straturi magnetice perpendiculare între ele (*cross axes anisotropy*). Aceste structuri pot prezenta o caracteristică liniară de variație a rezistenței în zona câmpului 0, pentru câmpuri aplicate în domeniul $\pm(1-5)$ mT, și o amplitudine a efectului GMR în intervalul 6-20 % [83]. Această tehnică a fost implementată în cazul unor senzori comerciali [81, 82].

În cadrul unor studii [17] privind detecția nanoparticulelor magnetice (NPM) folosind senzori GMR de tip valvă de spin, au fost efectuate simulări micromagnetice pe acest tip de structuri pentru a putea evidenția modul de funcționare și mecanismul de detecție. Modelul utilizat și rezultatele simulărilor sunt prezentate în Fig. 3.20 și raportate de către autor în [76].

Parametrii utilizați: dimensiunea fiecărui strat magnetic: 1000×1000 nm²; stratul magnetic "liber", cu grosimea de 10 nm, este marcat cu săgeți roșii iar stratul magnetic "fixat" prin interacție de schimb cu stratul AFM (numit strat magnetic de referință), cu grosimea de 5 nm, este marcat cu săgeți albastre; magnetizarea la saturație $M_s=800$ emu/cm³=800 kA/m pentru ambele straturi iar câmpul de anizotropie (săgeata galbenă în Fig. 3.20) este $H_K=10$ Oe în ambele straturi FM. Câmpul de fixare a magnetizării stratului FM2 (orientat spre stânga și marcat ca H_{pin} în Fig. 3.20) este $H_{EB}=-100$ Oe, iar distanța dintre straturile FM a fost fixată la

10 nm. Acest parametru asigură modelarea convenabilă a unui câmp de cuplaj antiferomagnetic între straturile FM1 și FM2.

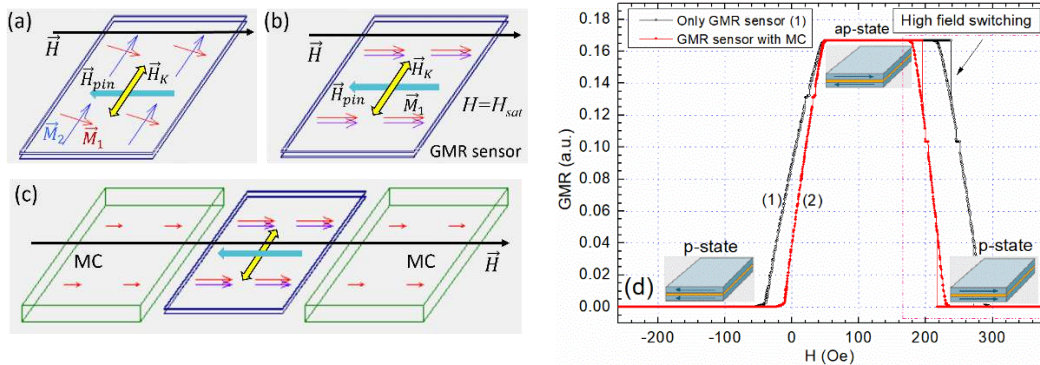


Fig. 3.20. Structura GMR tip valvă de spin simulată, cu prezentarea câmpurilor implicate, și două stări distincte: (a) pentru un câmp $H < H_{sat}$, și (b) la saturație. În (c) este simulată prezența concentratorului de flux magnetic (MC) iar în (d) sunt prezentate caracteristicile de câmp ale efectului GMR în absența și în prezența MC [76].

Cele două plăci ce simulează concentratorul de flux magnetic (MC) au dimensiunile: $1000 \times 1000 \times 100 \text{ nm}^3$ și prezintă o permeabilitate relativă $\mu_r = 2000$, fiind asimilate în simulator ca material magnetic moale. Distanța dintre plăcile MC este 1200 nm iar între ele se află structura GMR, Fig. 3.20(c). Rolul MC este de a amplifica câmpul magnetic aplicat senzorului GMR, această abordare fiind regăsită la senzorii realizați de NVE și Sensitec, Fig. 3.19(b). Câmpul magnetic extern este aplicat ca în Fig. 3.20, perpendicular pe axa de anizotropie (pentru a micșora efectele de histererezis).

Câteva concluzii au fost trase din aceste simulări: există (i) o regiune utilă pentru procesul de detecție, la câmp mic, când numai M_1 își schimbă orientarea, și (ii) o regiune de câmp intens (care de regulă nu este utilizată) când poate comuta și magnetizarea stratului fixat (high field switching), Fig. 3.20(d). Prezența MC permite comutarea magnetizării în stratul liber la câmpuri aplicate mai mici. Caracteristica (2), din Fig. 3.20(d), este în foarte bun acord calitativ cu caracteristica experimentală a senzorului GF708 de la Sensitec [82]. Prezența unor NPM deasupra senzorului, alterează distribuția câmpului magnetic aplicat senzorului, acest lucru fiind vizibil în curba efectului GMR [76]. Din acest motiv a fost ales un cip cu încapsulare tip flip-chip ce oferă acces nanoparticulelor magnetice la o distanță minimă de suprafața senzorilor GMR aflați în întrefierul concentratorului de flux magnetic. Fig. 3.21(a-c) prezintă structura schematică a senzorului GF708 unde este vizibil concentratorul de flux magnetic și întrefierul în care se află elementele GMR sensibile iar în Fig. 3.21(d) este prezentată caracteristica de răspuns atunci când H este aplicat de-a lungul axei de maximă sensibilitate ($\alpha = 0$ în Fig. 3.21(a)); iar $H_p = 0, 25 \text{ Oe}$ [76]. H_p reprezintă un câmp magnetic ce poate fi aplicat perpendicular pe suprafața senzorului; acest câmp poate fi utilizat în experimentele de detecție a NPM. Ușoara deplasare a curbei GMR se poate datora unei componente în plan a câmpului H_p , estimată din grafic la $0,25 \text{ Oe}$. Pentru $\alpha = \pi/2$, semnalul de ieșire este plat, ca și în Fig. 3.21(d), aceasta fiind o direcție de minimă sensibilitate.

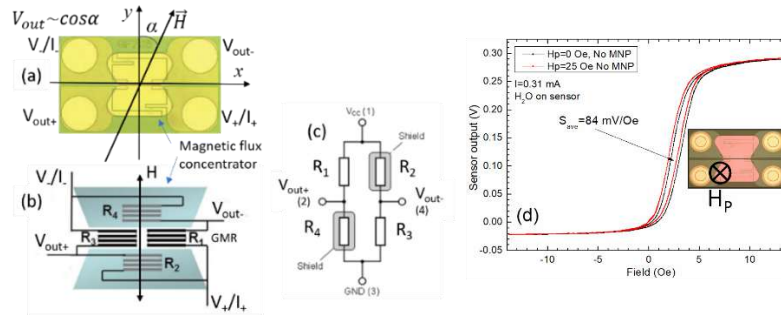


Fig. 3.21. (a-c) Structura cip-ului GF708 cu schema electrică de conectare a elementelor GMR și (d) caracteristica de ieșire a senzorului când, perpendicular pe suprafață, se aplică un câmp $H_p = 0$ sau 25 Oe [76].

3.4. Aspecte fundamentale privind efectul de magnetorezistență tunel

Efectul de tunelare dependentă de spin, cunoscut și ca efectul de magnetorezistență tunel, apare în joncțiuni tunel cu structură de tip valvă de spin (SV) sau multistrat (ML) dar în care stratul nemagnetic conductor este înlocuit cu un strat de oxid precum Al_2O_3 sau MgO cu grosimi 1-2 nm [1, 2, 6]. O asemenea joncțiune tunel, în care electrozii metalici nemagnetici sunt înlocuiți de *straturi metalice magnetice*, se mai numește și joncțiune tunel magnetică (magnetic tunnel junction – MTJ). Dacă, în general, în cazul structurilor GMR curentul se deplasează în planul structurii (așa numita configurație Current In Plane – CIP), Fig. 3.22(a), în cazul joncțiunii tunel, curentul străbate structura perpendicular pe plan (așa numita configurație Current Perpendicular to Plane – CPP), Fig. 3.22(b,c).

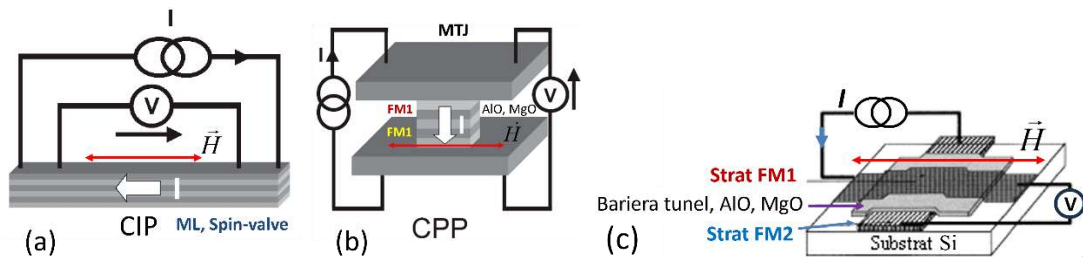


Fig. 3.22. (a) Configurația CIP tipică pentru structuri magnetorezistive, AMR și GMR, (b) configurația CPP utilizată pentru conectarea și exploatarea efectului de tunelare dependentă de spin (TMR) și (c) structura MTJ cu straturile magnetice depuse în cruce între care se află bariera tunel și modul de conectare în 4 sonde, H este câmpul magnetic care, tipic, este aplicat în planul structurii (Fig. (a-b) adaptate după [7], (c) după [1])

Așa cum am arătat în [1, 41], curentul printr-o joncțiune tunel de tip metal-oxid-metal (MOM) depinde de nivelul de injecție, având un caracter exponențial. Fitarea acestei caracteristici permite evaluarea pe cale electrică a lărgimii și înălțimii barierei tunel [1, 41]. Experimentele de tunelare au arătat că electronii de conducție în metale feromagnetice prezintă polarizare de spin și că spinul se conservă în procesul de tunelare. Astfel, stratul FM care injectează electroni în joncțiune acționează ca un *polarizor* – majoritatea electronilor vor avea spinul polarizat conform magnetizării acestui strat, exemplu FM1. O mică parte din electronii injectați vor avea spini cu alte orientări. Astfel, se poate vorbi despre două canale de spini: majoritari și minoritari, ca în Fig. 3.16(a) unde este descris efectul GMR. Stratul FM2, în care ajung electronii,

acționează ca un *analizor*. Astfel, dacă magnetizările din straturile FM adiacente sunt orientate paralel, conducția prin joncțiunea tunel se va datora electronilor cu spin majoritar (polarizați în stratul injector) astfel că, rezistența structurii este minimă, R_p . Dacă magnetizările din straturile FM adiacente sunt orientate antiparalel, conducția prin joncțiunea tunel se va datora electronilor cu spin minoritar iar rezistența structurii va fi maximă, R_{ap} . Configurația CPP, tipică joncțiunii tunel, elimină efectele de șuntare date de straturile nemagnetice ce apar în configurația CIP. Astfel, amplitudinea efectului TMR este mai mare decât în cazul GMR. Ca și în cazul efectului GMR, amplitudinea efectului TMR este exprimată prin:

$$TMR = \frac{R_{ap} - R_p}{R_p} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (18)$$

Primele structuri tunel cu straturi magnetice au utilizat straturi amorfe de Al_2O_3 ca barieră tunel iar amplitudinea efectului TMR a fost nu mai mare de 70 %. Utilizând straturi monocristaline de MgO , a făcut posibilă creșterea amplitudinii efectului TMR la 200 % la temperatura camerei [2, 6].

Structurile MTJ sunt larg utilizate ca senzori magnetici, capete de citire la HDD-uri dar și în realizarea elementelor de memorii nevolatile, MRAM. Uzual, structurile MTJ au suprafețe mai mici de $10 \mu m^2$, ajungând la valori de ordinul zecilor-sutelor nm^2 în cazul memoriilor magnetice. Deși senzorii TMR oferă semnale mai mari decât cei GMR, procesele de microfabricație sunt mai costisitoare și pretențioase datorită barierei tunel care necesită suprafețe cu rugozități mai mici de 0,1 nm astfel încât parametrii joncțiunii tunel să poată fi controlați într-un mod reproductibil. În plus, rezistența joncțiunii tunel este mai mare decât cea a structurilor GMR (<https://www.nve.com/analogSensors>) iar procesul de tunelare a electronilor, prin bariera de oxid, crește nivelul zgomotului electric al semnalului furnizat.

3.5. Deriva termică și zgomotul electric în senzorii magnetorezistivi

În [6] am făcut o analiză a ponderii derivatei termice și a zgomotului electric (intrinsec) ce caracterizează senzorii MR bazați pe efectele enumerate mai sus. Aceste considerații sunt utile în procesul de alegere a tipului de senzor și a setup-ului de măsură.

Deriva termică este un factor important ce limitează performanța senzorilor MR în zona câmpurilor scăzute, atunci când tensiunea este măsurată de-a lungul curentului, Fig. 3.1(a).

Structurile AMR, ca elemente rezistive simple, nu sunt utile pentru a fi folosite ca senzori întrucât sunt afectate de fluctuații termice, de ordinul a 0,3 %/K în timp ce sensibilitatea este în jur de 0,5%/G ($50 T^{-1}$), cu un răspuns neliniar și sensibilitate scăzută în jurul câmpului 0 [6, 84]. Totuși, așa cum se observă în Fig. 3.1(b), variația rezistenței este liniară (pozitivă sau negativă) atunci când M se rotește în jurul valorilor $\theta = \pm 45^\circ$ cu direcția curentului din strat. Pe baza acestei observații se utilizează așa numita tehnică de polarizare Barber-Pole în care, prin depunerea unor benzi conductoare înguste din Au deasupra stratului FM, curentul este forțat să facă un unghi de $\pm 45^\circ$ cu direcția magnetizării din strat. Aceste elemente rezistive

sunt conectate într-o configurație de tip punte Wheatstone care permite o bună compensare termică a semnalului de ieșire și o mărire a sensibilității de patru ori față de cea a unui singur element. Ideal, puntea este echilibrată pentru $H=0$ iar semnalul de ieșire prezintă o variație liniară cu câmpul aplicat. Tehnica este utilizată pe scară largă în fabricarea cip-urilor cu senzori AMR ce pot detecta câmpuri magnetice cu sensibilități de ordinul $0,35 \text{ (mV/V)/Oe}$ [3, 60]. Pe acest principiu de liniarizare dar, folosind structuri de tipul FM/AFM cu un design ce implică folosirea unei singure măști, și fără a mai depune benzile de Au, au fost realizați și testați de către autor, în condiții de laborator, senzori de câmp magnetic și de curent [15, 16, 62]. Problema zgomotului electric este doar parțial rezolvată, datorită configurației de punte Wheatstone.

În cazul senzorilor GMR, conectarea elementelor rezistive în punte Wheatstone permite utilizarea doar a două dintre ele ca senzori activi (cele de pe brațele opuse), celelalte două fiind ecranate și având doar rolul de completare a punții și de compensare termică a coeficientului derivatei semnalului de ieșire la valori cuprinse între $-0,1$ la $-0,4 \text{ \%/}^\circ\text{C}$ [81, 82]. Valoarea negativă a acestui coeficient arată că proprietățile magnetice ale stratului se degradează cu creșterea temperaturii iar fenomenul de împrăștiere difuză a electronilor se amplifică. Coeficientul de variație a rezistenței punții este în jur de $0,1$ - $0,14 \text{ \%/}^\circ\text{C}$. Aceste aspecte vor fi particularizate când vor fi prezentate contribuții la dezvoltarea unui sistem de măsurare non-contact a curentului electric [74, 75]. Așa cum este de așteptat, în cazul senzorilor TMR, conectați în punte Wheatstone, coeficientul de variație a rezistenței joncțiunii tunel este unul negativ, $-0,08 \text{ \%/}^\circ\text{C}$. Coeficientul derivatei semnalului de ieșire ia valori cuprinse în intervalul $0,1$ - $0,25 \text{ \%/}^\circ\text{C}$ [81].

Așa cum a fost evidențiat, efectul Hall planar, ce este o consecință a efectului AMR din straturile magnetice, aduce câteva avantaje precum răspuns liniar în zona câmpului zero și comportare electrică echivalentă unei punți Wheatstone. Pe de altă parte, semnalul măsurat în configurația de efect Hall, E_y , respectiv U_{PHE} , ec. 7 și 9 din Cap.2, oferă o reducere a derivatei termice a semnalului de ieșire cu până la patru ordine de mărime față de senzorii AMR bazați pe variația componentei longitudinale a rezistivității, ρ_{xx} , și un raport semnal/zgomot (S/N) mai mare de 1000 [6, 84]. Acestea permit atingerea unor rezoluții de ordinul zecilor de nT pentru senzori PHE ce folosesc, uzual, o geometrie simplă, de tip cruce sau eliptică [6, 63, 66], cu suprafața zonei centrale ce poate varia de la câteva zeci de μm^2 la mm^2 . Setup-ul de măsură al efectului Hall planar oferă acces direct la componenta anizotropă a magnetorezistenței, $\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}$, ec. 7 și 9, devenind, așa cum am arătat din simulări și caracterizări experimentale, un instrument util de caracterizare a straturilor magnetice. Așa cum am arătat, ca un aspect de originalitate, în multe din studiile pe care le-am raportat, structura PHE a avut o geometrie de tip disc [6, 43, 44, 49, 50].

Stabilitatea termică a semnalului de ieșire pentru senzorii PHE se datorează unor interacțiuni complexe ce au loc în structură [6]. Astfel, pentru structurile NiFe/Cu/IrMn sensibilitatea, $S_{PHE}=dU_{PHE}/dH$, prezintă o variație cu temperatura a semnalului PHE de aproximativ $4,5 \times 10^{-3}$

V/A/T/K, pentru B în intervalul ± 2 mT, și o variație a temperaturii în intervalul -186 la 86 °C. Pentru structurile FM/AFM, acest coeficient de variație este sensibil mai mare [6]. Utilizarea unui sistem diferențial, compus din doi senzori PHE identici, unul din ei fiind ecranat (senzor de referință), poate crește stabilitatea termică a semnalului de ieșire.

În articolul de review [6] am analizat componentele zgomotului electric intrinsec, ce caracterizează senzorii magnetorezistivi.

Zgomotul termic (Johnson noise) se datorează fluctuațiilor electronilor din structură. Densitatea spectrală este dată de formula Nyquist:

$$S_{Johnson} [V^2 \cdot Hz^{-1}] = 4K_B \cdot T \cdot R \quad (19)$$

unde K_B este constanta lui Boltzmann, T este temperatura în K iar R este rezistența structurii.

Acest tip de zgomot alb *nu are legătură cu câmpul magnetic aplicat*, este independent de tensiunea aplicată și este direct asociat cu rezistența structurii și temperatura de lucru. Pentru senzorii AMR, GMR și TMR, R (asociată cu R_x din Fig. 3.1(a)) ia valori în intervalul $10^2 \Omega$ - sute k Ω pe când, R_y asociată cu rezistența pe direcția y , unde este măsurată tensiunea PHE, ia valori de ordinul zecilor-sutelor de Ohmi. Pentru $R_y=100 \Omega$, zgomotul termic este $\sim 1,3 \text{ nV}/(\text{Hz})^{1/2}$ ceea ce, pentru un senzor PHE, este echivalent cu un zgomot magnetic $1\text{-}1,3 \text{ nT}/(\text{Hz})^{1/2}$. Acest zgomot electric este mai mic decât zgomotul circuitelor de condiționare a semnalului. Rezistența pe ramura de măsurare a semnalului pentru senzorii PHE utilizați de autor este în domeniul $30\text{-}100 \Omega$.

Zgomotul de alicie (shot noise) este important în joncțiunile tunel unde prezența barierei de oxid produce discontinuități în procesul de conducție a electronilor. Acest zgomot este mai redus în structurile AMR, GMR și virtual absent în semnalul PHE.

Zgomotul 1/f reprezintă o componentă importantă în zona frecvențelor joase pentru senzorii MR. Exceptând zgomotul sursei de alimentare, în materialele magnetice acest zgomot provine de la mișcările domeniilor magnetice, în jurul pozițiilor de echilibru, activate termic sau datorită vibrațiilor mecanice ale substratului ce pot induce fenomene magnetoelastice. Fluctuațiile magnetice se traduc, datorită efectelor MR, în fluctuații ale semnalului electric. Dinamica domeniilor magnetice depinde de forma și dimensiunea senzorului și de parametrii de material. O valoare crescută a anizotropiei efective, datorată anizotropiei magnetocristaline, anizotropiei de formă (aspect de formă ridicat) și a câmpului de polarizare prin interacție de schimb, poate aduce structura magnetică a senzorului aproape de cea monodomenială ceea ce reduce zgomotul asociat domeniilor magnetice. Pe de altă parte, o anizotropie crescută reduce sensibilitatea senzorului MR pentru că sunt necesare câmpuri magnetice mai mari pentru a roti momentele magnetice din strat. Astfel, este necesar un compromis în ceea ce privește raportul semnal/zgomot (S/N) și sensibilitatea senzorului.

În Tabelul 3.1 am sintetizat câteva caracteristici importante pentru senzorii prezentați.

Tabelul 3.1. Caracteristici comparative pentru senzori MR (adaptat după [6])

Tipul de senzor	I (mA)	Rezoluție $\mu_0 H_{\min}$ (nT)	Raportul S/N
AMR -ring (config. punte)	10	26	50
PHE	10	32	1453
GMR SV	10	54	442
GMR ML	5	93	382
TMR	1	202	114

Aceste aspecte, precum derivă termică redusă, raport S/N ridicat dar și procesul de microfabricație mai simplu, comparativ cu cel pentru structurile GMR, m-au determinat să utilizez structuri PHE pentru dezvoltarea unor aplicații destinate senzorilor magnetici precum, senzori de câmp magnetic, senzori de rotație [43, 48-50] sau senzori pentru detecția NPM [44, 45, 53].

3.6. Concluzii

În acest capitol au fost prezentate aspecte fundamentale privind descrierea și modelarea micromagnetică a efectelor MR precum AMR, PHE și GMR. Acestea au fost completate de exemplificări cu teste experimentale pe structuri reprezentative și cu prezentarea unor aplicații practice precum senzor de câmp magnetic, senzor de rotație sau senzor pentru detecția nanoparticulelor magnetice. A fost evidențiată legătura profundă dintre comportarea stării de magnetizare a senzorului și efectele MR ce se stabilesc în acesta. Astfel, aceste structuri pot fi folosite și pentru studiul, pe cale electrică, a proprietăților magnetice ale acestora.

Comportarea efectului GMR a fost exemplificată cu teste experimentale pe structuri ce au fost folosite în dezvoltarea unor aplicații precum detecția non-contact a curentului electric sau detecția nanoparticulelor magnetice.

Capitolul 4. Sistem de măsurare non contact a curentului electric folosind senzori GMR

Aspectele prezentate în acest capitol au fost publicate în [74, 75, 85] și au fost studiate în cadrul unor contracte de cercetare precum [15, 16]. Astfel, a fost dezvoltat un sistem performant de măsurare non-contact a curentului electric DC/AC, bazat pe o configurație diferențială, ce este capabil să detecteze curenți de ordinul zecilor de μA . Sistemul este caracterizat printr-o foarte bună stabilitate termică și liniaritate crescută a semnalului de ieșire. Au fost realizate două iterații ale acestui sistem în scopul creșterii performanțelor de detecție a curentului electric.

4.1. Introducere

Tehnicile de măsurare de tip non-contact (transformatoare de curent, bobine de tip Rogowski, senzori (micro)fluxgate, senzori Hall, senzori magnetorezistivi (MR)) prezintă avantajul izolării galvanice față de linia de curent ce este esențială în multe aplicații. Transformatoarele de curent și bobinele Rogowski sunt senzori de curent bazați pe metode inductive ce funcționează în AC. Detecția curentului pe baza câmpului magnetic produs de acesta este bazată pe legea lui Ampère și permite măsurarea atât în DC cât și în AC. Astfel, curentul ce străbate un traseu conductor produce un câmp magnetic ce poate fi măsurat folosind senzori Hall, magnetorezistivi sau (micro)fluxgate ce permit detecția atât a câmpurilor magnetice constante (DC) cât și alternative (AC) [86-91], Fig. 4.1.

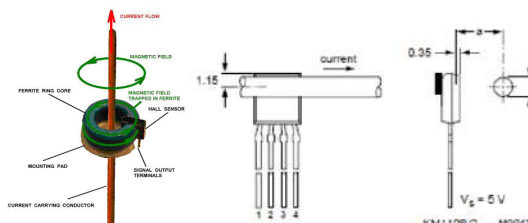


Fig. 4.1. Ilustrarea principiului detecției non-contact a curentului electric.

Din Fig. 4.1 rezultă cele două metode de măsură principale: (i) în circuit magnetic închis, când se folosește un miez magnetic prin care se închid liniile de câmp și (ii) în circuit magnetic deschis. În primul caz, senzorul magnetic, Hall, AMR sau GMR, se plasează în întrefierul acestui circuit magnetic. Sensibilitatea poate fi mare dar apar efectele de histerezis magnetic și neliniarități datorate miezului magnetic. Acest neajuns poate fi eliminat prin utilizarea unei bobine de compensare, plasată pe miez, ce anulează în permanență, prin intermediul unui circuit de feedback, câmpul magnetic creat de către curentul ce trece prin conductor – aceasta este metoda de măsură în buclă închisă. În acest caz, senzorul de câmp magnetic acționează ca un senzor de nul. Curentul prin bobina de compensare este o măsură a curentului de măsurat [91]. Aceeași tehnică este utilizată și în cazul senzorilor de curent ce integrează în același cip, pe lângă senzorii AMR și traseul de curent, și un conductor prin care trece curentul de feedback ce menține senzorii în starea inițială, de câmp 0 [87]. Această metodă de lucru în buclă închisă [87, 91] necesită circuite electronice complexe și este consumatoare de energie.

Pe de altă parte, măsurarea directă a câmpului magnetic creat de către curentul ce străbate traseul conductor, fără utilizarea unui circuit magnetic, aduce simplitate lanțului de măsură și sunt evitate efectele de neliniaritate aferente miezului magnetic. Având în vedere forma liniilor de câmp magnetic și necesitatea ca, în cazul curenților mai mici de 1 A, senzorul să fie cât mai aproape de suprafața traseului conductor, utilizarea senzorilor magnetorezistivi bazați pe efectele AMR, GMR sau PHE poate reprezenta soluția optimă. Așa cum am arătat în [6] senzorii MR realizați din straturi subțiri magnetice prezintă sensibilități mult crescute față de senzorii Hall, fiind capabili să deceleze câmpuri magnetice în domeniul 10^{-9} - 10^{-2} T. Dacă detecția câmpului magnetic produs de către curenți mai mari de 10 A nu este dificilă, utilizarea senzorilor MR poate conduce la extinderea domeniului de măsură spre valori mai mici de 1 mA atât în DC cât și în AC. Astfel, pot fi dezvoltate aplicații speciale în domeniul electronicii medicale, testării circuitelor electronice, monitorizarea unor componente din surse de putere sau amplificatoare [92], detectarea liniilor de alimentare cu energie electrică din pereți, etc.

4.2 Principiul de detecție a curentului

Fig. 4.2 ilustrează principiul de detecție a curentului ce străbate un traseu conductor. Acest curent generează un câmp magnetic [74] ce este detectat de către senzorul de câmp magnetic, bazat pe efectul de magnetorezistență gigantică, a cărei caracteristică de câmp a fost prezentată în Fig. 3.19(c).

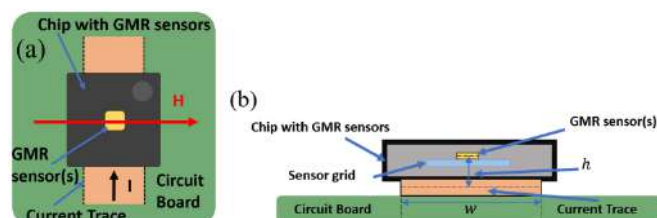


Fig. 4.2. Principiul de detecție a curentului ce străbate o bandă conductoare folosind un senzor de câmp magnetic bazat pe efectul GMR. a) vedere în plan și b) vedere în secțiune.

Banda de conductoare este definită pe un cablaj imprimat denumit în continuare PCB (Printed Circuit Board). Curentul ce o străbate generează un câmp magnetic ce va avea o componentă *rezultantă* paralelă la suprafață, Fig. 4.2(a). Senzorii MR din straturi subțiri sunt sensibili la această componentă în plan și pot fi plasați cât mai aproape de suprafață. Structura cipului cu senzori (plachetă, grila de conectare, etc) este tipică tehnologiei circuitelor integrate, Fig. 3.19(b) și Fig. 4.2(b). În continuare, pentru simplitate, banda conductoare prin care circulă curentul I va fi numită "banda de curent" - current trace (adaptat din [74]).

Pentru a estima câmpul magnetic creat de această bandă de curent în zona senzorului magnetic, a fost considerat un model ca cel prezentat în Fig. 4.3. Se consideră o bandă de curent, de lățime w și grosime t , prin care circulă un curent de intensitate I de-a lungul axei Oy . Curentul este uniform distribuit prin banda conductoare și, în acest caz, $h > t$.

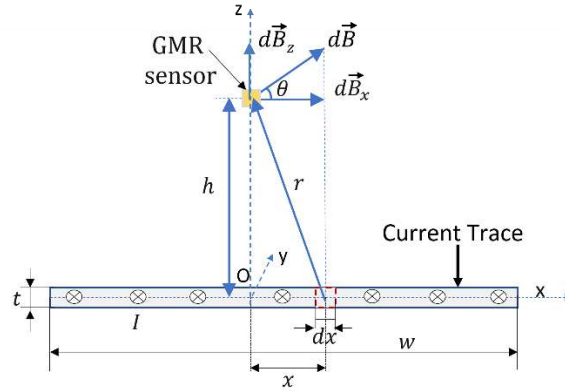


Fig. 4.3. Vedere în secțiune (detaliu la Fig. 4.2(b)) reprezentând parametrii modelului analitic utilizat pentru calculul câmpului creat de către banda de curent (adaptat din [74]).

Astfel, considerând densitatea liniară de curent I/w [A/m], se poate exprima, în aproximația unui conductor foarte lung, câmpul magnetic elementar dB , creat de curentul dI , în locul unde se află senzorul magnetic:

$$dB = \mu_0 \frac{dI}{2\pi r}, dI = \frac{I}{w} dx \quad (1)$$

iar componenta după axa Ox va fi:

$$dB_x = dB \cdot \cos\theta = \mu_0 \frac{h}{2\pi} \cdot \frac{I}{w} \cdot \frac{dx}{h^2 + x^2} \quad (2)$$

unde $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m este permeabilitatea magnetică a vidului.

Uzual, grosimea traseului de curent, t , este cuprinsă în intervalul 0,018-0,036 mm iar h ia valori între 0,4-0,8 mm pentru cipuri cu montare SMD, în funcție de tipul de încapsulare, SOIC8, TDFN6 sau ULLGA4 și de procesul de microfabricație ce stabilește plasarea plachetei de Si cu senzorii GMR în cip [81]. Pentru senzorul utilizat în acest studiu, AA003-02 produs de Nonvolatile Electronics (NVE), $h=0,8$ mm pentru încapsulare SOIC8. Acest parametru poate fi găsit la <https://www.nve.com/spec/calculators#tabs-Current-Sensing> în funcție de setup-ul folosit. Astfel, întrucât $h \gg t$, în această abordare traseul conductor nu a fost subdivizat în mai multe straturi, cu grosimi t/N (N – numărul de straturi), dar metoda poate fi extinsă și la această abordare. În [62] am arătat că, în acest caz, subdivizarea în mai multe straturi a benzii conductoare nu produce rezultate diferite în estimarea câmpului creat în zona senzorului. Dacă [93] estimează valoarea câmpului magnetic în zona senzorului folosind metoda elementelor finite, noi am stabilit o formulă analitică în urma integrării ecuației (2), considerând că senzorul este plasat pe mijlocul traseului de curent, astfel încât componenta verticală a câmpului, B_z , se anulează. Expresia câmpului magnetic, în zona senzorului devine [74]:

$$B = B_x = \left[\frac{I}{w} \cdot \arctan \left(\frac{w}{2h} \right) \right] \cdot 4 \cdot 10^{-7} \text{ [T]} \quad (3)$$

sau

$$B = B_x = \left[\frac{I}{w} \cdot \arctan \left(\frac{w}{2h} \right) \right] \cdot 4 \cdot 10^{-3} \text{ [G]} \quad (4)$$

Astfel, pentru $h=0,8$ mm (pentru senzorul AA003-02 de la NVE și capsulă SOIC8), $w=2$ mm, $t=0,036$ mm (1 Oz) și un curent de 4 A, rezultă un câmp $B=B_x=7,16 \times 10^{-4}$ T=7,16 G. Această valoare este în foarte bun acord cu [93].

Pentru regiunea liniară de răspuns a senzorului, Fig. 3.19(c), semnalul furnizat va fi:

$$\Delta U_{out} = U_s(I) - U_s(I = 0) = S_{eff} \cdot B \quad (5)$$

unde U_s reprezintă tensiunea de ieșire a senzorului pentru $I \neq 0$ respectiv $I = 0$; S_{eff} reprezintă sensibilitatea senzorului ce depinde de tipul senzorului, de zona de lucru de pe caracteristică și de tensiunea (curentul) de alimentare, Fig. 3.19(c)

Pentru senzorul GMR AA003-02, $S = 2.6$ mV/(V×Oe). Pentru o tensiune de alimentare $V_s = 5$ V, se obține $S_{eff} = 13$ mV/Oe și o variație a tensiunii de ieșire $\Delta U_{out} = 93.18$ mV pentru $I = 4$ A. Aceste calcule au ajutat la estimarea amplitudinii semnalelor implicate, în scopul implementării practice a sistemului de măsură. Se observă că, pentru curenți mai mici de 1 A, vor trebui găsite metode de îmbunătățire a performanțelor sistemului de detecție și de micșorare a influenței unor parametri externi precum fluctuații de temperatură și câmp magnetic extern. Pentru $I < 1$ A, B devine comparabil sau chiar mai mic decât câmpul magnetic terestru. Prin urmare, sistemul de detecție a curentului va trebui să adreseze aceste probleme.

4.3. Implementarea unui sistem diferențial de detecție a curentului

4.3.1. Teste de detecție a curentului printr-o bandă conductoare

Au fost realizate teste preliminare de detecție pentru a putea stabili parametrii optimi de funcționare ai senzorului în scopul obținerii unei caracteristici de răspuns liniare și cu histerezis minim. Pentru aceasta, a fost folosit un setup ca cel din Fig. 4.2 în care traseul conductor are o lățime $w = 0,254$ mm, detaliile experimentale suplimentare fiind publicate în [74]. Prin traseu a fost aplicat un curent alternativ foarte lent variabil cu amplitudinea de 0,16 A; senzorul GMR AA003-02 a fost alimentat cu un curent de 1 mA (a se vedea Fig. 3.19(c) pentru caracteristica în câmp). Senzorul nu este polarizat în câmp magnetic extern. Fig. 4.4 prezintă caracteristicile de răspuns ale senzorului [74].

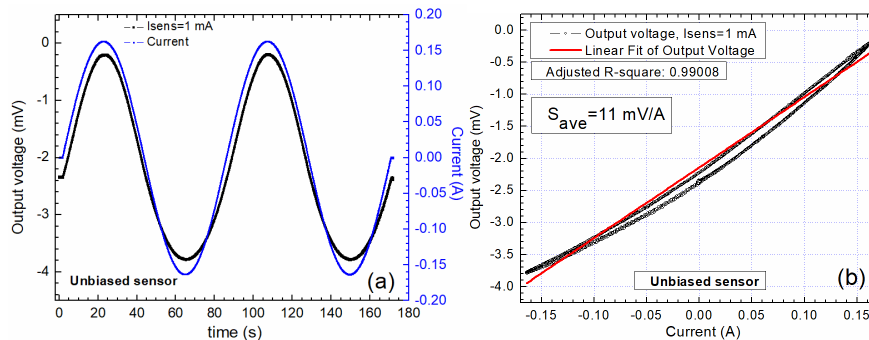


Fig. 4.4. (a) Formele de undă ale semnalului furnizat de senzor și ale curentului prin traseul conductor și (b) caracteristica de calibrare tensiune de ieșire în funcție de curentul prin traseu; senzorul nu este polarizat [74].

Se remarcă răspunsul neliniar al senzorului și efectul de histerezis magnetic. Trebuie menționat că, pentru aceste valori ale curentului prin traseul conductor, câmpul magnetic aplicat senzorului variază între $\pm 0,4$ Oe care este comparabil cu intensitatea câmpului magnetic terestru (0,25 până la 0,65 Oe).

Strategia utilizată pentru a depăși aceste neajunsuri constă în (i) polarizarea senzorului pentru a fi adus într-o zonă de caracteristică liniară și (ii) utilizarea unui setup diferențial de măsură care să permită o mai bună stabilizare termică și reducerea influenței câmpului magnetic extern, de exemplu cel terestru.

Folosind un sistem de bobine, în care a fost introdus sistemul de test pentru detecția non-contact a curentului, a fost aplicat un câmp magnetic de polarizare de ± 5 Oe. Fig. 4.5 și 4.6 prezintă răspunsul sistemului de detecție pentru $H_{bias}=5$ Oe, respectiv -5 Oe.

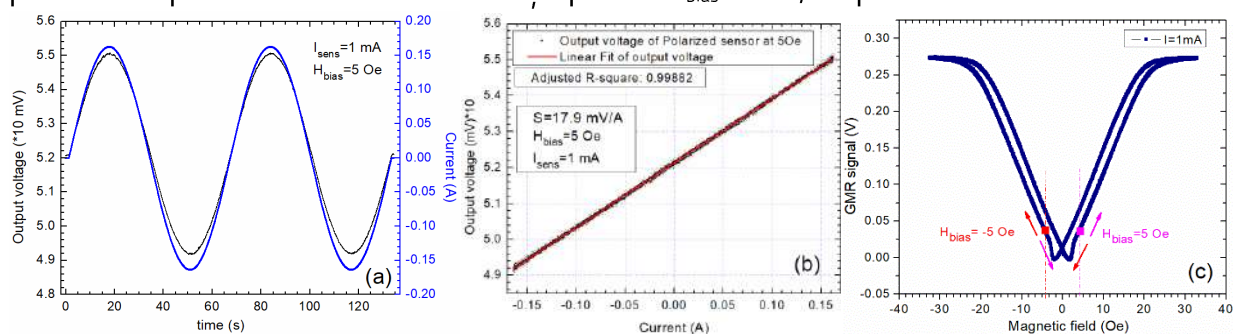


Fig. 4.5. Caracteristicile de răspuns ale senzorului GMR AA003-02 polarizat la $H_{bias}=5$ Oe reprezentând (a) forma de undă a semnalului furnizat de senzor prin comparație cu cea a curentului prin traseul conductor și (b) caracteristica de calibrare; în (c) este prezentat principiul polarizării pentru $H_{bias}=\pm 5$ Oe (adaptat din [74]).

Se observă (i) că semnalul senzorului este în fază cu cel al curentului prin banda conductoare și (ii) dependența liniară a semnalului furnizat de senzor în funcție de curent, Fig. 4.5(b).

Fig. 4.5(c) ilustrează modul de lucru al senzorului polarizat: pentru $H_{bias}=5$ Oe, semnalul de ieșire crește pentru $\Delta H > 0$ și scade pentru $\Delta H < 0$ (ΔH reprezintă variația câmpului aplicat relativ la punctul static de funcționare impus de H_{bias}). Pentru $H_{bias}=-5$ Oe, variația tensiunii de ieșire are sens inversat în funcție de ΔH , Fig. 4.5(c). Astfel, pentru $H_{bias}=-5$ Oe, semnalul de ieșire a senzorului va avea o diferență de fază de 180° față de curent, Fig. 4.6.

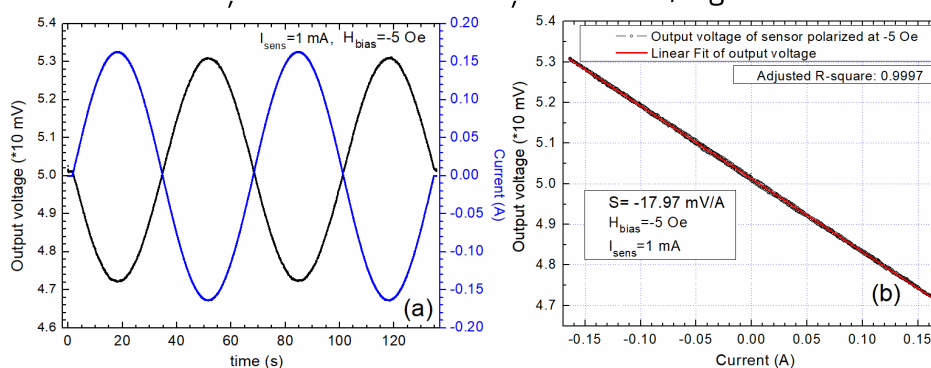


Fig. 4.6. Caracteristicile de răspuns ale senzorului GMR AA003-02 polarizat la $H_{bias}=-5$ Oe reprezentând (a) forma de undă a semnalului furnizat de senzor prin comparație cu cea a curentului prin traseul conductor și (b) caracteristica de calibrare [74].

Caracteristicile prezentate în Fig. 4.5-4.6 arată (i) că se poate liniariza caracteristica de detecție a curentului electric și (ii) sugerează modul de implementare a unui sistem diferențial de măsură. De asemenea, amplitudinea variației a semnalului de la senzor oferă informații utile pentru proiectarea sistemului de condiționare a semnalului și de achiziție a datelor.

4.3.2. Implementarea practică a sistemului diferențial de detecție a curentului

Pentru a utiliza un setup de măsurare diferențial, a fost realizat pe PCB un circuit în formă de "U" în care banda conductoare are o lățime $w=2$ mm și grosime $t=0,036$ mm (1 oz.) pentru a suporta curenți de până la 6 A [93]. Pe fiecare latură a fost plasat câte un senzor GMR AA003-02. Pentru $I=4$ A, câmpul generat în zona senzorilor GMR este de 7,18 Oe. Pentru a menține senzorii în zona de liniaritate, câmpul de polarizare a fost setat la 8 Oe. În [74] au fost oferite detalii privind pașii implementării practice.

Figura 4.7(a) prezintă PCB-ul cu traseul în formă de U peste care sunt plasați cei doi senzori GMR identici iar în Fig. 4.7(b) este vizibil circuitul magnetic de polarizare. Pe partea cablată este plasat și un senzor de temperatură pentru a monitoriza temperatura în zona senzorilor. În Fig. 4.7(c) este ilustrat modul în care polarizarea acționează asupra ambilor senzori, numiți S_1 și S_2 .

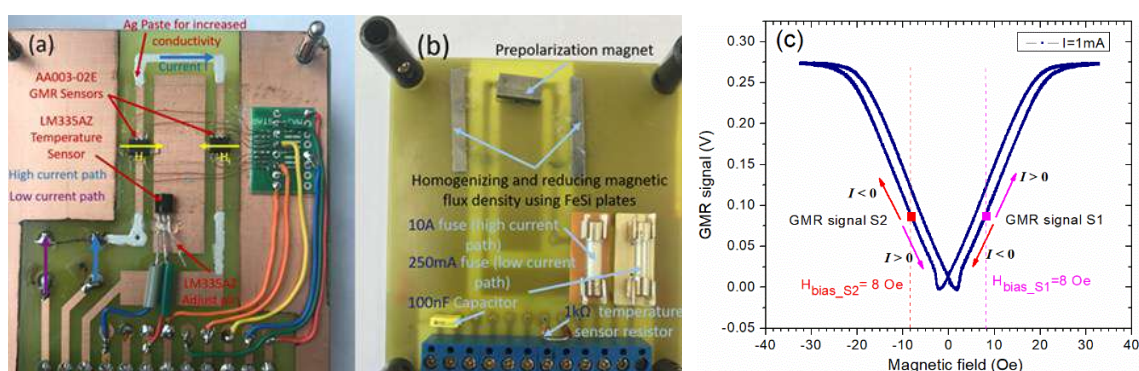


Fig. 4.7 (a, b) Implementarea practică a sistemului diferențial de măsurare a curentului folosind doi senzori identici și (c) modul de acțiune a câmpului de polarizare (adaptat după [74]).

Prin poziționarea fină a magnetului, Fig. 4.7(b), se pot polariza cei doi senzori la $H \approx 8$ Oe astfel încât tensiunile de ieșire furnizate de S_1 și S_2 să fie cât mai apropiate – offset-ul sistemului diferențial să fie minim pentru $I=0$. Cei doi senzori sunt supuși unor câmpuri identice dar de orientări opuse atunci când prin banda conductoare trece un curent I , Fig. 4.7(a). Din Fig. 4.7(c) se desprinde modul de funcționare al sistemului diferențial de măsură: când $I > 0$, tensiunea de ieșire a senzorului 1 crește iar cea a senzorului 2 scade. Când $I < 0$, variațiile semnalelor de la cei doi senzori sunt în sens invers. Având în vedere nivelul semnalelor de pe fiecare senzor și amplitudinea variației acestora, sistemul de măsură conține amplificatoare de instrumentație (EI 1040) care condiționează semnalul înainte de a fi aplicat pe intrarea analogică a plăcii de achiziție a datelor, LabJack U12. Schema bloc a sistemului diferențial de măsură este prezentată în Fig. 4.8. EI 1040 conține două amplificatoare de instrumentație cu câștig ce poate fi setat digital și o sursă de tensiune de 4,096 V destinată alimentării senzorilor.

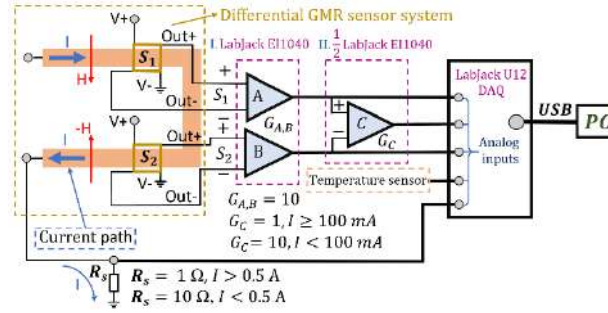


Fig. 4.8. Schema bloc a sistemului diferențial de măsură a curentului, folosind senzori GMR; $G_{A,B}$ semnifică amplificarea pentru fiecare canal, asociat senzorilor 1 și 2. G_C este amplificarea pentru canalul diferențial [74].

În această aplicație, senzorii au fost alimentați la o tensiune de 4,096 V, generată de către sursa compensată termic din EI 1040. La această tensiune, curentul prin fiecare senzor va fi de aproximativ 0,8 mA, deci ușor mai mic decât curentul la care au fost realizate testele preliminare. Totuși, prin această abordare a fost simplificată foarte mult realizarea practică a sistemului la un cost redus ce face sistemul de măsură să fie atractiv pentru dezvoltarea unor aplicații de monitorizare non-contact a curentului electric. Curentul din traseul conductor este măsurat prin intermediul tensiunii citite pe R_s . Placa de achiziție citește semnalele amplificate, provenite de la fiecare senzor GMR în parte, A, B, de la circuitul diferențial de amplificare, C, de la rezistența de sarcină, R_s , cât și de la senzorul de temperatură, Fig. 4.8.

Având în vedere structura internă a acestor cipuri, ele acționează ca un magnetometru diferențial stabilizat termic, Fig. 3.19(a). Pe de altă parte, sistemul de măsură utilizat în Fig. 4.8, reprezintă tot un setup diferențial ce poate compensa influența câmpurilor magnetice externe și, din nou, variația temperaturii externe. De aceea, în [74], noi am numit această configurație ca fiind una *dublu diferențială*, ce reprezintă un element de noutate.

Astfel, făcând analiza parametrilor externi de influență, precum câmp magnetic extern, H_{ext} și temperatură, și considerând schema din Fig. 4.8, se poate obține pentru tensiunea de ieșire a sistemului diferențial, aplicată la intrarea plăcii de achiziție de date [74]:

$$\Delta U = U_{S1} - U_{S2} = (K_{S1} + K_{S2}) \cdot H_I + (S_1 - S_2) \cdot \Delta T + (K_{S1} - K_{S2}) \cdot H_{ext} \quad (6)$$

unde $K_{S1,2}$ sunt constantele de sensibilitate în câmp ale senzorilor 1 și 2 în zona liniară de răspuns, H_I este câmpul magnetic creat de curentul I în fiecare senzor iar $S_{1,2}$ reprezintă coeficientul de variație a semnalului de ieșire cu temperatura, T . Pentru senzorul utilizat, alimentat la tensiune constantă, $S_{1,2} \approx -0,1 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ [81].

Astfel, tensiunea provenind de la sistemul diferențial poate fi aproximată ca fiind

$$\Delta U = (K_{S1} + K_{S2}) \cdot H_I = (K_{S1} + K_{S2}) \cdot C \cdot I = S \cdot I \quad (7)$$

unde, $S \text{ (V/A)}$ este sensibilitatea sistemului diferențial de măsurare a curentului.

4.3.3. Rezultate privind performanțele sistemului de măsură și discuții

(a) Teste de detecție pentru curenți mai mari de 100 mA.

Fig. 4.9 prezintă rezultatele testelor de detecție a curentului electric în domeniul ± 2 A [74].

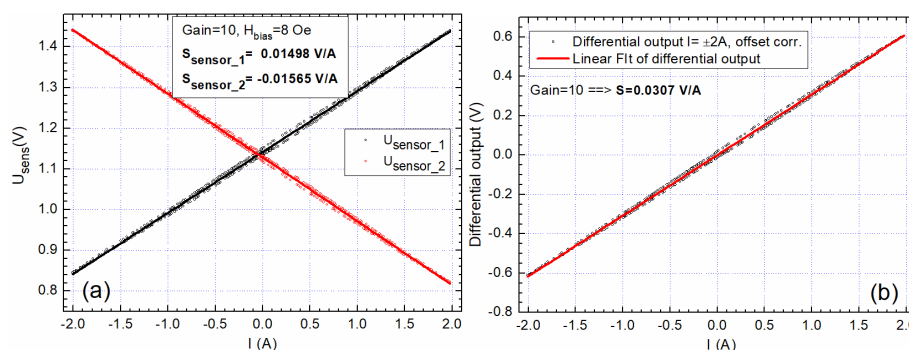


Fig. 4.9. (a) Tensiunile de ieșire ale senzorilor S_1 și S_2 în funcție de curent și (b) caracteristica sistemului diferențial.

Sensibilitatea sistemului diferențial este $S = 0.0307$ V/A și a fost pus în evidență un efect de histererezis de 0,04 A, pentru un domeniu de variație de ± 2 A a curentului aplicat; în acest caz, $G_A=G_B=10$ iar $G_C=1$.

Sistemul a dovedit capabilitatea de a-și menține un domeniu liniar al caracteristicii de ieșire și pentru o variație de ± 4 A a curentului prin traseul metalic. Fig. 4.10(a) prezintă caracteristica de ieșire, ce permite estimarea performanțelor de detecție; frecvența semnalului a fost 0,01 Hz și au fost parcurse două perioade ale semnalului pentru a evidenția stabilitatea semnalului furnizat de senzori și de către linia de măsură. Fig. 4.10(b) ilustrează cât de fidel urmărește semnalul de ieșire forma de undă a curentului [74].

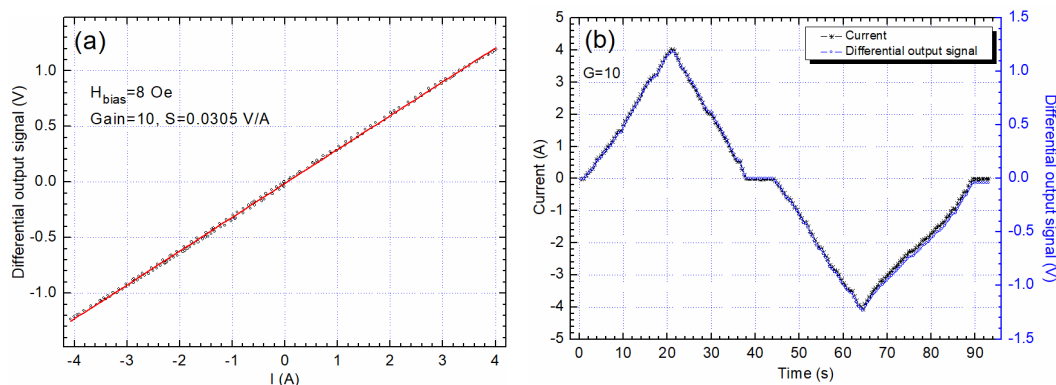


Fig. 4.10. (a) Caracteristica de detecție când I variază între ± 4 A și (b) formele de undă ale curentului din banda conductoare și ale semnalului furnizat de către sistemul de măsură [74].

Sistemul a fost testat și pentru detecția curentului alternativ cu frecvența de 50 Hz, cu o intensitate de 3 A, valoare efectivă (amplitudine de 4,24 A). Figura 4.11(a) prezintă formele de undă ale curentului și ale semnalului de ieșire a lanțului de măsură iar în Fig. 4.11(b) este prezentată analiza armonică a semnalului achiziționat. Întrucât, datorită naturii structurii din care sunt realizați, senzorii GMR pot funcționa fără probleme până la frecvențe de ordinul MHz [81], caracteristica de calibrare U-I din Fig. 4.9(b) sau Fig. 4.10(b) se aplică și în cazul curenților

alternativi. De fapt, singurele limitări, în acest caz, pot proveni de la sistemul de condiționare a semnalului și cel de achiziție a datelor.

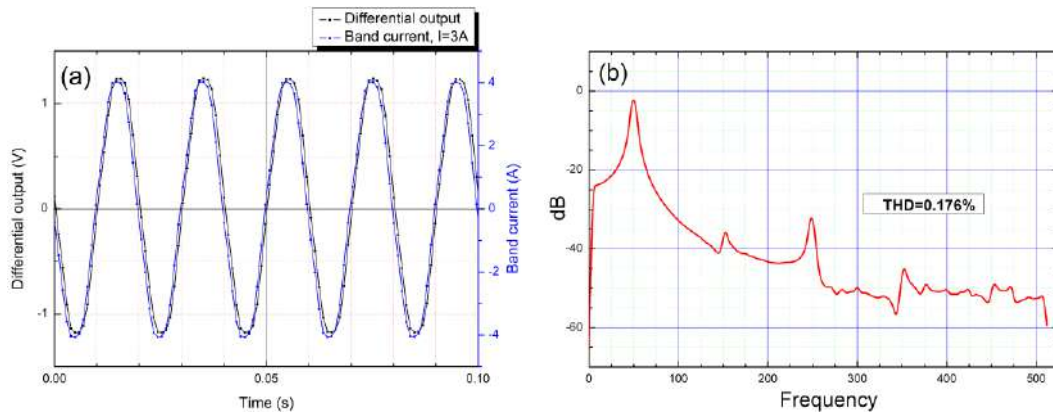


Fig. 4.11. (a) Răspunsul în AC a senzorului de curent, polarizat la 8 Oe, și (b) analiza armonică a semnalului furnizat de către lanțul de măsură; frecvența curentului este de 50 Hz iar valoarea efectivă a curentului este 3 A [74].

Factorul total de distorsiune armonică (THD) este 0,176 % ceea ce arată o calitate foarte bună a semnalului diferențial.

b Teste de detecție pentru curenți mai mici de 1 A

În cazul curenților mici, performanțele de detecție sunt limitate de factori precum valoarea extrem de mică a câmpului magnetic generat de către banda conductoare, sensibilitatea senzorilor GMR din sistemul diferențial, zgomotul electric al senzorului și al circuitelor electronice implicate. Tehnici de ecranare magnetică suplimentară și de ecranare electrică sunt necesare. Fig. 4.12(a) prezintă caracteristica de detecție a curentului în regim foarte lent variabil ($f=0,01$ Hz) și în AC pentru o frecvență de 50 Hz [74].

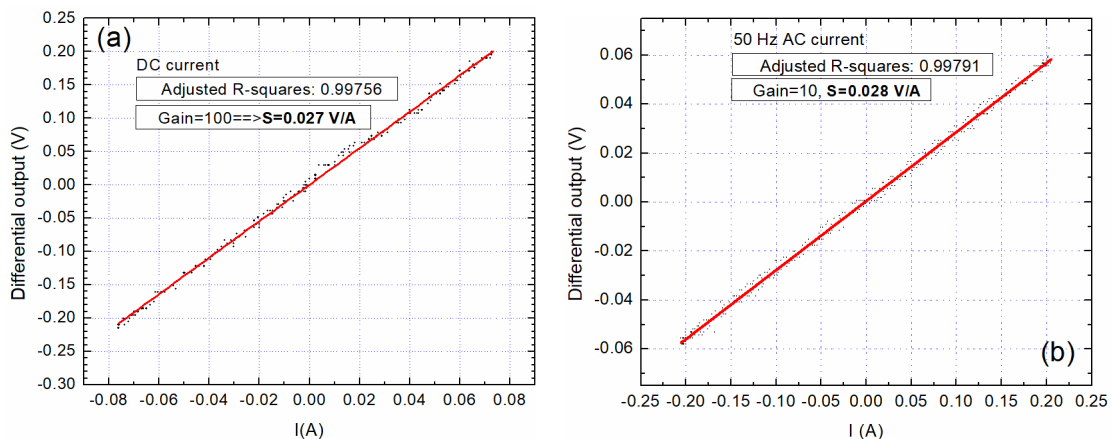


Fig. 4.12 Caracteristici de detecție pentru (a) un curent foarte lent variabil (0,01 Hz) ce variază între ± 75 mA și (b) pentru un curent alternativ (50 Hz) cu amplitudinea de 0,2 A [74].

Au fost efectuate măsurători în AC pentru curenți cu frecvența de 50 și cu valori efective cuprinse între 0,25 și 3 A. Rezultatele sunt prezentate în Fig. 4.13, unde se poate remarca o liniaritate deosebită a caracteristicii de detecție pentru acest interval, exprimată prin

coeficientul de corelare $R=0,99943$, iar eroarea pentru întregul domeniu de măsură (full-scale error) a fost calculată la 0.66%. [74]:

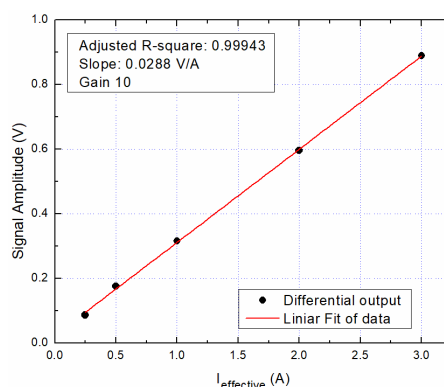


Fig. 4.13. Caracteristica de detecție în curent alternativ, de 50 Hz, pentru sistemul diferențial de măsură cu senzori GMR polarizați cu un câmp constant de 8 Oe [74].

Prin aceste rezultate, am arătat că, sensibilitatea sistemului de măsură este practic aceeași, atât în DC cât și în AC, fiind cuprinsă între 0,027 și 0,03 V/A pentru un interval de variație a curenților cuprins între zeci de mA până la 4 A.

Lățimea traseului conductor joacă un rol important în ce privește domeniul de valori, minim-maxim, pe care îl poate lua curentul. Astfel, traseele late favorizează sistemele dedicate măsurării curenților mari. Spre exemplu, traseul utilizat în această implementare, 2 mm lățime și 0,036 mm grosime, poate susține curenți de maxim 6,5 A [93]. Totuși, în cadrul experimentelor, am constatat o ușoară creștere a temperaturii traseului conductor, ce s-a stabilizat la 28 °C pentru un curent de 2 A, respectiv 36 °C pentru 3 A, după un timp de peste 30 minute [74].

Pe de altă parte, traseele înguste favorizează măsurarea curenților mici. Dacă în cazul $w=2$ mm, $t=0,036$ mm, și $I=100$ mA, câmpul creat de către traseul conductor este de 0,18 Oe, pentru traseul utilizat la testele preliminare, unde $w=0,254$ mm, $t=0,036$ mm, și $I=100$ mA, câmpul magnetic generat în zona senzorilor GMR este de 0,28 Oe. Prin urmare, *alegerea traseului conductor depinde de aplicația urmărită*.

Rezultatele testelor privind *stabilitatea termică* a sistemului diferențial realizat cu senzori GMR au arătat că deriva termică semnalului, TCOV (output change with temperature using a constant voltage source) este de aproximativ 0,07 %/°C pentru $I=1$ A, -0.0134 %/°C pentru $I=2$ A și 0.12 %/°C pentru $I=3$ A [74]. Câteva cauze sunt responsabile de deriva termică a semnalului provenit de la senzorii GMR: (i) variația (creșterea) rezistenței straturilor metalice cu temperatura și (ii) dependența de temperatură a efectului GMR. Influenta primei cauze este compensată practic complet de configurația în punte Wheatstone a senzorului iar configurația diferențială de măsură îmbunătățește această compensare. Totuși, creșterea temperaturii structurii metalice duce la o ușoară micșorare a curentului prin elementele GMR ceea ce poate

cauza o micșorare a variației tensiunii datorate efectului GMR, când se aplică un câmp magnetic. A doua cauză conduce la mărirea fluctuației spinilor electronilor polarizați și, ca o consecință, amplitudinea efectului GMR prezintă o scădere liniară cu temperatura.

În [74] am arătat că, știind temperatura la care se află senzorii și cunoscând coeficientul TCOV, se poate aplica un factor de corecție care să compenseze variația semnalului sistemului diferențial cu variația de temperatură. Un alt rezultat important al acestui studiu este că, folosind senzori GMR unipolari, polarizați în mod adecvat și conectați într-un sistem de măsură diferențial, s-a obținut un senzor de curent cu răspuns bipolar, imun la câmpuri magnetice externe.

Sistemul de măsură studiat, bazat pe senzori GMR, este caracterizat prin simplitate constructivă datorită lipsei miezului magnetic și a unui circuit magnetic de feedback. Astfel, strict pe partea de detecție magnetică, consumul de energie este extrem de redus, fiind de aproximativ 6,4 mW. Sistemul poate fi miniaturizat prin folosirea unor circuite dedicate.

4.4. Optimizarea senzorului de curent în zona câmpurilor scăzute

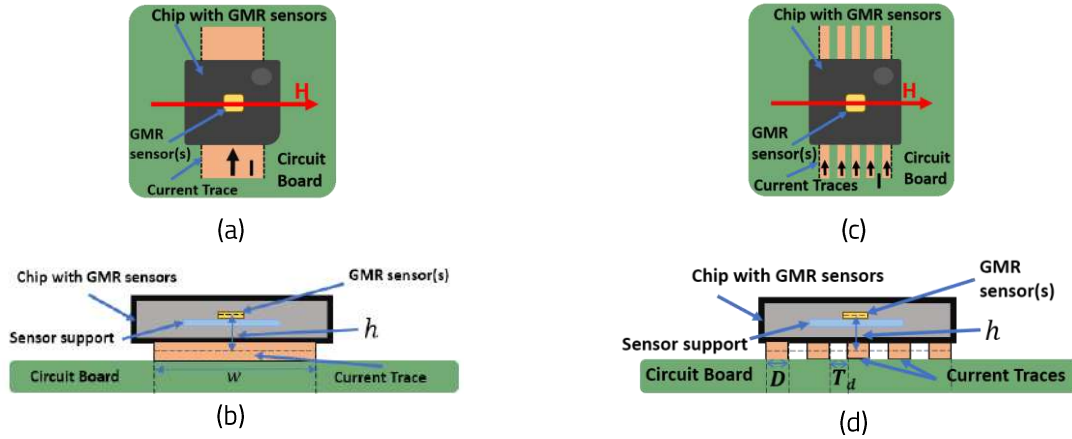
Aspectele prezentate în continuare au fost publicate în [75, 85] și raportate în cadrul proiectelor [16, 94] în cadrul cărora au fost desfășurate activități de cercetare și dezvoltare pe acest subiect.

Dacă sistemul de măsurare non-contact, prezentat anterior, s-a dovedit a fi performant în cazul curenților acoperind un domeniu de la zeci de mA la 4 A, domeniul curenților mici necesită o abordare care să crească semnalul provenit de la traseul de curent. De asemenea, o polarizare reglabilă a senzorilor GMR poate asigura o mai bună împerechere a acestora și o micșorare a tensiunii de offset.

Aceasta este a doua iterație în dezvoltarea senzorului de curent. A fost implementată o metodă practică de a crește semnificativ sensibilitatea și acuratețea senzorului de curent prin proiectarea adecvată a circuitului ce generează câmpul magnetic datorită curentului ce-l străbate și prin îmbunătățirea lanțului de prelucrare a semnalului.

4.4.1. Modelarea bobinei planare

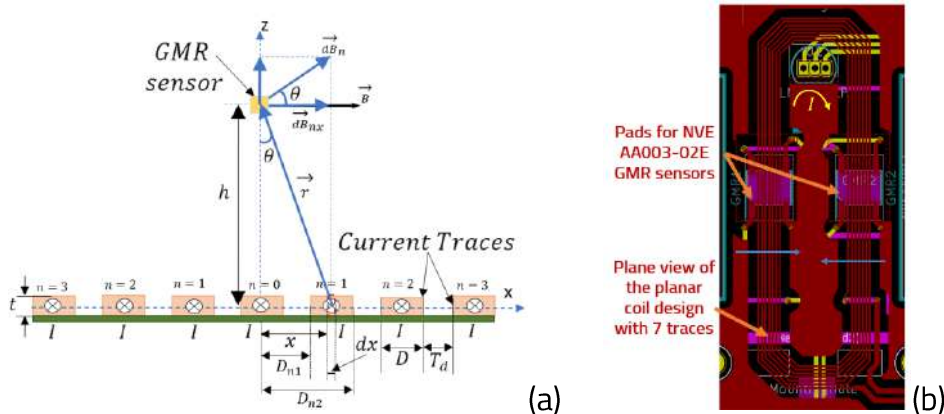
În această abordare sunt utilizate trasee multiple de curent, într-un sistem de detecție dublu diferențial implementat într-un circuit imprimat proiectat în cadrul proiectului PED315. Așa cum am prezentat în secțiunea 4.3, când un curent, I , trece printr-un traseu conductor, va genera câmpul magnetic B ce va produce o modificare în tensiunea de ieșire a senzorului GMR plasat în apropiere. Implementarea practică a acestui principiu este ilustrată în Fig. 4.14 pentru(a,b) un singur traseu conductor (traseu de curent) și (c,d) pentru mai multe trasee de curent.



Supoziția de pornire a noului design este că, performanțele sistemului de măsură a curenților mici se pot îmbunătăți semnificativ, utilizând un traseu mai îngust. Utilizând trasee multiple prin care trece același curent de detectat, se va constitui, în esență o bobină planară, Fig. 4.15(a). Curentul, I , din traseul conductor (denumit "Traseu de curent") generează un câmp magnetic, a cărei componentă, B_x , va fi detectată de senzorul GMR plasat deasupra traseului, ca în Fig. 4.13(c,d).

Așa cum se va arăta în capitolul următor, în locul senzorului GMR se poate utiliza un senzor bazat pe efectul Hall planar sau pe o configurație ce emulează PHE realizată cu elemente AMR.

Pentru a estima B , a fost dezvoltată o metodă analitică ce presupune că senzorul este *centrat* deasupra unui sistem compus din n trasee de curent identice (n este impar) la o distanță h . Această metodă urmează, în esență, abordarea prezentată pentru un singur traseu de curent care este extinsă la mai multe trasee, de lățime egală, D , între care există o distanță T_d , Fig. 4.15(a). Astfel, valoarea totală a componentei în plan a câmpului magnetic, generat în zona senzorului, va fi maximă iar componentele normale se vor anula datorită simetriei problemei. În Fig. 4.15(b) este prezentată bobina planară realizată pe PCB [16, 75].



Valoarea lăţimii traseului este decisă de valoare maximă a curentului ce va străbate bobina dar şi de posibilităţile tehnologice de realizare în ce priveşte valorile minime pentru D (atunci când se doreşte măsurarea unor curenţi foarte mici) şi pentru T_d .

Astfel, considerând detaliile din Fig. 4.15(a), se poate exprima valoarea componentei în plan, B_{nx} a câmpului magnetic în zona senzorului creat de către traseul " n " (dreapta sau stânga):

$$B_{nx} = \frac{\mu_0 I}{2\pi D} \left[\arctan\left(\frac{D_{n2}}{h}\right) - \arctan\left(\frac{D_{n1}}{h}\right) \right] \quad [\text{T}] \quad (8)$$

iar pentru traseul central *considerat ca $n=0$* :

$$B_{0x} = \frac{\mu_0 I}{\pi D} \cdot \arctan\left(\frac{D}{2h}\right) \quad [\text{T}] \quad (9)$$

unde unde $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ este permeabilitatea magnetică a vidului.

Detaliile privind calculul câmpului magnetic sunt precizate pe larg în [16, 74, 75, 85].

Aşa cum am precizat, având în vedere simetria problemei, în cazul senzorului centrat deasupra benzilor conductoare, componenta B_z a câmpului total va fi 0 astfel încât câmpul rezultat va fi $B=B_x$ şi va fi exprimat cu relaţia:

$$B = B_0 + 2B_1 + 2B_2 + \dots + 2B_n \quad (10)$$

Spre exemplu, pentru $n=3$, înseamnă că vor fi 7 trasee conductoare liniare sub senzor. Pentru $h=0,8 \text{ mm}$, $D=0,22 \text{ mm}$ şi $T_d=0,19 \text{ mm}$, se obţine:

$$B = 10.3784 \cdot I \cdot 10^{-4} [\text{T}] = 10.3784 \cdot I [\text{G}] \quad (11)$$

unde $I(\text{A})$.

A fost efectuată o analiză privind numărul optim de trasee conductoare Astfel, au fost considerate două tipuri de trasee cu (i) $D=0,35 \text{ mm}$ şi $T_d=0,21 \text{ mm}$ şi (ii) $D=0,22 \text{ mm}$, $T_d=0,19 \text{ mm}$. Valoarea minimă pentru T_d a fost impusă de considerente tehnologice ce au limitat distanţa minimă dintre traseele conductoare definite pe PCB. Din Fig. 4.16, se remarcă (i) cum H creşte cu n şi (ii) tendinţa asimptotică a câmpului magnetic în zona senzorului către o valoare maximă. Din analiza curbelor de fitare s-a obţinut $H_{\max}=4,849 \text{ Oe}$ (Case I) şi $H_{\max}=6,845 \text{ Oe}$ (Case II). Calculele au fost făcute pentru $I=0,5 \text{ A}$. Ținând cont de dependenţa asimptotică în funcţie de " n ", şi dimensiunile fizice ale cipurilor GMR, cea mai bună balanţă între câmpul obţinut şi posibilitatea implementării practice, este la structurile de 5 sau 7 trasee.

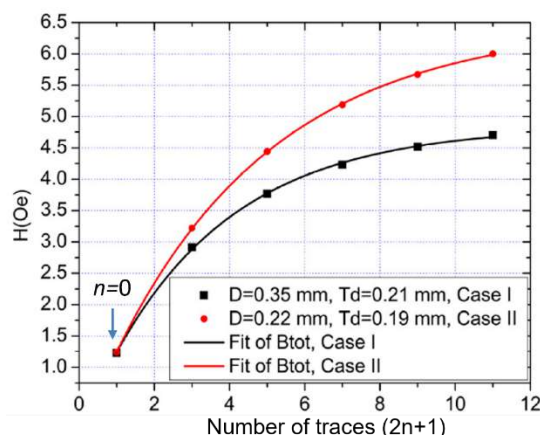


Fig. 4.16. Dependența câmpului magnetic total în zona senzorului de numărul de trasee și de dimensiunile acestora notate Case I ($D=0.35$ mm, $T_d=0.21$ mm) și Case II ($D=0.22$ mm, $T_d=0.19$ mm), pentru $I=0.5$ A. Câmpul magnetic tinde asimptotic către 4,849 Oe (Case I) și 6,845 Oe (Case II) [75].

Întrucât această implementare se concentrează pe măsurarea curenților de valori sub 1 mA cu un domeniu extins până la 300 mA, și având în vedere dimensiunile cip-ului cu încapsulare MSOP8/SOIC8, a fost considerată varianta cu $n=3$ (7 trasee), $D=0.22$ mm și $T_d=0.19$ mm.

Astfel, considerând un cip GMR AA003-02 GMR care, alimentat cu un curent de 1 mA și polarizat în câmp magnetic astfel încât să aibă o sensibilitate medie de 13.75 mV/Oe, se pot estima, în cazul configurației diferențiale, următoarele sensibilități: $S=0.0341$ mV/mA (un singur traseu conductor), $S=0.244$ mV/mA (5 trasee, Case I) sau $S=0.285$ mV/mA (7 trasee, Case II).

4.4.2. Implementarea experimentală

Având în vedere aspectele prezentate, a fost realizată o implementare practică sub forma unui PCB pe care se regăsesc cei doi senzori GMR conectați în configurație diferențială (ca în Secțiunea 4.3), bobina planară ce creează câmpul magnetic, senzorul de temperatură și circuitul de condiționare a semnalului, proiectat și realizat în laborator. În două locașuri special concepute, au fost plasate două bobine ce creează câmpul magnetic de polarizare a senzorilor; ele au rolul aceluși magnet din iterația anterioară. Fig. 4.17 (a) prezintă o imagine a plăcii complet echipate realizate în cadrul proiectului PED315 [75]. Bobina planară, ce nu este clar vizibilă, are 7 trasee conductoare, Fig. 4.15(b). În Fig. 4.17(b) este prezentată diagrama funcțională a sistemului de măsură a curentului [75]. În această aplicație, sunt folosiți doi senzori GMR identici iar semnalul produs de fiecare senzor este amplificat pentru a se trece de la un semnal flotant la unul raportat la masă. Apoi semnalul diferențial este amplificat din nou și transferat la o placă de achiziții de date, NI6281. Nivelul amplificării, G_c , este ales în funcție de nivelul semnalului și este setat din placa de achiziție de date.

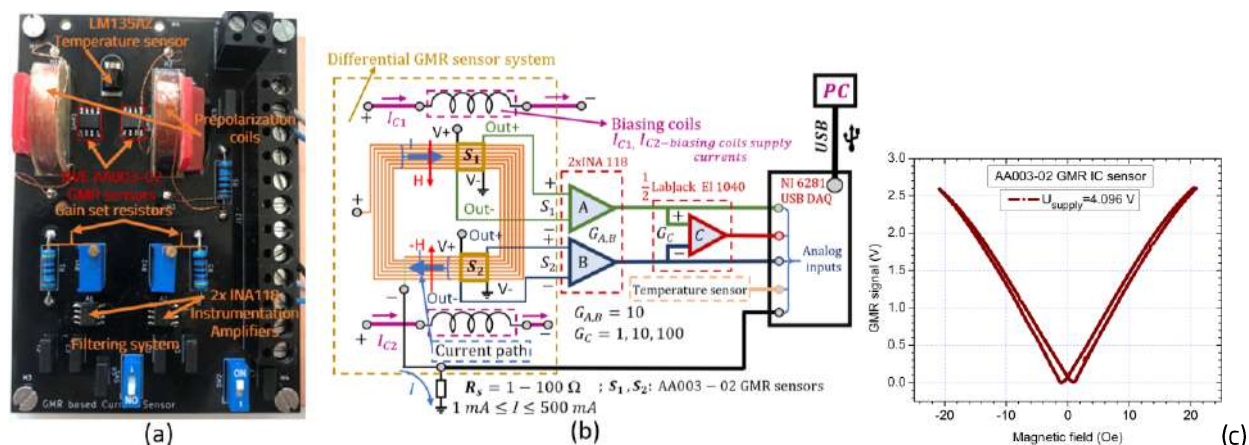


Fig. 4.17. (a) Placa de test cu senzori GMR optimizată pentru detecția la câmpuri scăzute. Placa de circuit imprimat folosește 7 trasee în bobina planară; (b) Diagrama funcțională a sistemului de detecție a curentului precum și configurarea sistemului de amplificare. Este încadrată structura în formă de "U" a circuitului ce produce câmpul magnetic care este aplicat senzorilor; (c) caracteristica senzorului AA003-02 [75].

Modulul de condiționare a semnalului, EI 1040, a fost folosit și pentru (i) a alimenta cu o tensiune simetrică de ± 15 V amplificatoarele de instrumentație ce preiau semnalul de la senzori dar și (ii) pentru a alimenta senzorii GMR cu o tensiune foarte stabilă, 4,096 V. Rezistența de sarcină a fost folosită pentru a putea furniza un semnal de tensiune proporțional cu valoarea curentului; această tensiune a fost aplicată direct pe una din intrările plăcii de achiziție de date și a fost folosită în procesul de calibrare a sistemului de măsurare non-contact a curentului. Fig. 4.17(c) prezintă caracteristica semnalului furnizat de către senzorul GMR AA003-02. Această caracteristică a fost ridicată folosind bobinele de polarizare.

Schema bloc a sistemului de măsurare a curentului, utilizat de către echipa de cercetare pe care am coordonat-o, este prezentat în Fig. 4.18 [75].

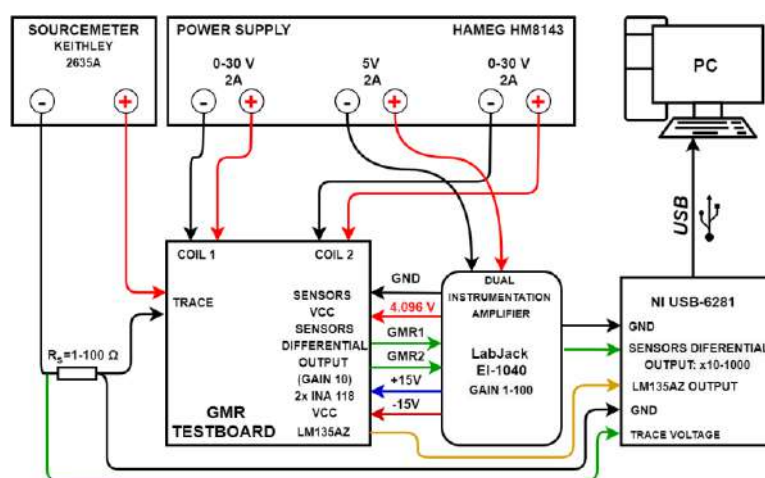


Fig. 4.18. Schema bloc a sistemului de măsură.

Intensitatea câmpului magnetic de polarizare H_{bias} creat de către bobine, a fost determinată în timpul asamblării plăcii de circuit imprimat utilizând un Gaussmetru 475 (Lake Shore

Cryotronics, USA). Relația dintre curentul de alimentare al bobinelor și câmpul de polarizare prezent în zona senzorului este (curentul I_c este exprimat în mA):

$$H_{bias} = I_c(mA) \cdot 0.1391 \text{ [Oe]} \quad (12)$$

Pentru 57.55 mA se obține un câmp de polarizare de 8 Oe. Rezistența fiecărei bobine de polarizare este de 38 Ω .

În final, așa cum am arătat și în [74], tensiunea de ieșire a sistemului diferențial de senzori se poate exprima prin:

$$\Delta U = (K_{S1} + K_{S2}) \cdot H_I = (K_{S1} + K_{S2}) \cdot C \cdot I = S \cdot I \text{ [V]} \quad (13)$$

unde $K_{S1,2}$ sunt sensibilitățile fiecărui senzor magnetic, $H_I = C \cdot I$ este câmpul magnetic creat de către bobina planară prin care circulă curentul I (conform ec. 11) iar S este sensibilitate sistemului diferențial de senzori, în (mV/mA) pentru aceste teste.

Tensiunea ΔU este amplificată și preluată de către sistemul de achiziție de date; și semnalele furnizate separat de cei doi senzori magnetici, după amplificare, sunt aplicate la intrările plăcii de achiziție de date, la fel ca în implementarea anterioară.

4.4.3. Rezultate experimentale și discuții

Sistemul diferențial de detecție a fost testat pentru diverse intervale de variație ale curentului aplicat și diverse valori ale câmpului de polarizare. Au fost efectuate teste atât în DC cât și în AC. Ca și rezultate, vor fi prezentate sensibilitățile sistemului diferențial de senzori (fără amplificare).

Fig. 4.19 prezintă răspunsul sistemului diferențial pentru *detecția curentului continuu* în domeniul ± 150 mA. Fig. 4.19(a) prezintă caracteristica de detecție pentru fiecare senzor iar în Fig. 4.19(b) este răspunsul sistemului diferențial pentru care se obține o sensibilitate $S=0,2319$ mV/mA ceea ce arată o corelare bună între rezultatele teoretice și cele experimentale.

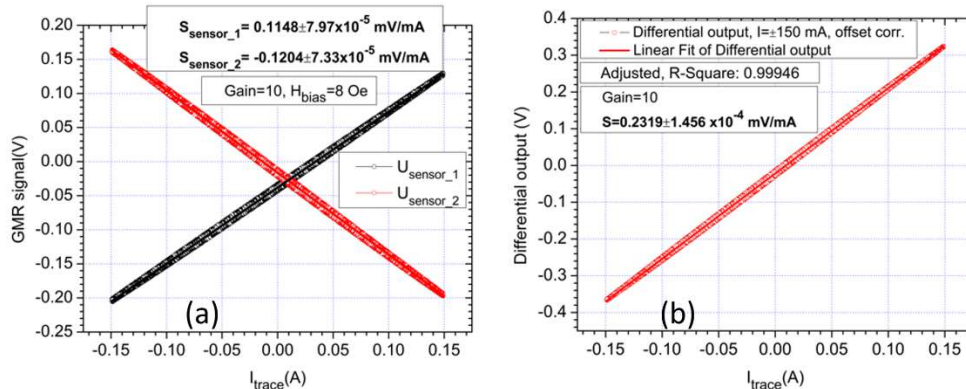


Fig. 4.19. Răspunsul senzorilor GMR pentru un curent ce ia valori între ± 150 mA. În (a) este prezentat răspunsul senzorilor individuali iar în (b) este răspunsul sistemului diferențial; H_{bias} a fost configurat la 8 Oe [75].

Pentru a demonstra performanțele de detecție în zona curenților mici (mai mici de 10 mA), au fost efectuate teste pentru măsurarea unui curent continuu variabil în domeniul ± 5 mA, Fig. 4.20(a) și în domeniul ± 2 mA, Fig. 4.20(b). În acest ultim caz, testele au fost efectuate pentru diverse valori ale câmpului de polarizare, în intervalul 4-8 Oe, pentru a vedea influența valorii acestuia asupra performanțelor de detecție în zona curenților mici.

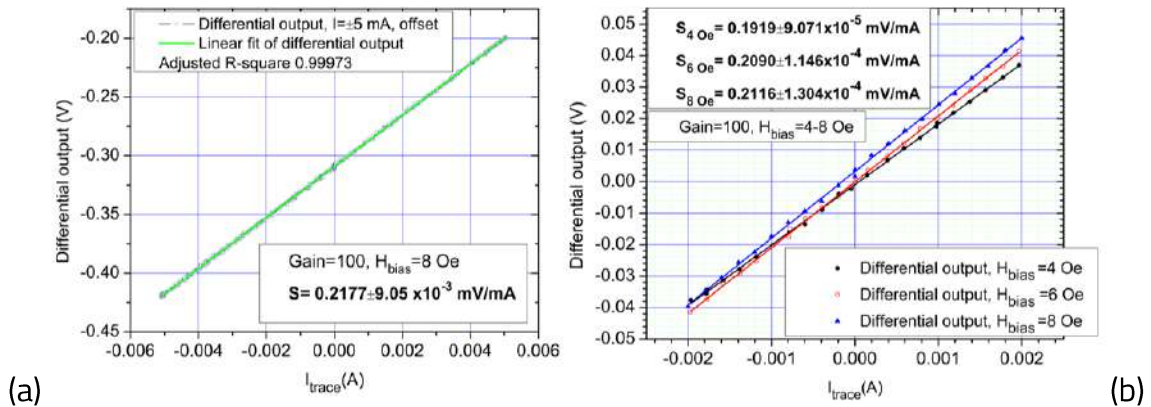


Fig. 4.20. Răspunsul în DC al sistemului pentru curenți mici: (a) Răspunsul diferențial pentru ± 5 mA, câmp de polarizare $H_{\text{bias}} = 8$ Oe și (b) răspunsul diferențial al senzorilor polarizați la 4, 6 și 8 Oe și curent ce variază între ± 2 mA. Se poate remarca răspunsul liniar al sistemului de măsură. În (a) $S = 0.277$ mV/mA iar în (b) $S = 0.2116$ mV/mA pentru $H_{\text{bias}} = 8$ Oe [75].

Pentru măsurarea unor curenți în jurul valorii de 1 mA au fost necesare precauții suplimentare precum ecranare electromagnetică a senzorilor, pași suplimentari de amplificare și filtrare digitală. În urma testelor, s-a obținut că limita inferioară de detecție în DC pentru acest sistem este de 100 μ A. Se poate remarca posibilitatea de ajustare fină a sensibilității sistemului de detecție în funcție de valoarea câmpului de polarizare. De asemenea, pentru a echilibra fin cei doi senzori GMR pentru $I = 0$, s-a folosit un magnet miniatural plasat în spatele uneia dintre bobinele de polarizare. Câmpul creat de acesta se adaugă peste câmpul de creat de bobină.

În Fig. 4.21(a,b) este prezentat răspunsul sistemului cu senzori GMR la măsurarea unui curent sinusoidal de cu amplitudine de 10 mA și frecvența de 1000 Hz raportat în [75]. Din Fig. 4.21(a) se observă că răspunsul diferențial al sistemului senzori-circuit de condiționare menține integritatea semnalului (forma de undă a curentului) fără distorsiuni și fără diferență de fază. Din teste s-a obținut că limita de detecție pentru o undă sinusoidală de 100 Hz este de 100 μ A (la fel ca în DC) în vreme ce, pentru un semnal sinusoidal de 1 kHz este de 300 μ A (nu s-au găsit creșteri în limita de detecție la frecvențe mai ridicate). Se poate concluziona că aceste limitări sunt cauzate de lanțul de procesare a semnalului, de creșterea impedanței bobinei odată cu creșterea frecvenței și nu datorită senzorilor GMR care au o frecvență de funcționare de la DC la 1 MHz [81].

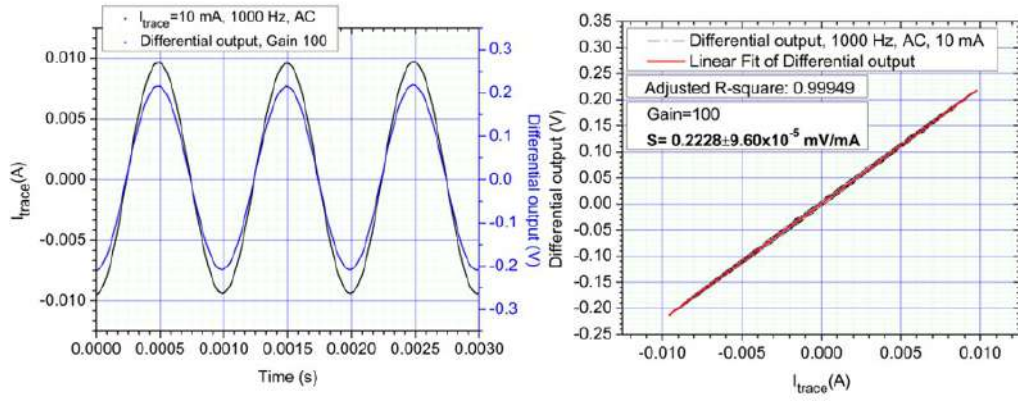


Fig. 4.21. (a, b) Răspunsul sistemului de detecție diferențial pentru un curent sinusoidal cu amplitudine de 10 mA și frecvență de 1000 Hz; $S = (0.223 \pm 9.6E-5) \text{ mV/mA}$ este similară celei în DC. Senzorii sunt polarizați la 8 Oe [75].

Răspunsul pentru un curent de 20 mA cu formă de undă dreptunghiulară și frecvență de 1 kHz este prezentat în Fig. 4.22(a). Teste multiple (la diverse câmpuri de polarizare și frecvențe) au determinat un timp de creștere și de descreștere de aproximativ 15 μs . Se observă o reproducere fidelă a formei de undă a curentului aplicat. Fig. 4.21(b) detaliază răspunsul sistemului pentru un singur puls de 20 mA [75].

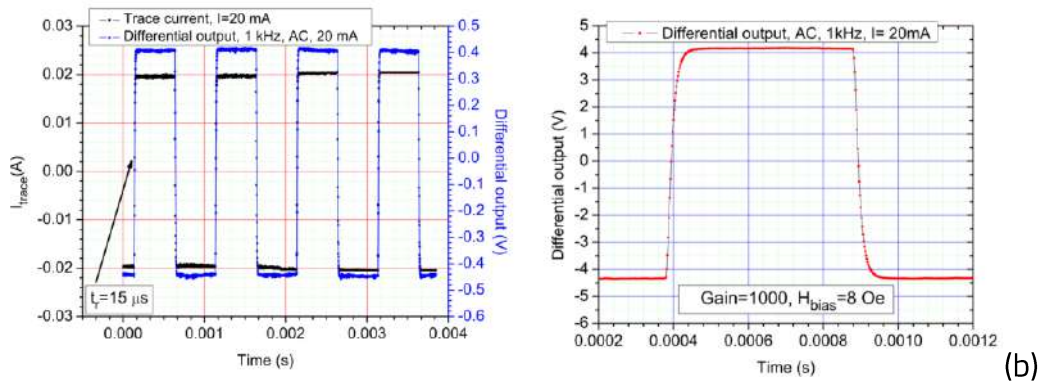


Fig. 4.22 (a, b) Răspunsul sistemului cu senzori polarizați la 8 Oe pentru o formă undă dreptunghiulară de 1 kHz și amplitudine de 20 mA. A fost determinat un timp de creștere și de descreștere de 15 μs (măsurat între nivelele de 10-90%) [75]

Fig. 4.23 (a) și (b) prezintă caracteristicile de frecvență pentru trei valori ale curentului AC și două valori ale câmpului de polarizare, 6 și 8 Oe [75].

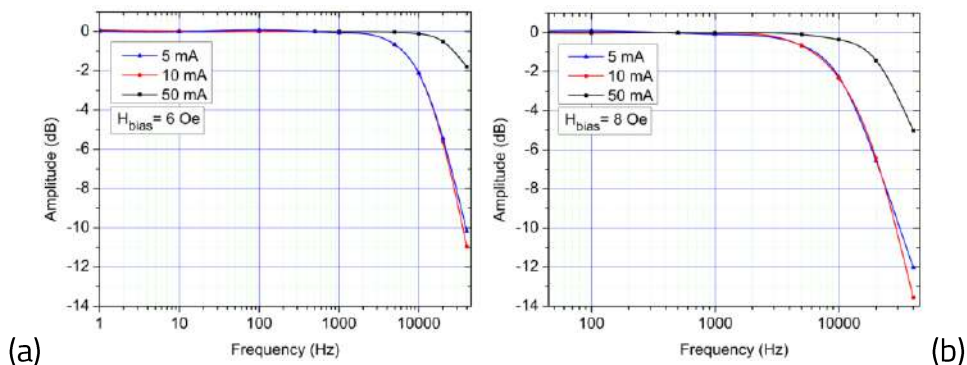


Fig. 4.23. Caracteristica de frecvență când (a) $H_{\text{bias}} = 6 \text{ Oe}$ și (b) $H_{\text{bias}} = 8 \text{ Oe}$ pentru trei amplitudini ale curentului.

Se observă că H_{bias} are o influență foarte mică asupra caracteristicii de frecvență, prin modificarea sensibilității senzorilor, așa cum s-a remarcat mai sus. Din analiza impedanței bobinei planare în funcție de frecvență, a rezultat că $Z \approx R = 2 \Omega$ până la frecvențe de aproximativ 3000-4000 Hz. Pentru frecvențe mai mari ale curentului, s-a observat o creștere accentuată a impedanței datorită creșterii componentei inductive a bobinei planare.

Fig. 4.24 prezintă curba de calibrare a sistemului de măsură (senzori și circuitele de condiționare) în funcție de amplitudinea curentului alternativ prin bobina planară, în intervalul 0-100 mA, și frecvență de 100 Hz.

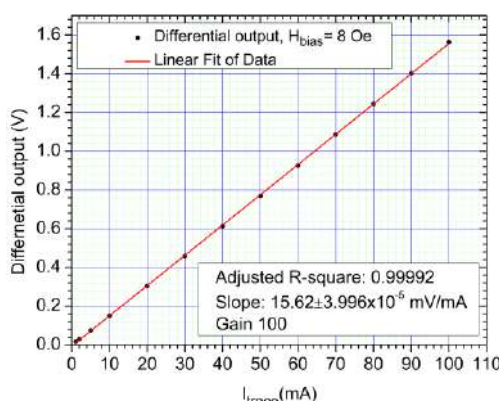


Fig. 4.24 Curba de calibrare în AC, pentru o frecvență de 100 Hz.

S-a obținut o sensibilitate a sistemului de măsură de 15.62 mV/mA în AC, pentru $f=50$ Hz..

4.5. Concluzii

În acest capitol au fost prezentate contribuții la designul și implementarea practică a unui sistem de detecție a curentului continuu sau alternativ folosind senzori bazați pe efectul GMR. În acest scop, fost dezvoltată o metodă analitică de calcul a câmpului magnetic creat de un traseu planar simplu sau cu mai multe linii de curent. Aceasta permite estimarea amplitudinii câmpului magnetic creat de către curent și estimarea performanțelor sistemului de detecție. Metoda de detecție non-contact a curentului folosind senzori GMR asigură un nivel de protecție electrică (ESD) de 400 V dacă cipul este plasat direct pe traseul metalic neizolat. De precizat că cipul folosit nu a fost gândit special pentru acest tip de aplicație, el fiind doar un senzor unipolar de câmp magnetic. Plasarea unui strat dielectric, între circuitul de curent și senzor, poate crește substanțial valoarea acestei tensiuni.

Prima iterație, ce folosește o bandă conductoare în formă de U, caracterizată prin $w=2$ mm și $t=0,036$ mm, este bine adaptată pentru măsurarea curentului continuu pentru un interval de variație cuprins între 10 mA până la 4 A iar în AC de la 25 mA la 4 A, cu o sensibilitate a sistemului diferențial de senzori cuprinsă între 0,027 și 0,03 V/A. Această implementare a fost caracterizată prin simplitate constructivă, preț redus (placa U12 de la LabJack având un preț de aproximativ 230 \$) și flexibilitate în dezvoltarea de aplicații de detecție atât în DC cât și AC.

Lipsa miezului magnetic, caracteristic unui circuit închis, practic a anulat efectele de histerezis magnetic. Lipsa buclei de reacție negativă, caracteristică în general sistemelor de măsură cu miez magnetic, a simplificat circuitul de procesare a semnalului și a micșorat puterea consumată de către sistemul de măsură.

În a doua iterație, sistemul de măsurare non-contact a adresat zona curenților scăzuți. Deși a fost proiectat să măsoare curenți între 2-300 mA, domeniul operațional poate fi extins, spre exemplu, prin integrarea unei bare de cupru pe placa de circuit imprimat unde se află bobina planară. Sistemul de măsură (senzori și circuitul de condiționare) are o sensibilitate cuprinsă între 15.62 și 23.19 mV/mA, pentru câmpuri de polarizare între 4-8 Oe cu o limită de detecție de 100 μ A în DC și 100-300 μ A în AC de la 10 Hz până 10 kHz cu o atenuare mai mică de 2 dB. Un câmp de polarizare a fost aplicat folosind două bobine circulare într-o configurație cvasi-Helmholtz pentru liniarizarea răspunsului senzorilor GMR și pentru a permite diferite moduri de funcționare. Această abordare a fost aleasă pentru a crește versatilitatea sistemului pentru testarea diverselor regimuri de funcționare. Pentru o aplicație dedicată, în care sunt stabiliți parametrii funcționali, un magnet permanent prezintă numeroase avantaje pentru că nu implică un consum suplimentar de energie și nu generează căldură suplimentară. Rezultatele au fost obținute fără ecranare electromagnetică iar consumul de energie al sistemului este relativ redus (fiecare senzor consumă 3.2 mW), bobinele de polarizare consumă ~251.7 mW pentru un câmp de polarizare de 8 Oe, fiecare amplificator INA118 are un curent de standby de doar 350 μ A și amplificatorul EI1040 are, de asemenea, un consum energetic redus. În ambele implementări, sistemul de măsură reproduce fidel forma de undă a curentului alternativ detectat.

Ca un aspect interesant, partea de detecție, ce folosește senzori GMR, funcționează într-un regim dublu diferențial [74, 75]. Această abordare nu a fost raportată în alte lucrări.

Capitolul 5. Contribuții la dezvoltarea unui cip spintronic pentru detecția curentului

În acest capitol sunt prezentate rezultate obținute în cadrul activităților de modelare și dezvoltare (activități de microfabricație și caracterizare) a unui demonstrator bazat pe un cip cu senzori spintronici, numit pe scurt "*cip spintronic*", destinat măsurării non-contact a curentului electric. Acest cip are o structură hibridă, fiind compus dintr-un senzor dublu diferențial de câmp magnetic realizat pe o plachetă de Si și traseul de curent. Structura acestui cip este inspirată de studiile prezentate în Cap.4 și reprezintă rezultatul unor activități de cercetare desfășurate în cadrul proiectelor PED126/2017 în care a fost realizat un cip demonstrator cu funcție de senzor de câmp magnetic DC/AC (<http://www.icpe-ca.ro/icpe-ca/proiecte/proiecte-nationale/pn-2016-2020/magsens/etapa-2.pdf>) și PED315/2020 în care, folosind rezultatele și expertiza dobândite, a fost realizat cip-ul demonstrator – senzor de curent DC/AC (<https://www.icpe-ca.ro/315ped-2020/>). În continuare, vor fi prezentate aspecte referitoare la realizarea și testarea acestui cip de curent. Rezultatele au fost publicate în [62]. Detalii sunt și pe site-urile acestor proiecte.

5.1. Principiul de funcționare

Structura acestui cip a fost inspirată de studiile publicate în [74, 75] în care sunt utilizate 2 cip-uri identice ce conțin, fiecare, câte o punte Wheatstone cu senzori GMR în care doi senzori sunt activi iar ceilalți doi sunt ecranați și sunt folosiți pentru a completa puntea și a asigura stabilitatea termică a semnalului de ieșire. În acest caz, elementele rezistive, ce compun punțile Wheatstone, sunt realizate din straturi de tip FM/AF. Stratul AFM (din Fe/MN) asigură, prin intermediul interacției de schimb, H_{EB} , la suprafața de separație cu stratul FM ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) orientarea magnetizării acestuia după o direcție ce poate fi fixată prin călire magnetică [62]. Structura senzorului este prezentată în Fig. 5.1(a) iar dimensiunile propuse, pe baza cărora s-a realizat masca de depunere, sunt prezentate în Fig. 5.1(b). Fig. 5.1(c) ilustrează direcția lui H_{EB} și echivalența acestei punți cu o structură PHE (Cap. 3). Întrucât comportarea punții este foarte asemănătoare cu cea a unui senzor bazat pe efectul Hall planar (PHE), denumirea uzuală este aceea de punte Hall rezistivă (Planar Hall Resistance – PHR [PHR]). Așa cum se vede din Fig. 5.1(c), în mod ideal, *orientarea magnetizării față de curent*, când $H=0$, este de 45° sau -45° iar unghiul dintre curent și M este același pentru brațele de pe laturi opuse. Acesta este echivalentul polarizării de tip Barber-Pole pentru fiecare latură a punții. Având în vedere anizotropia de formă, pentru structuri ale căror brațe au un raport $L/w \geq 10$, magnetizarea va tinde să rămână orientată de-a lungul brațelor. Altfel spus, va fi o competiție între H_{EB} și H_K . Pentru proiectarea măștii de depunere a fost ales raportul $L/w = 5$. Pentru mai multă flexibilitate în testare, au fost definite pad-uri separate pentru fiecare senzor.

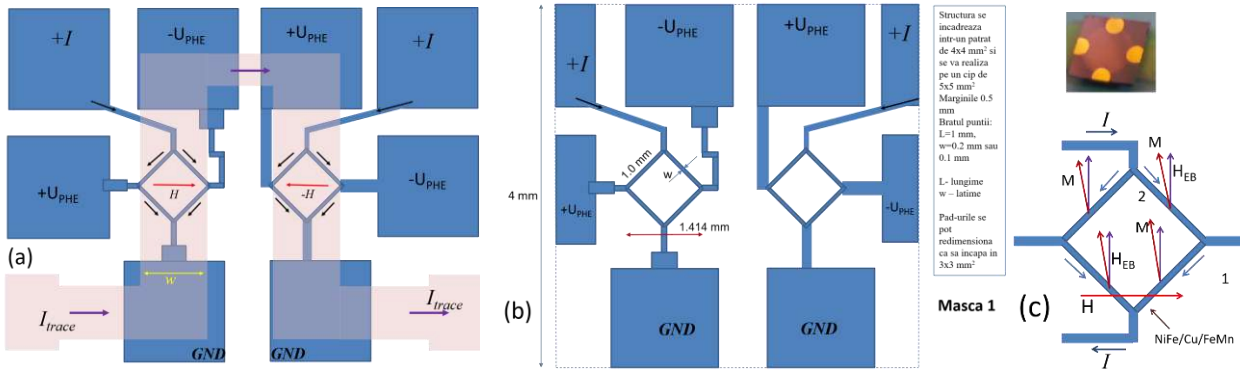


Fig. 5.1. (a) Structura de principiu a cip-ului spintronic cu banda de curent, (b) proiectul de layout și dimensiunile propuse pentru realizarea cip-ului și (c) ilustrarea orientării câmpurilor H_{EB} , H și a magnetizării din fiecare braț față de orientarea curentului; H , este produs de curentul, I , prin bandă.

Cipul cu cei doi senzori reprezintă un sistem de măsură dublu diferențial, în sensul că fiecare punte în parte reprezintă un senzor diferențial. Banda de curent din Ag, în formă de U, va fi printată pe o bandă de Kapton, folosind un sistem de prototipaj Voltera V-one, și va fi plasată pe suprafața cip-ului, ca în Fig. 5.1(a). Cipul va fi conectat într-un sistem de condiționare a semnalului și de achiziție de date asemănător cu cel descris în [74, 75], și prezentat în Fig. 5.2.

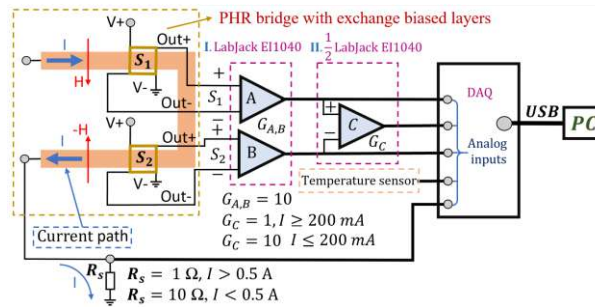


Fig. 5.2. Structura de principiu a sistemului de condiționare a semnalului și de achiziție a semnalelor [62].

Curentul ce trece prin banda în formă de U creează câmpuri magnetice de sensuri opuse ce se aplică celor doi senzori. Prin urmare, se va obține un semnal $\Delta U_{A,B} \cong G_{A,B}(K_{S1} + K_{S2}) \cdot K_I \cdot I$ ce va fi amplificat de către circuitul de condiționare "C" rezultând un semnal ce poate fi convertit A/D. Aici, $G_{A,B}$ reprezintă amplificarea circuitelor A și B, K_{S1} și K_{S2} sunt sensibilitățile senzorilor $S_{1,2}$ iar K_I este o constantă ce depinde de lățimea benzii de curent, grosimea ei și grosimea stratului de izolare. Ideal $K_{S1}=K_{S2}$ întrucât senzorii sunt identici (ca layout și grosimi).

Experimente anterioare efectuate în cadrul proiectului PED126/2017 pe senzori cu o structură asemănătoare, au relevat o sensibilitate ce poate ajunge la $12 \mu\text{V}/(\text{Oe} \cdot \text{mA})$. Dacă banda de curent (trace) are o lățime de 1,5 mm, Fig. 5.1(a,b), și este la o distanță de 0,05 mm de suprafața senzorului (strat de izolare galvanică), atunci, câmpul generat de un curent de 100 mA va fi de aproximativ 4,2 Oe adică $4,2 \cdot 10^{-4} \text{ T}$ în aer. Pentru un curent de 5 mA prin senzor, se va obține o tensiune de ieșire de 0,252 mV. Fiind sistem diferențial de măsură, Fig. 5.2, tensiunea va fi de 0,5 mV. Pentru o amplificare de $G_{A,B}=10$ pe fiecare canal, și $G_C=10$ pe

amplificatorul de instrumentație final, semnalul va avea o amplitudine de 50 mV. Sensibilitatea estimată în aceste condiții este de 0,5 mV/mA.

5.1.1. Simularea micromagnetică a senzorului spintronic.

A fost simulată micromagnetic zona centrală a punții din Fig. 5.1. Imaginea structurii simulate este prezentată în Fig. 5.3(a). În Fig. 5.3(b) sunt prezentate curba de magnetizare a senzorului după axa x și răspunsul, PHR, calculat; H_{EB} este aplicat după axa y, ca în Fig. 5.1(c) și Fig. 5.3(a).

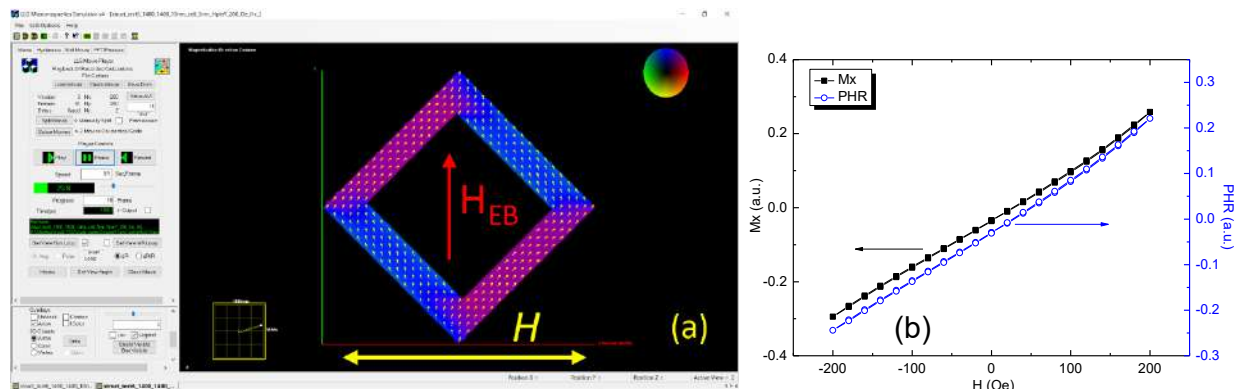


Fig. 5.3. (a) Imagine cu structura simulată și (b) Dependențele de câmp ale magnetizării după axa x, respectiv ale răspunsului PHR.

Sistemul simulat este cuprins într-un volum cu dimensiunile 1400x1400x10 nm; celula de discretizare este 5x5x5 nm³. Parametrii utilizați pentru simulare sunt: $M_s=710$ emu/cm³, constanta de schimb $A = 0.9 \times 10^{-11}$ J/m, constanta de anizotropie $K_u=500$ J/m³, $H_{EB}=200$ Oe după axa y, Fig. 5.1(c) și Fig. 5.4(a); $T=0$ K; H este aplicat după axa x. Condiția de convergență a fost menținută la 1×10^{-4} . Între K_u și H_k este relația: $H_k=2K_u/M_s$. Pentru simulări a fost folosit programul LLG Micromagnetics Simulator v4. Latura exterioară este de 990 nm iar cea interioară este de 790 nm. Raportul lungime/lățime pentru fiecare latura este de aproximativ 6/1.

Se remarcă o liniaritate, estimată, foarte bună a semnalului de ieșire, fără efecte de histerezis magnetic. Simularea are un caracter calitativ, fiind realizată pentru o structură cu dimensiuni mult reduse la scară și la $T=0$ K; în cazul includerii fluctuațiilor termice, nu se pot obține soluții cu condiții de convergență mai bune de 10^{-2} .

5.2. Realizarea cip-ului demonstrator

Structurile spintronice de tipul $Ni_{80}Fe_{20}(10 \text{ nm})/FeMn(1 \text{ nm})$, ce definesc senzorii din Fig. 5.1, au fost depuse la ICPE-CA București prin pulverizare catodică magnetron pe substrat de Si oxidat și microfabricate prin metoda liftoff. Detalii privind experimentele de microfabricație au fost prezentate în cadrul proiectului PED315/2020 [16] dar aceleași procese au fost folosite și în cadrul proiectului PED126/2017 [15]. Având în vedere particularitățile metodei de

depunere, structurile sunt amorfe și prezintă o conducție foarte slabă. De asemenea, structurile astfel depuse nu prezintă o axă de anizotropie magnetocristalină definită și nici un câmp de cuplaj, H_{EB} , între stratul antiferomagnetic (FeMn) și cel magnetic de Permalloy ($Ni_{80}Fe_{20}$). În final au fost taiate cipuri cu dimensiuni de $5 \times 5 \text{ mm}^2$ pe care se regăsesc câte două structuri PHR, Fig. 5.4 [62]. A fost folosită o singură mască pentru realizarea cipului, acest lucru simplificând mult procesul de microfabricație. Altfel spus, traseele de conectare sunt realizate din același material ca și brațele punții Wheatstone. Așa cum am arătat și în [62] prin simulări micromagnetice, această abordare nu a afectat curba de magnetizare și semnalul PHR.

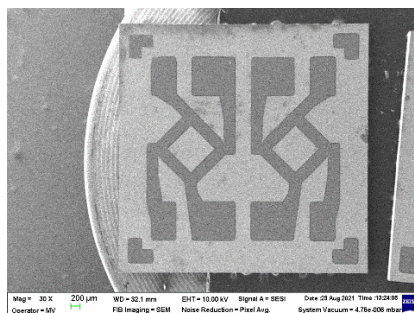


Fig. 5.4. Imagine SEM a cip-ului cu doi senzori identici realizat în cadrul ICPE-CA București.

5.2.1. Tratamentul termic și călirea magnetică

a) Cipurile microfabricate la ICP-CA București au fost tratate termic, în cadrul ICDT-UTBV, în scopul îmbunătățirii structurii cristaline a straturilor depuse și a conductivității electrice. Tratamentul termic s-a efectuat în atmosferă de Ar (99,99%), presiune 2 mbarr, la o temperatură de 450°C , timp de 2 ore [62, 95].

b) Călirea magnetică a fost aplicată în scopul inducerii unei axe de anizotropie magnetică și a unui câmp de cuplaj prin interacție de schimb, H_{EB} , între stratul de NiFe și cel de FeMn după o direcție bine determinată. S-a recurs la o metodă de călire magnetică rapidă în vid, la o temperatură mai scăzută [96], pentru a evita efecte de interdifuzie între straturile FM și AFM. În acest scop, a fost realizat un dispozitiv de călire în câmp magnetic, ca cel prezentat în Fig. 5.5.

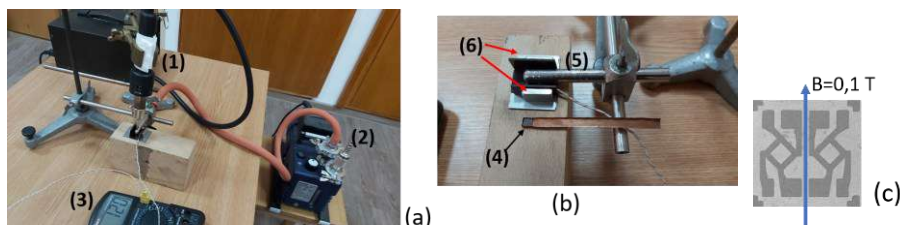


Fig. 5.5 . (a) Sistemul de călire magnetică: (1) Suflantă cu aer încălzit cu temperatura reglabilă electronic ($40\text{--}300^\circ\text{C}$), (2) Pompă de vid (2 mbarr), (3) Termometru electronic cu termocuplu tip K; (b) Detaliu: (4) lamelă de Cu în capătul careia este fixat un cip pentru călire magnetică, (5) tub din oțel inoxidabil conectat la pompa de vid, (6) Magneți permanenți; (c) direcția de aplicare a câmpului, B , asupra structurii

Cip-ul este plasat în capătul lamelei de Cu ce este introdusă în tubul (5) care este conectat la pompa de vid. Fiind un volum foarte mic, se atinge o presiune de 2 mbarr în aproximativ 15 min. Inițial, sistemul nu este plasat între polii magnetilor. După aproximativ 15 min de vidare, tubul (5) este încălzit la 100 °C, cu ajutorul suflantei cu aer, timp de 10 min pentru a degaza pereții interiori, lamela și proba. Temperatura este crescută la 200 °C (mai mare decât temperatura Néel a stratului AFM de FeMn) și se introduce sistemul între polii magnetilor ce generează un câmp $B=0,1$ T în zona vârfului tubului unde se afla cip-ul. Temperatura este menținută timp de 5 min după care este scăzută la 30 °C în 10 min. În acest fel, se stabilește un câmp H_{EB} după orientarea câmpului magnetic în timpul călirii magnetice. Acest procedeu a fost folosit, prima oară, în cadrul proiectului PED126/2017 ce a avut ca obiectiv realizarea unui cip demonstrator pentru detecția câmpului magnetic [15].

5.2.2. Proiectarea și realizarea traseului conductor în formă de U

a) Modelarea traseului conductor

Proiectul traseului metallic ce va fi printat pe substrat de Kapton este prezentat în Fig. 5.6. Desenul a fost realizat în KiCad pentru a putea fi preluat de imprimanta Voltera V-One PCB Printer [16, 62].

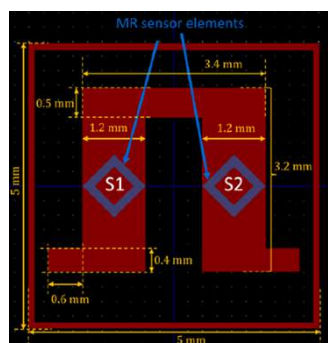


Fig. 5.6. Proiectul traseului în formă de U. Cotele sunt cele reale, utilizate pentru printare [62].

Fiecare braț are lățimea de 1,2 mm astfel încât să acopere integral fiecare senzor, 1 și 2 din Fig. 5.4, plasat la jumătatea lungimii traseului conductor, Fig. 5.6.

Câmpul magnetic în zona senzorilor a fost estimat folosind (i) metoda analitică, prezentată în Cap. 5, dar în care traseul conductor a fost divizat în m straturi, de grosimi t/m , unde t este grosimea traseului în formă de U și (ii) simulări folosind metoda elementului finit în COMSOL Multiphysics [62].

Următorii parametri au fost considerați pentru calcul folosind metoda analitică:

- Curentul prin banda I: 100 mA;
- Grosimea traseului conductor (valoare decisă în urma procesului de printare): 35 microni; ($m=35$)
- Lățime traseu: 1,2 mm
- Lungime traseu: 3,2 mm

- Poziția sensorului pe traseu: 1,6 mm

Au fost considerate două posibile grosimi, $h=45$ și $80\text{ }\mu\text{m}$, pentru banda de Kapton pe care este printat traseul conductor, rezultatele fiind [62]:

$h=80$ microni: $H=36.7321\text{ [A/m]}$ ($0,388\text{ Oe}$)

$h=45$ microni: $H=38.2408\text{ [A/m]}$ ($0,404\text{ Oe}$)

Din analiza acestor date se observă că valoarea estimată a componentei paralele cu suprafața, a câmpului magnetic în zona sensorului, variază între $0,39$ și $0,40\text{ Oe}$ în funcție de grosimea benzii de Kapton. În această implementare, $h=45$ microni.

Rezultatele simulărilor realizate în COMSOL, pentru $h=45\text{ }\mu\text{m}$ (grosimea benzii de Kapton) sunt prezentate în Fig. 5.7 unde este evidențiată și distribuția câmpului magnetic [62]:

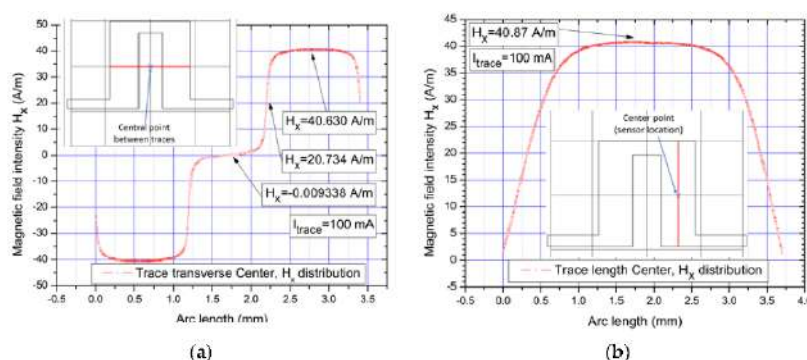


Fig. 5.7. Distribuția câmpului magnetic, H_x , creat de structura în formă de U la suprafața sensorului (a) după axa Ox de-a lungul liniei ce trece prin punctul central, aflat la jumătatea lungimii benzii și (b) de-a lungul liniei mediane [62].

Din aceste reprezentări se remarcă o bună omogenitate a câmpului magnetic creat de banda conductoare în zona celor doi senzori PHR, cu o valoare medie $H=40,75\text{ A/m}=0,51\text{ Oe}$.

b) Realizarea traseului conductor în formă de U

În vederea integrării traseului în formă de U pe suprafața sensorului s-a optat pentru printarea directă pe substrat flexibil de Kapton, cu o cerneală din argint de la Voltera, **Voltera Adorable Anchovy** de tipul **Flex 2 ink**. Aceasta rămâne flexibilă după ce este tratată termic pentru eliminarea componentelor organice. Această cerneală este compatibilă, de asemenea, cu PET (Polietilen tereftalat), și cu alte substraturi polimerice flexibile și se păstrează la temperaturi cuprinse între $4-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rezistivitatea este de aproximativ $1,36 \times 10^{-7}\text{ }\Omega\text{m}$ după tratament termic. Traseul în forma de "U" a fost realizat folosind imprimanta dedicată pentru realizarea de PCB-uri Voltera V-One. Dimensiunile traseului în formă de U sunt cele din Fig. 5.6. Pentru proiectarea traseului a fost folosită suita de proiectare grafică PCB KiCad 5.1.10.

S-a optat pentru printarea pe un substrat din bandă de Kapton cu lățimea de 6 mm și o grosime de $45\text{ }\mu\text{m}$ (măsurată cu un micrometru). Pentru menținerea integrității mecanice și a planeității în timpul printării, banda de Kapton a fost fixată temporar pe o placă de circuit imprimat

standard din FR4. Imprimanta a fost configurată pentru a printa un strat cu grosimea de 35-40 μm de la o distanță de 0.08 mm față de suprafață, iar pentru capul de printare s-a utilizat un vârf metalic cu diametrul de 150 μm . Imediat după printare, tot ansamblul a fost tratat termic la 160 $^{\circ}\text{C}$ pentru 30 de minute. Au fost realizate diverse configurații de traseu în formă de U dar varianta finală, utilizată pe cip, a rămas cea cu dimensiunile din Fig. 5.6 [62].

Această abordare, de printare directă pe substrat flexibil a traseului conductor și de atașare a acestuia pe cip-ul de Si pe care au fost microfabricați cei doi senzori PHR permite flexibilitate în definirea și altor structuri conductoare care să fie utilizate. De asemenea, această abordare, a fost folosită pentru a realiza un circuit de încălzire planar, direct pe substratul destinat unor experimente de microfluidică [97]. Acest trend, al circuitelor electrice și electronice printate, permite implementarea conceptului "printed electronics" cu aplicații în domeniul medical, al senzorilor flexibili de temperatură, de deformare, senzori tactili sau de presiune, senzori de câmp magnetic [5], și altele. Fig. 5.8, prezintă echipamentul utilizat, rezultatul printării și o fereastră din etapa de control a procesului de călire a traseului conductor.

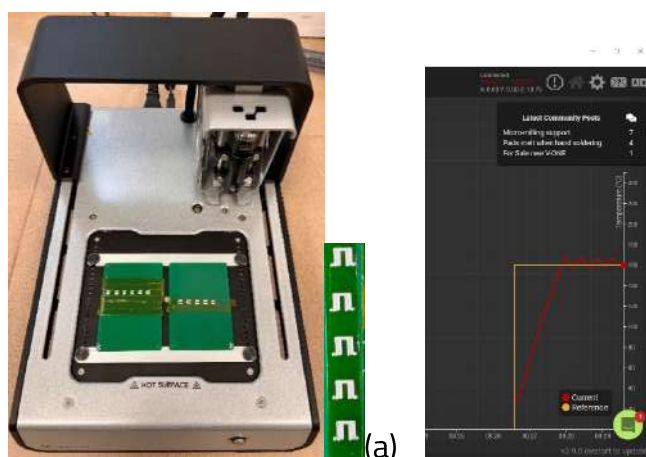


Fig. 5.8. (a) Echipamentul de printare Voltera V-One cu un exemplu de structuri printate pe substrat flexibil de Kapton și (b) Tratamentul termic al pastei de Ag imediat după printare (adaptat după [62]).

5.2.3. Asamblarea cip-ului demonstrator

Etapele asamblării cip-ului demonstrator au fost descrise pe larg în [16, 62]. Cip-ul contactat a fost plasat pe o placă PCB adaptoare, SO8, MSOP8, ce-i permite montarea pe un soclu DIP PIN 8 cu pini auriți, Fig. 5.9(a). Peste cip a fost plasat traseul printat în formă de U. Astfel, s-a obținut o structură compactă, ce poate fi asimilată cu un circuit integrat hibrid care poate fi manipulat și caracterizat. Schema de conectare și măsurare pentru un senzor este prezentată în Fig. 5.9(b). Întrucât este de interes răspunsul senzorului la câmpuri scăzute, a fost realizat un sistem de bobine Helmholtz, de dimensiuni reduse, plasate în vecinătatea cip-ului, Fig. 5(c). Tot ansamblul este montat într-o cutie feromagnetică cu rol de ecranare. Cip-ul a fost introdus într-un soclu DIP PIN 16 de unde sunt realizate conexiunile către rigletă și mai departe către sistemul exterior de măsură. Pinii rămași liberi din soclu sunt utilizați pentru conectarea benzii

de curent. Au mai fost utilizați doi magneți pentru a corecta efectul câmpului de polarizare prin interacție de schimb, H_{EB} . Câmpul generat de aceștia va fi notat cu H_{bias} , Fig. 5(a).

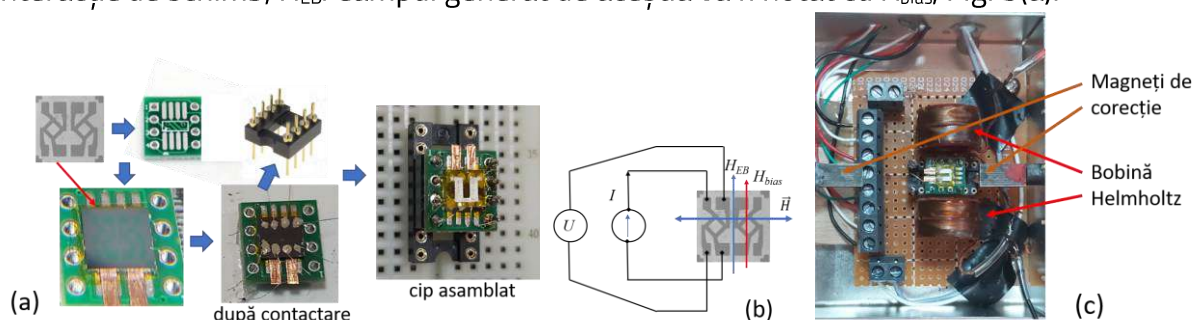


Fig. 5.9 (a) Principalele etape de asamblare ale cip-ului demonstrator, (b) Schema de măsură cu direcțiile câmpurilor aplicate și (c) senzorul montat între două bobine Helmholtz într-o cutie ecranată (adaptat după [62]).

Conectarea celor doi senzori ai cip-ului și a benzii de curent la sistemul electronic de caracterizare sunt prezentate schematic în Fig. 5.10 [15, 16, 62].

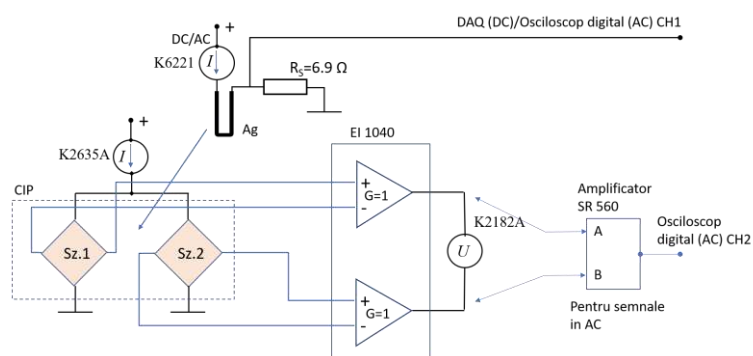


Fig. 5.10. Structura schematică a sistemului de caracterizare a CIP-ului demonstrator [62]

Întrucât cei doi senzori au rezistențe foarte apropiate s-a recurs la alimentarea grupării de la o sursă de curent constant. Sursa de curent, K2635A a fost setată la 6 mA. Curentul a fost distribuit egal între cei doi senzori lucru confirmat de valorile tensiunilor de offset măsurate pe fiecare senzor și care sunt foarte apropiate de cele măsurate când senzorii au fost alimentați separat la 3 mA.

În condițiile setup-ului din Fig. 5.10, sursa K2635A a determinat:

- Tensiunea la bornele punții: 4,399 V
- Rezistența totală a punții: 0,734 k Ω
- Puterea disipată pe punte: 13,1 mW

Tensiunile de ieșire de pe cei doi senzori au fost aplicate sistemului de condiționare EI 1040 care furnizează la ieșire două tensiuni, egale cu cele de intrare dar raportate la masă. Este de așteptat ca, sub acțiunea unui câmp magnetic extern sau a temperaturii, cele două tensiuni să aibă variații identice (în mod ideal).

În DC, semnalul astfel obținut este aplicat nanovoltmetrului K2182A. Curentul prin banda de Ag este generat de către sursa K6221 cu formă de undă sinusoidală și frecvența de 0,04 Hz (deci regim cvasi-staționar). Curentul se închide la masă printr-o rezistență de sarcină $R=6,903$

Ω . Semnalul de pe această rezistență este citit de către un sistem de achiziție de date astfel încât să poată fi înregistrate datele $U_{dif}=U_{sz1}-U_{sz2}=f(I)$. În AC, semnalul este aplicat unui amplificator de tensiune de la Stanford Research SR 560 și apoi osciloscopului digital Teledyne LeCroy HDO 4024.

5.3. Rezultate și discuții

5.3.1. Modelarea micromagnetică a senzorului PHR

Varianta tehnologică de realizare a acestui senzor a fost aceea de a utiliza *o singură mască* de depunere. Aceasta simplifică foarte mult procesul tehnologic de obținere a cip-ului. Utilizarea mai multor măști, cum a fost cazul senzorului PHE sub formă de disc, discutat în Cap. 3, a implicat utilizarea mai multor măști pentru depunerea structurii centrale din Permalloy și apoi a traseelor conductoare din Au, pentru contactarea structurii de Permalloy. Aceste măști trebuie aliniate precis astfel încât, în urma depunerii fiecărui strat, să rezulte structura funcțională proiectată. Pentru fiecare strat depus, placheta de Si este supusă unui proces complex de pregătire precum curățarea, depunerea stratului de fotorezist, tratament termic, definirea imaginii măștii pe acesta, developarea, depunerea stratului FM sau NM, îndepărtarea măștii prin lift-off, iar procesul se repetă pentru fiecare mască.

Având în vedere că, în acest caz, și traseele de contactare sunt realizate tot din material feromagnetic, a fost studiată, prin simulări micromagnetice, influența lor asupra semnalului furnizat de către zona centrală a senzorului, ce definește puntea Wheatstone. Pentru aceasta, imaginea senzorului a fost folosită ca mască ce a definit structura simulată micromagnetic, Fig. 5.11, [62]. Astfel, imaginea SEM a senzorului a fost curățată, convertită în alb/negru, Fig. 5.11(a) și a fost importată ca mască în simulatorul LLg Micromagnetics, Fig. 5.11(b). Această mască a fost încadrată într-o regiune rectangulară cu dimensiunile $1000 \times 2000 \times 10 \text{ nm}^3$. Parametrii utilizați pentru simulare au fost: magnetizarea la saturație $M_s = 710 \text{ kA/m} = 710 \text{ emu/cc}$, constanta de schimb $A = 1.3 \times 10^{-11} \text{ J/m}$, constanta de anizotropie uniaxială $K_u = 500 \text{ J/m}^3$, câmpul de polarizare prin interacție de schimb $H_{EB}=H_{ex}= 150 \text{ Oe}$, $T = 0 \text{ K}$; și celula de discretizare $10 \times 10 \times 10 \text{ nm}^3$; condiția de convergență 1×10^{-4} .

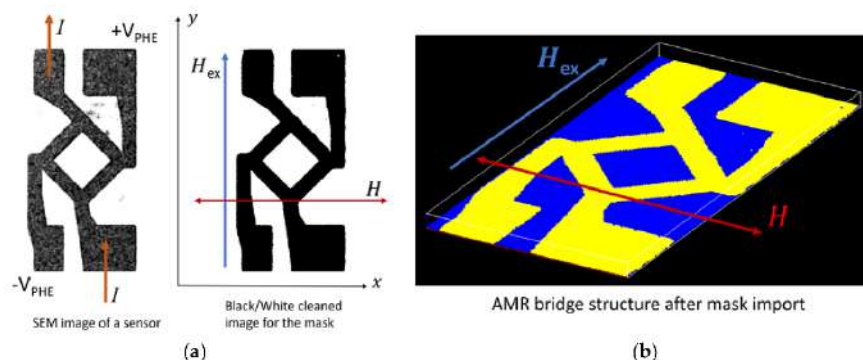


Fig. 5.11. (a) Imaginea SEM a unui senzor de pe cip transformată în mască utilizată pentru definirea structurii de simulat (b) [62].

Astfel, prin simulări micromagnetice, am evidențiat comportarea senzorului atât prin imaginea structurii de domenii magnetice a acestuia, Fig. 5.12, cât și prin obținerea curbelor de magnetizare și a dependenței de câmp a semnalului PHR, Fig. 5.13. Aceste rezultate au fost discutate pe larg în [62].

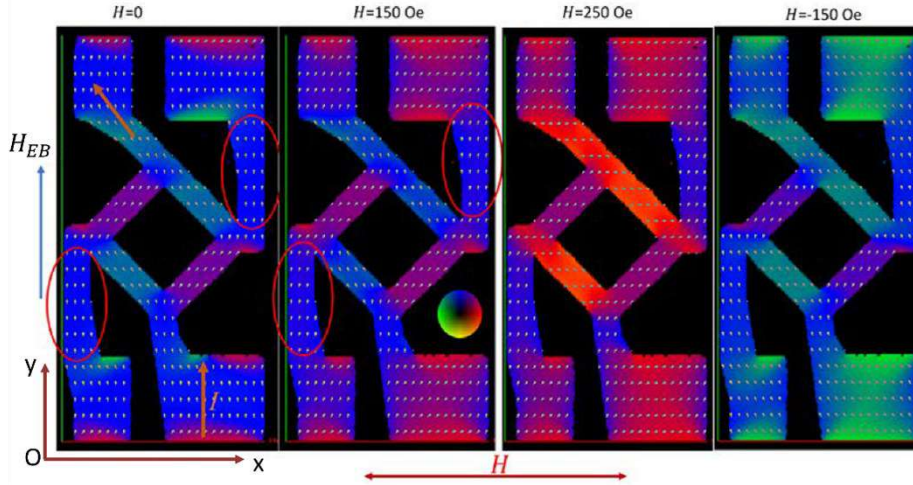


Fig. 5.12. Imagini obținute prin simulare micromagnetică ce ilustrează structura de domenii magnetice pentru patru valori ale câmpului magnetic aplicat: $H = 0$ Oe, $H = -150$ Oe, $H = 150$ Oe, $H = 250$ Oe. Codurile de culoare arată orientarea momentelor magnetice (adaptat din [62]).

Din Fig. 5.12 și Fig. 5.13 se observă că momentele magnetice din traseele de conectare au o mică influență asupra comportării zonei centrale ce alcătuiește puntea Wheatstone cu rezistori AMR. Spre exemplu, momentele magnetice din traseele de conectare pentru pad-urile de semnal păstrează orientarea dată de H_{EB} și de anizotropia de formă. Analiza este completată de reprezentarea dependențelor magnetizărilor M_x și M_y și a semnalului PHE în funcție de H , atât pentru întreaga structură cât și pentru zona punții, Fig. 5.13(a, b, c, d).

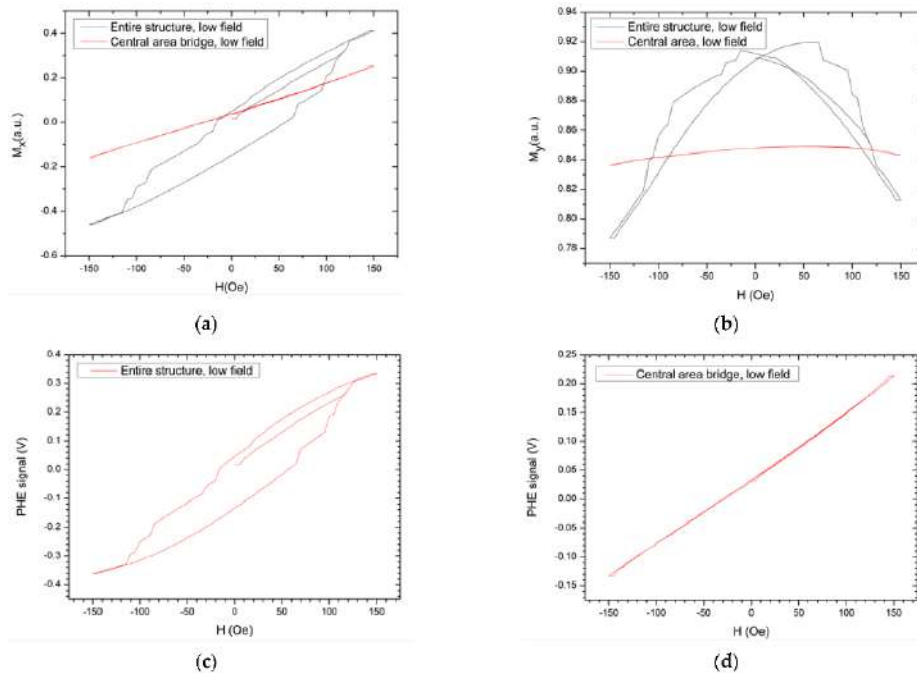


Fig. 5.13. Curbele de magnetizare (a) după axa Ox și (b) după axa Oy și răspunsul PHR dacă ar fi considerată (c) comportarea întregii structuri respectiv, (d) doar a zonei centrale [62].

Pentru aceasta, a fost folosită o mască, precum cea din Fig. 5.3, ce a permis extragerea contribuției momentelor magnetice doar din zona centrală, Fig. 5.3 (a, b). Folosind datele magnetizărilor a fost calculat răspunsul efectului PHR, de multe ori asociat ca PHE datorită similitudinii comportării. Acestea sunt reprezentate în Fig. 5.13 (c, d).

Prin rezultatele acestor simulări se observă că zona centrală a senzorului nu prezintă histerezis, atât în ce privește dependențele de câmp ale magnetizărilor cât și în ceea ce privește semnalul PHR. Se observă un bun acord calitativ între dependențele semnalelor, M_x , și PHR din Fig. 5.3 și Fig. 5.13(d). De asemenea, am arătat că, utilizarea unei singure măști de depunere, dar cu un layout adecvat, Fig. 5.12, se pot obține structuri PHE pentru care comportarea magnetizării din zona centrală să nu fie influențată de traseele de curent și de semnal realizate din același material FM.

5.3.2. Caracteristica de câmp a senzorului PHR

Senzorii PHR au fost caracterizați magnetic, atât înainte cât și după efectuarea călirii magnetice, iar rezultatele au pus în evidență, din forma caracteristicii de câmp a efectului PHR, stabilirea câmpului H_{EB} după direcția impusă în timpul călirii [62].

Caracteristica de câmp a sistemului de bobine din Fig. 5.9(c) a fost obținută plasând în locul cipului sonda Hall a gaussmetrului digital Lakeshore 475 DSP. Aceasta este prezentată în Fig. 5.14(a). În Fig. 5.14(b, c) sunt prezentate caracteristicile de câmp ale senzorului 1, respectiv 2, folosind setup-ul din Fig. 5.10.

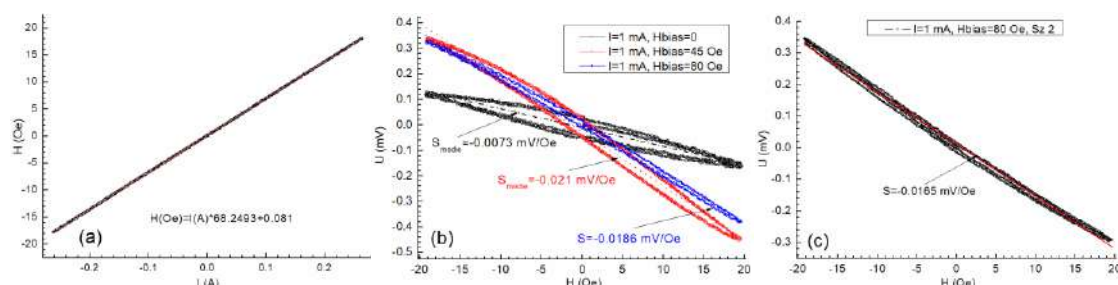


Fig. 5.14. (a) Caracteristica de câmp a bobinei Helmholtz din Fig. 5.9(c), (b,c) caracteristicile de câmp ale semnalului de ieșire pentru senzorul "1", respectiv "2".

Pentru a micșora efectul de histerezis și cel de neliniaritate, s-a recurs la o polarizare suplimentară cu ajutorul a doi magneți plasați pe peretele carcasei metalice. Fiind material feromagnetic, câmpul se închide prin acesta. Fig. 5.14(b) prezintă caracteristicile $U=f(H)$ pentru $H_{bias}=0$ și două valori ale câmpului suplimentar de polarizare, $H_{bias}=45$ respectiv 80 Oe. De asemenea, pozițiile celor doi magneți au fost modificate astfel încât să se obțină un compromis cât mai bun între sensibilitate și liniaritate. Valoarea $H_{bias}=80$ Oe a fost considerată optimă. O valoare mai mare pentru H_{bias} duce la o micșorare a sensibilității. Fig. 5.14(c) prezintă caracteristica de răspuns a senzorului 2 pentru același câmp de polarizare; cei doi senzori sunt separați spațial la o distanță de 1 mm. Ușoara asimetrie dintre cei doi senzori va fi compensată

în regimul diferențial de măsură. Având în vedere distribuția curentului prin banda în formă de "U" și orientările câmpului magnetic creat de cele două brațe, Fig. 1, semnalul de ieșire se va exprima de forma $U_{\text{dif}} = U_{\text{sz1}} - U_{\text{sz2}}$, lucru ce a fost discutat pe larg.

5.3.3. Caracterizarea cip-ului demonstrator ca senzor de curent

Fig. 5.15 prezintă caracteristica de răspuns în DC a senzorului diferențial în funcție de valoarea curentului prin banda printată din Ag.

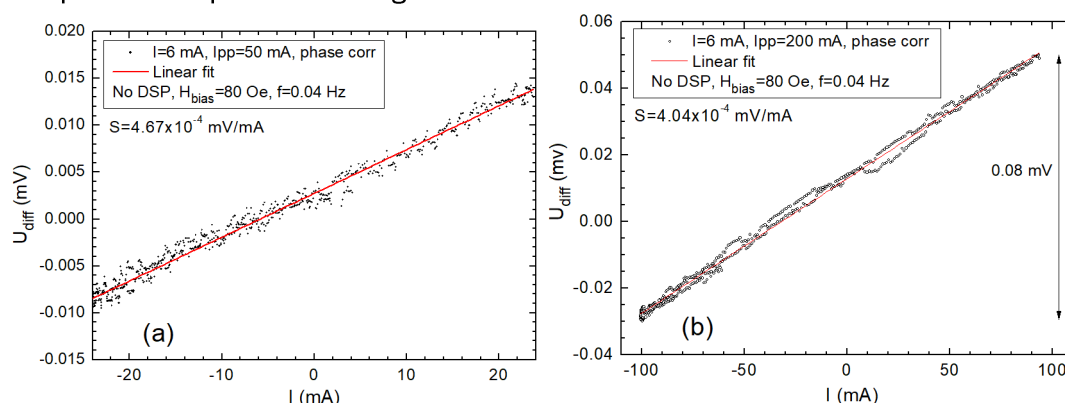


Fig. 5.15. Caracteristicile de răspuns ale senzorului diferențial în funcție de valoarea curentului prin banda printată din Ag pentru (a) curenți mici și (b) curenți până în 100 mA în regim cvasistaționar ($f=0,04$ Hz). Nu a fost efectuată nicio procesare de semnal precum medierea valorilor pentru un curent dat, filtrare analogică sau digitală [62].

Se remarcă o liniaritate destul de bună a caracteristicii de răspuns cu o sensibilitate cuprinsă între $4-4,67 \cdot 10^{-4}$ mV/mA. Pe de altă parte, dacă se consideră estimarea de la Secțiunea 5.2.2, câmpul magnetic creat de către banda conductoare în zona senzorului este cuprins între 0,404 Oe (metoda analitică) și 0,51 Oe (COMSOL), pentru $I=100$ mA. Considerând sensibilitățile celor doi senzori în câmp magnetic, 0,0186 mV/Oe/mA, respectiv 0,0165 mV/Oe/mA, Fig. 5.14(a,b), se obține o variație a tensiunii furnizată de senzori, în regim diferențial, de 0,042 respectiv 0,053 mV. În cazul estimării prin metoda analitică a câmpului magnetic creat de banda conductoare din Ag, se obține o variație a semnalului de ieșire de 0,084 mV pentru o variație $200 \text{ mA}_{\text{pp}}$ ceea ce este în bun acord cu datele experimentale din Fig. 5.15(b).

Prin urmare, se poate scrie pentru câmpul magnetic creat de către banda de curent o expresie de tipul $H(\text{Oe}) = I(\text{mA}) \times 4,04 \cdot 10^{-3}$.

Cip-ul demonstrator a fost testat și pentru detecția curenților alternativi, detalii suplimentare fiind raportate în [62]. Curentul total prin cei doi senzori a rămas la valoarea de 6 mA. Sursa K6221 a fost programată să genereze curent alternativ prin banda în formă de U, Fig. 5.10. Semnalul este amplificat de către amplificatorul de zgomot redus SR 560 de la Stanford Research; amplificarea a fost $2 \cdot 10^4$ și au fost utilizate filtre care au tăiat semnalele cu frecvența mai mare de 1 kHz și mai mici de 5 Hz. Semnalul de pe rezistența de sarcină, $R=6,903 \Omega$, este aplicat pe canalul 1 iar cel corespunzător senzorului de curent este aplicat pe canalul 2 al

osciloscopului digital Teledyne LeCroy HDO 4024, Fig. 5.15, ce permite analiza semnalului furnizat de cip.

Au fost injectați în banda de Ag curenți cu amplitudinea de 5, 10, 15, 25, 25, 50, 75 și 100 mA la o frecvență de 100 Hz. Cu ajutorul osciloscopului digital HDO 4000 au fost vizualizate formele de undă ale semnalului generat de către cip-ul cu senzori și a fost măsurată valoarea efectivă a semnalului. S-a obținut curba de calibrare din Fig. 5.16(a). A fost testat, de asemenea, și răspunsul în frecvență, Fig. 5.16(b).

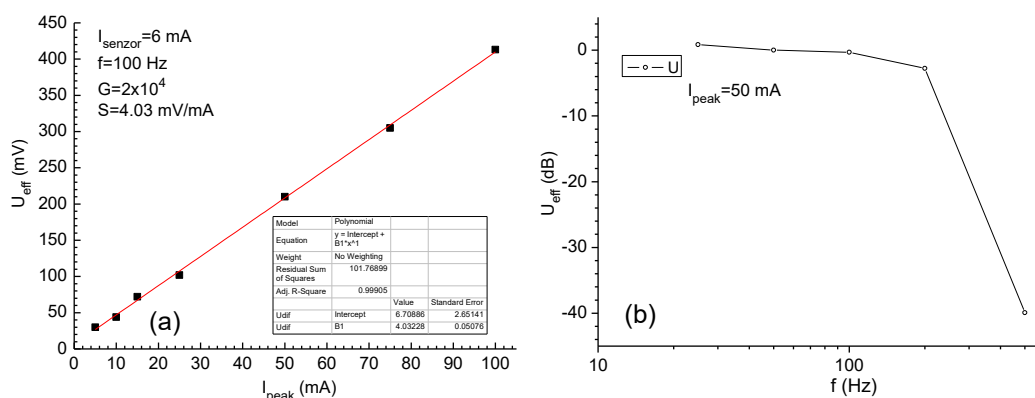


Fig. 5.16. (a) Caracteristica de calibrare în a.c. pentru $f=100$ Hz și (b) Răspunsul în frecvență al tensiunii de ieșire pentru un curent aplicat cu amplitudinea de 50 mA de formă sinusoidală.

Se remarcă o liniaritate foarte bună a caracteristicii de răspuns, cu o sensibilitate de 4,03 mV_{eff}/mA. În [16, 62] am arătat că, pentru un curent cu amplitudine mai mare de 15 mA senzorul diferențial reproduce cu distorsiuni minime forma de undă a curentului sinusoidal, aspect confirmat și din analiza spectrului Fourier a semnalului de ieșire.

S-a obținut că limita de detecție, atât în DC cât și în AC este de aproximativ 2 mA. Eroarea de neliniaritate în DC, Fig. 5.15(b), este de aproximativ 7,5 %. Curentul a fost limitat la 100 mA pentru a evita încălzirea benzii conductoare din Ag.

5.4. Concluzii

Studiile prezentate în acest capitol au demonstrat capacitatea de integrare a unei multitudini de instrumente și tehnici ce au contribuit la realizarea unui cip demonstrator destinat măsurării non-contact a curentului electric. Astfel au fost îmbinate concepte fundamentale privind efectele magnetorezistive, tehnici de simulare micromagnetică și proiectare de layout, cu aspecte practice de microfabricație și tehnici de caracterizare galvanomagnetice pentru realizarea cip-ului demonstrator. Acest cip, cu o structură hibridă, este capabil să detecteze câmpuri magnetice și curenți electrici în DC și AC. Pe cip au fost definiți doi senzori magnetorezistivi, numiți senzori PHR, ce emulează prin caracteristica lor un senzor PHE. Ansamblul de măsură este unul diferențial însă, fiecare senzor în parte reprezintă un senzor diferențial. Această configurație oferă stabilitate termică și permite o bună imunitate la câmpul magnetic extern prin faptul că cei doi senzori au caracteristici de detecție foarte apropiate, Fig.

5.14(b,c). Câmpul magnetic creat de către banda de curent, plasată deasupra senzorilor, a fost estimat folosind un model analitic dar și prin simulări în COMSOL Multiphysics, rezultatul fiind validat din teste experimentale. Banda conductoare în formă de U a fost obținută printr-un proces de printare pe substrat flexibil de Kapton și apoi atașată pe suprafața senzorului.

A fost realizat un dispozitiv complex de testare care a permis obținerea caracteristicilor de câmp și apoi a celor de detecție a curentului - DC/AC. Din analiza caracteristicilor de detecție s-a estimat o limită de detecție de aproximativ ± 2 mA. S-a observat o caracteristică de detecție aproape liniară în domeniul de frecvență 0-200 Hz, pentru setup-ul experimental utilizat. Senzorii PHR prezintă o sensibilitate în câmp magnetic de 0,0186 mV/(Oe·mA), respectiv 0,0165 mV/(Oe·mA).

Aceste teste și rezultate în condiții de laborator au confirmat gradul de maturitate al tehnologiei utilizate, și a cip-ului demonstrator, la nivelul TRL4 [16]. Rezultatele obținute într-un timp de implementare redus (2 ani) impulsionează continuarea acestor studii pentru îmbunătățirea calității structurilor magnetice și creșterea sensibilității senzorilor magnetorezistivi obținuți. Posibilitate obținerii unor structuri MR prin printare ar simplifica foarte mult etapele tehnologice de realizare a senzorilor magnetici și ar aduce flexibilitate în proiectarea și implementarea de noi aplicații la un cost redus. Acest deziderat vine și cu provocări privind optimizarea materialului ce permite printarea structurilor MR ceea ce presupune studii și dezvoltarea unor colaborări interdisciplinare.

(B-ii) Planuri de evoluție și dezvoltare a carierei

Activitatea de cercetare desfășurată de-a lungul anilor a fost valorificată prin publicarea de articole științifice în reviste ISI și BDI și susținerea de prezentări invitate, prezentări orale sau poster la conferințe de specialitate. Aceste rezultate au fost recunoscute prin citări în reviste indexate ISI, invitații de a recenza articole în reviste cu factor de impact ridicat și de a fi editor invitat (guest editor) al unor numere speciale. Toate acestea nu ar fi fost posibile fără accesarea de fonduri în cadrul proiectelor de cercetare pe care le-am coordonat de-a lungul timpului și care mi-au permis dobândirea unei dotări tehnice bogate.

Astfel, în cadrul activității de cercetare, am abordat teme variate, interdisciplinare, plecând de la studii teoretice, activități de modelare și de proiectare dar și activități experimentale desfășurate asupra sistemelor magnetice nanostructurate aplicate în domeniul detecției câmpului magnetic, a nanoparticulelor magnetice sau a curentului electric.

Atragerea de studenți doctoranzi, dinamici și capabili să se implice în activitatea de cercetare avansată, va permite continuarea unor asemenea teme la un nivel superior de dezvoltare dar și inițierea unor noi, ce pot aduce plus valoare în domeniul Ingineriei Electrice. Experiența pe care am dobândit-o în managementul proiectelor de cercetare va fi folosită pentru îndrumarea tinerilor doctoranzi în accesarea de granturi de cercetare fără de care îmbunătățirea dotării tehnice cu echipamente moderne ar fi imposibilă.

Întrucât desfășor ore didactice la secția de Inginerie Electrică și Calculatoare (în limba engleză) și la programul de Master Sisteme Electrice Avansate (în limba engleză), unde țin un curs opțional "Sisteme integrate de senzori pentru aplicații în ingineria electrică", am ocazia să cunosc tineri talentați și ambițioși, ce pot aplica pentru a-și continua traseul de formare prin studii doctorale în acest domeniu sub conducerea mea. Pe lângă aceștia voi fi deschis și către absolvenți ai altor programe de studii de masterat, atât din țară cât și din străinătate, ce au legătură cu domeniul Ingineriei Electrice, care să poată aborda teme de cercetare de actualitate.

Caracterul interdisciplinar inherent al temelor de cercetare actuale va impune continuarea și consolidarea relațiilor de colaborare cu parteneri din țară, precum IMT-București, ICPE-CA București, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București, sau Institutul National de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizica Materialelor (INCDFM) – Măgurele. Îmi propun să inițiez noi legături de colaborare atât cu instituții de cercetare din țară dar și din străinătate, precum și cu parteneri din mediul privat mai ales în cazul unor granturi de cercetare.

Temele de doctorat ce vor fi propuse vor avea în vedere atât dotarea tehnică disponibilă în cadrul Universității Transilvania din Brașov dar și posibilitatea colaborării, pentru implementarea lor, cu parteneri din țară și din străinătate. Aceste teme vor fi bazate pe tendințe actuale, și trebuie să răspundă unor necesități de cunoaștere și de implementare practică a unor soluții tehnice în domeniul Ingineriei Electrice.

Astfel, vor fi abordate subiecte de cercetare ce vor fi propuse și în cadrul temelor de doctorat, precum:

1. Aplicații cu senzori bazați pe efectul de magnetorezistență anizotropă, magnetorezistență gigantică și tunelare dependentă de spin pentru monitorizarea non-contact a curenților reziduali din instalații electrice, determinarea traseelor de curent, analiza formei de undă a curenților și altele.

Pornind de la experiența acumulată, vor fi propuse arhitecturi performante pentru detecția non-contact a curentului, metode de compensare termică hardware dar și software, metode de extindere a domeniului dinamic de măsură, sisteme performante de condiționare și achiziție a semnalului bazate pe noi tehnologii precum Machine Learning, Inteligență Artificială și alți algoritmi de prelucrare avansată a datelor.

2. Metode de reducere a zgomotului electric în senzori magnetorezistivi.

Detecția câmpurilor magnetice extrem de scăzute, cu rezoluții de ordinul nT este limitată în multe cazuri de zgomotul electric al senzorului MR. Vor fi efectuate studii privind alegerea adecvată a senzorului MR cu domenii de liniaritate, sensibilitate și nivel de zgomot adecvate aplicațiilor propuse. Vor fi studiate strategii de reducere a zgomotului electric și magnetic al senzorului și tehnici de prelucrare a semnalului pentru micșorarea nivelului zgomotului $1/f$. Vor fi studiate aplicații pentru detecția câmpului magnetic extrem de scăzut precum cel al nanoparticulelor magnetice pentru aplicații de diagnostic medicală, echipamente de magnetocardiografie, monitorizarea apelor uzate, și altele.

3. Studiul senzorilor magnetici realizați pe substrat flexibil și a celor printați pentru aplicații industriale și medicale în aplicații de tip "wearable devices".

Vor fi studiate în principal senzori AMR și PHE, depuși pe substrat flexibil sau printați (în special cei bazați pe efectul AMR) cu diverse structuri și geometrii și configurații de conectare electrică care să le asigure stabilitate termică și liniaritate a răspunsului în câmp magnetic.

4. Metode obținere și studiul unor circuite electrice printate.

Realizarea unor elemente de circuit printate precum rezistori sau inductanțe pot completa în mod benefic studiile privind obținerea de senzori MR prin introducere și a unor elemente de prelucrare a semnalului. Această abordare va permite o mare flexibilitate în designul unor aplicații și reducerea timpului necesar implementării lor. Vor fi întreprinse studii legate de natura materialelor utilizate și de stabilirea unor regimuri optime pentru printare precum și alegerea unor substraturi potrivite. Analiza influenței calității suprafețelor printate asupra caracteristicilor de conducție. Va fi abordată și posibilitatea obținerii de elemente active simple precum diode sau tranzistori. Tehnologia circuitelor electrice/electronice printate reprezintă un trend de mare actualitate la nivel internațional.

5. Studii privind utilizarea senzorilor spintronici pentru monitorizarea non-contact a funcționării unor componente critice și a semnalelor electrice într-o bandă largă de frecvențe, din echipamente electrice/electronice precum surse de putere în comutație, amplificatoare și altele.

Așa cum am subliniat în capitolele anterioare, senzorii MR au abilitatea de a funcționa la fel de bine atât în DC cât și în AC, putând urmări fidel forma de undă a semnalului electric până la frecvențe de ordinul MHz sau chiar mai mult. Plasarea unor asemenea senzori în anumite zone de pe PCB sau busbar permite monitorizarea non-contact a funcționării unor instalații de putere sau a altor echipamente electrice/electronice. Modelări numerice și teste experimentale complexe vor fi utilizate în aceste studii.

Aceste teme nu sunt limitative, noi direcții și priorități putând fi identificate în viitor.

Abordarea acestor teme de cercetare va fi însoțită nu doar de consolidarea și dezvoltarea de noi legături cu institute de cercetare și universități cu preocupări similare sau complementare, dar și de activități de atragere de noi fonduri prin scrierea de proiecte de cercetare.

Astfel, vor fi atinse obiective specifice pe care le urmăresc, precum:

- Dezvoltarea de noi senzori, precum senzori și arii de senzori reconfigurabili în funcție de aplicație, și tehnologii avansate de detecție și prelucrare de semnal pentru aplicații în domeniul Ingineriei Electrice;
- Îmbunătățirea dotării tehnice a laboratorului pe care l-am creat;
- Dezvoltarea de noi tehnologii având la bază structuri metalice și semiconductoare printate dar și structuri pe bază de grafenă pentru senzori de câmp magnetic [10] și elemente de procesare de semnal;
- Consolidarea și creșterea calității resursei umane implicate în activitatea de cercetare;
- Creșterea vizibilității activității de cercetare și a resursei umane implicate prin activități de diseminare;
- Atragerea de studenți de la programele de licență și masterat în cadrul unor teme de cercetare adaptate nivelului lor și care să-i familiarizeze cu noi tehnologii. Aceștia pot deveni viitorii candidați pentru studii doctorale în Inginerie Electrică.

Voi urmări ca rezultatele originale să fie protejate prin depunerea de cereri de brevet de invenție național sau internațional.

Diseminarea rezultatelor originale se va realiza prin publicarea de articole în reviste ISI cu factor de impact și participarea la conferințe de specialitate. Prin vizite și stagii de cercetare în țară sau străinătate se va urmări stabilirea de noi legături pentru colaborări științifice și viitoare parteneriate pentru propuneri de proiecte de cercetare.

Consider că activitatea didactică este de o importanță fundamentală în formarea unor viitori specialiști care să își dorească să urmeze un Master și studii de doctorat în domeniu și, eventual, o carieră didactică. Cursurile și aplicațiile, pe care le predau la programul de studii de licență Electrical Engineering and Computing, au un rol important în formarea de cunoștințe și competențe atât într-un domeniu fundamental, precum Fizica, (cursul Physics), de domeniu

(cursul Electromagnetic Field Theory) precum și de specialitate (cursul Microsensors and Actuators).

De aceea, voi urmări perfecționarea metodelor de predare și continua îmbunătățire a conținutului cursurilor, seminarelor și laboratoarelor care să ducă la creșterea interesului pentru acest domeniu. Voi continua să îmbunătățesc utilizarea unor metode de predare moderne, asistate de calculator, ce vor fi însoțite de simulări și de exemple ce ilustrează aplicarea în practică a subiectelor tratate.

Lucrările de laborator pentru cursurile "Microsensors and Actuators" de la programul de licență "Electrical Engineering and Computers" și "Embedded sensors for electrical engineering applications" de la programul de Master „Advanced Electrical Systems” au trezit interesul studenților prin utilizarea unor senzori și echipamente moderne de măsură și achiziții de date. Astfel, voi continua să îmbunătățesc aceste lucrări și să introduc altele noi privind dezvoltarea unor aplicații practice în domeniul sistemelor complexe de senzori.

Prin aceasta urmăresc:

- O mai bună implicare a studenților în activitățile didactice – curs, seminar, laborator;
- Creșterea procentului de promovabilitate și a numărului de studenți cu note de promovare ridicate;
- Atragerea studenților către activitatea de cercetare prin participarea acestora cu lucrări la competiții științifice studentești precum Cercurile științifice, Absolvenți în fața companiilor (AFCO - <https://afco.unitbv.ro/>) și altele;
- Stabilirea unor lucrări de licență și de disertație care să-i implice pe studenți în activități complexe de documentare, proiectare și implementare practică a unor aplicații din domeniul Ingineriei Electrice;
- Crearea unei baze de selecție pentru viitori studenți doctoranzi cu care să pot colabora în viitor.

Îmi exprim convingerea că, prin aceste acțiuni ce privesc dezvoltarea pe viitor a activității de cercetare cât și didactice, voi putea aduce contribuții valoroase în domeniul Ingineriei Electrice.

(B-iii) Bibliografie

- [1] Marius Volmer, Nanostructuri magnetice – Obținere, proprietăți, aplicații, Editura Universității Transilvania din Brașov, 2008, ISBN 978-973-598-248-5
- [2] A. Elzwawy, M. Rasly, M. Morsy, H. Piskin, M. Volmer, (2024). Magnetic Sensors: Principles, Methodologies, and Applications, pp 1-38, In: Ali, G.A.M., Chong, K.F., Makhoulf, A.S.H. (eds) Handbook of Nanosensors. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16338-8_33-1
- [3] <https://www.sensitec.com/en/products-and-solutions/sensorchips/amr-sensors/>
- [4] <https://www.analog.com/en/product-category/magnetoresistive-sensors.html#category-detail>
- [5] Oliveros Mata, E.S., Cañón Bermúdez, G.S., Ha, M. et al. Printable anisotropic magnetoresistance sensors for highly compliant electronics. Appl. Phys. A 127, 280 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00339-021-04411-1>
- [6] Amir Elzwawy, Hasan Pişkin, Numan Akdoğan, Marius Volmer, Günter Reiss, Luca Marnitz, Anastasiia Moskaltsova, Ogan Gurel and Jan-Michael Schmalhorst, Current trends in planar Hall effect sensors: evolution, optimization, and applications, J. Phys. D: Appl. Phys. 54 353002 (2021), <https://doi.org/10.1088/1361-6463/abfbfb>
- [7] Jogschies, L.; Klaas, D.; Kruppe, R.; Rittinger, J.; Taptimthong, P.; Wienecke, A.; Rissing, L.; Wurz, M.C. Recent Developments of Magnetoresistive Sensors for Industrial Applications. Sensors 2015, 15, 28665-28689. <https://doi.org/10.3390/s151128665>
- [8] A. Hirohata et. al., Review on spintronics: Principles and device applications, *J. Magn. Magn. Mater.* 509 166711 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166711>
- [9] Han, W., Kawakami, R., Gmitra, M. et al. Graphene spintronics. Nature Nanotech 9, 794–807 (2014). <https://doi.org/10.1038/nnano.2014.214>
- [10] Minggang Zeng et. al., Graphene-Based Spintronic Components, <https://arxiv.org/pdf/1010.5634.pdf>
- [11] J. Neamtu, M. Volmer, Surface magnetisation sensor for characterization of magnetic thin films and spin-valves structures, Microelectronic Engineering 51-52, 409-413 (2000), <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167931799005122>
- [12] M. Volmer, M. Avram, A Differential Magnetometer for Magnetic Nanobeads Characterization, Proceedings of the International Semiconductor Conference, CAS, Volume 1, 2011, Pages 135-138 (34rd International Semiconductor Conference, CAS 2011; Sinaia; 17

October 2010 through 19 October 2011), ISBN 978-1-61284-171-7, ISSN 1545-827X, <https://doi.org/10.1109/SMICND.2011.6095736>

[13] J. Neamtu, M. Volmer, Magnetoresistance and Hall Effect Characterisation on Magnetic Thin Films Multilayers, Materials Research Society symposia, Boston 2002, *MRS Online Proceedings Library* 746, 55 (2002). <https://doi.org/10.1557/PROC-746-R5.5>

[14] M. Volmer, J. Neamtu, Hall effect in Permalloy-based thin films and magnetic multilayers, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 272-276, 1881-1882 (2004), <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2003.12.360>

[15] Structuri spintronice cu Magneto-Rezistență Anizotropică (AMR) și Magneto-Rezistență Gigantică (GMR) pentru aplicații de senzori robuști (MAGSENS), 126PED/2017, (Contractor ICPE-CA București), <http://www.icpe-ca.ro/icpe-ca/proiecte/proiecte-nationale/pn-2016-2020/magsens/etapa-2.pdf>

[16] Senzori cu valvă de spin avansați pentru aplicații de măsurători de precizie non-contact ale curenților DC/AC (SpinCurrentSense), 315PED/2020, (Contractor ICPE-CA București), <https://www.icpe-ca.ro/315ped-2020/>

[17] Senzori magnetorezistivi optimizați pentru detecția pe cip a nanoparticulelor magnetice (MagSensOnChip), 510PED/2020, <https://magsensonchip.unitbv.ro/>

[18] Structuri spintronice pe grafenă pentru aplicații de senzorică și procesare de semnal (GrafeneS), 597PED/2022, <https://graphenespin.unitbv.ro/>

[19] M. Volmer, M. David, M. Florescu, A. Bezerghianu, C. Mușuroi, *Procedeu pentru controlul anizotropiei magnetice în straturi subțiri feromagnetice moi*, cod depunere OSIM A/00305 din 10.06.2024

[20] Handbook of Surface Science, Volume 5, 2015, Pages 1-41, Chapter 1 - Growth and Characterization of Magnetic Thin Film and Nanostructures, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62634-9.00001-1>

[21] J. Nogués, J. Sort, V. Langlais, V. Skumryev, S. Suriñach, J.S. Muñoz, M.D. Baró, Exchange bias in nanostructures, *Physics Reports*, 422(3), 65-117 (2005), ISSN 0370-1573, <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2005.08.004>

[22] John X.J. Zhang, Kazunori Hoshino, Chapter 2 - Fundamentals of nano/ microfabrication and scale effect, Editor(s): John X.J. Zhang, Kazunori Hoshino, In *Micro and Nano Technologies, Molecular Sensors and Nanodevices* (Second Edition), Academic Press, 2019, Pages 43-111, ISBN 9780128148624, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814862-4.00002-8>

- [23] <https://www.semicore.com/news/71-thin-film-deposition-thermal-evaporation>
- [24] B. Janarthanan, et al., Basic deposition methods of thin films**, Journal of Molecular Structure, **1241**, 130606 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.130606>
- [25] K.Y. Kok, C.M. Hangarter, B. Goldsmith, I.K. Ng, N.B. Saidin, N.V. Myung, Synthesis and characterization of electrodeposited permalloy (Ni₈₀Fe₂₀)/Cu multilayered nanowires, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, **322** 3876–3881 (2010), <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2010.08.012>
- [26] W. Schwarzacher and D. S. Lashmore, "Giant magnetoresistance in electrodeposited films," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 32, no. 4, pp. 3133–3153, July 1996, <https://doi.org/10.1109/20.508379>
- [27] Milton Ohring, The Materials Science of Thin Films, Academic Press, 1992, ISBN 0-12-524990-X
- [28] <https://www.lesker.com/evaporation-sources.cfm>
- [29] Almas Bashir, Tahir Iqbal Awan, Aqsa Tehseen, Muhammad Bilal Tahir, Mohsin Ijaz, Chapter 3 - Interfaces and surfaces, Editor(s): Tahir Iqbal Awan, Almas Bashir, Aqsa Tehseen, Chemistry of Nanomaterials, Elsevier, 2020, Pages 51-87, ISBN 9780128189085, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818908-5.00003-2>
- [30] F. Lévy, Film Growth and Epitaxy: Methods, Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, Elsevier, 2016, ISBN 9780128035818, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.01012-2>
- [31] G. Reiss, et al., Presence and absence of antiferromagnetic coupling and giant magnetoresistance in sputtered and evaporated permalloy/copper multilayers, J. Magn. Magn. Mater. **184(3)**, 281–288 (1998), [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(97\)01151-7](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(97)01151-7)
- [32] J. Neamtu, M. Volmer, A. Coraci, Magnetoresistive Properties and Microstructure of NiFe Thin Films and NiFe(t)/Cu(s)/NiFe(t) Multilayer Films, Thin Solid Films, **343–344**, 218–221 (1999), [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(98\)01629-0](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(98)01629-0)
- [33] J. Neamtu, M. Volmer, Magnetoresistance and Magnetic Properties of Magnetic Thin Film Multilayers, Surface Science **482–485**, 1010–1014 (2001), [https://doi.org/10.1016/S0039-6028\(01\)00792-0](https://doi.org/10.1016/S0039-6028(01)00792-0)
- [34] <https://www.sputtertargets.net/blog/an-overview-of-magnetron-sputtering.html>
- [35] <https://www.nanoscience.com/techniques/atomic-force-microscopy/>

- [36] M. Volmer, J. Neamtu, I. Inta, Hall Effect and Magnetoresistance measurements on permalloy (Py) thin films and Py/Cu/Py multilayers, *J. Optoelectron. Adv. Mater.* **4**(1), 79-84, (2002), https://old.joam.inoe.ro/arhiva/pdf4_1/Volmer.pdf
- [37] M. Volmer, J. Neamtu, Simulated and measured hysteresis curves for thin films, *Physica B: Condensed Matter*, **372**, 198-201, (2006), <http://dx.doi.org/10.1016/j.physb.2005.10.047>
- [38] CEEX - Microsisteme de multistraturi nanometrice magnetice cu efect de magnetorezistență gigantica (GMR) si tunelare dependenta de spin (TMR) pentru spintronică (NANOMATGIANT), Contract nr. 69/03.10.2005, (Contractor ICPE-CA București)
- [39] M. Volmer, J. Neamtu, Micromagnetic characterization of a rotation sensor based on the planar Hall effect, *Physica B: Condensed Matter*, **403**, 350-353 (2008), <https://doi.org/10.1016/j.physb.2007.08.047>
- [40] PC Micromagnetics Simulator, <https://math.nist.gov/oommf/contrib/simulmag/>
- [41] J. Neamtu and M. Volmer, "Tunnel magneto-resistance effect and giant hall effect of some magnetic thin film multilayers," *2009 9th IEEE Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO)*, Genoa, Italy, 26-30 July 2009, pp. 647-650, <https://ieeexplore.ieee.org/document/5394777/>
- [42] M. Volmer, J. Neamtu, Hall Effect in Permalloy Based Thin Films and Magnetic Multilayers, *Journal of optoelectronics and advanced materials*, **5**(4), 951-957 (2003), https://old.joam.inoe.ro/arhiva/pdf5_4/Volmer.pdf
- [43] M. Volmer, J. Neamtu, Optimisation of Spin-Valve Planar Hall Effect Sensors for Low Field Measurements, *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, **48**(4), 1577-1580 (2012) <http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2011.2173671>
- [44] M. Volmer, M. Avram, Signal Dependence on Magnetic Nanoparticles Position Over a Planar Hall Effect Biosensor, *Microelectronic Engineering* **108**, 116-120 (2013); <https://doi.org/10.1016/j.mee.2013.02.055>
- [45] M. Volmer, M. Avram, Using Permalloy Based Planar Hall Effect Sensors to Capture and Detect Superparamagnetic Beads for Lab on a Chip Applications, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **381**, 481-487 (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.10.172>
- [46] T.Q. Hung, S. Oh, B. Sinha, J.-R. Jeong, D.-Y. Kim, C. Kim, High field-sensitivity planar Hall sensor based on NiFe/Cu/IrMn trilayer structure, *J. Appl. Phys.* **107**, 09E715 (2010). <https://doi.org/10.1063/1.3337739>.
- [47] J. Neamtu, M. Volmer, M. C. Neamtu, Spin-valve structures with anisotropic magneto-resistance (AMR) for planar Hall effect (PHE) sensing applications, *Optoelectronics and*

Advanced Materials - Rapid Communications, 12(9-10), 603-607 (2018), <https://oam-rc.inoe.ro/articles/spin-valve-structures-with-anisotropic-magneto-resistance-amr-for-planar-hall-effect-phe-sensing-applications/fulltext>

[48] M. Volmer, J. Neamțu, Magnetic field sensors based on permalloy multilayers and nanogranular films, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 316, e265-e268 (2007), <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2007.02.115>

[49] M. Volmer, J. Neamtu, Micromagnetic analysis and development of high sensitivity spin-valve magnetic sensors, Journal of Physics: Conference Series, 268, 012032 (2011), 5th International Workshop on Multi-Rate Processes and Hysteresis (MURPHYS 2010) 31 May–3 June 2010, Pécs, Hungary, <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/268/1/012032>

[50] M. Volmer, J. Neamtu, Electrical and micromagnetic characterization of rotation sensors made from Permalloy multilayered thin films, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 322(9-12), 1631–1634 (2010), <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2009.06.085>

[51] M. Volmer, M. Avram, Micromagnetic Simulations on Detection of Magnetic Labelled Biomolecules Using MR Sensors, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 321, 1683-1685 (2009), <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2009.02.114>

[52] M. Volmer, M. Avram, Improving the Detection Sensitivity of Magnetic Micro Beads by Spin Valve Sensors, The American Institute of Physics Conference Proceedings, 1311, 261-266 (2010), ISBN 978-0-7354-0866-1, 8th International Conference on the Scientific and Clinical Applications of Magnetic Carriers, Rostock, Germany, 25-29 May 2010, <https://doi.org/10.1063/1.3530022>

[53] M. Volmer, M. Avram, Microbeads Detection Using Spin-Valve PHE Sensors, Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 12(9), 7456-7459 (2012), <https://doi.org/10.1166/jnn.2012.6524>

[54] Kevin Booth, Isaiah Gray, E. Dan Dahlberg, Determining the AC susceptibility of thin metal films using the anisotropic magnetoresistance, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 523, 167631 (2021), ISSN 0304-8853, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.167631>

[55] Jogschies, L.; Klaas, D.; Kruppe, R.; Rittinger, J.; Taptimthong, P.; Wienecke, A.; Rissing, L.; Wurz, M.C. Recent Developments of Magnetoresistive Sensors for Industrial Applications. Sensors 2015, 15, 28665-28689. <https://doi.org/10.3390/s151128665>

[56] L.K. Quynh, B.D. Tu, D.X. Dang, D.Q. Viet, L.T. Hien, D.T. Huong Giang, N.H. Duc, Detection of magnetic nanoparticles using simple AMR sensors in Wheatstone bridge, Journal of Science:

Advanced Materials and Devices, 1(1), 98-102 (2016), ISSN 2468-2179, <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2016.04.006>

[57] G. -W. Huang and J. -T. Jeng, "Implementation of 16-Channel AMR Sensor Array for Quantitative Mapping of Two-Dimension Current Distribution," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 54, no. 11, pp. 1-5, Nov. 2018, Art no. 6500605, <https://doi.org/10.1109/TMAG.2018.2844290>

[58] Pavel Mlejnek, Michal Vopálenský, Pavel Ripka, AMR current measurement device, Sensors and Actuators A: Physical, 141(2), 649-653 (2008), ISSN 0924-4247, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.10.016>

[59] P.V. Sreevidya, Jakeer Khan, Harish C. Barshilia, C.M. Ananda, P. Chowdhury, Development of two axes magnetometer for navigation applications, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 448, 298-302 (2018), <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.08.064>

[60] NXP Semiconductors Netherlands B.V. NXP Magnetoresistive Sensor KMZ60 Leaflet, <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/KMZ60.pdf> (accessed on 29 Jan 2025)

[61] Alberto Nicolicea, Eduardo Sergio Oliveros-Mata, Yevhen Zabala, Denys Makarov, Michael Melzer, Matthias Pelkner, Flexible anisotropic magnetoresistive sensors for novel magnetic flux leakage testing capabilities, NDT & E International, 146, 103160 (2024), ISSN 0963-8695, <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2024.103160>

[62] C. Muşuroi, M. Volmer*, M. Oproiu, J. Neamtu, E. Helerea, Designing a Spintronic Based Magnetoresistive Bridge Sensor for Current Measurement and Low Field Sensing. *Electronics*. 11(23), 3888 (2022), <https://doi.org/10.3390/electronics11233888>

[63] Lahav, D.; Schultz, M.; Amrusi, S.; Grosz, A.; Klein, L. Planar Hall Effect Magnetic Sensors with Extended Field Range. *Sensors*, 24, 4384 (2024), <https://doi.org/10.3390/s24134384>

[64] Marius Volmer, Sensors and microsensors – Theoretical and practical notes, Editura Universităţii Transilvania din Braşov, 2022, ISBN 978-606-19-1576-7

[65] J. Neamţu (ICPE-CA Bucureşti), M. Volmer, "Microsenzor magnetorezistiv de rotaţie", Brevet de invenţie nr. 125187/30-07-2013, publicat în Buletinul oficial de proprietate industrială - secţiunea invenţii nr. 7/2013

[66] Christian D. Damsgaard, Susana C. Freitas, Paulo P. Freitas, Mikkel F. Hansen; Exchange-biased planar Hall effect sensor optimized for biosensor applications. *J. Appl. Phys.* 1 April 103(7), 07A302 (2008). <https://doi.org/10.1063/1.2830008>

- [67] M. Volmer, A. Bezerghceanu, L. Prejbeanu, C. Muşuroi and M. Oproiu, EXCHANGE BIASED STRUCTURES USED FOR MAGNETIC NANOPARTICLES DETECTION, TIM 20-21 Physics Conference, November 11th - 13th 2021, Timisoara, Romania, Secțiunea Applied Physics and Interdisciplinarity (API), Invited (API-103), Friday 12th of November 2021
- [68] <https://www.bockyttech.com.tw/PDF-File/LLG.pdf>
- [69] D. Jordan, P. McCloskey, G. Wei, A GPU accelerated micromagnetic simulator for modelling complex magnetic systems, J. Magn. Mater., 537, 168204 (2021), ISSN 0304-8853, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168204>
- [70] C. Prados, D. Garcia, F. Lesmes, J. J. Freijo, A. Hernando, Extraordinary anisotropic magnetoresistance effect under 35 Oe field at room temperature in Co/Ni multilayers, Appl. Phys. Lett. 67(5), 718 (1995), <https://doi.org/10.1063/1.115285>
- [71] Marius Volmer, Marioara Avram and Andrei Marius Avram, Detection of Magnetic Nanoparticles for Lab-on-a Chip Applications, Romanian Journal of Information Science and Technology, 18(4), 343–355 (2015), <http://romjist.ro/content/pdf/04-volmer.pdf>
- [72] Marius Volmer, Marioara Avram, Mihai Oproiu, Cristian Leonard Muşuroi, Ioana Firastrau, Adrian Bezerghceanu, "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. Yurishş, Best student poster for M. Oproiu, https://www.sensorsportal.com/SEIA_2021/SEIA_2020_Proceedings_Contents.pdf
- [73] Yinglong Feng, Jinming Liu, Todd Klein, Kai Wu, Jian-Ping Wang; Localized detection of reversal nucleation generated by high moment magnetic nanoparticles using a large-area magnetic sensor. J. Appl. Phys., 122(12), 123901 (2017), <https://doi.org/10.1063/1.5001919>
- [74] C. Muşuroi, M. Oproiu, M. Volmer*, I. Firastrau, High sensitivity differential GMR based sensor for non-contacting DC/AC current measurement, Sensors, 20(1), 323 (2020); <https://doi.org/10.3390/s20010323>
- [75] C. Muşuroi, M. Oproiu, M. Volmer*, J. Neamtu, M. Avram, E. Helerea, Low Field Optimization of a Non-Contacting High-Sensitivity GMR-Based DC/AC Current Sensor. Sensors, 21(7), 2564 (2021), <https://doi.org/10.3390/s21072564>
- [76] M. Volmer, C. Muşuroi, M. Oproiu, A. Avram, M. Avram and E. Helerea, "On Detection of Magnetic Nanoparticles Using a Commercial GMR Sensor," 2021 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) & 2021 International

Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2021, Brasov, Romania 2-3 Sept. 2021, pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/OPTIM-ACEMP50812.2021.9590055>

[77] M.N. Baibich, J.M. Broto, A. Fert, F.N. Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich, J. Chazelas, Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices, Phys. Rev. Lett. **61**, 2472–2475 (1988). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.61.2472>

[78] G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach, W. Zinn, Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange, Phys. Rev. B. **39**, 4828–4830 (1989), <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.39.4828>

[79] <https://www.transparencymarketresearch.com/spintronic-devices-market.html>

[80] <https://www.fortunebusinessinsights.com/spintronics-market-110877>

[81] <https://www.nve.com/analogSensors> (accessed 14.04.2025)

[82] <https://www.sensitec.com/en/products-and-solutions/sensorchips/gmr-sensors/>

[83] S Cardoso, D C Leitaó, T M Dias, J Valadeiro, M D Silva, A Chicharo, V Silverio, J Gaspar and P P Freitas, Challenges and trends in magnetic sensor integration with microfluidics for biomedical applications, Journal of Physics D: Applied Physics, **50**, 213001 (2017), <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa66ec>

[84] François Montaigne, Alain Schuhl, Frédéric Nguyen Van Dau, Armando Encinas, Development of magnetoresistive sensors based on planar Hall effect for applications to microcompass, Sensors and Actuators A: Physical, **81**(1-3), 324-327 (2000), [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(99\)00102-8](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(99)00102-8)

[85] Cristian Muşuroi, Marius Volmer, Mihai Oproiu, "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, https://www.sensorsportal.com/SEIA_2021/SEIA_2020_Proceedings_Contents.pdf

[86] <https://www.aceinna.com/current-sensors> (accesat 14.04.2025)

[87] <https://www.sensitec.com/en/products-and-solutions/current-sensors/> (14.04.2025)

[88] <https://www.nve.com/currentSensors> (accesat 14.04.2025)

- [89] Ripka, P.; Mlejnek, P.; Hejda, P.; Chirtsov, A.; Vyhnánek, J. Rectangular Array Electric Current Transducer with Integrated Fluxgate Sensors, *Sensors*, **19**, 4964 (2019), <https://doi.org/10.3390/s19224964>
- [90] Mlejnek, P.; Vopalensky, M.; Ripka, P. AMR current measurement device. *Sensors Actuators A*, **141**, 649–653 (2008), <https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.10.016>
- [91] Li, Z.; Dixon, S. A, Closed-Loop Operation to Improve GMR Sensor Accuracy. *IEEE Sens. J.*, **16**, 6003–6007 (2016), <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2580742>
- [92] S. Salehi Vala, A. Basit Mirza and F. Luo, "An Integrated TMR-Based Current Sensing Solution for WBG Power Modules and Converters," in *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. **14**(12), 2220–2230 (2024), <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2024.3392483>
- [93] <https://www.nve.com/spec/calculators#tabs-Current-Sensing>
- [94] Platformă microfluidică pentru detecția celulelor tumorale circulante (CTC) concentrate prin dielectroforeză-magnetoforeză și analizate prin spectroscopie dielectrică și de impedanță electrochimică (uCellDetect), Contract nr: 3PCCDI/2018 (Contractor Universitatea Tehnică Gh. Asachi, Iași), <https://ieeia.tuiasi.ro/cercetare/proiecte-cd/>
- [95] O.D. Roshchupkina, et al., Structural modifications of thin magnetic Permalloy films induced by ion implantation and thermal annealing: A comparison, *Acta Materialia*, **74**, 278–284 (2014), <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.04.040>
- [96] Peter Savin, JorgeGuzmán, s.a., Exchange bias in sputtered FeNi/FeMn systems: Effect of short low-temperature heat treatments, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **402**, 49–54 (2016), <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.11.027>
- [97] Somayyeh Bakhtiaridoost, Cristian Musuroi, Marius Volmer, Monica Florescu, Optoelectronic microfluidic device for point-of-care blood plasma viscosity measurement, *Lab Chip*, **24**, 3305–3314 (2024), <https://doi.org/10.1039/D4LC00211C>