

Raport științific

privind prima etapă (2017) de implementare a proiectului intitulat:

Nano-canale pentru deplasarea virtual fără pierderi a pereților de domenii magnetice cu aplicații în spintronică

Near-Lossless Magnetic Domain Wall Nano-Conduits for Spintronic Applications

*Acronim: **No-Loss***

Cod proiect: PN-III-P4-ID-PCE-2016-0358

Contract nr. 149/2017

Cuprins

1. Obiectivele proiectului.....	3
2. Etapa 1 (12.07 – 29.12.2017)	3
2.1. Activitatea 1.1: Prepararea eşantioanelor sub formă de nanofire şi fire submicronice amorfe prin răcire rapidă din topitură.....	5
2.2. Activitatea 1.2: Realizarea instalaţiei experimentale pentru studiul pereţilor de domenii în nanofire şi fire submicronice cilindrice.....	8
2.3. Activitatea 1.3: Măsurarea vitezei pereţilor de domenii în eşantioane cilindrice din sistemele Fe-Si-B şi Co-Fe-Si-B.....	10
3. Efectul distribuţiei neliniare a anizotropiei magnetoelastice asupra inversării magnetizării în nanofire amorfe cilindrice.....	15
4. Concluzii. Diseminarea rezultatelor	17

1. Obiectivele proiectului

Obiectivul principal al acestui proiect îl constituie realizarea de nano-canale cilindrice pentru deplasarea cu pierderi cât mai reduse (virtual fără pierderi) a pereților de domenii magnetice în vederea dezvoltării unor aplicații pe bază de logică cu pereți de domenii. Acest obiectiv principal are în vedere dezvoltarea nano-canelor fie în interiorul unor fire amorfe cilindrice cu diametre submicronice, fie prin utilizarea unor fire amorfe cu dimensiuni nanometrice ca atare (aproximativ 100 nm). Pentru realizarea acestui obiectiv global, ne-am propus următoarele obiective specifice concrete:

- (i) Determinarea rolului geometriei eșantioanelor în propagarea pereților de domenii, în vederea stabilirii cu precizie a avantajelor geometriei cilindrice în raport cu cea planară, a nanofirelor preparate prin metode de litografiere.
- (ii) Determinarea rolului structurii de domenii magnetice a nanofirelor și/sau firelor submicronice amorfe cu simetrie cilindrică asupra proceselor de deplasare a pereților de domenii magnetice din interiorul acestora, cu efecte asupra mărimii vitezei și mobilității pereților de domenii.
- (iii) Determinarea influenței caracteristicilor structurale asupra mobilității pereților de domenii magnetice din nanofirele și firele submicronice cu simetrie cilindrică având structuri nanocristaline și amorfe. Studiul efectelor modificărilor și a relaxărilor structurale asupra mobilității și a vitezei pereților de domenii în astfel de fire cilindrice.
- (iv) Dezvoltarea unor nanofire și fire submicronice cilindrice cu proprietăți magnetice optime pentru crearea unor nano-canale prin care pereții de domenii magnetice să se poată deplasa cu pierderi minime, practic fără pierderi. Demonstrarea practică a unor viteze de deplasare record pentru pereții de domenii în astfel de nano-canale fără pierderi.

2. Etapa 1 (12.07 – 29.12.2017)

În prima etapă a proiectului, care s-a desfășurat în perioada 12 iulie – 29 decembrie 2017, am finalizat activitățile din prima etapă prevăzută în planul de realizare, etapă cu titlul *„Analiza rolului geometriei eșantioanelor în dinamica pereților de domenii magnetice. Investigarea deplasării pereților de domenii magnetice în nanofire și fire submicronice amorfe având simetrie cilindrică; comparație cu cazul propagării pereților de domenii în nanofire cu secțiune rectangulară”*. Cele trei activități realizate în cadrul acestei etape se constituie practic în activități desfășurate pentru atingerea primului obiectiv specific prezentat în secțiunea anterioară,

obiectiv referitor la investigarea rolului geometriei eşantioanelor sub formă de nanofire în propagarea pereţilor de domenii magnetice de-a lungul acestora. Activităţile, conform planului de realizare, au fost focalizate pe trei direcţii principale:

- prepararea nanofirelor şi firelor submicronice amorse cu simetrie cilindrică prin răcire rapidă din topitură;
- realizarea unei instalaţii experimentale pentru studiul propagării pereţilor de domenii în nanofirele şi firele submicronice amorse cu simetrie cilindrică; şi
- determinarea experimentală a vitezei pereţilor de domenii în nanofire şi fire submicronice cilindrice preparate din sisteme cu magnetostricţiune (λ) diferită, respectiv Fe-Si-B ($\lambda \gg 0$) şi Co-Fe-Si-B ($\lambda \approx 0$).

Vitezele astfel determinate ale pereţilor de domenii din nanofirele şi firele submicronice cu simetrie cilindrică au fost ulterior comparate cu multitudinea de date disponibile în literatură asupra vitezei pereţilor de domenii în nanofirele cu secţiune rectangulară – aşa-numitele nanofire planare, care au fost utilizate intens în ultima perioadă în studii de deplasări de pereţi de domenii pentru dezvoltarea de aplicaţii de logică pe bază de pereţi de domenii magnetice (“domain wall logic”).

Concret, activităţile prevăzute în planul de realizare au fost:

Activitatea 1.1: Prepararea de nanofire şi fire submicronice amorse acoperite cu sticlă având diametre între 100 şi 900 nm din aliaje cu magnetostricţiune mare (sistemul Fe-Si-B) şi respectiv redusă (sistemul Co-Fe-Si-B), prin metoda răcirii rapide din topitură în capilar din sticlă.

Activitatea 1.2: Realizarea unei instalaţii experimentale pentru investigarea propagării pereţilor de domenii magnetice în nanofire şi fire submicronice cu simetrie cilindrică, având diferite lungimi şi diametre.

Activitatea 1.3: Măsurarea experimentală a vitezei pereţilor de domenii magnetice în eşantioane cilindrice din sistemele Fe-Si-B şi Co-Fe-Si-B având diferite diametre prin metoda realizată în activitatea precedentă şi prin metoda MOKE (efect Kerr magneto-optic). Comparatie cu datele experimentale asupra dinamicii pereţilor de domenii magnetice din cazul nanofirelor cu secţiune rectangulară. Analiza influenţei geometriei eşantioanelor asupra mobilităţii pereţilor de domenii magnetice.

În cadrul activităţilor desfăşurate, am atins de asemenea problematica esenţială pentru procesele de interes în acest proiect, a includerii unei distribuţii neliniare de anizotropie magnetoelastică, specifică procesului de preparare prin metoda răcirii rapide din topitură, în analiza procesului de inversare a magnetizării în nanofirele cilindrice amorse, proces care se realizează practic prin deplasarea unui perete de domenii magnetice în lungul nanofirelor. Analiza acestui proces a condus la rezultate deosebit de interesante şi importante cu privire la structura pereţilor de domenii care se deplasează prin nanofirele amorse cu simetrie cilindrică, precum şi la potenţialul de realizare a nano-canalelor vizate în cadrul acestui proiect,

rezultate care au fost trimise spre publicare în prestigioasa revistă *Scientific Reports*.

2.1. Activitatea 1.1: Prepararea eşantioanelor sub formă de nanofire și fire submicronice amorse prin răcire rapidă din topitură

În cadrul acestei activități, ne-am propus să preparăm, prin metoda răcirii rapide din topitură în capilar de sticlă, eşantioane sub formă de nanofire cilindrice și fire submicronice cilindrice acoperite cu sticlă din două sisteme de aliaje – Fe-Si-B și Co-Fe-Si-B – având diametre ale firelor metalice propriu-zise cuprinse între 100 și 900 nm.

Metoda pe care am utilizat-o constă în tragerea rapidă a unui capilar de sticlă înmuiată în care se găsește aliajul metalic topit prin inducție. Bucățile din aliajul primar sunt introduse anterior în acest tub, închis la capătul inferior, fiind apoi topite într-un câmp de înaltă frecvență până când se înmoaie și sticla. În jurul aliajului topit se formează un înveliș de sticlă înmuiată, care permite tragerea capilarului, după cum este arătat în figura 1. În interiorul tubului de sticlă este asigurat fie vid de nivel redus – aproximativ 50–200 Pa – fie o atmosferă de gaz inert (argon) – care asigură susținerea picăturii la distanța dorită, impusă de asigurarea continuității procesului. Firul astfel format este răcit cu ajutorul unui jet de lichid de răcire (de obicei apă) ce curge perpendicular pe axa firului, așa cum este ilustrat în figura 2. În funcție de diametrul dorit pentru firul rezultat, răcirea poate fi efectuată și în mediul ambiant (aer).

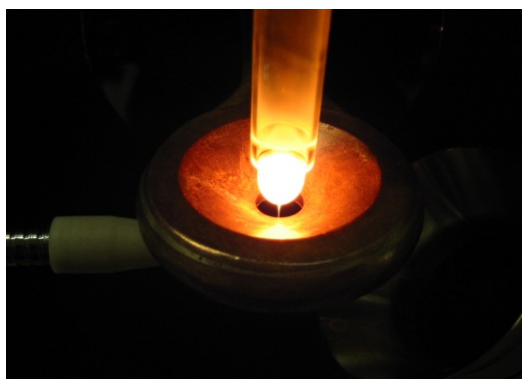


Fig. 1. Picătură de aliaj metalic topit în interiorul tubului de sticlă.

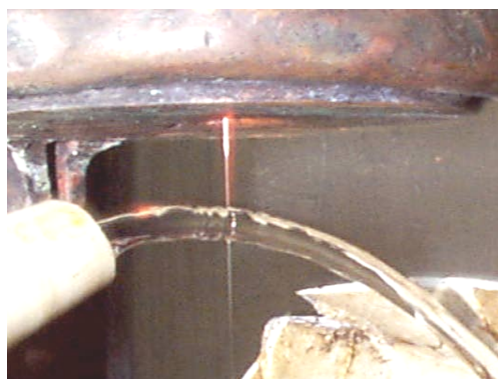


Fig. 2. Fir acoperit cu sticlă în contact cu lichidul de răcire (apă).

Pentru un aliaj metalic și o sticlă cu compozițiile date, dimensiunile și proprietățile firelor metalice amorse acoperite cu sticlă obținute sunt determinate de:

- temperatura de topire a aliajului;
- vâscozitatea aliajului în intervalul de temperatură de lucru;

- tensiunea superficială a aliajului în domeniul de temperatură de lucru;
- reacțiile chimice dintre aliaj, sticlă și atmosfera din tubul de sticlă.

Caracteristicile firelor sunt influențate de asemenea de proprietățile de bază ale sticlei:

- temperatura de înmuiere a sticlei;
- dependența de temperatură a vâscozității sticlei;
- sticla nu trebuie să cristalizeze în timpul procesului, adică, temperatura de cristalizare a sticlei trebuie să fie mult mai mare decât temperatura de lucru.

În ceea ce privește corelația dintre proprietățile aliajului metalic și cele ale sticlei, există de asemenea un număr de factori care trebuie luați în considerare:

- temperatura de lucru a sticlei (temperatura de tragere a capilarului) trebuie să fie cuprinsă în intervalul dintre temperatura de topire a aliajului utilizat și temperatura de fierbere a acestuia;
- coeficientul de dilatare termică al sticlei trebuie să fie aproximativ egal, sau cel mult ușor mai mic decât cel al aliajului metalic, altfel apare riscul producerii unor tensiuni termice mari, care pot duce la întreruperea continuității procesului;
- vâscozitatea sticlei trebuie să atingă o valoare suficient de mare (la care să nu se producă deformări prin tragere) înainte de solidificarea metalului, altfel, dacă metalul e solid și sticla se deformează, se poate iniția ruperea firului metalic;
- reacțiile chimice dintre metal și sticlă, precum și cele dintre metal și atmosfera din tubul de sticlă, trebuie să fie neglijabile.

Aceste restricții limitează alegerea compoziției sticlei la cele borosilicaticice de tip Pyrex, cu dilatare termică redusă, pentru aliajele convenționale de tip metal de tranziție-metaloid, care se utilizează în mod uzual pentru obținerea aliajelor magnetice amorse.

Pe lângă factorii menționați mai sus - legați direct de caracteristicile intrinseci ale metalului și sticlei, există și anumiți factori de proces care influențează caracteristicile firelor obținute:

- caracteristicile dimensionale (diametru, grosimea peretelui) și viteza de avans a tubului de sticlă în care sunt topite bucățile de aliaj primar – acești factori influențează grosimea învelișului de sticlă a nanofirului sau firului submicronic final;
- caracteristicile dimensionale și forma inductorului utilizat pentru topire (diametrul interior și cel exterior, unghiul de deschidere) – geometria inductorului determină distribuția temperaturii în picătura de metal topit inițială și totodată determină echilibrul acesteia prin acțiunea forțelor de natură electromagnetică;
- frecvența de lucru – aceasta trebuie să asigure topirea aliajului metalic;

- temperatura și capacitatea calorică a lichidului de răcire (apă) – acești factori au un rol hotărâtor asupra vitezei de răcire;
- existența vidului sau a unei atmosfere de gaz inert în tubul de sticlă, în vederea protejării aliajului topit în timpul procesului de formare a firului și pentru a preveni oxidarea excesivă a acestuia;
- viteza de tragere (recepție), care influențează puternic diametrul final al firului.

Instalația de obținere a firelor submicronice și nanofirelor acoperite cu sticlă prin răcire rapidă din topitură a fost realizată la INCDFT-IFT Iași prin îmbunătățirea semnificativă a unei instalații de preparare a microfirelor acoperite cu sticlă (având diametre în domeniul micrometrilor), care principial funcționează similar, însă prin utilizarea căreia nu s-ar fi putut prepara fire atât de subțiri (submicronice și nanofire). Astfel, îmbunătățirile principale pe care le-am realizat se referă la creșterea puternică a vitezei de tragere, reducându-se simultan vibrațiile mult mai puternice asociate acestei creșteri, pentru a menține continuitatea procesului de formare a firelor ultrasubțiri. Tensiunea superficială a aliajului topit reprezintă un parametru deosebit de important, a cărui valoare trebuie optimizată pentru a asigura curgerea continuă a aliajului topit prin capilarul de sticlă înmuiată. Pentru a obține acest lucru, aliajul metalic topit a fost supraîncălzit la temperaturi mult mai ridicate decât cele utilizate în cazul preparării microfirelor. Alte modificări ale tehnicii, astfel încât să putem prepara fire cu diametre de ordinul sutelor de nanometri, se referă la răcirea ansamblului metal (fir propriu-zis)-sticlă, care a trebuit adaptat la noile dimensiuni reduse. Instalația astfel modernizată, pe care am utilizat-o pentru prepararea eșantioanelor necesare (nanofire și fire submicronice) este ilustrată în figura 3.



Fig. 3. Instalația de preparare a firelor submicronice și nanofirelor amorse cilindrice acoperite cu sticlă de la INCDFT-IFT Iași.

Nanofirele și firele submicronice pe care le-am preparat din cele două sisteme de aliaje menționate au avut compozițiile exacte $\text{Fe}_{77,5}\text{Si}_{7,5}\text{B}_{15}$ ($\lambda = +25 \times 10^{-6}$) și $(\text{Co}_{0,94}\text{Fe}_{0,06})_{72,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ ($\lambda = -1 \times 10^{-7}$). Eșantioanele astfel pregătite le-am caracterizat din punct de vedere dimensional prin microscopie electronică de baleiaj, și din punct de vedere structural prin microscopie electronică de transmisie de ultraînaltă rezoluție (UHR-TEM), în cadrul laboratorului de microscopie electronică de la INCDFI-IFT Iași. Astfel, toate eșantioanele au diametrele cuprinse între 100 nm și 900 nm, conform specificațiilor inițiale și sunt amorse. În figura 4 este prezentată imaginea obținută la microscopul electronic de baleiaj (SEM) în cazul unui fir submicronic cu compoziția $\text{Fe}_{77,5}\text{Si}_{7,5}\text{B}_{15}$ acoperit cu sticlă, având diametrul firului metalic (v. partea centrală a imaginii) de 550 nm. În figura 5 este ilustrată imaginea UHR-TEM prelevată în cazul unui fir submicronic amorf cu diametrul de 300 nm.

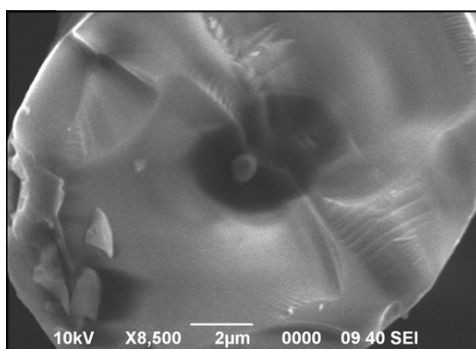


Fig. 4. Fir submicronic amorf cu diametrul de 550 nm acoperit cu sticlă, preparat la INCDFI-IFT Iași.

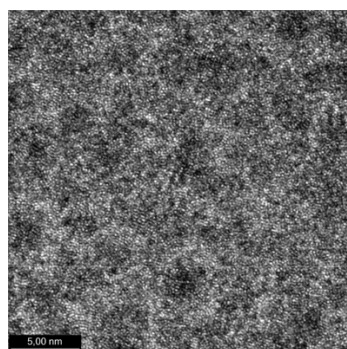


Fig. 5. Imagine UHR-TEM care arată existența stării amorse în cazul unui fir submicronic cu diametrul de 300 nm.

Astfel, activitatea 1.1 a fost realizată în proporție de 100%, eșantioanele sub formă de nanofire și fire submicronice amorse cu simetrie cilindrică, având compoziții din sistemele Fe-Si-B și Co-Fe-Si-B și diametre între 100 și 900 nm fiind preparate cu succes și fiind disponibile pentru activitățile și etapele ulterioare ale proiectului.

2.2. Activitatea 1.2: Realizarea instalației experimentale pentru studiul pereților de domenii în nanofire și fire submicronice cilindrice

Scopul acestei activități a fost realizarea unei instalații experimentale pentru investigarea experimentală a deplasării pereților de domenii magnetice adaptată dimensiunilor firelor cilindrice ultrasubțiri (100 – 900 nm) – materialele de interes din acest proiect. Noua instalație va trebui să prezinte în primul rând o sensibilitate mare, dată fiind cantitatea redusă de material ce urmează a fi măsurată. Metodele existente sunt ineficiente, întrucât la dimensiuni atât de reduse este de așteptat

atât o creștere a vitezelor de deplasare a pereților de domenii, cât și o creștere semnificativă a valorii câmpului magnetic de propagare a acestor pereți, ceea ce ar putea conduce la nucleerea unor domenii noi și implicit la formarea unor pereți noi pe direcția de propagare (axa firului), iar acest lucru ar determina apariția unor erori extrem de mari în măsurarea vitezelor și mobilităților pereților de domenii.

Instalația realizată este bazată în esență tot pe metoda Sixtus-Tonks, însă îmbunătățirea principală a constat în utilizarea unui număr mai mare de bobine de detecție în sistemul de măsură (patru) și totodată a încă unui sistem identic conectat în serie-opoziție cu cel de măsură, pentru compensare. Instalația pe care am realizat-o este reprezentată schematic în figura 6.

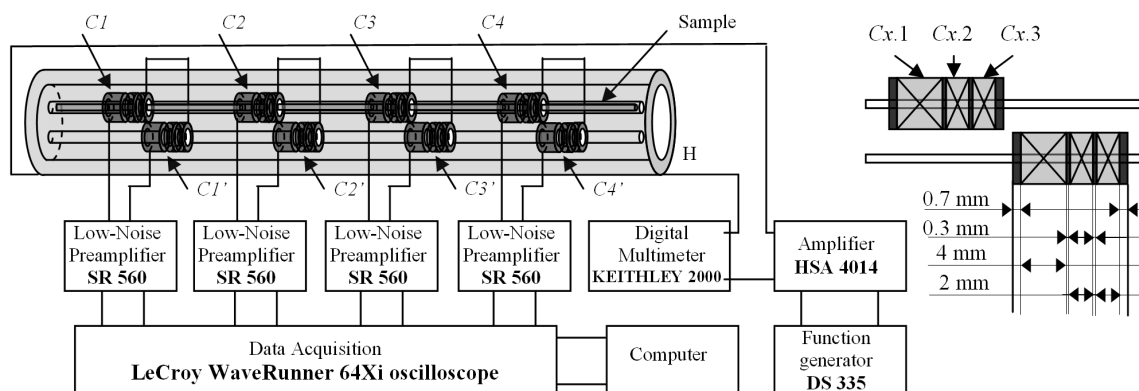


Fig. 6. Schema instalației experimentale pentru studiul pereților de domenii magnetice în nanofire și fire submicronice amorse cu simetrie cilindrică. Detaliu: structura și dimensiunile fiecărei bobine de detecție.

Fiecare bobină de detecție (C1, C2, C3, C4) este alcătuită din trei înfășurări succesive Cx.1, Cx.2 și Cx.3, prima având 4 mm lungime și 1800 spire, iar următoarele două câte 2 mm lungime și câte 800 spire, după cum este arătat în detaliul din dreapta al figurii 6. Înfășurările bobinelor de detecție le-am realizat din sârmă de cupru emailat cu diametrul de 0,07 mm pe tuburi ceramice cu diametrul exterior de 1,8 mm și cel interior de 1 mm. Cele trei înfășurări succesive sunt conectate în serie, însă cel mai important este faptul că Cx.2 este bobinată în sens invers înfășurărilor Cx.1 și Cx.3. Acest lucru l-am realizat pentru a putea separa în mod clar semnalele induse în Cx.1 și Cx.3.

Celelalte componente utilizate la realizarea instalației sunt identificate în figura 6: solenoidul mare care înglobează sistemele de detecție și de compensare (C1, ..., C4 și respectiv C1', ..., C4'), care are o lungime de 37 cm, diametrul de 2 cm și 2335 spire, fiind alimentat de un generator de funcții Stanford Research Systems DSS 335 printr-un amplificator bipolar de putere HSA 4014, patru amplificatoare Stanford Research Systems SR560 – câte unul pentru fiecare canal al osciloscopului LeCroy WaveRunner 64Xi, pentru amplificarea semnalelor mici în cazul firelor ultrasubțiri măsurate și pentru îmbunătățirea raportului semnal-zgomot. Multimetrul Keithley 2000 l-am utilizat pentru măsurarea curentului prin

înfăşurarea solenoidului. Semnalele achiziţionate le-am procesat cu un software realizat în LabVIEW.

Instalaţia realizată am testat-o pe nanofire şi fire submicronice cu diametre din întregul interval de interes (100 – 900 nm), preparate din aliaje aparţinând ambelor sisteme avute în vedere (Fe-Si-B şi Co-Fe-Si-B). Rezultatele au fost reproductibile şi au avut o precizie suficient de mare pentru a putea utiliza instalaţia la realizarea investigaţiilor experimentale pe care ni le-am propus în cadrul acestui proiect. Rezultatele măsurătorilor propriu-zise pe care le-am efectuat cu această instalaţie sunt prezentate în secţiunea următoare, cea referitoare la activitatea 1.3.

Aşadar, activitatea 1.2 a fost realizată în proporţie de 100%, instalaţia experimentală pentru investigarea propagării pereţilor de domenii magnetice în nanofire şi fire submicronice cu simetrie cilindrică fiind în măsură să fie utilizată pentru măsurarea cu precizie a vitezei pereţilor de domenii magnetice în aceste materiale ultrasubţiri.

2.3. Activitatea 1.3: Măsurarea vitezei pereţilor de domenii în eşantioane cilindrice din sistemele Fe-Si-B şi Co-Fe-Si-B

În cadrul acestei activităţi, ne-am propus să măsurăm experimental vitezele de deplasare ale pereţilor de domenii magnetice, v , prin:

1. utilizarea instalaţiei experimentale realizate în activitatea 1.2; şi
2. prin metoda efectului Kerr magneto-optic (MOKE).

Scopul acestor investigaţii experimentale este comparaţia cu datele numeroase existente în literatura de specialitate asupra vitezei de deplasare a pereţilor de domenii în nanofire planare (având secţiune rectangulară), pentru a stabili influenţa geometriei eşantioanelor sub formă de nanofire şi fire submicronice asupra mobilităţii pereţilor de domenii magnetice.

În figura 7 am reprezentat rezultate ale măsurătorilor efectuate cu instalaţia experimentală realizată în activitatea precedentă pe eşantioane sub formă de fire submicronice preparate cu instalaţia descrisă la activitatea 1.1, obţinute din sistemul Fe-Si-B ($\lambda \gg 0$), cu diametre cuprinse între 350 şi 940 nm. În figura 8 am reprezentat ciclurile de histerezis axiale pentru aceleaşi eşantioane, măsurate printr-o metodă inductivă.

De ce am făcut această paralelă între viteze de deplasare a pereţilor de domenii şi ciclurile de histerezis? Pentru că, deplasarea pereţilor de domenii în lungul axei firelor reprezintă practic mecanismul prin care se realizează inversarea magnetizării acestora sub acţiunea unui câmp magnetic aplicat, mecanism descris de ciclul de histerezis. Aşadar, deplasarea unui perete de domenii şi inversarea magnetizării reprezintă în esenţă acelaşi fenomen. Acest lucru este deosebit de important, deoarece ne oferă instrumente adiţionale de studiu şi înţelegere a

proceselor investigate, din perspectiva viitoarelor aplicații avute în vedere (logică magnetică pe bază de pereți de domenii).

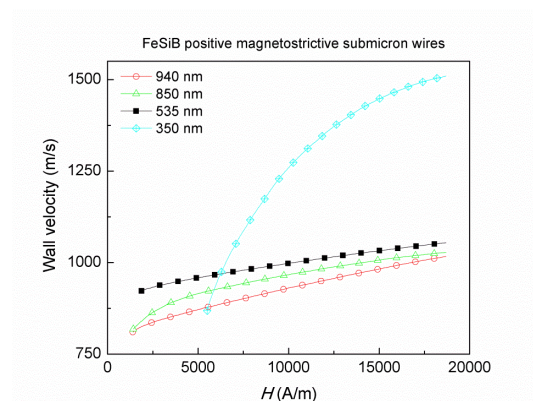


Fig. 7. Dependența vitezei pereților de domenii de câmpul magnetic aplicat, $v(H)$, determinată experimental cu instalația realizată la activitatea 1.2, în cazul firelor submicronice amorse cu compoziția $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$ având simetrie cilindrică.

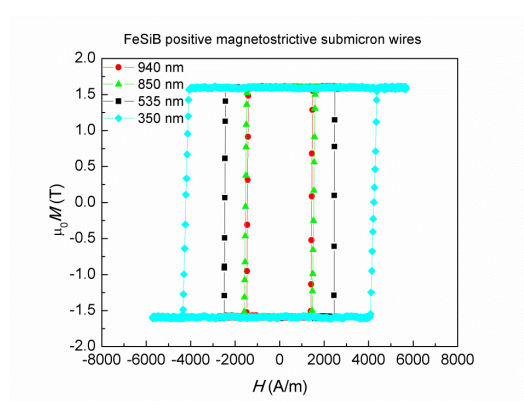


Fig. 8. Ciclurile de histerezis axiale măsurate inductiv pentru aceleași eșantioane sub formă de fire submicronice amorse din sistemul Fe-Si-B.

După cum am arătat mai sus, există o corelație între deplasarea pereților de domenii magnetice în lungul firelor și ciclul de histerezis axial. Acest lucru este dovedit în primul rând de forma rectangulară a ciclurilor de histerezis, fapt care arată fără echivoc că mecanismul de inversare a magnetizării în lungul axei firului îl reprezintă deplasarea unui singur perete de domenii. În cazul măsurătorilor ale căror rezultate sunt ilustrate în figurile 7 și 8, observăm și o corelație între vitezele de deplasare a pereților și valorile câmpului de comutare, H^* (câmpul la care magnetizarea face un salt de la saturația pozitivă $+M_s$ la cea negativă $-M_s$ sau invers). Însă cazul cel mai interesant este cel al firului submicronic cu diametrul cel mai mic (350 nm), la care vitezele pereților de domenii ating cele mai mari valori ($v > 1500$ m/s), dar la care și mobilitatea pereților (panta dependenței vitezei de câmpul aplicat, $\partial v / \partial H$) este mult mai mare decât în celelalte cazuri. Această diferență am atribuit-o anizotropiei de formă, mult mai puternică în cazul celui mai subțire fir decât în cazul celorlalte, la care anizotropia magnetoelastică încă joacă un rol determinant. Evident că această explicație este doar calitativă deocamdată, elucidarea acestui aspect necesitând un studiu mai aprofundat, pe care l-am realizat tot în cadrul acestei etape. Aceasta este practic și justificarea pentru care, așa cum am arătat la descrierea generală a etapei (secțiunea 2 – ultimul paragraf) în cadrul activităților desfășurate, a fost necesar să considerăm și problema includerii unei distribuții neliniare de anizotropie magnetoelastică, specifică procesului de preparare prin metoda răcirii rapide din topitură, în analiza procesului de inversare a magnetizării în firele submicronice și nanofirele amorse cu simetrie cilindrică.

În figura 9 am reprezentat rezultatele măsurătorilor efectuate cu instalația realizată la activitatea 1.2 pe fire amorse submicronice cu simetrie cilindrică preparate din sistemul Co-Fe-Si-B ($\lambda \approx 0$), iar în figura 10 am ilustrat ciclurile de histerezis axiale corespunzătoare.

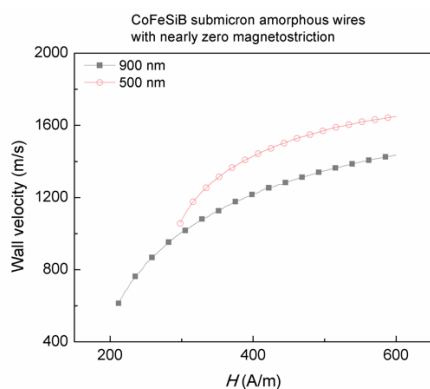


Fig. 9. Dependența vitezei pereților de domenii de câmpul aplicat, $v(H)$, determinată experimental în cazul firelor submicronice amorse cilindrice cu compoziția $(\text{Co}_{0,94}\text{Fe}_{0,06})_{72,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$.

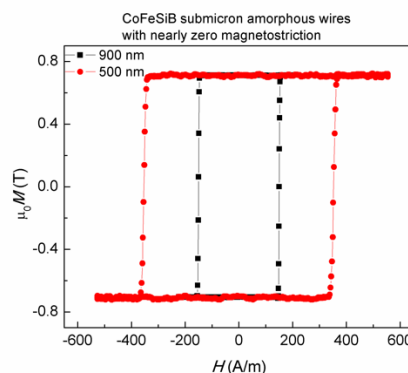


Fig. 10. Ciclurile de histerezis axiale măsurate inductiv pentru aceleași eșantioane sub formă de fire submicronice amorse din sistemul Co-Fe-Si-B.

Și în acest caz observăm corelația dintre v și H^* , la fel ca în cazul firelor amorse submicronice din sistemul Fe-Si-B, ceea ce arată faptul că aceleași considerații cu privire la echivalența celor două procese (deplasarea pereților și inversarea magnetizării) rămân valabile și pentru firele submicronice din sistemul Co-Fe-Si-B. Valorile vitezelor sunt mai mari, ceea ce deja indică un rol jucat de o anizotropie magnetoelastică redusă, și, mai important, aceste viteze mari se obțin la valori ale câmpului magnetic aplicat semnificativ mai mici decât în cazul firelor submicronice din sistemul Fe-Si-B.

Să vedem ce se întâmplă atunci când diminuăm și mai tare diametrul firelor, intrând în domeniul nano.

În figura 11 sunt prezentate rezultatele măsurătorilor efectuate pe nanofire amorse din sistemul Fe-Si-B (stânga) și respectiv Co-Fe-Si-B (dreapta) cu instalația realizată la activitatea precedentă. Observăm faptul că vitezele se mențin suficient de mari chiar și pentru aceste diametre foarte mici (peste 1350 m/s în cazul nanofirelor de Fe-Si-B și peste 1500 m/s în cazul celor de Co-Fe-Si-B).

Ciclurile de histerezis inductive ale celor două tipuri de nanofire sunt ilustrate în figura 12. Se observă faptul că acestea și-au menținut aspectul rectangular, asociat inversării magnetizării axiale prin deplasarea unui singur perete în lungul nanofirului. În cazul nanofirelor, ne așteptăm ca structura de domenii magnetice să fie de tip monodomeniu, în sensul că peretele de domeniu ocupă întreaga secțiune transversală a acestora, situație care ar putea fi diferită de cazul firelor submicronice cu diametre mai mari (900 nm și chiar mai jos), acestea putând

acomoda o structură de domenii magnetice mai complexă, de exemplu de tip core-shell ca la microfire. De ce este important acest lucru? Pentru că nanocanalele de interes în acest proiect – cele în care practic se deplasează pereții de domenii magnetice ar putea ocupa fie întregul eșantion (în cazul nanofirelor), fie doar o parte din acesta (în cazul firelor submicronice), iar caracteristicile deplasării ar putea fi semnificativ influențate de mai mulți parametri asociați fie defectelor de suprafață, fie structurilor magnetice din zona de suprafață a firelor submicronice. Aceste aspecte vor fi studiate în profunzime în etapele viitoare ale proiectului, însă la acest moment ne-am propus să verificăm experimental ipoteza structurilor de tip monodomeniu în nanofire.

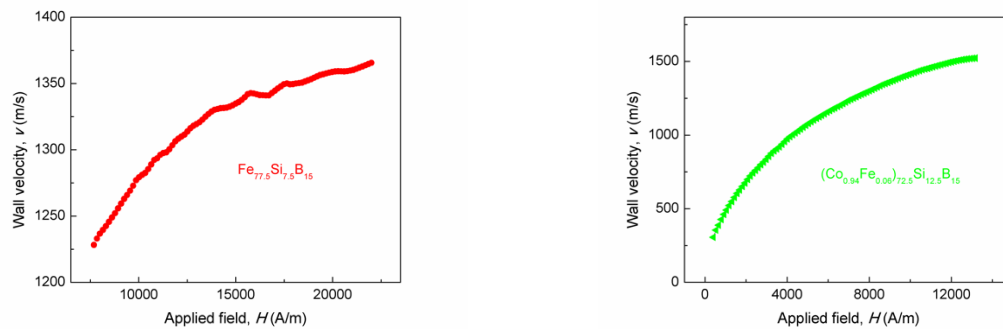


Fig. 11. Dependența vitezei pereților de domenii de câmpul magnetic aplicat, $v(H)$, determinată experimental cu instalația realizată la activitatea 1.2, în cazul nanofirelor cilindrice amorse cu compoziția $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$ (stânga) și respectiv a celor cu compoziția $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ (dreapta). Diametrul nanofirelor măsurate din sistemul Fe-Si-B a fost de 134 nm, iar cel al nanofirelor din sistemul Co-Fe-Si-B de 180 nm.

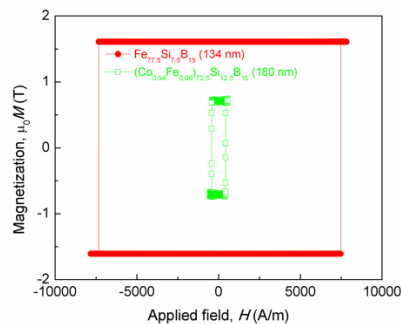


Fig. 12. Ciclurile de histerzis axiale măsurate inductiv pentru eșantioanele sub formă de nanofire cilindrice amorse din sistemele Fe-Si-B și Co-Fe-Si-B.

Pentru aceasta, am recurs la metoda efectului Kerr magneto-optic (MOKE), prin care am determinat ciclurile de histerzis din regiunea de suprafață a nanofirelor, pentru a le compara cu cele de volum, obținute prin măsurători inductive (figura 12). Am utilizat instalația NanoMOKE-2 de la INCDFT-IFT Iași (figura 13) și am ținut cont de faptul că rotația planului de polarizare este proporțională cu componenta magnetizării paralelă la planul de incidență, după cum este ilustrat schematic în figura 14, în care direcția câmpului aplicat este paralelă cu axa nanofirului.



Fig. 13. Instalația NanoMOKE-2 de la INCDFT-IFT Iași.

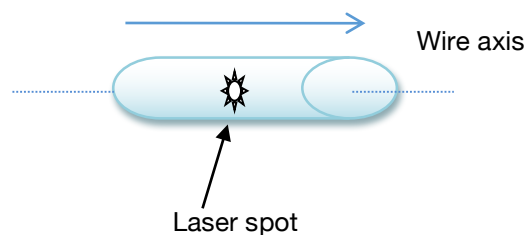


Fig. 14. Reprezentare schematică a experimentului pentru determinarea ciclurilor de histerezis de suprafață.

Sursa laser este de tip He-Ne, cu lungimea de undă de 635 nm, diametrul spotului fiind de 2 μm . Planul de incidență este paralel cu axa nanofirului.

Ciclurile de histerezis de suprafață, măsurate prin metoda MOKE, pentru cele două nanofire sunt prezentate în figura 15.

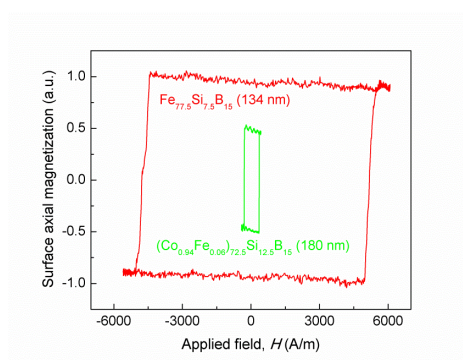


Fig. 15. Cicluri de histerezis de suprafață pentru nanofirele cilindrice amorfe din sistemele Fe-Si-B și Co-Fe-Si-B.

Comparând rezultatele obținute prin MOKE cu cele măsurate inductiv (figura 12), remarcăm faptul că nanofirele prezintă ciclurile rectangulare și în regiunea de suprafață, ceea ce practic echivalează cu o confirmare a unei structuri de domenii magnetice de tip monodomeniu în ambele cazuri (Fe-Si-B și Co-Fe-Si-B).

Situația din nanofirele planare

Să vedem în continuare cum sunt valorile vitezelor de deplasare ale pereților de domenii din nanofirele și firele submicronice cilindrice în raport cu cele din nanofirele planare (cu secțiune rectangulară). În nanofirele planare din Permalloy (Fe-Ni) având o secțiune cu lățimea de 200 nm și grosimea de 5 nm, au fost raportate în general valori de sub 1000 m/s la valori ale câmpului aplicat de până

la 3600 A/m (conform datelor publicate de grupul condus de Prof. R.P. Cowburn din Marea Britanie, unul din inițiatorii logicii pe bază de pereți de domenii magnetice în nanofire). Valoarea maximă raportată în astfel de nanofire a fost de 1500 m/s la un câmp aplicat de 4000 A/m, și reprezintă un caz relativ izolat, valorile uzuale fiind cele de câteva sute de m/s. Peste această valoare a câmpului nu există informații, din cauză că nanofirele planare prezintă un efect nedorit, și anume, după o creștere liniară a vitezei pereților cu câmpul aplicat până la un anumit prag, depășirea acestui prag (*Walker breakdown*) conduce la o scădere bruscă a vitezei pereților de domenii. Astfel, valorile măsurate în cazul nanofirelor și firelor submicronice cilindrice sunt peste valorile uzuale din nanofirele planare, iar valoarea maximă pe care am măsurat-o în studiul de față ajunge și la 1600 m/s (v. figura 9). Mai mult, creșterea câmpului aplicat la valori mult superioare celor aplicate în cazul nanofirelor planare nu conduce la atingerea limitei Walker, ceea ce este deosebit de important, geometria cilindrică fiind cel mai probabil favorabilă unui câmp Walker mult mai mare. În plus, nanofirele și firele submicronice cilindrice permit o plajă mult mai largă de parametri, atingând valori mari ale vitezei pereților de domenii atât la câmpuri mici (400 – 600 A/m) cât și la valori mult mai mari, de peste 20 kA/m, ceea ce este extrem de important din punct de vedere al potențialelor aplicații. Nu în ultimul rând, trebuie menționate și multiplele posibilități de a controla structura și proprietățile nanofirelor și firelor submicronice cilindrice, prin care vitezele preliminare din raportul de față pot fi cel mai probabil crescute în continuare. Acestea includ diferite tratamente termice pentru relaxări și/sau modificări structurale, cu influențe asupra anizotropiilor și structurilor magnetice pe care le vom aplica în etapele următoare ale proiectului.

Prin urmare, putem afirma că simetria superioară a nanofirelor și firelor submicronice cilindrice prezintă avantaje clare comparativ cu geometria rectangulară a nanofirelor planare, care au fost până acum principalii candidați la aplicații în elemente de logică pe bază de pereți de domenii magnetice.

Astfel, am finalizat activitatea 1.3 în proporție de 100%, având date experimentale promițătoare asupra vitezei pereților de domenii în nanofirele amorfe și firele submicronice amorfe cu simetrie cilindrică, comparația cu nanofirele planare scoțând clar în evidență avantajele acestor materiale noi preparate prin răcire rapidă din topitură.

3. Efectul distribuției neliniare a anizotropiei magnetoelastice asupra inversării magnetizării în nanofire amorfe cilindrice

După cum am menționat și în ultimul paragraf al secțiunii 2 (v. pagina 4), problema anizotropiei magnetoelastice distribuită neliniar pe direcția radială a nanofirelor amorfe cilindrice constituie un aspect specific acestor nanomateriale preparate prin răcire rapidă din topitură.

Justificarea pentru abordarea acesteia este, după cum am arătat la pagina 11, faptul că, în cazul nanofirelor și a firelor amorfe submicronice cu simetrie cilindrică din sistemul Fe-Si-B, există doi termeni importanți care determină anizotropia magnetică globală a eșantioanelor: termenul magnetoelastic și cel magnetostatic, care determină anizotropia magnetică de formă. Contribuția acestor termeni trebuie studiată în detaliu și înțeleasă corespunzător pentru a putea ulterior înțelege valorile diferite ale mobilităților pereților de domenii.

Am studiat această problemă prin implementarea unei distribuții radiale asimetrice într-un model micromagnetic bazat pe metoda elementului finit în cazul nanofirelor amorfe cilindrice din sistemul Fe-Si-B. Anizotropia magnetoelastică radială asimetrică implementată este de tipul celei ilustrate în figura 16, acesta fiind singurul tip de distribuție neliniară care conduce la modificări ale câmpului de comutare la implementarea modelului micromagnetic pentru calculul ciclului de histerezis axial, așa cum este arătat în figura 17 pentru un nanofir de Fe-Si-B cu diametrul de 100 nm. Pe de altă parte, această distribuție de anizotropie magnetoelastică este în acord și cu distribuția neliniară a tensiunilor mecanice interne induse în astfel de nanofire în timpul procesului de preparare.

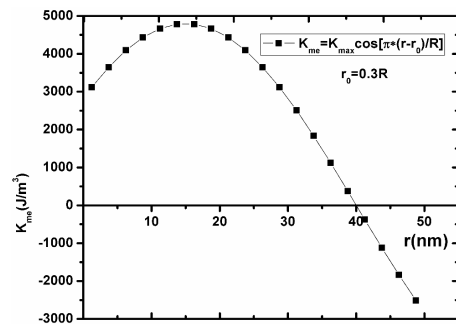


Fig. 16. Distribuția de anizotropie magnetoelastică neliniară implementată în modelul pentru determinarea ciclului de histerezis în cazul nanofirelor amorfe cilindrice din sistemul Fe-Si-B.

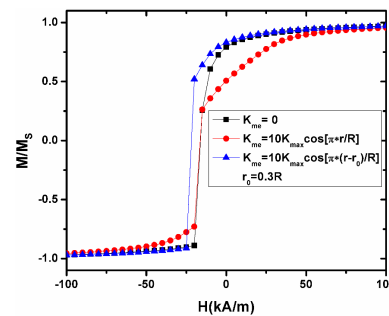


Fig. 17. Ramuri descendente ale ciclurilor de histerezis axiale pentru nanofire amorfe cu simetrie cilindrică din sistemul Fe-Si-B, calculate cu un model micromagnetic în care s-a considerat o distribuție de anizotropie magnetoelastică ca în fig. 16.

Modelul pe care l-am dezvoltat a permis și vizualizarea configurațiilor magnetizării. În cazul unui nanofir cu $\lambda \approx 0$, configurația este ca cea ilustrată în figura 18. Pentru a compara această configurație cu cea din cazul unui nanofir cu magnetostricțiune ridicată ($\lambda \gg 0$), am vizualizat în paralel proiecțiile nanofirului cu magnetostricțiune nulă și cea din cazul unui nanofir cu o distribuție de anizotropie ca cea din figura 16. Rezultatele sunt prezentate în figura 19. Se observă în mod evident diferențele dintre cele două cazuri, ceea ce ne arată faptul că, în cazul nanofirelor în care predomină anizotropia de formă (cazul Co-Fe-Si-B), putem vorbi despre o structură de tip monodomeniu, în timp ce atunci când predomină anizotropia de tip magnetoelastic distribuită neliniar, nanofirul începe să formeze o structură

apropiată de cea de tip core-shell. Pentru firele de Fe-Si-B, cele două cazuri pot alterna, în funcție de dimensiunile eșantioanelor.

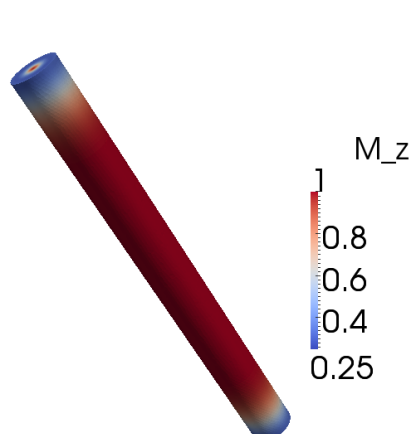


Fig. 18. Configurația magnetizării la remanență în cazul unui nanofir cilindric amorf cu $\lambda \approx 0$.



Fig. 19. Secțiuni longitudinale prin două nanofire cilindrice amorse: unul cu $\lambda \approx 0$ (stânga) și celălalt cu $\lambda \gg 0$ (dreapta).

Cel mai important rezultat îl reprezintă însă evidențierea în ambele cazuri a unor structuri de spin de tip vortex, structuri care se formează în mod spontan la capetele firelor, ocupând o zonă mai adâncă în cazul nanofirului cu $\lambda \gg 0$. Aceste structuri de tip vortex apar pentru a minimiza energia magnetostatică, iar atunci când câmpul magnetic aplicat crește până la valoarea câmpului de comutare H^* , aceste vortexuri se desprind și se propagă, ele reprezentând în fapt pereții de domenii magnetice care se deplasează. Așadar, am demonstrat faptul că, în cazul firelor cilindrice cu diametre foarte mici (în domeniul nano), pereții de domenii prezintă structuri interne specifice de tip vortex. Mergând mai departe, aceste structuri pot fi de tip „skyrmion” sau de tip „Bloch-point”, ambele tipuri fiind evidențiate și studiate foarte recent, dar nu în acest tip de nanofire. De fapt, aceste structuri, și cu predilecție cele de tip „skyrmion” sunt de interes major în momentul de față pentru dezvoltarea de aplicații în domeniul tehnicii de calcul, cu predilecție în stocarea informației, dar și în elemente de logică magnetică. Prin urmare, este un rezultat deosebit de important faptul că în nanofirele amorse cilindrice, pereții de domenii care se propagă pot avea astfel de structuri, deoarece nanofirele pot reprezenta nano-canale pentru deplasarea controlată a acestora, la viteze ridicate, de ordinul celor măsurate în activitatea 1.3.

4. Concluzii. Diseminarea rezultatelor

Lucrările prevăzute la cele trei activități din această etapă au fost realizate în totalitate. Astfel, în cadrul primei activități am obținut eșantioanele planificate sub

formă de nanofire și fire submicronice amorfe cu simetrie cilindrică având compoziții din sistemele Fe-Si-B și Co-Fe-Si-B și diametre între 100 și 900 nm. În cea de-a doua activitate, am realizat instalația experimentală complexă pentru măsurarea vitezei de deplasare a pereților de domenii magnetice în nanofirele și firele submicronice amorfe cu simetrie cilindrică. Cu această instalație, am obținut în cea de-a treia activitate date experimentale importante cu privire la viteza de deplasare a pereților de domenii în nanofirele amorfe și firele submicronice amorfe cu simetrie cilindrică.

În plus, am studiat efectul unei distribuții neliniare a anizotropiei magnetoelastice asupra procesului de inversare a magnetizării din nanofirele amorfe cu simetrie cilindrică, care în fapt este echivalent cu deplasarea unui perete de domenii magnetice în lungul acestora, ceea ce ne-a permis să punem în evidență, pentru prima dată în acest tip de nanofire, existența unor structuri de spin de tip vortex – care pot fi de tip skyrmion sau de tip Bloch-point wall, urmând să aprofundăm în etapele viitoare aceste studii. Nanofirele studiate ar putea juca și rol de nano-canale pentru deplasarea acestor structuri de tip vortex, ceea ce ar deschide calea unor noi aplicații în elemente de logică magnetică.

Pe baza rezultatelor prezentate în acest raport, suntem în măsură să afirmăm că toate activitățile prevăzute în această etapă au fost realizate în totalitate, în conformitate cu planul de realizare. Totodată, considerăm că există toate premisele favorabile continuării proiectului și atingerii obiectivului principal al acestuia, așa cum este descris în secțiunea 1 a acestui raport.

În ceea ce privește diseminarea rezultatelor, acestea sunt cuprinse într-un articol trimis spre publicare și aflat în curs de evaluare la revista *Scientific Reports*, editată de prestigiosul grup Springer Nature:

- C. Rotărescu, H. Chiriac, N. Lupu, T.-A. Óvári, „Finite element micromagnetic modelling of magnetic hysteresis in magnetostrictive cylindrical amorphous glass-coated nanowires”.

Articolul conține rezultatele referitoare la structurile de tip vortex puse în evidență în cazul nanofirelor amorfe cu simetrie cilindrică.

De asemenea, rezultatele au fost diseminate pe larg prin prezentarea făcută la una din cele mai importante manifestări științifice din domeniul magnetismului și materialelor magnetice ce a avut loc în cursul acestui an (noiembrie 2017). Astfel, rezultatele le-am prezentat la 62nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials – MMM 2017, Pittsburgh, S.U.A., 6 – 10 noiembrie 2017 – fiind cuprinse în lucrarea:

- AR-01: „Phenomenology of magnetic nucleation in rapidly solidified cylindrical amorphous nanowires” – T.-A. Óvári, C. Rotărescu, N. Lupu, H. Chiriac.

Activitățile efectuate în cadrul proiectului au avut de asemenea rezultate importante în formarea celor doi cercetători tineri din echipa proiectului, dl. dr.

Cristian Rotărescu – cercetător postdoctoral și dl. Costică Hlenschi – doctorand. Dr. C. Rotărescu este autor principal la lucrarea trimisă spre publicare la *Scientific Reports* și coautor la lucrarea prezentată la conferința internațională MMM 2017 în luna noiembrie.

Director proiect,
CS I Dr. T.-A. Óvári