

Raport științific

privind a 2-a etapă (2018) 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. Rezumatul primei etape (2017).....	3
3. Etapa a 2-a (2018)	6
Activitatea A2.1 – Prepararea eșantioanelor cu diferite anizotropii magnetice	7
Activitatea A2.2 – Analiza efectului anizotropiei asupra mobilității pereților de domenii	10
Activitatea A2.3 – Prepararea eșantioanelor amorfe din sistemul Fe-Cu-Nb-Si-B	14
Activitatea A2.4 – Prepararea nanofirelor și firelor submicronice nanocristaline.....	16
4. Concluzii. Diseminarea rezultatelor	19

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-canalilor 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. Rezumatul primei etape (2017)

În prima etapă a proiectului, care s-a derulat în perioada 12.07 – 29.12.2017, am finalizat activitățile prevăzute în Planul de realizare pentru respectiva etapă, având 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*”. Activitățile realizate au condus la atingerea primului obiectiv specific al proiectului, cel referitor la investigarea rolului geometriei eșantioanelor în propagarea pereților de domenii magnetice de-a lungul acestora. Activitățile, conform planului de realizare, au fost focalizate pe trei direcții principale:

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

Vitezele astfel determinate ale pereților de domenii din nanofirele și firele submicronice cu simetrie cilindrică au fost ulterior comparate cu datele asupra vitezei pereților de domenii în nanofirele cu secțiune rectangulară – așa-numitele nanofire planare, și acestea prezentând interes pentru dezvoltarea de aplicații de logică pe bază de pereți de domenii magnetice (“domain wall logic”).

În cadrul activităților desfășurate, am atins de asemenea problematica esențială pentru procesele de interes în acest proiect, a 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 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 și importante cu privire la structura pereților de domenii care se deplasează prin nanofirele amorse cu simetrie cilindrică, precum și la potențialul de realizare a nano-canalelor vizate în cadrul acestui proiect.

Nanofirele și firele submicronice pe care le-am preparat 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, iar din punct de vedere structural prin microscopie electronică de transmisie de ultraînaltă rezoluție (UHR-TEM), în cadrul laboratorului de microscopie electronică de la INCDFT-IFT Iași. Astfel, toate eșantioanele au avut diametre, Φ_m , cuprinse între 100 nm și 950 nm, conform specificațiilor inițiale, fiind totodată amorse.

Instalația pe care am realizat-o pentru studiul experimental al deplasărilor de pereți de domenii magnetice este adaptată pentru dimensiunile reduse ale firelor cilindrice ultrasubțiri (100 – 900 nm) – materialele de interes în cadrul acestui proiect, prezentând o sensibilitate ridicată, necesară analizei unei cantități reduse de material magnetic. Instalația este bazată pe metoda Sixtus-Tonks, îmbunătățirea principală constând în utilizarea unui număr mai mare de bobine de detecție în sistemul de măsură, fiecare dintre acestea fiind la rândul ei alcătuită din trei înfășurări succesive. Cele trei înfășurări succesive sunt conectate în serie, însă cel mai important este faptul că înfășurarea mediană este bobinată în sens invers celorlalte două, ceea ce permite separarea fără echivoc a semnalelor induse în acestea. Pentru prelucrarea semnalelor și automatizarea generală a măsurătorilor pe această instalație nouă, am realizat un software specializat în LabVIEW.

Utilizând noua instalație experimentală, am efectuat măsurători preliminare ale vitezei pereților de domenii în eșantioane sub formă de nanofire și fire submicronice cilindrice având compozițiile din sistemele Fe-Si-B ($\lambda \gg 0$) și Co-Fe-

Si-B ($\lambda \approx 0$), și diametrele Φ_m cuprinse între 100 și 950 nm. Rezultatele astfel obținute le-am comparat cu valorile vitezelor de deplasare ale pereților de domenii din nanofirele planare (cu secțiune rectangulară). Am constatat faptul că valorile măsurate în cazul nanofirelor și firelor submicronice cilindrice sunt peste valorile uzuale din nanofirele planare, iar valoarea maximă pe care am măsurat-o a fost $v = 1600$ m/s. 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 mai 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. Astfel, simetria superioară a nanofirelor și firelor submicronice cilindrice prezintă avantaje clare comparativ cu geometria rectangulară a nanofirelor planare, cele care, până acum, au fost principalii candidați la aplicații în elemente de logică pe bază de pereți de domenii magnetice. Problema anizotropiei magnetoelastice distribuită neliniar pe direcția radială a nanofirelor amorfe cilindrice constituie un aspect specific acestor nanomateriale preparate prin răcire rapidă din topitură. 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, model care a permis și vizualizarea configurațiilor magnetizării. Cel mai important rezultat al acestui studiu a fost evidențierea unor structuri de spin de tip vortex, structuri care se formează în mod spontan la capetele nanofirelor având $\lambda \gg 0$. Practic acestea 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, care pot fi de tip „skyrmion”. Aceste structuri de tip „skyrmion” sunt de interes major în prezent pentru aplicații în domeniul tehnicii de calcul, în special în stocarea informației, dar și în elemente de logică magnetică. Prin urmare, este un rezultat deosebit de important faptul că în nanofirele amorfe 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.

Rezultatele obținute în prima etapă a proiectului au fost prezentate la una dintre cele mai importante conferințe internaționale din domeniul magnetismului și materialelor magnetice, ce a avut loc în noiembrie 2017: *62nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials – MMM 2017*, Pittsburgh, S.U.A., 6 – 10 noiembrie 2017 – fiind cuprinse în lucrarea *“Phenomenology of magnetic nucleation in rapidly solidified cylindrical amorphous nanowires”* – T.-A. Óvári, C. Rotărescu, N. Lupu și H. Chiriac.

De asemenea, rezultatele sunt în curs de publicare, fiind cuprinse într-un articol trimis spre publicare și aflat încă în curs de evaluare la cea mai prestigioasă revistă de magnetism și materiale magnetice – domeniul principal al acestui proiect, respectiv *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, editată de prestigiosul

grup Elsevier. Articolul se intitulează “*Role of magnetoelastic anisotropy distribution in the axial magnetization of $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$ amorphous glass-coated nanowires: a micromagnetic analysis*”, autorii fiind C. Rotărescu, N. Lupu, H. Chiriac și T.-A. Óvári. Acest articol a fost trimis inițial (2017) spre publicare la *Scientific Reports* (Springer Nature), dar dată fiind noutatea subiectului, evaluarea a fost contradictorie (un raport pozitiv și unul negativ), editorul luând practic decizia de a nu publica articolul. Ulterior a fost modificat și trimis la *Physical Review B* (American Physical Society), unde editorul a considerat că nu se potrivește cu specificul revistei, și a decis să nu îl dea unor referenți spre evaluare. Astfel, am decis să-l actualizăm și să-l trimitem la revista *Nanoscale* (Royal Society of Chemistry), considerând că materialele pe care le studiem au dimensiuni nanometrice, însă din nou ni s-a comunicat faptul că nu este potrivit cu specificul revistei, care este editată de Societatea Regală de Chimie (Royal Society of Chemistry). Din nefericire, în pasul următor am fost puși cumva pe o pistă falsă, fiind invitați să o trimitem la o altă revistă editată de Royal Society of Chemistry, și anume *RSC Advances*, unde a fost evaluată din nou contradictoriu - un raport pozitiv și unul negativ - observațiile din cel negativ fiind foarte ușor de contraargumentat, însă am preferat să revenim la o revistă din domeniul de specializare cel mai apropiat proiectului, respectiv *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* (Elsevier), unde încă se află în evaluare în prezent.

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.

3. Etapa a 2-a (2018)

În cadrul celei de-a 2-a etape a proiectului, corespunzătoare anului 2018, cu titlul „*Investigarea efectului anizotropiei magnetice asupra vitezei și mobilității pereților de domenii în nanofire și fire submicronice cu simetrie cilindrică. Prepararea de nanofire și fire submicronice cu simetrie cilindrică având structuri nanocristaline în vederea studiului influenței caracteristicilor structurale asupra mobilității pereților de domenii magnetice în etapa următoare.*”, ne-am propus ca prim obiectiv de etapă să determinăm corelația dintre anizotropia magnetică preponderentă, în funcție de caracteristicile nanofirelor amorfе (compoziție chimică, dimensiuni), și parametrii principali care descriu deplasarea pereților de domenii magnetice în acestea, respectiv viteza și mobilitatea. Acest prim obiectiv este premergător celui de-al doilea obiectiv specific al proiectului, respectiv *determinarea rolului structurii de domenii magnetice a nanofirelor și/sau firelor submicronice amorfе 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*. Obiectivul de etapă secund este reprezentat de pregătirea eșantioanelor cu structură nanocristalină, necesare atingerii celui de-al treilea obiectiv specific al proiectului, respectiv *determinarea influenței caracteristicilor structurale asupra*

mobilității pereților de domenii magnetice din nanofire și firele submicronice cu simetrie cilindrică având structuri nanocristaline și amorf.

Activitățile prevăzute în planul de realizare pentru atingerea celor două obiective de etapă sunt:

A2.1 Prepararea de eșantioane sub formă de nanofire și fire submicronice cilindrice acoperite cu sticlă având diferite distribuții ale anizotropiei magnetice.

A2.2 Analiza efectului pe care îl au tipul și distribuția anizotropiei magnetice asupra mobilității pereților de domenii magnetice în nanofire și fire submicronice amorf cu simetrie cilindrică.

A2.3 Prepararea de eșantioane amorf sub formă de nanofire și fire submicronice cu simetrie cilindrică, având compoziții din sistemul Fe-Cu-Nb-Si-B (precursori amorf pentru eșantioane nanocristaline).

A2.4 Prepararea de nanofire și fire submicronice cu simetrie cilindrică având diferite tipuri de structuri nanocristaline, cu diametre cuprinse între 100 și 900 nm, prin tratamente termice adecvate.

Activitatea A2.1 – Prepararea eșantioanelor cu diferite anizotropii magnetice

În cadrul primei activități, am preparat eșantioane amorf cu diferite valori ale constantei de magnetostricțiune, λ , astfel încât să obținem nanofire și fire submicronice cu diferite tipuri de anizotropie magnetică preponderentă. Dimensiunile eșantioanelor au fost cuprinse în intervalul tipic $100 \text{ nm} \leq \Phi_m \leq 950 \text{ nm}$, acestea fiind preparate prin metoda răcirii rapide din topitură în capilar de sticlă, descrisă în mod detaliat în raportul corespunzător primei etape a proiectului. Astfel, am preparat nanofire și fire submicronice amorf din aliajele reprezentative $\text{Fe}_{77,5}\text{Si}_{7,5}\text{B}_{15}$ ($\lambda = +25 \times 10^{-6}$) și $(\text{Co}_{0,94}\text{Fe}_{0,06})_{72,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ ($\lambda = -1 \times 10^{-7}$). În cazul eșantioanelor cu compoziția $\text{Fe}_{77,5}\text{Si}_{7,5}\text{B}_{15}$, valoarea mare și pozitivă a constantei de magnetostricțiune, cuplată cu tensiunile mecanice intrinseci, induse datorită metodei specifice de preparare a nanofirelor și firelor submicronice amorf, ce presupune viteze de răcire foarte mari, va conduce la o anizotropie magnetică de natură magnetoelastică, care va fi preponderentă și va determina practic caracteristicile proceselor de magnetizare ce au loc în astfel de probe.

Astfel, în figura 1, avem reprezentată distribuția tensiunilor mecanice intrinseci, induse la prepararea nanofirelor și firelor submicronice amorf, în funcție de dimensiunile finale ale acestora ($\Phi_m = 2 \cdot R_m$). Observăm faptul că valorile tensiunilor mecanice intrinseci sunt foarte mari, de ordinul 10^9 Pa , atât în cazul celor de întindere (pozitive), din interior, cât și în cazul celor compresive (negative), din regiunea de suprafață.

Chiar dacă tensiunile scad pe măsură ce raza R_m (sau diametrul) nanofirelor/firelor submicronice crește, ordinul de mărime rămâne același, ceea ce va conduce la valori mari ale cuplajului magnetoelastic, și implicit la valori foarte mari ale constantei de anizotropie magnetoelastică, K_{me} , conform relației:

$$K_{me} = \frac{3}{2} \lambda \cdot \tau_{ii} \quad (1)$$

unde τ_{ii} reprezintă componenta predominantă a tensorului tensiunilor mecanice intrinseci dintr-o anumită regiune a nanofirului.

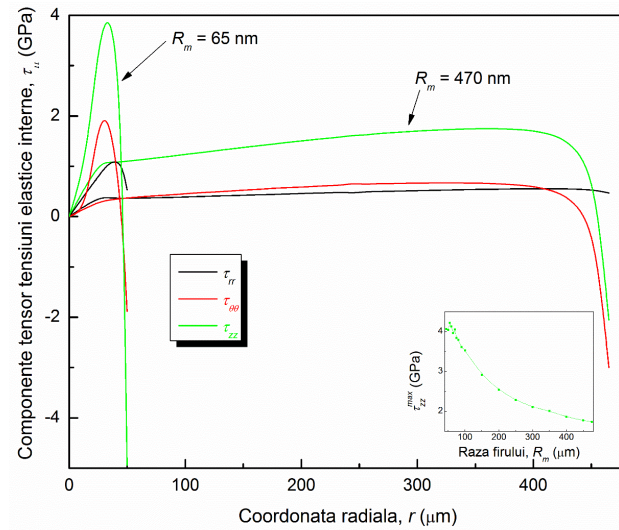


Fig. 1. Distribuții radiale ale tensiunilor intrinseci - τ_{rr} (radială), $\tau_{\theta\theta}$ (circumferențială) și τ_{zz} (axială) - calculate pentru eșantioane cu razele de 65 și respectiv 470 nm. Grosimea sticlei: $t_g = 15 \mu m$. Dreapta-jos: dependența maximului tensiunii axiale de întindere de rază.

Zona interioară, care ocupă aproape întregul volum al eșantionului, cu excepția zonei foarte înguste din imediata vecinătate a suprafeței, este regiunea de interes maxim, întrucât în aceasta are practic loc deplasarea pereților de domenii de 180° la inversarea magnetizării eșantioanelor sub acțiunea unui câmp magnetic aplicat axial, H .

Inversarea magnetizării de la $+M$ la $-M$ se produce printr-un salt unic, la o valoare bine determinată a câmpului aplicat, numită câmp de comutare, H^* , și este reflectată într-un ciclu de histerezis tipic, cu aspect rectangular, precum cel din figura 2.

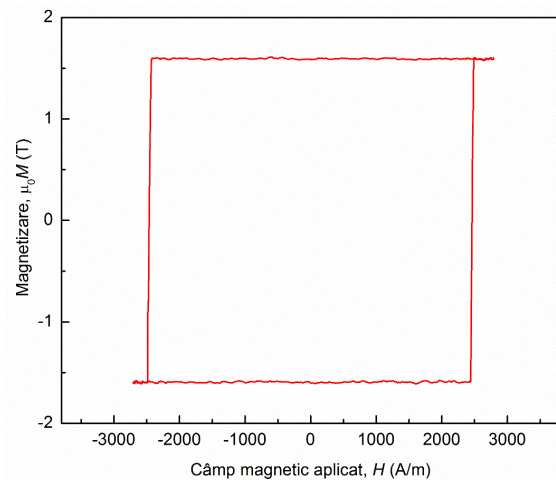


Fig. 2. Ciclul de histerezis rectangular măsurat pe un fir submicronic amorf cu compoziția $Fe_{77,5}Si_{7,5}B_{15}$, preparat prin răcire rapidă din topitură, având diametrul $\Phi_m = 500 \text{ nm}$ și grosimea sticlei $t_g = 12 \mu m$. Mărimea câmpului de comutare: $H^* = 2500 \text{ A/m}$.

Din relația (1) rezultă implicit faptul că distribuția radială a anizotropiei magnetoelastice are aceeași formă cu distribuția radială a tensiunilor interne, tensiunile de interes din punct de vedere al comutării $+$ $\rightarrow$ $-$ a magnetizării M și al deplasării pereților de domenii magnetice de 180° , fiind cele axiale de întindere, τ_{zz} , care predomină în cea mai mare parte a volumului eșantioanelor.

Grosimea sticlei influențează, la rândul ei, prin intermediul tensiunilor, valoarea constantei de anizotropie magnetoelastică, însă, peste o anumită valoare, practic $5 \mu\text{m}$, această influență prezintă o saturație, după cum se vede în figura 3, ceea ce era de așteptat, ținând cont de diferența mare existentă între diametrul nanofirelor/firelor submicronice și grosimea sticlei.

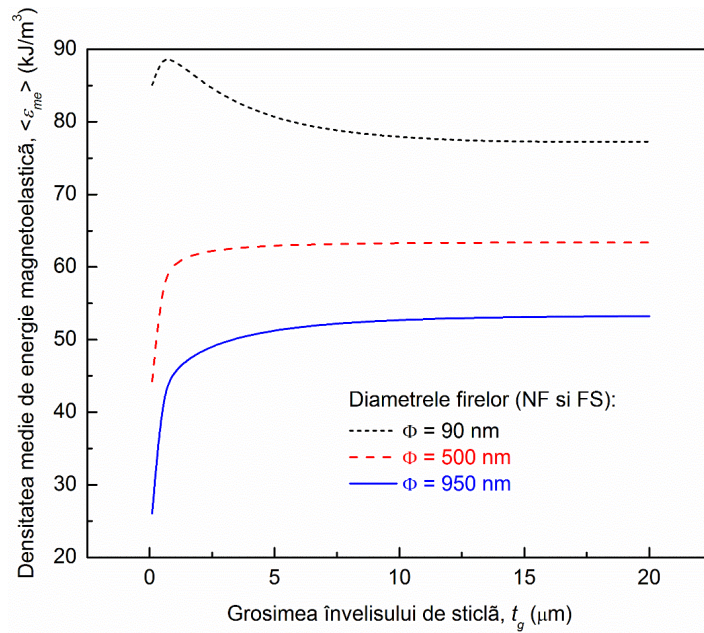


Fig. 3. Densitatea medie de energie magnetoelastică în funcție de grosimea învelișului de sticlă, cu diametrul firelor ca parametru, în cazul firelor submicronice (FS) și a nanofirelor (NF) amorse cu compoziția $\text{Fe}_{77,5}\text{Si}_{7,5}\text{B}_{15}$ preparate prin răcire rapidă din topitură.

Densitatea medie de energie magnetoelastică reprezintă constanta medie de anizotropie magnetoelastică, $\langle K_{me} \rangle$, aceasta fiind calculată pentru a caracteriza global nivelul de anizotropie dintr-un eșantion, utilizând o relație similară cu (1), în care valoarea τ_{ii} , corespunzătoare unei anumite coordonate radiale r este înlocuită cu valoarea medie $\langle \tau_{ii} \rangle$, în cazul de față cu $\langle \tau_{zz} \rangle$, medierea având loc pe întregul interval de valori ale coordonatei radiale în care τ_{zz} este componenta dominantă:

$$\langle \varepsilon_{me} \rangle = \frac{3}{2} \lambda \cdot \langle \tau_{zz} \rangle = \langle K_{me} \rangle \quad (2)$$

Deși valorile tensiunilor mecanice induse în timpul preparării nanofirelor/firelor submicronice amorse sunt similare în cazul compoziției $(\text{Co}_{0,94}\text{Fe}_{0,06})_{72,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$, adică de ordinul 10^9 Pa , faptul că acestea prezintă o constantă de

magnetostricțiune cu două ordine de mărime ($\sim 10^2$) mai mică decât eşantioanele cu compoziția $\text{Fe}_{77,5}\text{Si}_{7,5}\text{B}_{15}$, va conduce la diminuarea semnificativă, în aceeaşi măsură (mai exact, de $2,5 \times 10^2$ ori), a densităţii de energie magnetoelastică a nanofirelor din sistemul Co-Fe-Si-B, şi implicit a anizotropiei magnetice de origine magnetoelastică. Această diminuare importantă are ca şi consecinţă imediată apariţia comportării magnetice bistabile ($+M \leftrightarrow -M$) sub acţiunea unui câmp magnetic aplicat axial, H , similar cu cazul nanofirelor şi firelor submicronice din sistemul Fe-Si-B. Spre deosebire însă de cazul nanofirelor din sistemul Fe-Si-B, în cazul celor din sistemul Co-Fe-Si-B comportarea bistabilă, echivalentă cu inversarea magnetizării într-un singur pas şi, prin urmare, observabilă printr-un ciclu de histerezis rectangular, nu are cum să îşi aibă originea într-o anizotropie predominantă de natură magnetoelastică, având în vedere faptul că un cuplaj magnetoelastic între tensiunea axială dominantă de întindere ($\tau_{zz} > 0$) şi magnetostricţiunea negativă ($\lambda < 0$), ar conduce la o direcţie de anizotropie ortogonală la axa nanofirului, şi în nici un caz la una paralelă cu aceasta. Acest fapt demonstrează că axa de uşoară magnetizare în cazul nanofirelor/firelor submicronice cu compoziţia $(\text{Co}_{0,94}\text{Fe}_{0,06})_{72,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$, având $\lambda = -1 \times 10^{-7}$, este de altă natură decât cea magnetoelastică. Având în vedere valoarea foarte mică a termenului magnetoelastic, şi totodată forma eşantioanelor cilindrice studiate, care sunt foarte lungi şi cu dimensiuni transversale reduse, putem afirma că termenul energetic care determină orientarea axei de uşoară magnetizare în lungul axei nanofirului este cel de natură magnetostatică.

Avem astfel o anizotropie de formă, de natură magnetostatică, care predomină în cazul nanofirelor/firelor submicronice amorfe cu compoziţia $(\text{Co}_{0,94}\text{Fe}_{0,06})_{72,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$, şi, pe de altă parte, o anizotropie magnetoelastică, care predomină în cazul nanofirelor/firelor submicronice cu compoziţia $\text{Fe}_{77,5}\text{Si}_{7,5}\text{B}_{15}$, ambele cu rol determinant în procesul de inversare a magnetizării axiale sub acţiunea câmpului H , care reprezintă, în fapt, deplasarea unui perete de 180° în lungul axei eşantioanelor. Toată argumentaţia de mai sus demonstrează faptul că am preparat eşantioanele cele mai reprezentative în scopul studierii efectului pe care îl are fiecare tip de anizotropie magnetică în parte, asupra mobilităţii şi vitezei pereţilor de domenii magnetice în nanofire şi fire submicronice amorfe cu simetrie cilindrică.

Activitatea A2.2 – Analiza efectului anizotropiei asupra mobilităţii pereţilor de domenii

În cadrul celei de-a doua activităţi, pentru a analiza efectul pe care îl au tipurile de anizotropie magnetică preponderentă asupra vitezei şi mobilităţii pereţilor de domenii magnetice din nanofirele şi firele submicronice amorfe, am efectuat măsurători ale vitezei pereţilor de domenii în eşantioanele de $\text{Fe}_{77,5}\text{Si}_{7,5}\text{B}_{15}$ şi $(\text{Co}_{0,94}\text{Fe}_{0,06})_{72,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ preparate în activitatea nr. 1, utilizând instalaţia complexă realizată în acest scop în etapa din 2017 a proiectului.

Din datele experimentale asupra vitezei pereţilor de domenii magnetice, v , în eşantioanele cu cele două compoziţii, mai precis din curbele care dau dependenţa de câmpul magnetic aplicat H a vitezei pereţilor de domenii, $v(H)$, am calculat

valorile mobilității pereților, S , aceasta fiind definită ca panta curbelor $v(H)$, respectiv:

$$S = \frac{dv}{dH} \quad (3)$$

Întrucât am văzut mai sus faptul că efectul grosimii sticlei este limitat peste o anumită valoare, în special în domeniul grosimilor uzuale ale acesteia ($5 - 10 \mu\text{m}$), practic ne-am limitat la studiul mobilității în funcție de diametrul eșantioanelor, Φ_m , în cadrul fiecărui sistem – Fe-Si-B și respectiv Co-Fe-Si-B.

În figura 4 am reprezentat dependența mobilității pereților de domenii în funcție de diametrul eșantioanelor, $S(\Phi_m)$, în cazul nanofirelor și firelor submicronice amorse cu compoziția $\text{Fe}_{77,5}\text{Si}_{7,5}\text{B}_{15}$.

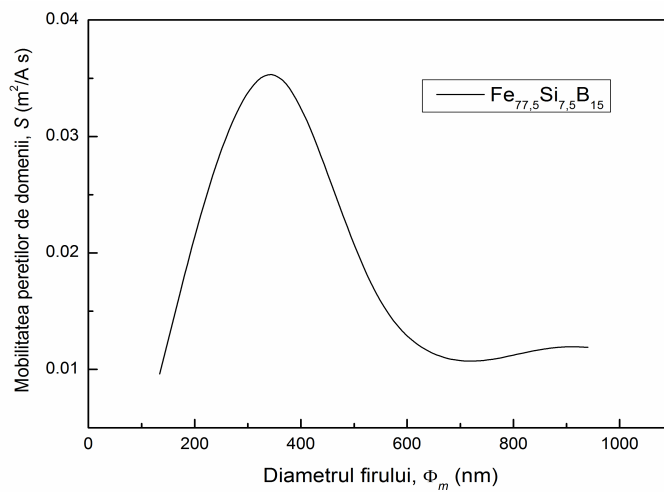


Fig. 4. Mobilitatea pereților de domenii magnetice în funcție de diametrul firului magnetic amorf, Φ_m , în cazul nanofirelor și firelor submicronice amorse cu compoziția $\text{Fe}_{77,5}\text{Si}_{7,5}\text{B}_{15}$ având magnetostricțiune pozitivă mare.

Observăm faptul că dependența este neliniară, prezentând un maxim pronunțat pentru o valoare a diametrului situată în jurul valorii de 350 nm.

În figura 5 am reprezentat aceeași dependență pentru cazul nanofirelor și firelor submicronice amorse având compoziția $(\text{Co}_{0,94}\text{Fe}_{0,06})_{72,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$. În acest caz dependența este monotonă.

Pe lângă alura complet diferită a celor două dependențe $S(\Phi_m)$ în eșantioanele cu semne și valori diferite ale constantelor de magnetostricțiune, observăm de asemenea faptul că eșantioanele cu cele două compoziții studiate prezintă valori semnificativ diferite ale mobilității pereților de domenii magnetice, respectiv valorile corespunzătoare nanofirelor și firelor submicronice amorse având magnetostricțiunea aproape nulă sunt cu două ordine de mărime mai mari comparativ cu cele din cazul eșantioanelor cu magnetostricțiune pozitivă mare. Ambele aspecte semnalate își au originea în tipul de anizotropie magnetică predominantă din fiecare compoziție.

Diferența dintre valorile mobilității pereților de domenii în cele două cazuri este în concordanță cu diferența existentă între mărimile valorilor absolute ale

constantelor de magnetostricțiune ale celor două aliaje studiate. Pe de altă parte, înțelegerea naturii diferenței existente între formele curbelor $S(\Phi_m)$ nu este atât de simplă. În cazul corelației dintre mobilitatea pereților și magnetostricțiune, proporționalitatea inversă își are originea în prezența tensiunilor mecanice interne cu valori foarte mari, specifice procesului de preparare prin răcire rapidă din topitură, și mai ales în rolul jucat de aceste tensiuni în fixarea pereților de domenii care se propagă odată ce câmpul magnetic aplicat depășește o anumită valoare de prag (câmpul de comutare = câmpul de propagare). Astfel, cuplajul magneto-mecanic puternic din cazul firelor cu magnetostricțiune pozitivă mare facilitează fixarea mai puternică a pereților de domenii magnetice, implicând necesitatea unui câmp de propagare/comutare mai mare.

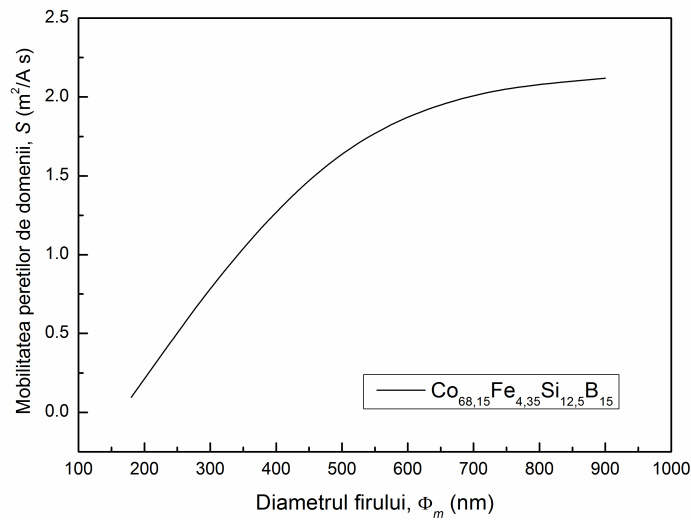


Fig. 5. Mobilitatea pereților de domenii funcție de diametrul firelor în cazul nanofirelor și firelor submicronice amorfе având compoziția $(Co_{0,94}Fe_{0,06})_{72,5}Si_{12,5}B_{15}$ cu magnetostricțiune negativă mică (aproape nulă).

Pentru a înțelege particularitățile dependenței mobilității pereților de domenii de diametrul nanofirelor și firelor submicronice amorfе în fiecare caz în parte ($\lambda \gg 0$ și respectiv $\lambda \approx 0$, dar negativ), trebuie să ținem cont de detaliile care fac diferența între cele două seturi de eșantioane, respectiv între cele cu magnetostricțiune pozitivă mare și cele cu magnetostricțiune aproape nulă. Diferența principală constă, după cum am văzut în argumentația prezentată la activitatea nr. 1, în valoarea și semnul constantei de magnetostricțiune, ceea ce are ca rezultat o valoare mult mai mare a termenului magnetoelastic în cazul eșantioanelor cu compoziția $Fe_{77,5}Si_{7,5}B_{15}$ comparativ cu cele având compoziția $(Co_{0,94}Fe_{0,06})_{72,5}Si_{12,5}B_{15}$. Pe de altă parte, pentru cele mai mici diametre ale nanofirelor magnetice amorfе studiate, termenul magnetostatic este de asemenea important în expresia energiei libere totale a acestora (anizotropia de formă devine mai puternică pe măsură ce diametrul nanofirelor scade).

Din acest motiv, situația cea mai complexă este întâlnită în cazul nanofirelor și firelor submicronice amorfе având magnetostricțiune pozitivă mare, întrucât în acest tip de eșantioane atât E_{me} (termenul magnetoelastic), cât și E_{ms} (termenul

magnetostatic) sunt importante, în special la valori foarte mici ale diametrului Φ_m . Rezultatele prezentate în figura 4, cu mobilitatea maximă a pereților de domenii magnetice corespunzând unui diametru al firului submicronic de 350 nm, indică faptul că, în jurul acestei valori a diametrului are loc o modificare a termenului energetic preponderent, și respectiv a anizotropiei magnetice predominante. Mai precis, dacă $\Phi_m \leq 350$ nm, atunci anizotropia magnetostatică predomină ($E_{me} < E_{ms}$), iar pentru $\Phi_m > 350$ nm, anizotropia magnetică predominantă va fi cea de natură magnetoelastică ($E_{me} > E_{ms}$).

Pe baza rezultatelor analizei efectului anizotropiei magnetice a nanofirelor și firelor submicronice amorse asupra mobilității pereților de domenii magnetice din astfel de materiale, putem afirma, legat de corelația existentă între tipul de anizotropie magnetică și mobilitatea pereților de domenii magnetice în firele magnetice amorse ultrasubțiri, că:

- (i) o pantă pozitivă a dependenței $S(\Phi_m)$ indică întotdeauna prezența unei anizotropii de formă predominante, de natură magnetostatică, iar
- (ii) o pantă negativă a acestei dependențe indică o anizotropie magnetoelastică predominantă.

Această corelație nu este restricționată doar pentru cazul nanofirelor și firelor submicronice cu magnetostricțiune pozitivă mare, acolo unde pot fi observate ambele situații datorită dependenței neliniare $S(\Phi_m)$ (v. figura 4), ci reprezintă o caracteristică generală, fiind valabilă și în cazul eșantioanelor cu magnetostricțiune aproape nulă, dar în acest caz observăm doar situația în care panta curbei $S(\Phi_m)$ este pozitivă, din cauză că în aceste fire energia magnetoelastică este mult mai mică, iar anizotropia de formă domină practic întregul interval de dimensiuni (v. figura 5).

Astfel, am atins practic primul obiectiv de etapă, reușind să determinăm corelația existentă între anizotropia magnetică preponderentă și mobilitatea pereților de domenii magnetice din nanofirele și firele submicronice amorse preparate prin metoda răcirii rapide din topitură. Este de remarcat faptul că, atunci când anizotropia magnetică predominantă este cea de natură magnetostatică, pereții de domenii prezintă o mobilitate mult mai mare decât în situația în care anizotropia predominantă este de natură magnetoelastică. Diferența este semnificativă, mobilitatea pereților de domenii fiind cu două ordine de mărime mai mare în primul caz, comparativ cu al doilea, adică invers proporțional cu diferența, în valoare absolută, dintre constantele de magnetostricțiune ale celor două aliaje investigate. Legat de procesul de inversare al magnetizării în nanofirele cu cele două compoziții - $\text{Fe}_{77,5}\text{Si}_{7,5}\text{B}_{15}$ și $(\text{Co}_{0,94}\text{Fe}_{0,06})_{72,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ – și totodată de termenul energetic preponderent în cele două tipuri de nanofire - E_{me} (termenul magnetoelastic) sau E_{ms} (termenul magnetostatic) - în funcție de dimensiunile acestora, am realizat un studiu micromagnetic al comutării magnetizării prin deplasarea peretelui de 180° atunci când câmpul magnetic H este aplicat sub diferite unghiuri în raport cu axa nanofirelor, unghiuri cuprinse între 0° (H paralel cu axa nanofirului) și 90° (H perpendicular la axa nanofirului).

Rezultatele acestui studiu confirmă tranziția existentă între termenii energetici principali care determină și practic controlează procesul de magnetizare axială prin intermediul deplasării pereților de domenii în lungul axei nanofirului. Tranziția de la termenul magnetoelastic la cel magnetostatic ($E_{me} \rightarrow E_{ms}$) are loc odată cu modificarea dimensiunilor transversale ale nanofirului, respectiv a diametrului, și a fost pusă în evidență doar în cazul nanofirelor amorfe cu compoziția $Fe_{77,5}Si_{7,5}B_{15}$, întrucât în cazul celor cu compoziția $(Co_{0,94}Fe_{0,06})_{72,5}Si_{12,5}B_{15}$ termenul magnetoelastic este neglijabil. Aceste rezultate confirmă practic datele experimentale prezentate mai sus, validând interpretarea acestora.

Activitatea A2.3 – Prepararea eșantioanelor amorfe din sistemul Fe-Cu-Nb-Si-B

În cadrul celei de-a treia activități, am preparat precursorii amorfi cu simetrie cilindrică pentru prepararea ulterioară (activitatea A2.4) de nanofire și fire submicronice cu structuri nanocristaline, în vederea studiului influenței caracteristicilor structurale asupra mobilității pereților de domenii magnetice în etapa următoare (2019).

Precursorii amorfi i-am preparat prin metoda descrisă detaliat în raportul asupra implementării primei etape a proiectului (2017), respectiv prin metoda răcirii/tragerii rapide în capilar de sticlă, utilizând instalația modernizată de preparare a firelor acoperite cu sticlă existentă la INCDFT-IFT Iași. Îmbunătățirile substanțiale aduse acesteia au permis creșterea semnificativă a vitezei de tragere, odată cu reducerea vibrațiilor, astfel încât să fie menținută continuitatea procesului de formare a nanofirelor/firelor submicronice.

În scopul preparării precursorilor amorfi, am utilizat aliajul cu compoziția $Fe_{73,5}Cu_1Nb_3Si_{13,5}B_9$, cunoscut și sub denumirea de FINEMET, și am preparat nanofire și fire submicronice cu această compoziție în stare amorfă, eșantioanele având diametre care acoperă întreaga plajă a dimensiunilor acestora, respectiv $100 \text{ nm} \leq \Phi_m \leq 950 \text{ nm}$. Constanta de magnetostricțiune a aliajului $Fe_{73,5}Cu_1Nb_3Si_{13,5}B_9$ în stare amorfă are valoarea $\lambda = 20 \times 10^{-6}$, fiind practic ușor mai mică decât cea a aliajului amorf $Fe_{77,5}Si_{7,5}B_{15}$, din care provine.

Aliajul propriu-zis, utilizat în procesul de preparare a precursorilor amorfi, l-am preparat din pulberi de înaltă puritate, care au fost într-o primă fază presate, compactate și apoi topite prin inducție electromagnetică, astfel încât să obținem aliajul primar pentru utilizare în instalația de preparare a nanofirelor și firelor submicronice amorfe.

Eșantioanele amorfe sub formă de nanofire și fire submicronice din FINEMET au fost caracterizate din punct de vedere structural cu ajutorul microscopiei electronice prin transmisie (TEM) în laboratorul de microscopie electronică de la INCDFT-IFT Iași, utilizând un microscop de transmisie de ultra-înaltă rezoluție Carl Zeiss LIBRA 200MC UHR-TEM.

În figura 6 sunt reprezentate imaginile STEM ('scanning transmission electron microscopy') și SAED ('selected area electron diffraction') pentru eșantioane FINEMET aflate în stare amorfă.

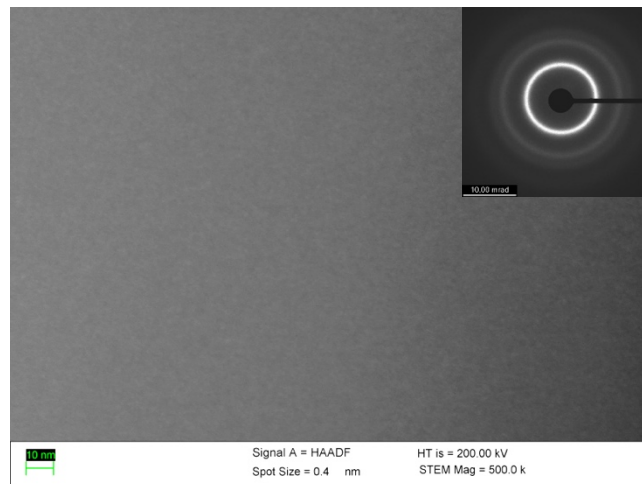


Fig. 6. Imagini STEM ('scanning transmission electron microscopy') și SAED ('selected area electron diffraction') pentru eșantioane cu compoziția $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ (FINEMET) în stare amorfă.

Acestea au aspecte tipice unor materiale amorf, confirmând astfel starea precursorului amorf.

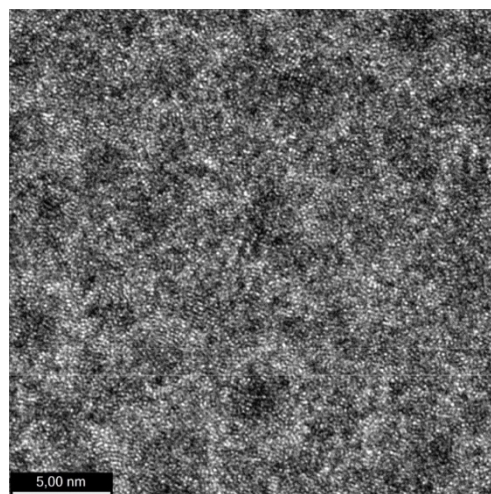


Fig. 7. Imagine UHR-TEM ('ultra-high resolution transmission electron microscopy') realizată în cazul unui eșantion amorf cu compoziția $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ (FINEMET).

De asemenea, în figura 7 este prezentată imaginea UHR-TEM ('ultra-high resolution transmission electron microscopy') realizată în cazul unui eșantion amorf cu compoziția $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ (FINEMET). Și în acest caz, imaginea este tipică unui material amorf, nefiind vizibile nici un fel de structuri cristaline.

Pregătirea probelor pentru STEM și UHR-TEM am realizat-o cu ajutorul unui sistem cu fascicul de ioni focalizat (FIB) pentru prepararea lamelor subțiri pentru investigarea prin microscopie electronică de transmisie.

Astfel, având precursorii amorfii preparați, am îndeplinit condiția necesară pentru a putea trece la realizarea următoarei activități, respectiv cea de preparare a nanofirelor și firelor submicronice cu structuri nanocristaline.

Activitatea A2.4 – Prepararea nanofirelor și firelor submicronice nanocristaline

În cadrul acestei ultime activități din etapa curentă a proiectului, am supus precursorii amorfii sub formă de nanofire și fire submicronice cu compoziția $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ (FINEMET) unor tratamente termice controlate, în vederea inducerii structurii nanocristaline, de interes pentru studiile ce urmează a fi realizate în etapa viitoare (2019).

Tratamentele termice controlate le-am efectuat în vid, utilizând un sistem care cuprinde un cuptor electric, sistemul fiind realizat în cadrul INCDFT-IFT Iași. Sistemul realizat permite efectuarea de tratamente termice în regim izoterm, atât în vid, cât și în atmosferă controlată (de exemplu în Ar). Cel mai important aspect este însă faptul că sistemul permite răcirea eșantioanelor până la temperatura camerei, după încheierea tratamentelor termice în vid sau în atmosferă controlată, în afara zonei cuptorului, ceea ce conduce la evitarea unor tratamente nedorite pe durata încălzirii sau răcirii sistemului, proba fiind plasată în cuptor după atingerea temperaturii de tratament, și respectiv îndepărtată din acesta imediat după încheierea duratei de tratament stabilite. Un regulator de temperatură asigură în mod automat o temperatură de tratament termic uniformă cu o precizie de $\pm 1^\circ\text{C}$ în raport cu temperatura setată inițial. Temperatura maximă de tratament termic permisă de sistem este de 800°C .

Eșantionul supus tratamentului termic este introdus în sistem prin deplasarea unui magnet, după atingerea temperaturii prevăzute pentru tratament. Același magnet este utilizat la final pentru îndepărtarea eșantionului după încheierea procedurii de tratament termic. Tratarea termică a eșantioanelor amorfe de $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ sub formă de nanofire și fire submicronice a fost realizată la temperaturi de tratament cuprinse între 250°C și 650°C . Durata tratamentelor a fost cuprinsă între 5 minute și 60 minute.

Pentru caracterizarea structurală a nanofirelor și firelor submicronice din FINEMET după realizarea tratamentelor termice, am utilizat aceleași tehnici de microscopie electronică și echipamente ca și în cazul precursorilor amorfii, respectiv STEM ('scanning transmission electron microscopy'), SAED ('selected area electron diffraction') și UHR-TEM ('ultra-high resolution transmission electron microscopy'), prin utilizarea microscopului de transmisie de ultra-înaltă rezoluție Carl Zeiss LIBRA 200MC UHR-TEM din cadrul laboratorului de microscopie electronică de la INCDFT-IFT Iași.

În figura 8 sunt reprezentate imaginile STEM și SAED ale unui eșantion FINEMET tratat termic în vid timp de 60 minute la 550°C , iar în figura 9 este prezentată imaginea UHR-TEM realizată în cazul unui eșantion cu aceeași compoziție $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ (FINEMET), după un tratament similar (550°C , 60 minute).

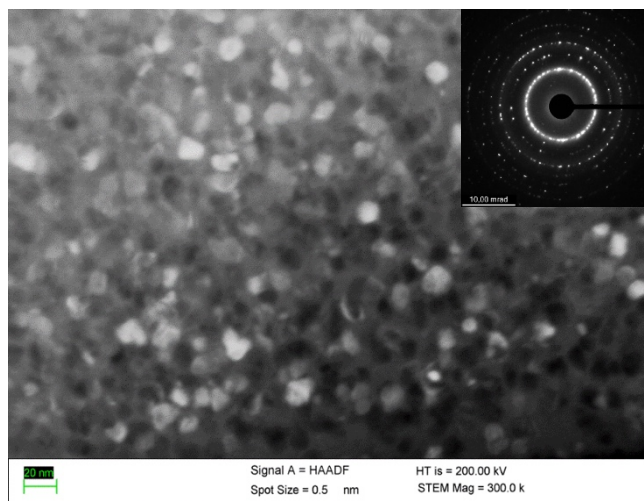


Fig. 8. Imagini STEM și SAED pentru eșantioane având compoziția $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ (FINEMET) după tratamentul termic realizat în vid la 550°C timp de 60 min.

Deja după acest tratament se observă formarea unor nano-grăunți cristalini, având o dimensiune medie de 7 nm (calculată din distribuția Gauss a mărimii grăunților cristalini).

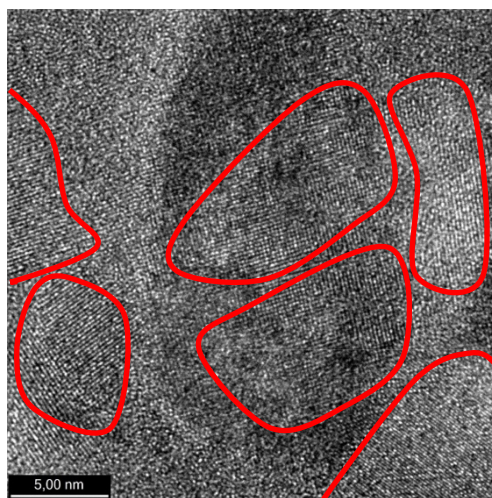


Fig. 9. Imagine UHR-TEM realizată în cazul unui eșantion cu compoziția $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ (FINEMET) după tratamentul termic realizat în vid la 550°C timp de 60 min.

Tratamentul termic realizat la temperatura de 600°C timp de 60 minute, conduce la o creștere ușoară a dimensiunii grăunților cristalini, de la 7 nm la 9 nm, însă caracteristicile structurii nanocristaline se mențin. În mod evident, volumul ocupat de matricea amorfă reziduală scade comparativ cu situația existentă după tratamentul termic la 550°C . În figurile 10 și 11 sunt prezentate imaginile de microscopie pentru cazul eșantioanelor cu compoziția $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$

(FINEMET), după realizarea tratamentului termic în vid la 600°C, timp de 60 minute: imaginile STEM și SAED în figura 10, și respectiv UHR-TEM în figura 11.

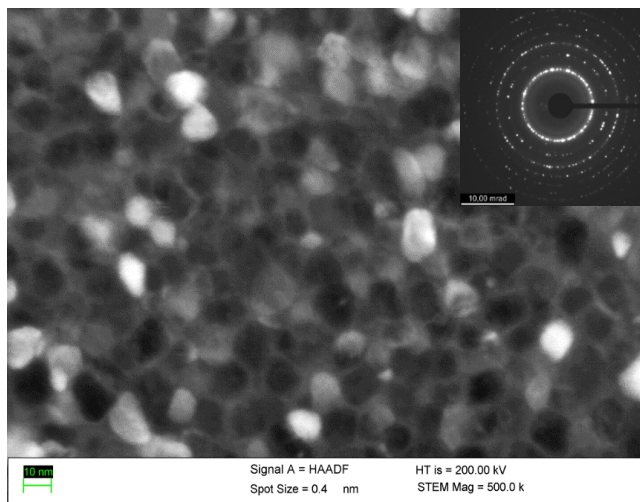


Fig. 10. Imagini STEM și SAED pentru eșantioane având compoziția $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ (FINEMET) după tratamentul termic realizat în vid la 600°C timp de 60 min.

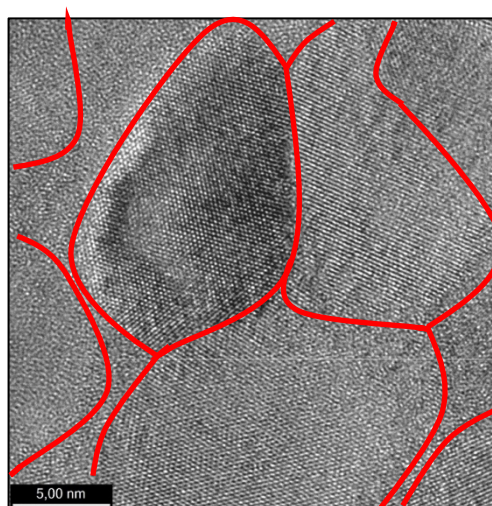


Fig. 11. Imagine UHR-TEM realizată în cazul unui eșantion cu compoziția $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ (FINEMET) după tratamentul termic realizat în vid la 600°C timp de 60 min.

Este important de remarcat faptul că structura nanocristalină se menține și după tratamentul la o temperatură mai înaltă (600°C) decât temperatura tipică de tratament (550°C), observată în mod curent în cazul altor materiale în care poate fi indusă această structură deosebită, de grăunți nanometrici înglobați într-o matrice reziduală amorfă. Aceasta pare să fie o consecință a reducerii semnificative a dimensiunilor transversale ale eșantioanelor, respectiv a diametrului, mai exact a intrării acestuia în plaja de dimensiuni submicronică și chiar nanometrică. Sigur că există anumite deosebiri între structurile nanocristaline corespunzătoare celor două tratamente termice diferite – la 550°C și respectiv 600°C – observabile pe

cale experimentală prin metode de microscopie electronică, cum sunt micile deosebiri între dimensiunile grăunților cristalini, fracția de volum ocupată de cele două faze (grăunții și respectiv matricea amorfă), sau chiar distanța dintre grăunți, însă ne așteptăm ca acestea să producă efecte în ceea ce privește procesul de inversare a magnetizării, precum și în privința deplasării peretelui de 180° asociat acestui proces, consecințe pe care le vom analiza în etapa viitoare prin studiul influenței lor asupra mobilității pereților de domenii magnetice.

Prin urmare, am atins și cel de-al doilea obiectiv de etapă, reprezentat de pregătirea eșantioanelor cu structură nanocristalină, necesare atingerii celui de-al treilea obiectiv specific al proiectului, respectiv *determinarea influenței caracteristicilor structurale asupra mobilității pereților de domenii magnetice din nanofirele și firele submicronice cu simetrie cilindrică având structuri nanocristaline și amorfe*.

În vederea înțelegerii aspectelor specifice dimensiunilor nanometrice și submicronice din eșantioanele investigate, legat de efectul caracteristicilor structurale asupra deplasării pereților de domenii magnetice, am realizat un studiu complex, la un nivel dimensional superior (microfire acoperite cu sticlă), în care am studiat deplasările de domenii din fire aparținând celor trei clase de compoziții de interes - $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ (FINEMET), $\text{Fe}_{77,5}\text{Si}_{7,5}\text{B}_{15}$ și $(\text{Co}_{0,94}\text{Fe}_{0,06})_{72,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$, având magnetostricțiuni și în general proprietăți magnetice diferite. În cadrul acestui studiu, am pus în evidență importanța unui termen magnetoelastic redus în cazul FINEMET și $(\text{Co}_{0,94}\text{Fe}_{0,06})_{72,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$, precum și posibilitatea de a controla declanșarea procesului de propagare a peretelui de 180° prin utilizarea unui câmp magnetic circumferențial, creat de un curent electric de valoare mică trecut prin probă. Am arătat faptul că o condiție necesară pentru a putea utiliza un curent în inițierea inversării magnetizării este aplicarea unei mici torsiuni firului cilindric, care practic scoate magnetizarea de pe direcția axei acestuia, conferindu-i o componentă circumferențială, asupra căreia va acționa practic câmpul creat de curent.

Utilitatea unui termen magnetoelastic redus (E_{me} neglijabil în raport cu E_{ms}), ne-a permis să demonstrăm totodată posibilitatea de a utiliza un fir amorf cu magnetostricțiune negativă mică – aproape nulă, din familia Co-Fe-Si-B, pentru realizarea unei noi aplicații ca element sensibil într-un senzor flexibil de forță.

4. Concluzii. Diseminarea rezultatelor

Lucrările prevăzute în planul de realizare la cele patru activități din această etapă a proiectului au fost realizate în totalitate. Astfel, în cadrul primei activități (A2.1) am preparat eșantioanele planificate sub formă de nanofire și fire submicronice amorfe cu simetrie cilindrică având diferite anizotropii magnetice preponderente, respectiv magnetoelastică în cazul probelor din aliajul $\text{Fe}_{77,5}\text{Si}_{7,5}\text{B}_{15}$ și magnetostatică în cazul probelor din aliajul $(\text{Co}_{0,94}\text{Fe}_{0,06})_{72,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$. În cadrul celei de-a doua activități (A2.2), am analizat efectul pe care cele două tipuri de anizotropii magnetice îl au asupra mobilității pereților de domenii, stabilind practic

corelația existentă între tipul de anizotropie magnetică și mobilitatea pereților de domenii magnetice din nanofirele și firele submicronice amorfe cu simetrie cilindrică. Astfel, o pantă pozitivă a dependenței mobilității de diametrul nanofirelor, $S(\Phi_m)$, indică întotdeauna prezența unei anizotropii de formă predominante, de natură magnetostatică, iar o pantă negativă indică o anizotropie magnetoelastică predominantă. Studiul micromagnetic conex al comutării magnetizării prin deplasarea peretelui de 180° atunci când câmpul magnetic H este aplicat sub diferite unghiuri în raport cu axa nanofirelor a confirmat tranziția existentă între termenii energetici principali care determină și practic controlează procesul de magnetizare axială prin intermediul deplasării pereților de domenii în lungul axei nanofirelor, validând interpretarea datelor experimentale. Acest studiu este cuprins în articolul cu titlul *“Angular dependence of the magnetic properties of low and highly magnetostrictive amorphous glass-coated nanowires prepared by rapid quenching and drawing”* - autori: Cristian Rotărescu, Horia Chiriac, Nicoleta Lupu și Tibor-Adrian Óvári, trimis spre publicare la *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, cea mai prestigioasă revistă din domeniul proiectului (magnetism).

La cea de-a treia activitate (A2.3), am preparat nanofire și fire submicronice cu compoziția $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ (FINEMET) în stare amorfă, eșantioanele având diametre care acoperă întreaga plajă a dimensiunilor necesare, respectiv $100 \text{ nm} \leq \Phi_m \leq 950 \text{ nm}$, eșantioanele preparate fiind necesare în activitatea următoare ca precursori pentru prepararea nanofirelor și firelor submicronice cu structuri nanocristaline. Imaginile STEM (‘scanning transmission electron microscopy’), SAED (‘selected area electron diffraction’) și UHR-TEM (‘ultra-high resolution transmission electron microscopy’) ale eșantioanelor FINEMET au confirmat starea amorfă a acestora. Având aceste eșantioane preparate, am trecut la activitatea următoare (A2.4), în care am tratat termic probele amorfe realizate în vederea obținerii nanofirelor și firelor submicronice cu structuri nanocristaline necesare în etapa de anul viitor a proiectului. Prin studiile de microscopie electronică, am pus în evidență faptul că structura nanocristalină apare după un tratament de 60 min. la 550°C , și se menține și după tratamentul la o temperatură mai ridicată (600°C), ceea ce este o consecință a reducerii semnificative a dimensiunilor transversale ale eșantioanelor, respectiv a diametrului, mai exact a intrării acestuia în plaja de dimensiuni submicronică și chiar nanometrică. Există însă anumite deosebiri între structurile nanocristaline corespunzătoare celor două tratamente termice diferite – la 550°C și respectiv 600°C – observabile pe cale experimentală – cum ar fi diferențele între dimensiunile grăunților cristalini, fracția de volum ocupată de cele două faze (grăunții și respectiv matricea amorfă) și distanța dintre grăunți.

Legat de investigarea efectului caracteristicilor structurale asupra deplasării pereților de domenii magnetice la nivel nanometric în etapa viitoare (2019), am realizat în această etapă un studiu premergător complex, la un nivel dimensional superior (microfire), în care am studiat deplasările de domenii din fire aparținând celor trei compoziții de interes - $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ (FINEMET), $\text{Fe}_{77,5}\text{Si}_{7,5}\text{B}_{15}$ și $(\text{Co}_{0,94}\text{Fe}_{0,06})_{72,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$, cu magnetostricțiuni și proprietăți diferite. Am pus în evidență importanța termenului magnetoelastic redus la FINEMET și

(Co_{0,94}Fe_{0,06})_{72,5}Si_{12,5}B₁₅, precum și posibilitatea de a controla propagarea peretelui de 180° cu un curent electric trecut prin probă. Am arătat faptul că o condiție necesară pentru a putea utiliza un curent în inițierea inversării magnetizării este aplicarea unei mici torsiuni firului cilindric. Rezultatele studiului sunt cuprinse în articolul intitulat *“Field and current controlled domain wall propagation in twisted glass-coated magnetic microwires”* - autori: Sorin Corodeanu, Horia Chiriac, Alina Damian, Nicoleta Lupu și Tibor-Adrian Óvári, trimis spre publicare la revista *Scientific Reports*, editată de prestigiosul grup Springer Nature.

Ca și utilitate practică pentru termenul magnetoelastic redus, cercetătorii din echipa proiectului au demonstrat posibilitatea de utilizare a unui fir amorf din familia Co-Fe-Si-B, pentru realizarea unei noi aplicații ca element sensibil într-un senzor flexibil de forță. Rezultatele sunt cuprinse în articolul cu titlul *“Flexible force sensors based on permeability change in ultrasoft amorphous wires”* - autori: Costică Hlenschi, Sorin Corodeanu, Nicoleta Lupu și Horia Chiriac, trimis spre publicare la revista *IEEE Sensors Journal*, una dintre cele mai importante reviste de senzori (alții decât chimici).

Astfel, ținând cont de rezultatele prezentate în acest raport, și de atingerea celor două obiective de etapă, apreciem că toate activitățile prevăzute în a doua etapă a proiectului (2018) au fost realizate în totalitate, conform planului de realizare actualizat. În același timp, considerăm că există toate premisele favorabile continuării proiectului și atingerii obiectivului principal al acestuia, așa cum este descris în prima secțiunea a acestui raport.

În ceea ce privește diseminarea rezultatelor, acestea sunt cuprinse în cele trei articole menționate mai sus, trimise spre publicare și aflate în curs de evaluare, după cum urmează:

1. C. Rotărescu, H. Chiriac, N. Lupu, T.-A. Óvári, *“Angular dependence of the magnetic properties of low and highly magnetostrictive amorphous glass-coated nanowires prepared by rapid quenching and drawing”*- trimis la *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* (Elsevier);
2. S. Corodeanu, H. Chiriac, A. Damian, N. Lupu, T.-A. Óvári, *“Field and current controlled domain wall propagation in twisted glass-coated magnetic microwires”* - trimis la *Scientific Reports* (Springer Nature); și
3. C. Hlenschi, S. Corodeanu, N. Lupu, H. Chiriac, *“Flexible force sensors based on permeability change in ultrasoft amorphous wires”* - trimis la *IEEE Sensors Journal* (IEEE Sensors Council).

De asemenea, rezultatele au fost diseminate pe larg prin prezentarea lor la unele dintre cele mai importante și prestigioase manifestări științifice din domeniul magnetismului, materialelor magnetice și a senzorilor și aplicațiilor realizate pe baza unor astfel de materiale, respectiv:

1. **Intermag 2018** - International Magnetism Conference - Singapore, April 23-27, 2018, CQ-09: *“Domain wall configurations in amorphous ferromagnetic nanowires with cylindrical symmetry”* - C. Rotărescu, H. Chiriac, N. Lupu, T.-A. Óvári;

2. 12th European Magnetic Sensors and Actuators Conference **EMSA 2018**, Athens, Greece, July 1-4, 2018, PW-11: „*Phenomenological modeling of the large Barkhausen effect in rapidly solidified amorphous nanowires*” – T.-A. Óvári, C. Rotărescu, C. Hlenschi, H. Chiriac, N. Lupu;
3. 9th Joint European Magnetic Symposia **JEMS 2018**, Mainz, Germany, September 3-7, 2018, A-1979 (P-B.122): “*Elongated nano-conduits for the fast motion of vortex domain walls*” - C. Rotărescu, H. Chiriac, N. Lupu, T.-A. Óvári.

Pe de altă parte, în cadrul activităților efectuate la acest proiect, o serie de rezultate importante au fost obținute de cei doi tineri cercetători din echipa proiectului, dl. dr. Cristian Rotărescu – cercetător postdoctoral și dl. Costică Hlenschi – doctorand, ambii fiind autori principali la câte un articol trimis spre publicare în 2018 (dl. Rotărescu la *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* și dl. Hlenschi la *IEEE Sensors Journal*).

Director proiect,
CS I Dr. Tibor-Adrian Óvári