

RECEPȚIONAT

Agencia Națională pentru Cercetare și Dezvoltare

La data: _____

AVIZAT

Secția AȘM _____

RAPORT ȘTIINȚIFIC FINAL

privind executarea proiectului de cercetări științifice

Caracterul cercetărilor: aplicative din cadrul programului „ASM & STCU Inițiative Comune de Cercetare-Dezvoltare”,

Perioada de implementare a proiectului: 2018-2019

Proiectul (titlul) „Element de memorie cu comutare completă pentru spintronica pe baza efectului de valva de spin supraconductoare”

Cifra Proiectului 18.80013.5007.02. STCU/6329

Direcția Strategică „Materiale, tehnologii și produse noi”

termen de executare: 31 decembrie 2019

Conducatorul proiectului	Zasavițchi Efim	_____
--------------------------	-----------------	-------

Directorul instituției	Sidorenko Anatolie	_____
------------------------	--------------------	-------

Consiliul științific/senat	Bujor Lilia	_____
----------------------------	-------------	-------

L. Ș.

Chișinău 2019

CUPRINS:

1. Scopul și obiectivele propuse spre realizare în cadrul proiectului (până la 1 pagină).
2. Rezultatele științifice obținute în cadrul proiectului.
3. Cele mai relevante realizări obținute în cadrul proiectului (până la 100 cuvinte).
4. Participarea în programe și proiecte internaționale (ORIZONT 2020, COST...), inclusiv propunerile înaintate/proiecte câștigate în cadrul concursurilor naționale/internaționale cu tangența la tematica proiectului.
5. Cooperări științifice internaționale/naționale.
6. Vizite ale savanților din străinătate.
7. Teze de doctorat/postdoctorat susținute pe parcursul realizării proiectului.
8. Manifestări științifice organizate la nivel național/internațional.
9. Aprecierea activității științifice promovate la executarea proiectului (premii, medalii, diplome etc.).
10. Rezumatul raportului cu evidențierea rezultatului, impactului, implementărilor, recomandărilor.
11. Concluzii.
12. Bugetul proiectului, lista executorilor, lista tinerilor cercetători, doctoranzilor (conform anexei nr.1)
13. Lista publicațiilor științifice ce țin de rezultatele obținute în cadrul proiectului (conform anexei nr.2)
14. Participări la manifestări științifice naționale/internaționale (conform anexei nr.3)

1. Scopul și obiectivele propuse spre realizare în cadrul proiectului (până la 1 pagină).

Obiectivul principal al proiectului este proiectarea și elaborarea elementului de memorie cu comutare completă, bazat pe efectul de valvă de spin.

Conform acestui obiectiv principal, obiectivele orientate spre realizarea proiectului sunt următoarele: obținerea structurilor și studiul experimental profund al efectului de proximitate în structurile stratificate hibride supraconductor/feromagnet, axat pe investigarea împerecherii triplete, a efectului valva de spin tripletă supraconductoare și a efectului de memorie, pe elaborarea dispozitivului de laborator - elementului de memorie cu comutare completă, bazat pe efectul valva de spin tripletă.

Sarcinile pe perioada de raportare sunt: Reglarea și optimizarea tehnologiei de vid pentru depunerea heterostructurilor de tip S/F cu efectul de valva de spin. Depunerea mai multor seturi de structuri de valva de spin de tip F1/S/F1/F2/AF și caracterizarea acestora pentru optimizarea procesului tehnologic.

Sarcinile sunt: Depunerea de heterostructuri optimizate cu efectul de valva de spin de tip F1/S/F1/F2/AF, demonstrarea posibilității de elaborarea dispozitivului de laborator - elementului de memorie cu comutare completă, bazat pe efectul valva de spin tripletă

2. Rezultatele științifice obținute în cadrul proiectului.

Ajustarea tehnologiei de obținerea nanostraturilor cu proprietăți avansate pentru spintronică sensibilă de spin supraconductibila

INTRODUCERE

Heterostructurile superconductor-feromagnetic (SC-FM) stratificate la nivel de nano-scară oferă o fizică bogată la interfețele dintre straturi [1]. Mai mult decât atât, fizica dispozitivelor poate fi dezvoltată pe baza efectelor date, iar spintronica superconductoare poate fi dezvoltată pe baza proprietăților fizice intrinseci ale structurilor S-F [2]. Lucrările au fost directate spre realizarea valvei de spin superconductoare (comutator pe baza de spin), componenta de bază a electronicii sensibile de spin cu un potențial ridicat. Miezul valvei de spin cuprinde două nano-straturi feromagnetice separate și un strat subțire superconductor. Mai departe va fi explicat procesul de pregătire a probelor. Eșantioanele au fost fabricate pe baza binecunoscutul supraconductor niobiu, Co pur și feromagnetul diluat $\text{Cu}_{41}\text{Ni}_{59}$ și CoO_x în calitate de antiferromagnet.

ELABORAREA TEHNOLOGIEI DE depunerea nanostructurilor stratificate in vid pentru fabricarea structurilor de valva de spin ȘI CARACTERIZAREA lor.

Pregătirea probelor: Probele au fost crescute utilizând o instalație de depunere Leybold Z-400 în principal la temperatura camerei și atmosferă de argon (puritate 99,999%, presiune de operare 8×10^{-3} mbar). O presiune reziduală în camera de pulverizare înainte de depunere a fost de aproximativ 2×10^{-6} mbar. Substraturile pentru depunerea peliculei (cu dimensiunile de $2,5 \times 5 \text{ mm}^2$) au fost tăiate dintr-o placă de siliciu comercial cu orientarea suprafeței de (111). Pentru prepararea structurilor au fost utilizate în total patru ținte de pulverizare: niobiu cu puritate 99,99%, siliciu (99,999%), aliaj de cobalt (99,95%) și cupru (40%) - nichel (60%).

Patru probe pentru măsurători au fost fabricate într-o singură etapă. În primul rând, a fost depus un strat de tampon de siliciu pentru a pregăti suprafața cu grad de curățire înalt pentru depunerea straturilor ulterioare. Apoi, stratul de Co metallic a fost depus și, în continuare, gazul oxigen reactiv a fost amestecat cu argon ($\text{Ar}:\text{O}_2 = 5:1$) pentru formarea și depunerea stratului de CoO_x . Ulterior, aliajul feromagnetic de $\text{Cu}_{41}\text{Ni}_{59}$ a fost crescut la 200°C la o viteză de 3 nm/sec . O compoziție de aliajul feromagnetic de $\text{Cu}_{41}\text{Ni}_{59}$ a fost depusa prin utilizarea pulverizării cu magnetron RF. Alegerea acestei compoziției a fost discutată detaliat în lucrările noastre anterioare [3]. Ținta aliajului feromagnetic a fost poziționată deasupra substratului I și datorită gradientului natural al pulverizării au fost obținute patru probe cu grosimi diferite ale filmelor de $\text{Cu}_{41}\text{Ni}_{59}$ depuse în aceleași condiții (vezi Fig 1a). Filmul din aliaj feromagnetic de pe substratul I este cel mai gros, iar stratul de $\text{Cu}_{41}\text{Ni}_{59}$ pe substratul IV este cu grosimea cea mai mică.

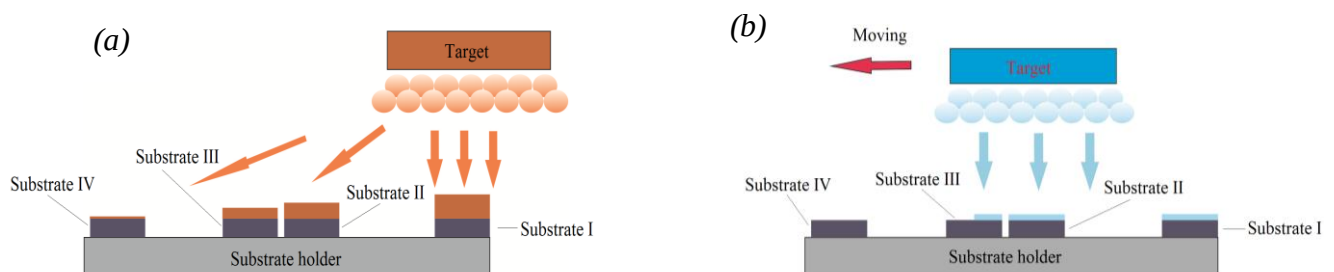


Fig. 1. Etapele de fabricare ale heterostructurilor: (a) aplicarea tehnologiei de gradient pentru depunerea unui set de patru probe cu grosimea variabilă a filmului; (b) depunerea stratului de grosime constantă: țintă se deplasează monoton pe deasupra subsstratelor în timpul depunerii.

Strat de niobiu supraconductor plat a fost depus, folosind mișcarea monotonă a țintei de pulverizare de-a lungul de substraturi (vazi fig. 1b). În acest mod, viteza de depunere a filmului de Nb a fost de aproximativ 1,3nm/sec, iar grosimea stratului a fost obținută constantă și egală cu $d(\text{Nb}) \approx 12\text{nm}$. Ultimul strat funcțional al structurii a fost al doilea film din aliaj feromagnetic de $\text{Cu}_{41}\text{Ni}_{59}$, obținut prin aceeași procedură ca și pentru stratul anterior de $\text{Cu}_{41}\text{Ni}_{59}$. În cele din urmă, structura a fost acoperită cu 12-14nm de siliciu pentru a proteja împotriva oxidării în condiții ambientale.

Fig. 2a prezintă o schiță care explică procedura obținerii a probelor. Microscopia cu transmisie electronică transversală (TEM), combinată cu rezultatele spectrometriei de imprastiere retură lui Rutherford (RBS), a fost utilizată pentru a evalua grosimea straturilor. Rezultatele sunt prezentate în Tabelul 1, enumerarea substraturilor și eșantioanelor este aceeași.

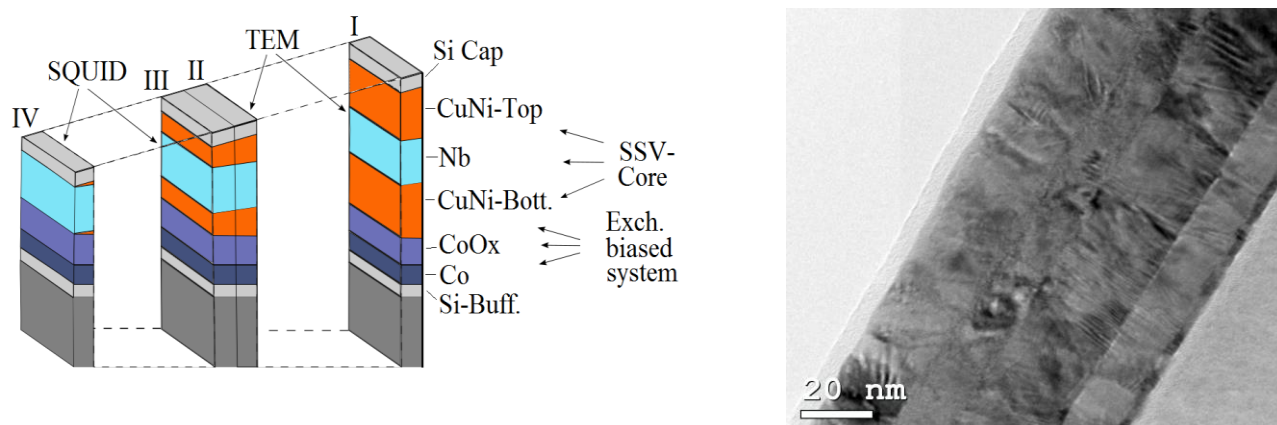


Fig. 2. (a) metoda obținerii probelor; (b) imaginea TEM pentru secțiunea transversal pentru proba II

Tabelul 1. Grosimea straturilor depuse pe substraturi I-IV.

Sample number	Co (nm)	CoO _x (nm)	CuNi-Bottom (nm)	Nb (nm)	CuNi-Top (nm)
I	4	14	25	13	22
II	5	19	9	12	10
III	5	19	8	12	9
IV	4	14	≤1	11.5	≤1

Caracterizare: Imaginea TEM prezentată în Fig. 2b arată că proba demonstrează o structură policristalină a tuturor straturilor. Dimensiunea granulelor cristaline poate fi estimată ca fiind comparabilă cu grosimea straturilor. Pentru stratul CoO_x este de ordinul 14nm.

O imagine TEM de înaltă rezoluție (mărire de $\times 60.000$) a fost luată pentru a analiza direcțiile preferate de creștere cristalografică a filmelor și pentru a identifica fazele cristalografice ale cobaltului și oxidului de cobalt. Fig. 3 prezintă imaginea obținută alături de liniile albe indicând interfețele dintre straturi. La punctele etichetate de la 1 la 11 ca distanțele de rețea cristalină ale a două planuri vizibile diferite și unghiul format de ambele au fost măsurate și prezentate în Tabelul 2.

Tabelul 2. Distanța între straturi de rețea cristalină și unghiurile pentru a identifica fazele cristalografice ale straturilor. Numărul rândurilor de tabel corespunde etichetelor numerice ale spoturilor din Fig.3, din care au fost obținute datele.

Spot #	1 st lattice			2 nd lattice			Angle btw. 1 st and 2 nd	
	Plane	Spacing (exp.)	Spacing (lit.)	Plane	Spacing (exp.)	Spacing (lit.)	Exp.	Lit.
1	Si {111}	3.16*	3.134	Si {111}	3.16*	3.134	70°	70.5°
2	β -Co {111}	2.04	2.051	β -Co {111}	2.03	2.051	70°	70.5°
3	β -Co {111}	2.04	2.051	β -Co {111}	2.04	2.051	70°	70.5°
4	β -Co {111}	2.03	2.051	β -Co {111}	2.02	2.051	71°	70.5°
5	CoO {200}	2.16	2.125	CoO {111}	2.46	2.453	54°	54.7°
6	CoO {111}	2.44	2.453	CoO {111}	2.45	2.453	71°	70.5°
7	CoO {200}	2.12	2.125	CoO {111}	2.43	2.453	55°	54.7°
8	CoO {111}	2.44	2.453	CoO {111}	2.43	2.453	71°	70.5°
9	CoO {200}	2.13	2.125	CoO {111}	2.43	2.453	55°	54.7°
10	Cu ₄₁ Ni ₅₉ {200}	1.80	1.780	Cu ₄₁ Ni ₅₉ {111}	2.03	2.055	54°	54.7°
11	Cu ₄₁ Ni ₅₉ {111}	2.03	2.055	Cu ₄₁ Ni ₅₉ {111}	2.03	2.055	71°	70.5°

Substratul Si are o suprafață cu orientare de {111}. Astfel, datele obținute pentru cele două planuri {111} vizibile au fost normalizate la valoarea teoretică de 3.134Å, rezultând o corecție de $\approx 0.8\%$ față de scala imaginii, atât în direcția orizontală cât și verticală.

După calibrarea de substratul Si a fost executată analiza de fază în stratul de cobalt. În principiu, atât faza α hexagonală închisă (hcp), cât și faza β c-cubică (fcc) sunt existente în materialele volumetrice. De exemplu, Renard și Nihoul au raportat că straturile Co subțiri sunt de structură hcp, Rath și colab. [4] a constatat că faza obținută trebuie să depindă de grosimea stratului și de stratul crescut deasupra (examinat în sandviciuri Cu/Co/Cu). În lucrarea din urmă, este raportat că Co crește mai întâi în fcc fază, și apoi să manifesta o schimbare cauzată de defecțiunea de stivuire a structurii hcp. A fost aratat că faza inițială de fcc poate fi stabilizată printr-un strat de acoperire de cupru. În timp ce probele noastre nu sunt depuse pe substratul de Cu{111} și nu sunt acoperite cu un strat de Cu, substratul Si{111} și stratul CoO (se discută în detaliu în paragraful următor) sunt, de asemenea, în esență, de structură fcc. Diferența principală constă în nepotrivirea rețelelor cristaline dintre Si sau CoO și rețea în Co, care este destul de mare în comparație cu cazul de Cu, iar stratul tampon de Si este amorf în apropierea stratului de Co. Cu toate acestea, din datele obținute la punctele 2, 3 și 4 au fost obținute distanțe și unghiuri de rețea care se potrivesc valorilor pentru β -Co, în timp ce sunt incompatibile cu α -Co. Stratul Co crește cu planul {111} paralel cu planul substratului, doar punctul 2 prezintă o ușoară înclinare, care poate fi explicată printr-o ușoară variație a grosimii stratului de tampon de Si în acea zonă.

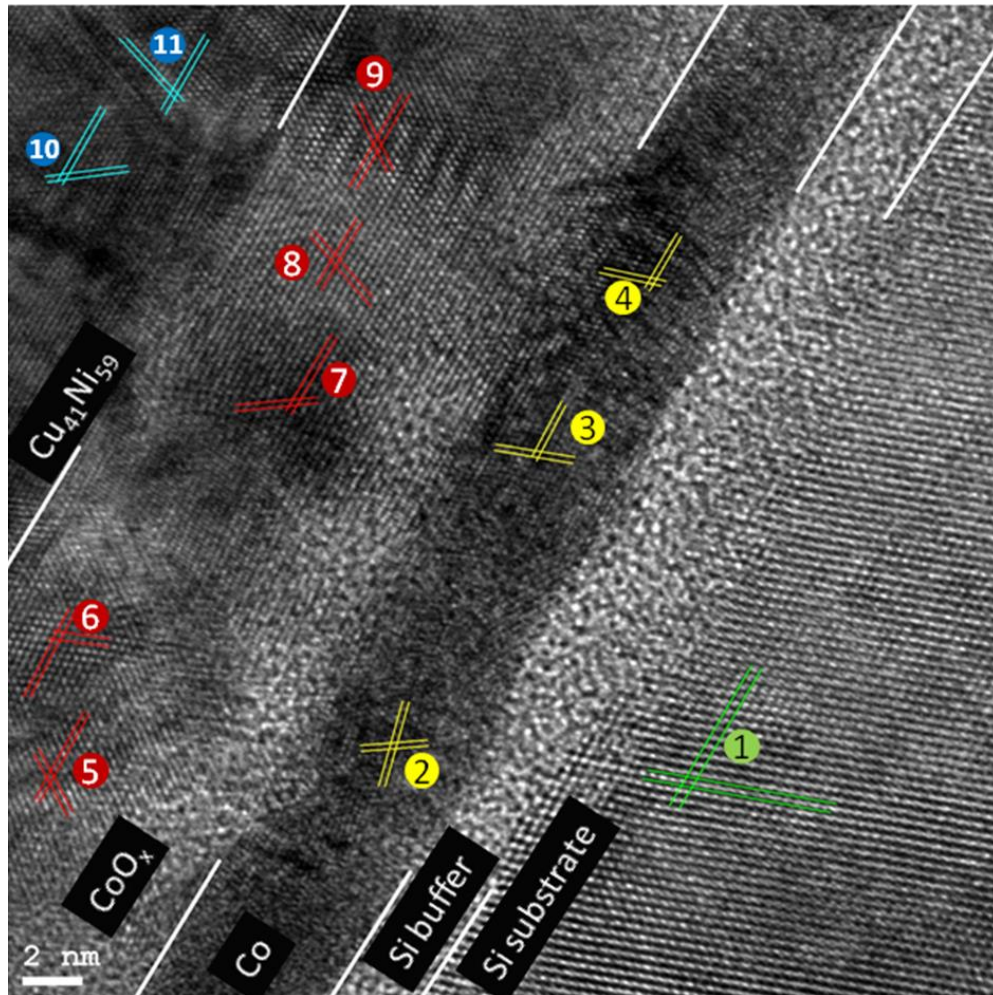


Fig. 3. Imaginea TEM de înaltă rezoluție a secțiunii transversale a probei. Linile albe ilustrează interfețele dintre straturi. Petele colorate denotă zonele în care au fost măsurate unghiurile interplanare (reprezentate prin linii duble de aceeași culoare) pentru a identifica fazele cristalografice ale materialelor stratului.

Există practic două tipuri de oxizi de cobalt diferiți stabili la temperaturi scăzute, CoO și Co_3O_4 . Deși ambele sunt antiferomagnetice, se consideră că efectul de interacțiune de schimbare între Co_3O_4 și un feromagnet nu este proprietatea intrinsecă pentru Co_3O_4 , ci rezultă din formarea unui strat de CoO la interfață datorită difuziei de oxigen la feromagnet [5]. Era investigat prin difracție electronică în secțiune transversală [6] pentru probele până de oxid de cobalt depuse pe siliciu (preparate în același mod ca și probele din această lucrare) și era constatat că oxidul de cobalt este Co_3O_4 , totuși prezența CoO nu a putut fi exclusă în totalitate. Din datele obținute la punctele de măsurare de la 5 la 9, concluzionăm că stratul de oxid de cobalt obținut în acest caz este CoO . Nu erau găsite pentru nici o probă datele caracteristice pentru Co_3O_4 . Acest lucru ar putea fi explicat prin faptul că stratul nostru de oxid de cobalt este destul de subțire și, în plus, este împrăștiat între două straturi feromagnetice, care ambele pot extrage oxigenul din stratul de oxid de cobalt. În cele din urmă, din datele obținute la punctele de măsurare 10 și 11, a fost găsit că $\text{Cu}_{41}\text{Ni}_{59}$ să crească în direcția $\{111\}$ paralelă cu planul, așa cum era menționat în lucrările anterioare [3, 6].

INTRODUCERE

Heterostructurile superconductor-feromagnetic (SC-FM) stratificate la nivel de nano-scară oferă o fizică bogată la interfețele dintre straturi [7]. Mai mult decât atât, fizica dispozitivelor poate fi dezvoltată pe baza efectelor date, iar spintronica superconductoare poate fi dezvoltată pe baza proprietăților fizice intrinseci ale structurilor S-F [8]. Lucrările au fost directate spre realizarea valvei de spin superconductoare (comutator pe baza de spin), componenta de bază a electronicii sensibile de spin cu un potențial ridicat. Miezul valvei de spin cuprinde două nano-straturi feromagnetice separate și un strat subțire superconductor. Mai departe va fi explicat procesul de pregătire a probelor. Eșantioanele au fost fabricate pe baza binecunoscutul supraconductor niobiu, Co pur și feromagnetul diluat $\text{Cu}_{41}\text{Ni}_{59}$ și CoO_x în calitate de antiferromagnet

Obținerea nanostructurilor stratificate de tip SFS în vid pentru fabricarea structurilor de valva de spin și caracterizarea lor.

Probele au fost obținute folosind o instalație, de depunere de tip Leybold Z-400 la temperatura camerei în atmosferă de argon (puritate 99,999%, presiune de operare 8×10^{-3} mbar). Presiunea reziduală în camera de depunere înainte de depunere era de aproximativ 2×10^{-6} mbar. Substraturile pentru depunerea peliculei (cu dimensiunile de $25 \times 25 \text{ mm}^2$) au fost tăiate dintr-o placă de siliciu comercială cu orientarea cristalografică (111). Pentru prepararea structurilor au fost utilizate în total două ținte pe baza de niobiu cu puritate de 99,99% și pe baza de cobalt cu puritatea de 99,95%.

Pentru studiu au fost pregătite probe de tip SFS cu următoarele parametrii: Nb(150 nm)/Co(10 nm)/Nb(150 nm) - SFS#18 și Nb(150 nm)/Co(15 nm)/Nb(150 nm) – SFS#19. Fiecare tip de probă SFS a fost pregătită într-o singură etapă fără devacuimizarea al camerei de depunerea probelor. Viteză de creștere Nb constituia 3 nm/sec, și viteză de creștere a Co era de 0,1 nm/sec.

În plus, au fost pregătite straturi de test din niobiu pur (grosime mai mare de 200 nm) pentru calibrarea ratei de corodarea probei cu ioni reactivi. Tehnologia de corodarea cu ioni ale probelor originale și de testare diferă doar cu o etapă suplimentară pentru prelucrarea cu plasmă de Ar a stratului intermediar de cobalt. Pentru formarea suprafeței de acoperire cu pattern ale filmelor de testare de Nb a fost folosită tehnologia standard de obținerea de fotorezist (S1813) cu expozitia sub radiația UV și o mască respectiva.

Pentru probele de test de Nb a fost utilizată metoda Cryo RIE Albanova (KTH, Stockholm, Suedia). Principalele detalii tehnologiei date sunt următoarele:

- amestec de gaz $\text{CH}_4:\text{O}_2=20:1$ (CH_4 - 40,0 de unitati și O_2 - 2.0 de unitati);
- presiunea gazului în timpul procesului - 80,0 mTorr;
- generator RF - 55 W;
- generator de plasmă cuplata inductiv: 200 W;
- Temperatura - 30°C .

După un minut de tratare probele de test au fost curățate în acetonă utilizând baie ultrasonică la temperatura camerei timp de 3 minute și au fost uscate în flux de azot pur. Treapta create pe proba de test de Nb a fost măsurată cu ajutorul de profilmetru standard, când consola se deplasează de la o parte mai groasă de niobiu la cea mai subțire.

Diagrama (Fig. 4) prezintă un rezultat mediu (măsurat la 6 și mai multe diferite puncte) pentru probele de test de Nb supus corodării ionice pentru două plachete utilizate ca suport pentru probă – din sapphire dublu lustruit și din silica topită pentru două cazuri: cu pasta termica (pentru disiparea mai bună a căldurii) și fără. Stratul intermediar de Co a supus corodării cu ioni în

atmosferă de Ar pur la temperatura camerei fără răcire forțată utilizând azot lichid. Un strat subțire de pasta termica a fost depus între fundul probei și substratul probei pentru a preveni încălzirea puternică a fotorezistului în timpul procesului de corodare. Cum putem vedea din Fig. 4 – pasta termica nu afectează în mod semnificativ viteza de corodarea a filmului Nb, de aceea ea era folosită numai la începutul procesului.

Detalii principalele detalii ale corodării ionice pentru strat intermediar sunt prezentate mai jos:

- gaz - Ar pur;
- presiunea gazului în timpul procesului: 7,0 mTorr;
- generator RF - 300 W;
- timp de corodare - 5 minute;

După cum era menționat, baia ultrasonică era folosită pentru a îndepărtarea fotorezistului neexpus. În cazul procesului de întărire a fotorezistului, probele au fost curățate în plasma de oxigen timp de 5 minute cu puterea RF de 100W

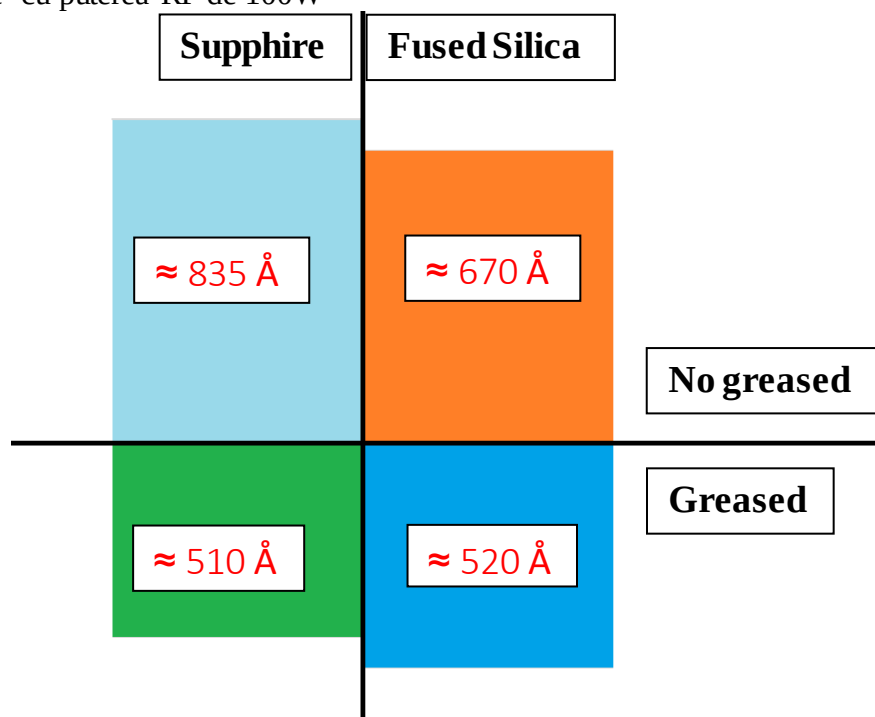


Fig. 4. Diagrama reprezintă un rezultat mediu al corodării chimice a straturilor de test de Nb timp de 1 minut. O linie verticală îngroșată separă rezultatele pentru diferite substraturi (utilizate ca suporturi de probă), cea orizontală - pentru două cazuri.

Mai mult, a fost aplicat un proces de corodare mai precis folosind instalația focusată cu fascicul de ioni (FIB). Probele erau fixate pe un suport în formă de pană (45°), care permite plasarea structurii atât perpendicular pe FIB, cât și paralel pentru corodarea încrucișată ulterioară și crearea unei joncțiuni SFS punctuale (unidimensionale). FIB a fost combinată cu tunul de electroni din aceeași cameră, ceea ce a făcut posibilă orientarea probei fără distrugerea semnificativă sau deteriorarea structurii (vezi Fig. 5)

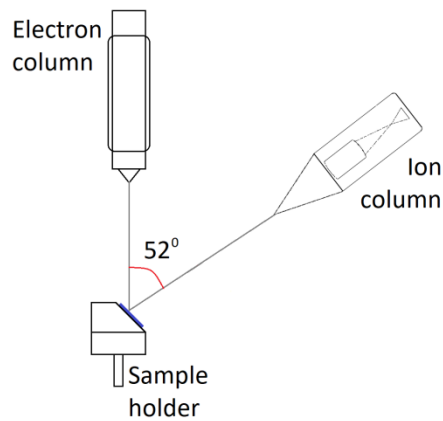


Fig. 5. Schița reprezintă sistemul FEI Nova 200 Dual Beam. Tunul electronic este îndreptat normal spre linia de orizont, în timp ce tunul cu ioni este înclinat de peste 52° de tunul de electroni.

Fig. 6a prezintă structura probei SFS#18 după tratament precis cu folosirea instalatiei FIB (corodarea perpendicular cu FIB). Fig.6b prezinta model utilizat pentru acest proces. Detalii principale sunt prezentate mai jos:

- curentul - 50pA;
- tensiunea - 30 kV.

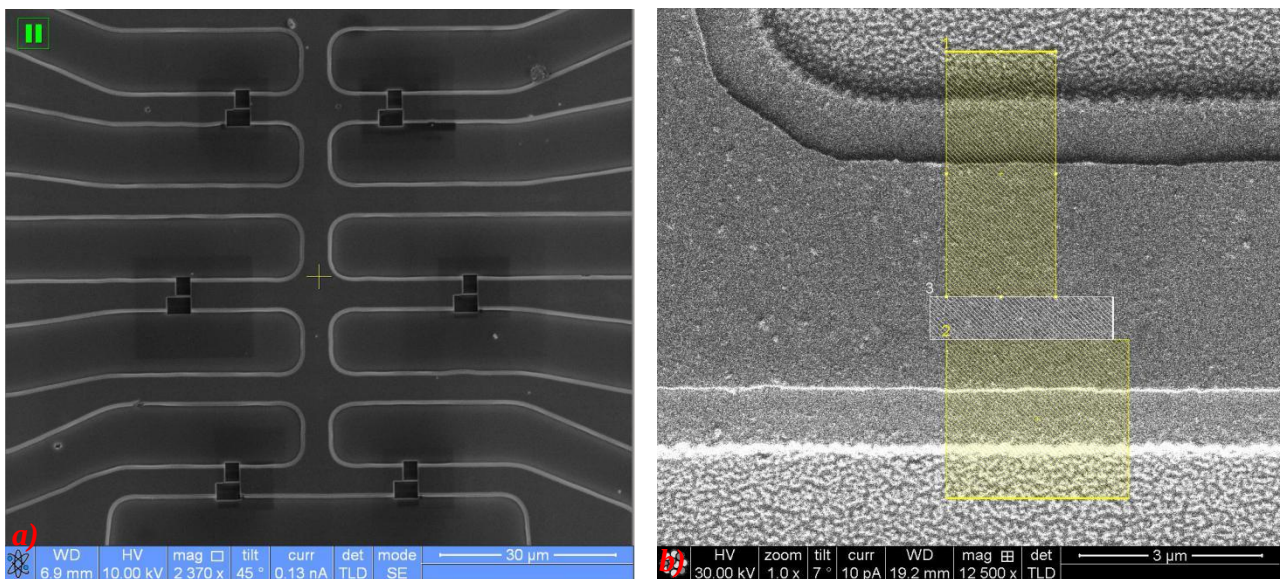


Fig. 6. a) - Structura probei SFS#18 după tratament precis FIB (corodarea perpendiculară FIB). b) - modelul utilizat pentru acest proces, dreptunghiurile galbene selectează zonele care trebuie să fie eliminate, dreptunghiul alb marchează zona care trebuie să fie salvată pentru corodarea încrucișată ulterioară.

Fig. 7 prezintă un contact de punctiform SFS creat pe baza probei SFS#18. După cum se poate vedea în Fig. 7a) - toate straturile componente ale structurii nu au fost deteriorate de tratamentele anterioare și sunt clar vizibile. Fig. 7b) - prezintă rezultatul procesului de corodare punctuală pentru crearea contactului SFS și, după cum se poate vedea în Fig. 7c) - găurile sunt străpunse cu muchii netede și exacte și fără posibilități de scurtcircuitare. Lățimea contactului reprezentat este de aproximativ 300 nm, lungimea fiind de 1 µm.

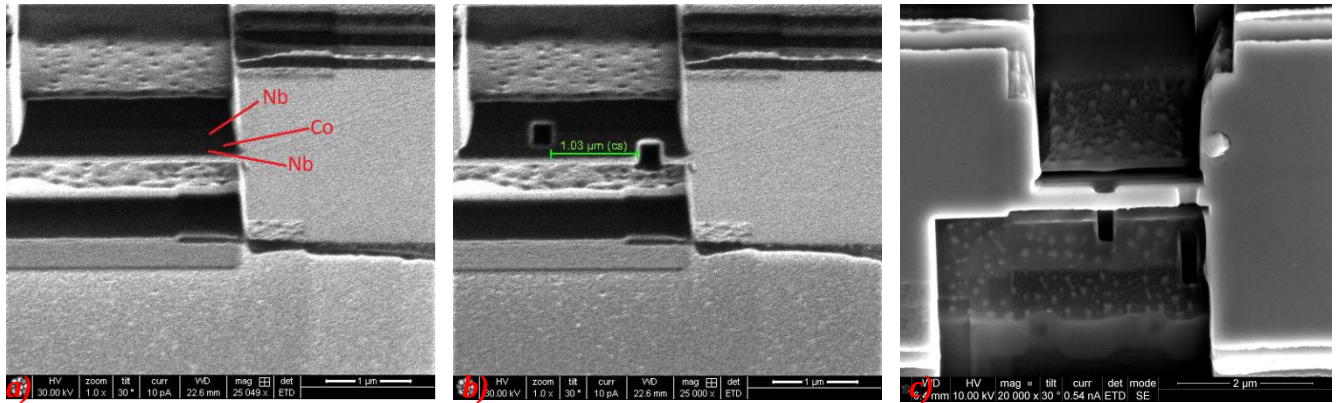


Fig. 7. Imaginea mărită a contactului punctiform SFS creat pe proba SFS#18. a) - structura înainte de corodarea încrucișată, b) - după corodarea, vedere laterală (înclinată de 30° față de linia orizontului), c) - vedere de sus, perpendiculară cu planul suprafeței probei.

Probele au fost măsurate utilizând schema standard de patru puncte pentru măsurătorile de rezistivitate, contactele fiind aplicate utilizând o mașină de lipire cu ultrasunete cu microscop. Măsurătorile au fost efectuate într-un criostat cu ciclu închis cu sistemul de condensare He^3/He^4 . Probele au fost răcite în modul ZFC pentru a preveni formarea de vârfuri în contactul punctiform SFS. Măsurătorile de test au fost efectuate la temperaturi sub 4 K; au fost testate oscilațiile curentilor critice ca o funcție a câmpului magnetic exterior paralel a suprafeței probelor.

Așa cum poate fi observat în Fig. 8 și 9 - comportamentul oscilatoriu clar al curentului critic supraconductor are loc la temperaturi în jur de 0,5 K, în timp ce oscilațiile nu sunt observate la temperaturi de 3,95 K. Contactele SFS obținute la proba SFS#19 care conțin un strat intermediar de Co mai gros (15 nm) nu manifesta dependențe oscilante, atât la temperaturi ridicate ($T=3,95$ K), cât și la temperaturi scăzute ($T=0,45$ K), Fig.9 reprezintă un grafic pentru cel de-al doilea caz.

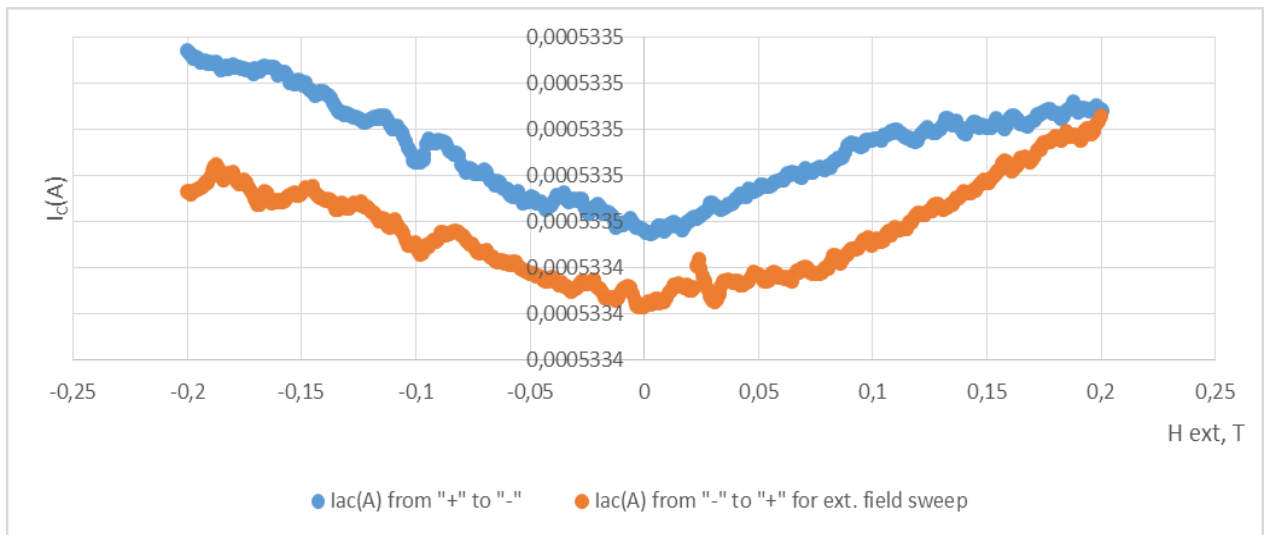


Fig. 8. Curba dependenței curentului critic ca funcție a câmpului magnetic extern pentru proba SFS#18 măsurată la 3,95 K.

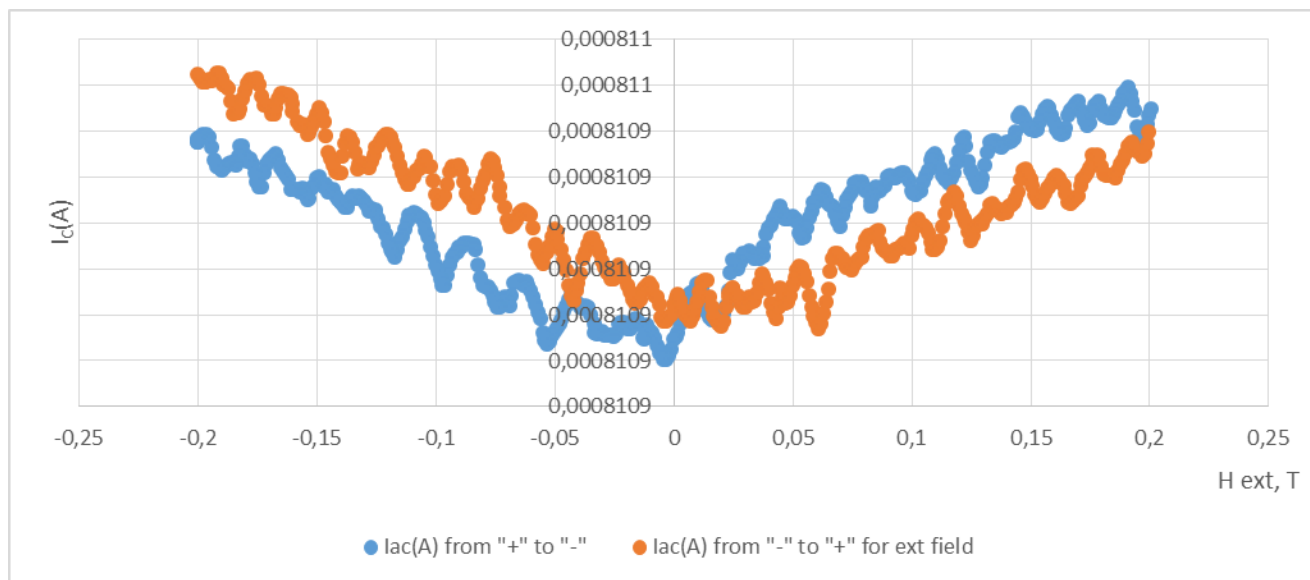


Fig. 9. Curba dependenței curentului critic ca funcția câmpului magnetic extern pentru proba SFS#18 măsurată la 0,45 K. Pe măsură ce temperatura este redusă, apar oscilațiile clare ale curentului critic supraconductor.

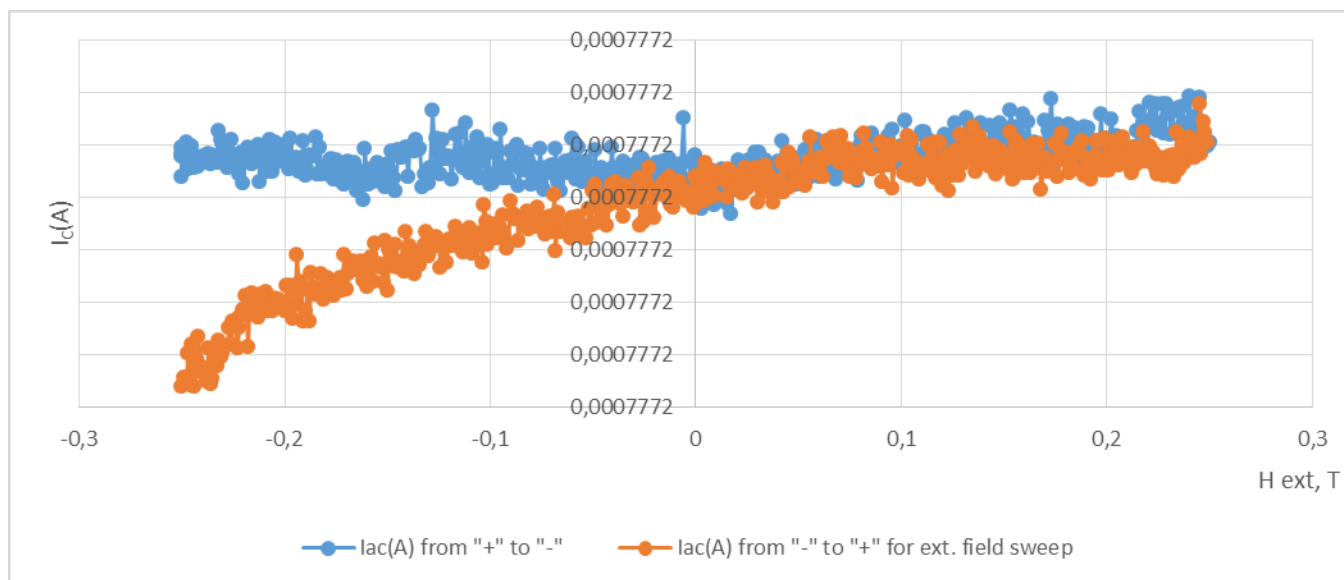


Fig. 10. Curba dependenței curentului critic ca funcție a câmpului magnetic extern pentru contactele SFS obținute pe proba SFS#19 care conține stratul intermediar de Co(15 nm) mai gros, măsurată la 0,45 K. Graficul nu arată comportamentul oscilator al curentului critic supraconductor.

Studiu efectului de valva de spin în nanostructuri stratificate de tip SFS.

Probele au fost crescute utilizând o instalație de depunere Leybold Z-400 la temperatura camerei și în atmosferă de argon (puritate 99,999%, presiune de operare 8×10^{-3} mbar). Presiunea reziduală în camera de pulverizare înainte de depunere era de aproximativ 2×10^{-6} mbar. Substraturile pentru depunerea peliculei (cu dimensiunile $25 \times 25 \text{ mm}^2$) au fost tăiate dintr-o placă de siliciu comercial cu orientarea de (111). Pentru prepararea structurilor s-au folosit în total trei ținte de pulverizare: niobiu ca supraconductor și strat intermediar cu puritate de 99,99%, cobalt cu puritatea de 99,95%

ca peliculă feromagnetică și Si cu puritatea de 99,95% ca strat de pasivare pentru a preveni posibila oxidare a structurii.

Au fost preparate două tipuri de probe pentru experiment: Nb(50)/[Co(1,5)/Nb(8)/Co(2,5)/Nb(8)]/Si-strat de protecție și Nb(1,5)/Nb(8)/Co(2,5)/Nb(8)]/strat de protecție de siliciu. Fiecare tip de probă a fost pregătit într-o singură etapă fără schimbarea de presiune al camerei. Viteza de creștere a Nb constituia 3 nm/sec, iar viteza de creșterea a Co era de 0,1 nm/sec. Ca ultima etapă a procesului de preparare a probei era aplicata metodologia standard de obtinerea probelor de standard cu o latimea de 10mm cu recoacerea ulterioara in atmosfera de Ar. Acest proces a fost descris în detalii în raportul anterior.

Proprietatile electromagnetice probelor au fost măsurate utilizând schema standard de patru contacte. Contactele au fost preparate utilizând o mașină de lipire cu ultrasunete. Măsurătorile au fost efectuate într-un criostat cu ciclu închis cu sistemul de condensare de He^3/He^4 . Probele au fost răcite în modul ZFC pentru a împiedica formarea de cimpul magnetic inghetat în regiunea apropiata a punții.

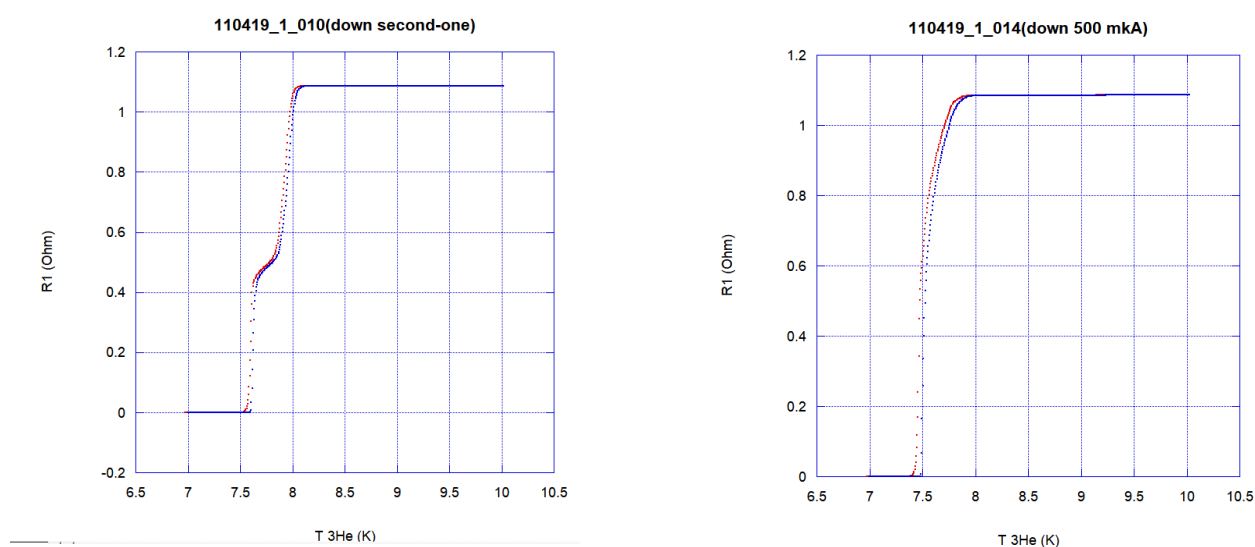


Fig. 11. Măsurarea temperaturii critice în câmpul magnetic zero pentru proba Nb(50)/Co(1,5)/Nb(8)/Co(2,5)/Nb(8)/Si-strat de protecție. Graficul din stânga reprezintă rezultatul pentru curentul aplicat de 20mA și cel drept pentru 500 mA. Puncte roșii – masurate pentru datele obtinute la scaderea temperaturii și cele albastre pentru datele obtinute la creșterea temperaturii.

Comportamentul unei structuri magnetice complicate în contact cu Nb superconductor în câmpul magnetic extern este de interes major din punctual de vedere științific. Si, mai întâi au fost executate masuratori de temperaturile critice superconductoare pentru proba cu o lățimea de 10 mm Nb(50)/[Co(1,5)/Nb(8)/Co(2,5)/Nb(8)]. Masuratorile au fost executate la diferite valori pentru curentul de alimentare probelor. Fig. 8 în stînga reprezintă rezultatul pentru curentul de 20 μA , unde se observa o tranziție în două etape, pe care putem asociază cu efectul superconductivității de domene în niobiu gros (50 nanometri). Pentru a confirma ipoteza data, am reevaluat suplimentar tranziția la temperatură critică crescând curentul de alimentare până la 500 μA (Fig. 11 - dreapta). La 500 μA , tranziția se nivelează și s-a transformat într-o secțiune plată a curbei. Curentul de alimentare pentru măsurarea magnetorezistenței a fost ales de 1 mA pentru toate probele ulterioare.

Două temperaturi au fost alese pentru a măsura rezistivitatea în cimp magnetic: prima este semnificativ mai mare decât T_c , pentru a confirma existența efectului unui comportament variabil

al rezistenței structurii magnetice într-un câmp magnetic extern aplicat paralel cu filmele eșantionului. A doua temperatură a fost selectată la un punct corespunzător unei valori de 10% din tranziția supraconductoare măsurată în timp ce temperatura era în creștere și se aplică curent de alimentare de 1 mA.

Fig. 12 prezintă rezultatele măsurătorilor de rezistivitate ale probei cu o lățime de 10 mkm ca funcție a câmpului magnetic extern aplicat paralel cu straturile structurii. Primul caz (graficul din stânga) reprezintă dependența măsurată în starea normală a structurii (peste T_c), oin al doilea caz (graficul din dreapta) datele au fost obținute la temperatura de 7,8 K. Graficele arată corelații clare ale rezistivității, dar nu expresive, ca o funcție a câmpului magnetic extern și nici un interes practic nu reprezintă

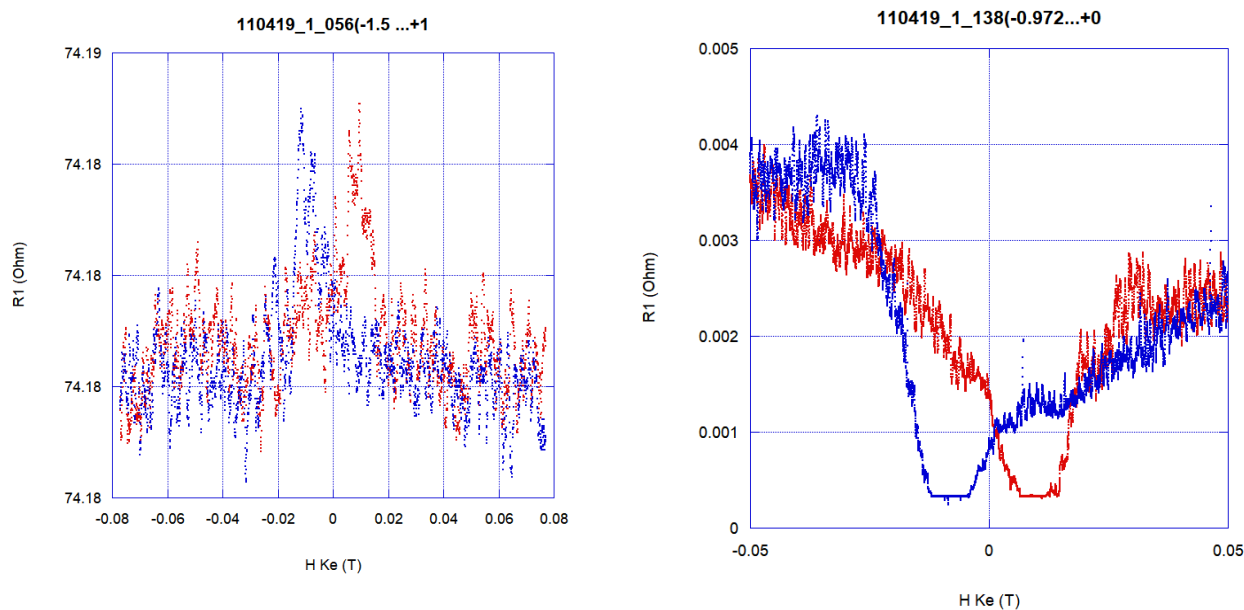


Fig. 12. Dependența rezistenței de câmpul magnetic extern aplicat pentru două cazuri: deasupra temperaturii critice (imaginea din stânga) și pentru datele măsurate la 7,8 K (dreapta) pentru probele cu o latimea de 10 mkm. Punctele roșii reprezintă evoluția câmpului magnetic din câmpurile negative, până la cele pozitive, albastre - invers.

Pentru a mări intensitatea efectului a fost executata reducerea latimii probei de două ori și - a fost pregătită proba de 4÷5mkm în lățime. Datele măsurătorilor de temperatură critice sunt similare cu primul caz (Fig. 11), prin urmare nu este prezentata aici. Magnetorezistența nu s-a schimbat semnificativ în starea normală a probei (Fig. 13, în stânga), dar și-a schimbat forma la temperatura mai scăzută (Fig. 13, graficul drept). Un maxim evident de rezistență a apărut lângă câmpul zero din ambele partmi. Există, de asemenea, maxime vizibile ale rezistivității în apropierea de 200 și, respective, la -200 Oe, care nu sunt reprezentate semnificativ în cazul de proba cu o lățime de 10 mkm. Apariția acestor maxime în comportamentul de magnetorezistență poate fi explicata prin apariția componentei triplete impare în interiorul probei. Dar dacă acest efect este legat de dimensiunea probei prezența defectelor sau a eterogenității necesită un studiu detaliat.

Așa cum era menționat mai sus, erau pregătite probe care conțineau o perioadă "triplă" a componentei feromagnetice a structurii: Nb(50)/3X[Co(1,5)/Nb(8)/Nb(8)]/strat de protecție. Fig. 14. reprezintă rezultatele măsurării temperaturii critice în dependent de cimpul magnetic pentru doua probe de lățime de 10 mkm. Dependența de tranziție $R(T)$ arată un comportament clar cu

multe trepte a curbei. Era presupus, ca aceasta comportament are corelație între numărul de trepte cu numărul de repetări ale componentei feromagnetice

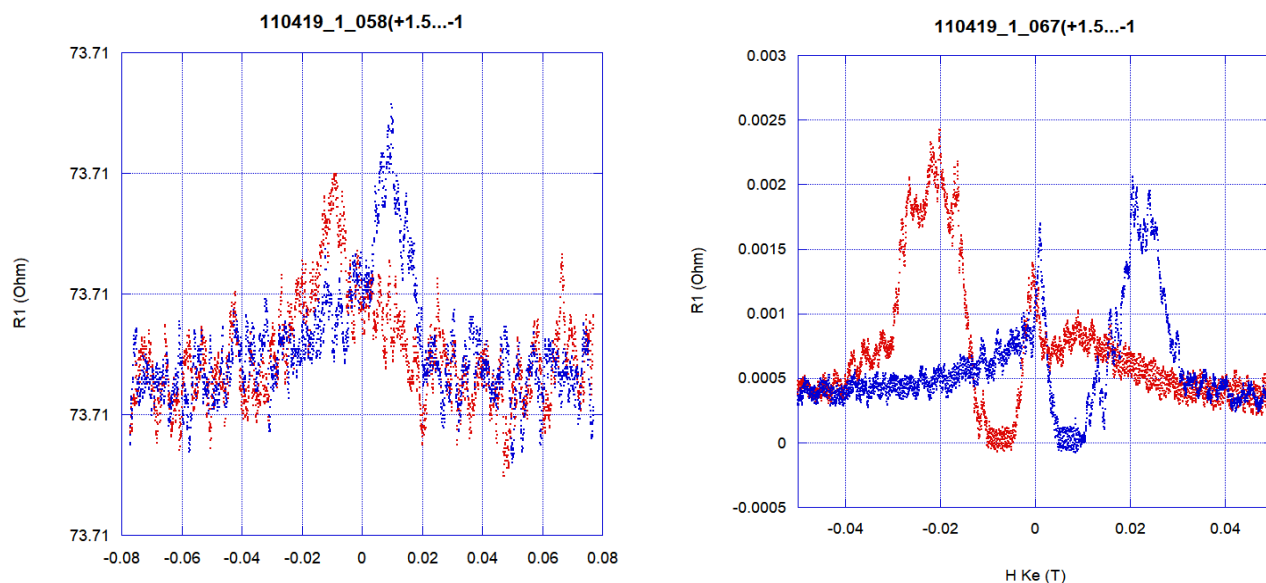


Fig. 13. Dependența de rezistență a probei de câmpul magnetic extern aplicat pentru două cazuri: mai sus de temperatură critică (imaginea din stânga) și măsurată la 7,8 K (dreapta) pentru proba cu o latimea de 5 mkm. Punctele albastre reprezintă cursa câmpului din câmpurile negative, până la cele pozitive, roșii - invers.

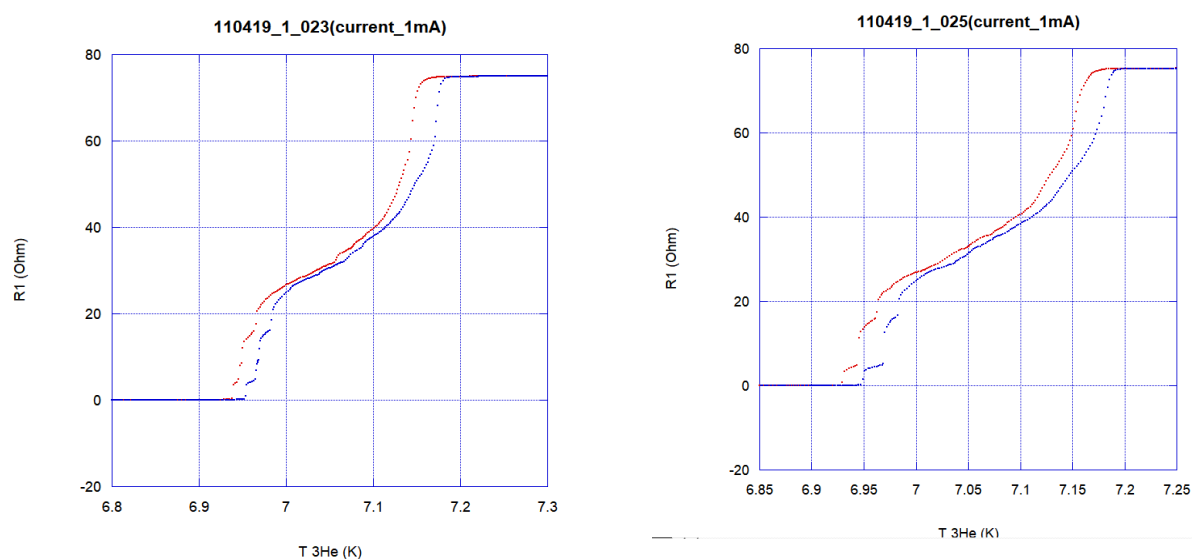


Fig.14. Măsurarea dependenței temperaturii critice în câmpul magnetic zero pentru proba de Nb(50)/3X[Co(1,5)/Nb(8)/Co(2,5)/Nb(8)]/Si-strat de protecție. Imaginea din dreapta reprezintă rezultatele pentru al doilea proba din această serie pregătită utilizând aceeași rețetă. Puncte roșii - maturarea temperaturii în la recirea și cea albastră pentru cazul de incalzirea.

Fig. 15 prezintă comportamentul rezistivității în dependent de cimpul magnetic a structurii care conține perioada tripla a componentei feromagnetice, măsurată la temperatura de stare normală (graficul stâng) și la temperatura apropiată de Tc (dreapta). Cazul din in Fig. 15 la Tc reprezintă comportamentul complex al rezistenței ca funcție a câmpului magnetic extern aplicat. Graficul

arată clar așa-numitele umeri, unde rezistivitatea este destul de stabilă și variază ușor în timp ce se schimbă câmpul magnetic.

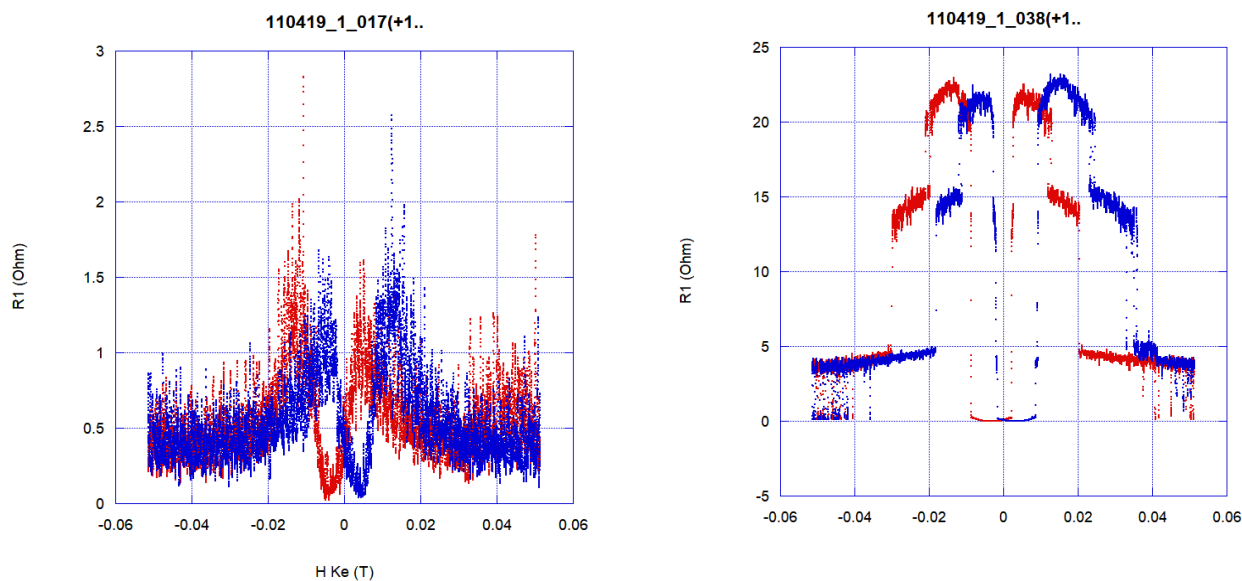
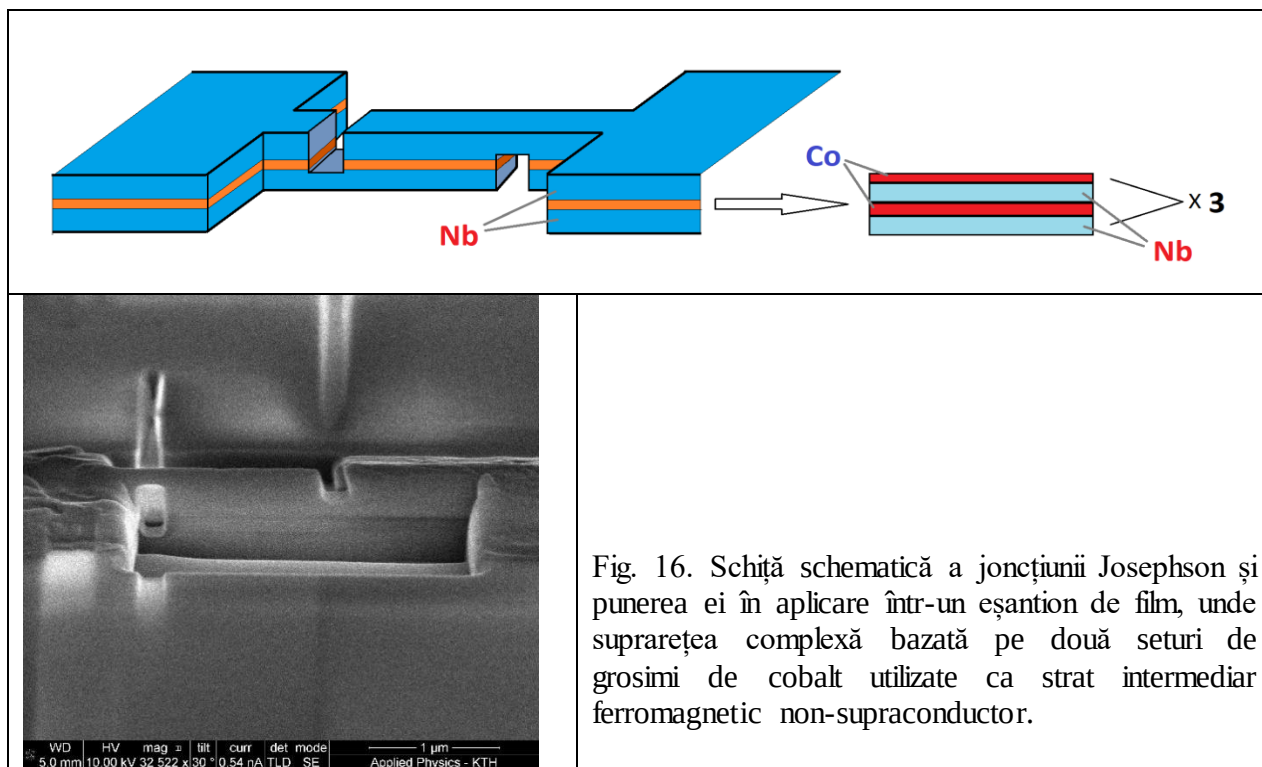


Fig. 15. Dependența rezistenței de câmpul magnetic extern aplicat pentru două cazuri: deasupra temperaturii critice (imaginea din stânga) și măsurată la 6.95K (dreapta) pentru o proba de o lățime de 10 mkm. Punctele roșii reprezintă evoluția câmpului de la câmpurile pozitive până la cele negative, cele albastre - invers.

Obținerea altor structuri supraconductoare pentru elemente de memorie

Dispozitivele digitale supraconductoare atrag din ce în ce mai multă atenție datorită eficienței și performanței lor unice, precum și compatibilității cu o serie de computere cuantice dezvoltate. Grupul nostru propune să folosească ca elemente joncțiunile super-conductoare ale lui Josephson bazate pe filme de niobiu în calitate de superconductor și supraretea, care constă din niobiu cu grosimea subțire (în starea metalică) și cobalt pur ferromagnetic cu două seturi de câmpuri coercitive pentru crearea unei stări magnetice paralele și antiparalele în structură.

Fig. 16 prezintă o reprezentare schematică a joncțiunii Josephson și a imaginii SEM a eșantionului S-SL3 (F1S2F2S2) -F1S # 1 / B6 obținut folosind o cale plană din structura de film a compoziției următoare: substrat de safir/Nb(150 nm)/3X[Co(1,5 nm)/Nb(8 nm)/Co(2,5nm)/Nb(8nm)]/Co(1,5nm)/Nb(250nm). Un set diferit de grosimi pentru cobaltul ferromagnetic oferă valori diferite ale câmpurilor coercitive, ceea ce face posibilă realizarea cazurilor unei stări magnetice paralele și antiparalele ale magnetizării structurii.



Probele au fost pregătite la Institutul de Nanotehnologii din Republica Moldova cu ajutorul unui sistem de depunerea cu magnetron. Niobiul pur a fost utilizat ca electrod supraconductor, stratul ferromagnetic fiind realizat prin creșterea alternativă a straturilor subțiri de cobalt pur (1,5 și 2,5 nm) și niobiu (8 nm). Pentru a crea o joncțiune lui Josephson, a fost aplicată o metodă de fabricare a joncțiunilor plane folosind o sursă a unui fascicul ionic focalizat, ale cărui detalii principale sunt menționate mai jos.

O structură plană lui Josephson a fost pregătită la Institutul de fizică din Stockholm. Ca o primă etapă, corodarea aproximativă a fost efectuată cu magnetronul într-un mediu cu gaz-plasmă (argon) printr-o mască fotolitografică. Apoi, eșantionul a fost plasat într-o cameră de vid înalt echipată cu o sursă a unui fascicul ionic focalizat pentru prelucrarea mai precisă a structurilor.

Studiul proprietăților electrofizice ale structurii obținute a fost realizat folosind metoda de patru puncte pentru conectarea unei surse de curent și a unui voltmetru.

Fig. 17 prezintă rezultatele măsurătorilor de rezistență ca funcție a unui câmp magnetic extern în domeniul de la -2500 la + 2500 Oe. Fig. 18 reprezintă graficele, inclusive și marile oscilații ale valorilor curentilor critici, în funcție de câmpul magnetic extern direcționat de-a lungul straturilor, și transversal fluxului de curent. Măsurătorile s-au făcut la temperaturi mai mici de 0,5 K.

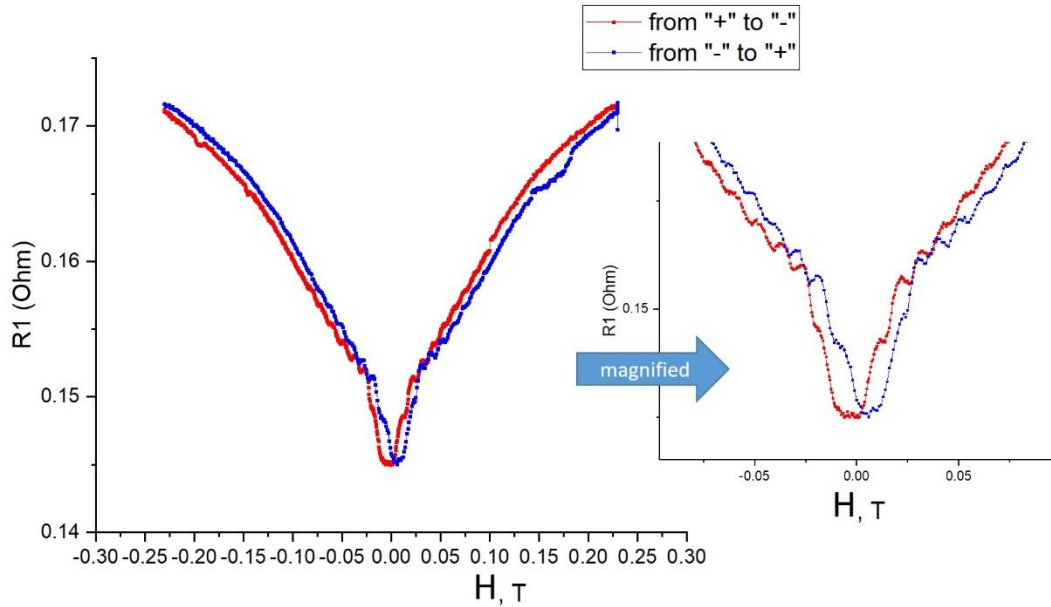


Fig. 17. Magnetoresistența eșantionului S-SL3 (F1S2F2S2) -F1S # 1/B6 într-un câmp magnetic extern aplicat de-a lungul straturilor și transversal fluxului de curent.

Dependența de temperatură a curentului critic a fost măsurată în două stări magnetice: cu magnetizarea paralelă a straturilor de cobalt în de supraretea și una antiparalelă. Starea paralelă a fost măsurată într-un câmp magnetic extern zero cu magnetizare preliminară a straturilor magnetice într-un câmp magnetic extern de +2 kOe. De asemenea, starea antiparalelă a fost măsurată la zero, dar după 2kOe $\rightarrow$ - 40Oe (câmpul de comutare a unui set de cobalt 1,5 nm straturi) din preistoria magnetică a probei.

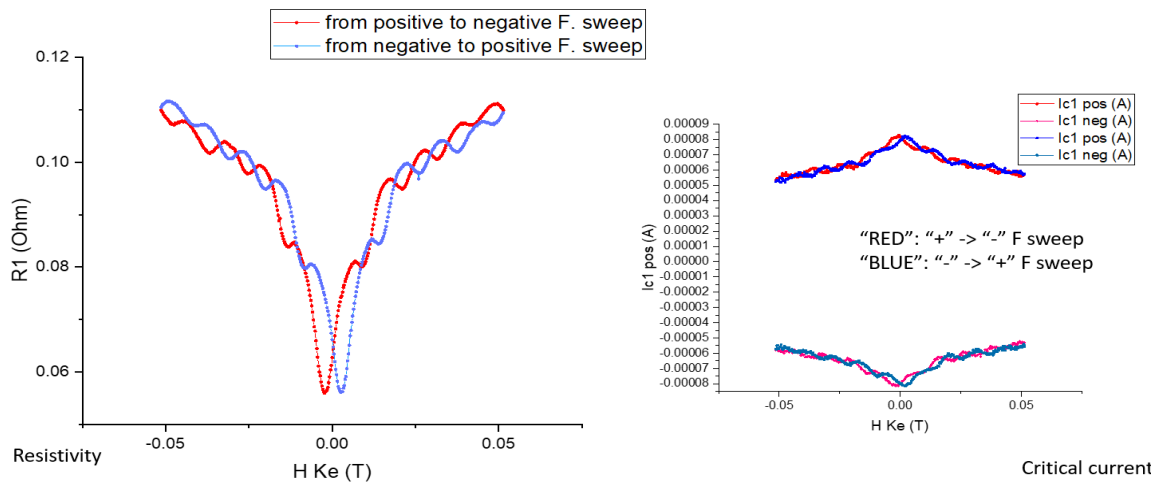


Fig. 18. Magnetoresistența eșantionului S-SL3 (F1S2F2S2) -F1S # 1/B6 și dependența curentului critic ca funcție a câmpului magnetic extern aplicat. După cum se vede clar, curbele au un caracter clar oscilant, iar perioada este de aproximativ 100 Oe.

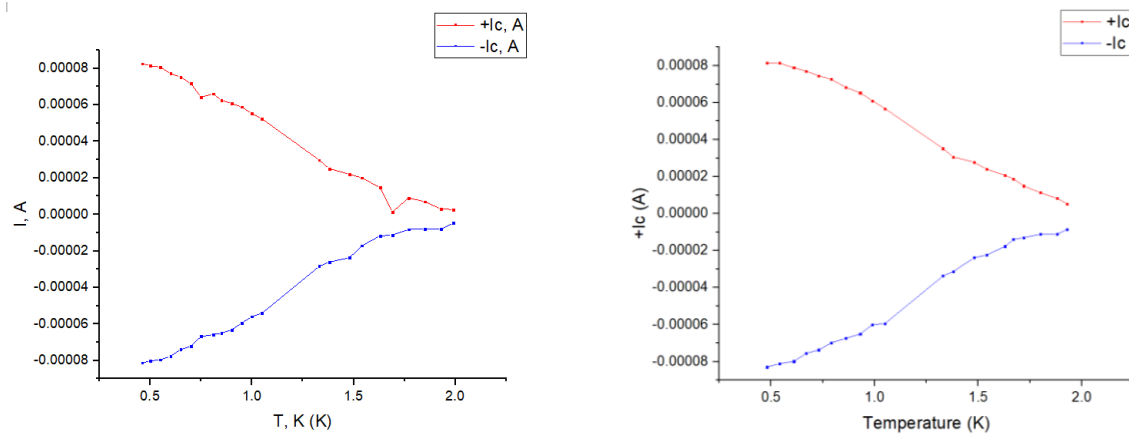


Fig. 19. Dependența de curent critic în funcție de temperatură pentru două cazuri - cu o stare orientată paralel și straturi antiparalele de straturi de cobalt în supraretea. După cum se poate vedea clar - dependența arată un caracter clar liniar.

REFERENCES

1. Buzdin, A. I. Proximity effects in superconductor-ferromagnet heterostructures // Rev. Mod. Phys. 2005, 77, 935. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.77.935>
2. Ustinov, A. V., Kaplunenko, V. K. Rapid single-flux quantum logic using π -shifters // Journal of Applied Physics. 2003, **94**, 5405. <https://doi.org/10.1063/1.1604964>
3. Zdravkov, V. I., Kehrlé, J., Obermeier, G., Ullrich, A., Gsell, S., Lenk, D., Müller, C., Morari, R., Sidorenko, A. S., Ryazanov, V. V., Tagirov, L. R., Tidecks, R., Horn, S. Interference effects of the superconducting pairing wavefunction due to the Fulde–Ferrell–Larkin–Ovchinnikov like state in ferromagnet/superconductor bilayers // Superconductor Science and Technology. 2011, **24**, 095004. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/24/9/095004>
4. Rath, Ch., Prieto, J. E., Müller, S., Miranda, R., Heinz, K. hcp-to-fcc stacking switch in thin cobalt films induced by Cu capping // Phys. Rev. B 1997, **55**, 10791. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.55.10791>
5. Vaz, C. A. F., Altman, E. I., Henrich, V. E. Exchange bias and interface electronic structure in Ni/Co₃O₄(011) // Phys. Rev. B 2010, **81**, 104428. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.81.104428>
6. Zdravkov, V. I., Kehrlé, J., Lenk, D., Obermeier, G., Ullrich, A., Müller, C., Krug von Nidda, H. A., Morari, R., Sidorenko, A. S., Tagirov, L. R., Horn, S., Tidecks, R. // Journal of Applied Physics. 2013, **114**, 033903. <https://doi.org/10.1063/1.4813131>
7. Buzdin, A. I. Proximity effects in superconductor-ferromagnet heterostructures // Rev. Mod. Phys. 2005, 77, 935. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.77.935>
8. Ustinov, A. V., Kaplunenko, V. K. Rapid single-flux quantum logic using π -shifters // Journal of Applied Physics. 2003, **94**, 5405. <https://doi.org/10.1063/1.1604964>

3. Cele mai relevante realizări obținute în cadrul proiectului (până la 100 cuvinte).

A fost dezvoltată tehnologia avansată de vid pentru fabricarea nanostructurilor multistratificate de tip S/F/S. A fost arătat, ca grosimea stratului intermediar feromagnetic joacă un rol crucial pentru manifestarea comportamentului oscilant al curentului critic și temperaturii de trecere în starea supraconductibilă și este în concordanță cu teoria. Filmele subțiri de cobalt sunt preferate pentru demonstrarea efectelor date.

Au fost obținute structuri care manifestă efectul de valvă de spin de tip F1/S/F1/F2/AF având ca scop optimizarea procesului tehnologic. A fost executată optimizarea condițiilor tehnologice pentru realizarea efectului de valvă de spin în structurile F1/S/F1/F2/AF.

A fost arătată posibilitatea realizării structurii spin-valve, cu o schimbare clară de la starea normală la cea superconductoare prin simpla schimbare a magnetizărilor straturilor feromagnetice ale probei prin câmp magnetic extern. În plus, simplitatea designului și absența compușilor complexi și "exotici" din compoziția sa implică o reproductibilitate clară a rezultatelor. Gama de grosimi controlate a straturilor este accesibilă folosind tehnologia dezvoltată pentru fabricarea structurilor de bază ale unui sensor de valvă de spin superconductoare pentru proiectarea circuitelor spintronice.

Cercetările executate în cadrul proiectului dat sunt adresate industriei microelectronice. Valvele de spin supraconductoare care au frecvențe de operare mai mari cu 2-3 ordine (până la 10 GHz), sunt foarte promițătoare pentru inovații microelectronice cu aplicații noi. Clasele noi de materiale reprezintă interes pentru industria microelectronică și sunt noi în sensul că utilizează nu doar sarcina, ci și spinul electronului: elementul de memorie pe baza valvei de spin supraconductoare ar putea oferi capacitatea de stocare cu cea mai mare densitate de informație. Noi propunem nanostructuri hibride de tip S/F ca bază pentru viitoarele dispozitive spintronice. Numeroși producători de elemente de memorie și dispozitive logice sunt interesați de materiale cu așa funcționalitate nouă.

4. Participarea în programe și proiecte internaționale (ORIZONT 2020, COST...), inclusiv propunerile înaintate/proiecte câștigate în cadrul concursurilor naționale/internaționale cu tangența la tematica proiectului.

Executorii proiectului dat participa la momentul dat în executarea proiectului SPIN-TECH „Boosting the scientific excellence and innovation capacity in spintronics of the D. GHITU Institute of Electronic Engineering and Nanotechnologies of the Academy of Science of Moldova” din cadrul Programei EU “TWINNING” - ORIZONT-2020 (2018-2020).

5. Cooperări științifice internaționale/naționale.

- Faculty for Engineering Technology University of Twente, Netherlands (Prof. Golubov Alexandr);
- Karlsruhe Institute of Technology(KIT), Germany (Prof. Hahn Horst);
- (Kazan Federal University, Russia, (Prof. Tagirov Lenar);
- Materials Science Division, Argonne National Laboratory, Argonne, IL, U. S. A., (Prof. Valerii Vinokur).

6. Vizite ale savanților din străinătate.

- Prof. Alexander Golubov, University of Twente, The Netherlands;
- Prof. Vladimir Krasnov, University of Stockholm, Sweden;
- Prof. Klenov Nikolai (Russia, MSU);
- Prof. Tagirov Lenar (Kazan Federal University, Russia);
- Prof. Vinokur Valery (Argonne National Laboratory, USA)

7. Teze de doctorat/postdoctorat susținute pe parcursul realizării proiectului.

Nu sunt.

8. Manifestări științifice organizate la nivel național/internațional.

Participarea la organizarea:

- Intern. Conf. „NANO-2019: Limits of Nanoscience and Nanotechnologies” 24-27 September 2019, Chisinau, Moldova;
- SPINTECH Summer school “S/F Hybrid Structures for Spintronics”, 27-30 September 2019, Chisinau, Moldova

9. Aprecierea activității științifice promovate la executarea proiectului (premii, medalii, diplome etc.).

Nu sunt

10. Rezumatul raportului cu evidențierea rezultatului, impactului, implementărilor, recomandărilor.

A fost dezvoltată tehnologia avansată de vid pentru fabricarea nanostructurilor multistratificate de tip S/F/S. A fost elaborată tehnologia de obținerea a contactului punctiform SFS pe probele stratificate. A fost arătat, ca grosimea stratului intermediar feromagnetic joacă un rol crucial pentru manifestarea comportamentului oscilant al curentului critic și temperaturii de trecere în starea supraconductibilă și este în concordanță cu teoria. Filmele subțiri de cobalt sunt preferate pentru demonstrarea efectelor date.

Au fost obținute structuri și caracterizate, care manifestă efectul de valvă de spin de tip F1/S/F1/F2/AF având ca scop optimizarea procesului tehnologic. Au fost executate măsurători magnetoelectrice și structurale. A fost executată optimizarea condițiilor tehnologice pentru realizarea efectului de valvă de spin în structurile F1/S/F1/F2/AF.

A fost arătată posibilitatea realizării structurii spin-valve, cu o schimbare clară de la starea normală la cea superconductoare prin simpla schimbare a magnetizărilor straturilor feromagnetice ale probei prin câmp magnetic extern. În plus, simplitatea designului și absența compușilor complexi și "exotici" din compoziția sa implică o reproductibilitate clară a rezultatelor. Gama de grosimi controlate a straturilor este accesibilă folosind tehnologia dezvoltată pentru fabricarea structurilor de bază ale unui sensor de valvă de spin superconductoare pentru proiectarea circuitelor spintronice.

A fost arătat pentru prima dată posibilitatea integrării cu succes a structurilor de supraconducție bazate pe pelicule subțiri de metale feromagnetice și non-supraconductoare în joncțiunile Josephson supraconductor bazate pe pelicule de niobiu. Utilizarea structurilor de supraconducție cu două seturi de forțe coercitive ca strat intermediar între electrozii supraconductori face posibilă afectarea suplimentară a probei și o reglare mai „lină”, reglabilă și reproductibilă a proprietăților conductoare de bază ale joncțiunii lui Josephson folosind un câmp magnetic extern. Datorită unei combinații de sensibilitate magnetică ridicată a structurii, eficienței energetice și performanței joncțiunilor lui Josephson supraconductoare, sistemul nostru poate fi utilizat ca bază pentru elementele viitoare din domeniul calculatoarelor supraconductoare și al sistemelor de control cuantic.

Cercetările executate în cadrul proiectului dat sunt adresate industriei microelectronice. Valvele de spin supraconductoare care au frecvențe de operare mai mari cu 2-3 ordine (până la 10 GHz), sunt foarte promițătoare pentru inovații microelectronice cu aplicații noi. Clasele noi de materiale reprezintă interes pentru industria microelectronică și sunt noi în sensul că utilizează nu doar sarcina, ci și spinul electronului: elementul de memorie pe baza valvei de spin supraconductoare ar putea oferi capacitatea de stocare cu cea mai mare densitate de informație. Noi propunem nanostructuri hibride de tip S/F ca bază pentru viitoarele dispozitive spintronice. Numeroși producători de elemente de memorie și dispozitive logice sunt interesați de materiale cu așa funcționalitate nouă.

11. Concluzii.

A fost dezvoltată tehnologia avansată de vid pentru fabricarea nanostructurilor multistratificate de tip S/F/S. A fost elaborată tehnologia de obținerea a contactului punctiform SFS pe probele stratificate. Gama de grosimi controlate a straturilor este accesibilă folosind tehnologia dezvoltată pentru fabricarea structurilor de bază ale unui sensor de valvă de spin superconductoare pentru proiectarea circuitelor spintronice. A fost arătat, ca grosimea stratului intermediar feromagnetic joacă un rol crucial pentru manifestarea comportamentului oscilant al curentului critic și temperaturii de trecere în starea supraconductibilă și este în concordanță cu teoria. Filmele subțiri de cobalt sunt preferate pentru demonstrarea efectelor date.

Au fost obținute structuri și caracterizate, care manifestă efectul de valvă de spin de tip F1/S/F1/F2/AF având ca scop optimizarea procesului tehnologic. Au fost executate măsurători magnetoelectrice și structurale. A fost executată optimizarea condițiilor tehnologice pentru realizarea efectului de valvă de spin în structurile F1/S/F1/F2/AF.

A fost arătată posibilitatea realizării structurii spin-valve, cu o schimbare clară de la starea normală la cea superconductoare prin simpla schimbare a magnetizărilor straturilor feromagnetice ale probei prin câmp magnetic extern. În plus, simplitatea designului și absența compozițiilor complexe și "exotice" din compoziția sa implică o reproductibilitate clară a rezultatelor. Gama de grosimi controlate a straturilor este accesibilă folosind tehnologia dezvoltată pentru fabricarea structurilor de bază ale unui sensor de valvă de spin superconductoare pentru proiectarea circuitelor spintronice.

A fost arătat pentru prima dată posibilitatea integrării cu succes a structurilor de supraconductoare bazate pe pelicule subțiri de metale feromagnetice și non-supraconductoare în joncțiunile Josephson supraconductor bazate pe pelicule de niobiu. Utilizarea structurilor de supraconductoare cu două seturi de forțe coerțitive ca strat intermediar între electrozii supraconductori face posibilă afectarea suplimentară a probei și o reglare mai „lină”, reglabilă și reproductibilă a proprietăților conductoare de bază ale joncțiunii lui Josephson folosind un câmp magnetic extern. Datorită unei combinații de sensibilitate magnetică ridicată a structurii, eficienței energetice și performanței joncțiunilor lui Josephson supraconductoare, sistemul nostru poate fi utilizat ca bază pentru elementele viitoare din domeniul calculatoarelor supraconductoare și al sistemelor de control cuantic.

Cercetările executate în cadrul proiectului dat sunt adresate industriei microelectronice. Valvele de spin supraconductoare care au frecvențe de operare mai mari cu 2-3 ordine (până la 10 GHz), sunt foarte promițătoare pentru inovații microelectronice cu aplicații noi. Clasele noi de materiale reprezintă interes pentru industria microelectronică și sunt noi în sensul că utilizează nu doar sarcina, ci și spinul electronului: elementul de memorie pe baza valvei de spin supraconductoare ar putea oferi capacitatea de stocare cu cea mai mare densitate de informație. Noi propunem nanostructuri hibride de tip S/F ca bază pentru viitoarele dispozitive spintronice. Numeroși producători de elemente de memorie și dispozitive logice sunt interesați de materiale cu așa funcționalitate nouă.

12. Bugetul proiectului, lista executorilor, lista tinerilor cercetători, doctoranzilor (conform anexei nr.1)

Anexa nr. 1

Volumul total al finanțării (mii lei) (pe ani)

Anul	Planificat	Executat	Cofinanțare
2018	100,0	95,4	-
2019	150,0	149,0	-

Lista executorilor (funcția în cadrul proiectului, titlul științific, semnătura)

Nr d/o	Numele/Prenumele	Anul nașterii	Titlul științific	Funcția în cadrul proiectului	Semnătura
1.	Zasavițchi Efim		Dr.	Cond. de proiect	
2.	Sidorenko Anatolie		Acad.	C. șt. p.	
3.	Condrea Elena		Dr.	C. șt. s.	
4.	Prepețița Andrei		Dr.	C. șt. s.	
5.	Antropov E.		Dr.	C. șt. s.	
6.	Morari Roman		Dr.	C. șt. s.	

Lista tinerilor cercetători

Nr d/o	Numele/Prenumele	Anul nașterii	Titlul științific	Funcția în cadrul proiectului
1.	Morari Roman	1986	Dr.	C. șt. s.
2.	Antropov E.	1986	Dr.	C. șt. s.

13. Lista publicațiilor științifice ce țin de rezultatele obținute în cadrul proiectului (conform anexei nr.2)

Anexa nr. 2

LISTA

lucrărilor publicate

- **articole din reviste cu factor de impact 1,0-2,9**
- 1. KLENOV, N.; KHAYDUKOV Y.; BAKURSKIY, S.; MORARI, R.; SOLOVIEV, I.; BOIAN, V.; KELLER, T.; KUPRIYANOV, M.; SIDORENKO, A.; KEIMER, B. Periodic Co/Nb pseudo spin valve for cryogenic memory. *Beilstein J. Nanotechnol.* 2019, **10**, 833–839. ISSN:2190-4286, doi:10.3762/bjnano.10.83.
- **rapoarte publicate/Teze ale comunicărilor la congrese, conferințe, simpozioane, în culegeri (naționale / internaționale),**
- 2. KAPRAN, O.M.; GOLOD, T.; IOVAN, A.; MORARI, R.; SIDORENKO, A.; GOLUBOV, A.; KRASNOV, V. M. S/F/S Josephson junctions with a strongly ferromagnetic Ni barrier. In: *Proceedings of the "VORTEX 2019" Conf.*, Antwerpen, Belgium, May 20-25, 2019, p.87.
- 3. KHAYDUKOV, Yu.; KLENOV, N. V.; BAKUSKIY, S. V.; SOLOVIEV, I. I.; KUPRIYANOV, M. Yu., MORARI, R.; KELLER, T.; SIDORENKO, A. S.; KEIMER, B. Metamaterials with two magnetic super-lattices for low temperature memory devices. In: *NATO AWR: "FNS-CBRN Defence – 2018"*, Chisinau, Moldova, May 14-17, 2018, pp.57.
- 4. SIDORENKO, A. Functional nanostructures for superconducting spintronics. In: *BIT's 8th annual world congress of "Nano Science & Tehnology"*, Potsdam, Germany, October 24-26, 2018, Abstract Book, pp.41.
- 5. SIDORENKO, A. Functional S/F nanostructures for superconducting electronics. In: *Proceedings of 30th World NANO-Conf.*, 20-22 May 2019, Zurich, Switzerland, p52.
- 6. SIDORENKO, A.S. Superconducting spin-valve memory element for superconducting electronics. In: *IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2018)*, Odessa, 11-14 September 2018, Abstract Book, pp. 121.
- 7. SIDORENKO, A. Superconductor/Ferromagnet Layered Nanostructures for Superconducting Spintronics. In: *BIT's 10th World Congress of Chemistry & Biology 2019*. Conf. Abstract Book, may 22-24, 2019, Barcelona, Spain.
- 8. SIDORENKO, A. Superconductor/Ferromagnet layered nanostructures for superconducting spintronics. In: *Int. conf. Nano-2019: Limits of nanoscience and nanotechnologies 27-27 September 2019 and SPINTECH summer school "S/F hybrid structures for spintronics"* 27-30 September, Chisinau, Moldova, p.35.
- 9. SIDORENKO, A. S.; MORARI, R.; LENK, D.; ZDRAVKOV, V. I.; PREPELITA, A.A.; ANTROPOV, E.V.; SOCROVISCICU, V.; DONU, S.; CONDREA, E.; HORN, S.; TIDECKS, R.; TAGIROV, L.R. Superconductor/ferromagnet hybrid structures and their perspectives for nanoelectronics. In: *NATO AWR: "FNS-CBRN Defence – 2018"*, Chisinau, Moldova, May 14-17, 2018, pp.43.

14. Participări la manifestări științifice naționale/internaționale (conform anexei nr.3)

Anexa nr. 3

Participări la manifestări științifice naționale/internaționale

Nume, prenume, date privind manifestarea științifică (denumire, data, loc), titlul comunicării susținute.

1. SIDORENKO. A. *“VORTEX 2019” Conf.*, Antwerpen, Belgium, May 20-25, 2019, S/F/S Josephson junctions with a strongly ferromagnetic Ni barrier.
2. MORARI, R., SIDORENKO, A. S. *NATO AWR: “FNS-CBRN Defence – 2018”*, Chisinau, Moldova, May 14-17, 2018. Metamaterials with two magnetic super-lattices for low temperature memory devices.
3. SIDORENKO, A. *BIT's 8th annual world congress of “Nano Science & Tehnology”*. Potsdam, Germany, October 24-26, 2018. Functional nanostructures for superconducting spintronics.
4. SIDORENKO, A. *30th World NANO-Conf.*, Zurich, Switzerland, 20-22 May 2019. Functional S/F nanostructures for superconducting electronics.
5. SIDORENKO, A. S. *IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2018)*, Odessa, Ucraina, 11-14 September 2018. Superconducting spin-valve memory element for superconducting electronics.
6. SIDORENKO, A. *BIT's 10th World Congress of Chemistry & Biology 2019*. Barcelona, Spain may 22-24, 2019. Superconductor/Ferromagnet Layered Nanostructures for Superconducting Spintronics.
7. SIDORENKO, A. S., MORARI, R., PREPELITA, A. A., ANTROPOV, E. V., CONDREA, E. *NATO AWR: “FNS-CBRN Defence – 2018”*, Chisinau, Moldova, May 14-17, 2018. Superconductor/ferromagnet hybrid structures and their perspectives for nanoelectronics.

Director proiectului ZASAVITCHI EFIM, Dr., Conf. Cercet.

Șeful laboratorului ZASAVITCHI EFIM, Dr., Conf. Cercet.
