UNIVERSITATEA DE STAT DIN MOLDOVA
ȘCOALA DOCTORALĂ ȘTIINȚE ALE NATURII

Cu titlu de manuscris
C.Z.U: 538.945:534.1

BOIAN VLADIMIR

SUPRACONDUCTIBILITATEA TRIPLETĂ CA BAZĂ A SPINTRONICII SUPRACONDUCTOARE.

133.04 – Fizica stării solide

Rezumatul tezei de doctor în științe fizice

Chişinău, 2024

Teza a fost elaborată în cadrul **Laboratorului de Criogenie, Institutul de Inginerie Electronică și Nanostehnologii " D. Ghițu " al Universității Tehnice a Moldovei.** Studiile de doctorat au for efectuate în cadrul **Școlii Doctorale Științe ale Naturii a Universității de Stat din Moldova**.

Conducător științific: **SIDORENKO Anatolie**	doctor habilitat în științe fizico – matematice, profesor universitar, academician, Institutul de Inginerie Electronică și Nanotehnologii „D. Ghițu" al Universității Tehnice a Moldovei

Componența comisiei de susținere publică a tezei de doctorat:

CULIUC Leonid	doctor habilitat în științe fizico – matematice, fizica corpului solid, profesor universitar, Institutul de Fizică Aplicată al Universității de Stat din Moldova – **președinte**
SIDORENKO Anatolie	doctor habilitat în științe fizico – matematice, profesor universitar, academician, Institutul de Inginerie Electronică și Nanotehnologii „D. Ghițu" al Universității Tehnice a Moldovei – **conducător științific**
PENIN Alexandru,	doctor habilitat în tehnică, bazele toeretice ale electrotehnicii, electronică de putere, Institutul de Inginerie Electronică și Nanotehnologii „D. Ghițu" al Universității Tehnice a Moldovei, cercetător coordonator, Moldova – **referent.**
ȚIULEANU Dumitru,	doctor habilitat în științe fizico – matematice, membru corespondent, profesor universitar, Academia de Științe a Moldovei, Universitatea Tehnică a Moldovei, Moldova – **referent.**
POSTOLACHI Igor.	doctor în științe fizico – matematice, fizica semiconductorilor și dielectricilor, conferențiar universitar, Universitatea Pedagogică de Stat Ion Creangă din Chișinău, Moldova – **referent.**

Susținerea va avea loc la 07. 10. 2024 , ora 15 . 00 în cadrul ședinței Comisiei de susținere publică a tezei de doctor din cadrul ȘDȘN, Sediul – Școala doctorală Științe ale Naturii, Universitatea de Stat din Moldova (http://www.usm.md), str. A. Mateevici 60, blocul 4, auditoriul 332, MD-2009, Chișinău, Moldova.

Teza de doctor și rezumatul pot fi consultate în Biblioteca Națională a Republicii Moldova, Biblioteca Centrală a Universității de Stat din Moldova (MD 2009, mun. Chișinău, str. Alexei Mateevici 60), pe pagina web a ANACEC (http://www.cnaa.md) și pagina web a USM (http://www.usm.md).

Rezumatul a fost expediat la "___ " _____ 2024

Președintele Comisiei de Doctorat
doctor habilitat în științe fizico – matematice, academician — **CULIUC Leonid**

Conducător științific
doctor habilitat în științe fizico – matematice, academician — **SIDORENKO Anatolie**

Autor: **BOIAN Vladimir**

©Boian Vladimir, 2024

CUPRINS

REPERE CONCEPTUALE ALE LUCRĂRII……..	……..	4
CONȚINUTUL TEZEI…….	……..	9
CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI…	……..	25
RECOMANDĂRI……..	……..	26
BIBLIOGRAFIE……	……..	27
LISTA PUBLICAȚIILOR LA TEMA TEZEI DE DOCTOR……...	……..	29
ADNOTARE…….	……..	31
ABSTRACT……...	……..	32
АННОТАЦИЯ.....	……..	33
FOAIA PRIVIND DATELE DE TIPAR.....	……..	34

REPERELE CONCEPTUALE ALE LUCRĂRII

Actualitatea și importanța temei.

Miniaturizarea necontenită a elementelor microelectronice sunt rezultatul utilizătii de maștab a microelectronicii în viața contemporană. Aceast fapt ne propune o utilizare la scară largă și din motivul – că aceste elemente au un consum al energiei electrice foarte mic, ceea ce este decisiv în contextul economic. La momentul actual s – a ajuns la încorporarea maximă de elemente pe o unitate de suprafață și deja capacitatea de răspuns, calcul, receptivitate și eficacitate nu poate fi mărită datorită efectului Joule și altor efecte de interferență. **Spintronica** – este o alternativă contemporană și actuală care propune principii noi de utilizare a efectelor și fenomenelor cuantice – cum ar fi spinul electronului. Utilizarea spinului electronului spre deosebire de sarcina electronului utilizată în microelectronica clasică, corespunde unei game largi de întrebuințare. Elementele bazate în fucționarea lor pe efectul de spin sunt mult mai efective din punct de vedere a consumului de curent electric, sunt capabile s – ă efectueze operații logice cu viteze colosale, utilizarea lor în diferite tipuri de sensori propun noi arii de întrebuințare cum ar fi: inteligența artificială, casele SMART, autoturisme fară șofer, șamd. Elementele ce utilizează spinul electronului sunt numite–supape de spin sau valve de spin. Valvele de spin prezintă structuri stratificate la scară nano din supraconductori (S) și feromagnetici (F). Într – o structură multistrat S/F au loc fenomene cuantice cum ar fi: efectul de proximitate, ocilația funcției de undă în feromagnetic, starea supraconductoare neomogenă – starea LOFF. Starea suprconductibilă și feromagnetismul se exclud reciproc datorită faptului că au structuri complet diferite a configurațiilor de spin. În feromagnetici spinii sunt orientați colineari pe când în supraconductor– antiparaleli. Dar necătând la acest fapt calculele realizate de Larkin și Ovchinnikov iclusiv Fulde și Ferrell arată că în structurile S/F apare starea supraconductoare neomogenă – când impulsul sumar al perechii Cooper este diferit de zero. Dar condiția de convețuire stabilă se îngreunează datorită limitării asupra mărimii energiei de schimb a ordonării magnetice – supraconductibilitatea în prezența câmpului de schimb E_{exc}, se poate observa doar în intervalul: $0.75\Delta < E_{exc} < 0.76\Delta$, unde Δ - gapul supraconductor. Pe de altă parte Buzdin și Radovici propun ideea de existență a acestor două ordine (supraconductibilitatea și feromagnetismul) într-o structură multistrat alcătuită din straturi de grosime nanometrică de supraconductori și feromagnetici care se repet, și în așa fel perechea de elctroni pătrund în feromagnetic prin granița: supraconductor/feromagetic și formează funcția pară supraconductibilă în feromagnetic. Sub temperatura critică $T_{c,}$ perechile Cooper din supraconductor datorită efectului de proximitate pătrund în feromagnetic unde ele cad sub acțiunea cîmpului de schimb E_{exc} și ca urmare aceste perechi au impulsul sumar diferit de zero. Ca efectele

la scară nanometrică în aceste structuri să fie evidente este necesar ca granița dintre oricare două straturi adiacente să fie atomar netedă. Experimental se demonstrează că este destul de anevoios realizarea granițelor atomar netede care ulterior sunt transparente petru fenomenele cuantice.

Descrierea situației în domeniul de cercetare și identificarea problemelor

La momentul actual necesitatea volumului de memorie și a vitezei de procesare a informație atinge un maximum inevitabil. Structurile spin – ventil ca elemente de bază, bazate pe nanostructuri stratificate de supraconductor – feromagnetic, sunt o cale fermă de soluționare în acest sens. Depunerile magnetron a nanostraturilor prezintă prin sine o metodologie foarte complexă care necesită materiale de calitatea cea mai înaltă și utilaj de laborator contemporan. O problemă care a fost soluționată cu ajutorul modelării matematice și mai apoi demonstrată experimental este – calitatea interfețelor adiacente a nanostraturilor vecine. Datorită interfețelor atomar netede dintre nanostraturi a fost posibilă crearea elementului de bază – supapă de spin. Datorită structurilor de rețea diferită a Niobiului și Cobaltului care provoacă rugozități de suprafață practic este imposibil de obținut interfețele atomar netede, dar experimentele numerice după care și cele de laborator au demonstrat că la anumite temperaturi ale substratului de Siliciu (Si) este posibil de creat interfețe atomar netede cu o rugozitate de doar – 0.3 nm. În plus dezvoltarea materialelor cum ar fi – materiale stratificate nano – metamateriale – cu proprietăți specifice, ne permit încă o gamă largă de efecte ce pot fi întrebuințate la soluționarea unor probleme de comutare. Un metamaterial alcătuit din - **[Co(1,5nm)/Nb(8nm)/Co(2,5nm)/Nb(8nm)]$_6$** ne propune un efect de comutare la doar – 30 Oe. În acest sens a fost creat pentru prima dată un element de bază – supapă de spin, în care s – a întrebuințat un metamaterial magnetic moale.

Scopul și obiectivele cercetării.

În lucrare este propusă o supapă de spin cu efecte de memorie ce funcționează datorită supraconductibilității triplete; și ajustarea parametrilor tehnologici de acoperire megnetron în așa fel încât să obținem interfețe atomar netede și cu efecte minime de interdifuzie reciprocă a materialelor – calitatea interfețelor adiacente joacă un rol deosebit la nivel cuantic în structurile de grosime nanometrică.

Obiectivele cercetării:

- Optimizarea parametrilor de depunere magnetron a nanostraturilor supraconductor – feromagnetic, cu parametri dirijați și strict reproductibili într – un singur ciclu de vid,

- Modelarea matematică a parametrilor tehnologici de depunere magnetron cu ajutorul pachetului LAMMPS, în scopul ajustării lor,
- Studiul proprietăților supraconductoare a structurilor stratificate nanometrice, cu efecte valvă de spin și elemente de memorie,
- Studiul comportamentului stări magnetice în nanostraturile adiacente feromagnetice cu ajutorul reflectometriei neutronilor polarizați – metodă de observare a orientării spinilor în materialele magnetice.

Ipoteza de cercetare

Pentru a crea o nouă generație de calculatoare neuromorfe cu o reducere radicală a consumului de energie, este necesar dezvoltarea unui element de comutare neliniar – asemănător unui tranzistor, dar spre deosebire de un tranzistor, care asigură trecerea dintr – o stare cu rezistență electrică mare la o stare cu rezistență scăzută, noul element trebuie să asigure trecerea dintr – o stare cu rezistență electrică finită la o stare cu rezistență zero, adică să fie un element nou de comutare – o supapă supraconductoare. Această ipoteză urmează să fie testată în această lucrare.

Metodologia cercetării științifice:

Pentru realizarea scopului și a obiectivelor cercetării a fost studiată literatura de specialitate, după care a fost utilizată metoda de depunere și de caracterizare a nanofilmelor:

- pentru depunerea nanostraturilor de Nb/Co (supraconductor/feromagnetic) s – a utilizat utilaj de vid - magnetronul ”LEYBOLD Z – 400”,
- structura morfologică a nanostraturilor a fost cercetată cu ajutorul microscopiei electronice cu scanare – SEM,
- caracteristicile de tranport în nanofilme au fost măsurate prin metoda celor patru sonde,
- topografia și rugozitățile nanofilmelor supraconductor/feromagnet au fost cercetate cu ajutorul AMF – microscopia atomică de forță,
- FIB – ul (focused ion beam) a fost întrebuințat pentru tăierea de micropunți la joncțiunile Josephson,
- designele speciale au fost gravate prin litografie în instalația: Oxford Plasmalab 100,
- În scopul determinării parametrilor de depunere magnetron a fost utilizat modelarea pe calculator cu ajutorul Modelului atomului scufundat – MEAM (Modified Embedded Atom Method).

Noutatea și originalitatea științifică.

A fost optimizată tehnologia de depunere magnetron a nanostraturilor de supraconductor/feromagnetic cu interfețe atomar netede în care a fost înregistrată împerecherea tripletă – datorită nanostraturilor de feromagnetic cu magnetizări necolineare. Este propus un prototip pseudo valvă de spin ca element de comutare, în care rolul principal îl are supraconductibilitatea tripletă cu utilizarea în continuare și ca element de memorie alcătuit dintr – o superlatice supraconductoare adică element de memorie criogenică.

Problema științifică soluționată în această teză constă în optimizarea tehnologiei de depunere magnetron cu interfețe atomar netede și formarea nanostructurilor pentru utilizarea lor în calitate de elemente de memorie și supape de spin.

Semnificația teoretică și valoarea aplicativă a lucrării:

- În baza măsurărilor caracteristicilor de transport a structurilor hibride de supraconductor/feromagnetic, Nb/Co, au fost realizat elementul de memorie cu comutare suficient de rapidă, cu orientările paralele (P) și antiparalele (AP) ale filmelor de feromagnetic,
- Prototipul valvă de spin – $S/F_1/S/F_2/AF$, în heterostructurile supraconductor/feromagnet este realizat dacă cel puțin două straturi feromagnetice (F_1, F_2) au o aliniere necoliniară a magnetizărilor lor – fapt ce generareză componenta tripletă impară,
- În domeniu teoretic cu ajutorul dinamicii moleculare și a Modelului atomului scufundat – MEAM, am ajustat parametrii de depunere magnetron în scopul îmbunătățirii calității interfețelor straturilor nanometrice,
- Au fost depistați experimental parametrii de depunere magnetron a nanostraturilor ce contribuie semnificativ la îmbunătățirea interfețelor adiacente cu sporirea efectelor cuantice, cu am fi temperatura substratutlui de siliciu (300 K).

Rezultatele științifice principale înaintate spre susținere:

- ❖ Interdifuzia straturilor nanometrice crește odată cu creșterea temperaturii substratului de Si, ceea ce se manifestă negativ asupra fenomenelor cuantice supraconductibile,
- ❖ Modelarea cu ajutorul pachetului LAMMPS arată că temperatura optimă pentru depunerea nanostraturilor de supraconductor/feromagnetic este de 300K a substratului de Si, în acest sens interfața obținută contribuie maxim la amplificarea fenomenelor cuantice,

- Structura multistrat – $S/[F_1/s/F_2/s]n/F_1/S$ cu cararacteristici de reorientare a straturilor de feromagnetic, paralelă (PA) la antiparalelă (APA) într – un câmp magnetic exterior scăzut, 30 Oe,

Aprobarea rezultatelor științifice:

Rezultatele cercetării din lucrarea dată au fost prezentate la următoarele conferințe naționale internaționale și expoziții:

1. Conferința științifică națională **"Tendințe contemporane ale dezvoltării științei: viziuni ale tinerilor cercetători"**, Ediția IX , Chișinău, Moldova, 15 iunie 2020,
2. Conferința științifică internațională **"8th International Conference on Functional Nanomaterials and High-Purity Substances"** FNM 2020, Suzdal, Rusia, 5-9 octombrie 2020,
3. Conferința științifică internațională **"The 12th international conference on intrinsic Josephson effect and horizons of superconducting spintronics"**, Chişinău, Moldova, 22-25 octombrie 2021,
4. Conferința științifică internațională **"Electronics, Communications and Computing"**, 12 Chişinău, Moldova, 20-21 octombrie 2022,
5. Conferința științifică națională **"Conferinţa tehnico-ştiinţifică a studenţilor, masteranzilor şi doctoranzilor"**, Chișinău, Moldova, IIEN, 5-7 aprilie 2023,
6. Simpozionul internațional XXIV, **"Нанофизика и Наноэлектроника",** 26 aprilie 2022,
7. Conferința științifică internațională: **NANO–2024: „Quo Vadis – Ethics of the Scientific Research”**, Chișinău. Moldova,15–18 aprilie.

Publicații la tema tezei

Cercetările și studiile de bază în această teză a fost pulicate în **15** lucrări științifice publicate în reviste la tema tezei; **5** articole în reviste din bazele de date SCOPUS și Web of Science; **7** publicații la conferințe naționale și internaționale; **4** articole cu un singur autor, lista este prezentată la sfîrșitul acestui Rezumat.

Volumul și structura lucrării

Teza constă din introducere, cinci capitole, concluzii generale și referințe bibliografice alcătuite din 161 de titluri, fiind expusă pe 112 de pagini text de bază, conținând **56** de figuri, **6** tabele.

Cuvinte cheie: Nanotehnologii, supraconductibilitate tripletă, supapă de spin, metamaterial, depunere magnetron, modelare matematică.

CONȚINUTUL TEZEI

În introducere este fixată actualitatea temei de cercetare, este expus scopul și obiectivele tezei, metodologia cercetării științifice, noutatea științifică și rezultatele obținute, problema științifică soluționată, semnificația teoretică și aplicativă a tezei, rezultatele științifice principale înaintate spre susținere, aprobarea rezultatelor științifice, cît și volumul și structura lucrării.

Capitolul I: este alcătuit din studiul și analiza bibliografică de domeniu, cum ar fi: comportamentul unor materiale la temperaturile heliului lichid și mai joase, proprietăți de bază a supraconductorilor – rezistența zero și expulzarea câmpului magnetic din volumul supraconductorului (efectul Meissner), teoria microscopică a supraconductibilității Bardeen – Cooper – Shrieffer, supraconductibilitatea singletă omogenă, efectul de proximitate supraconductor – metal normal cu întrepătrunderea supraconductibilității singlete în metalul normal, procesul de reflexie Andreev.

Capitolul II: sunt prezentate: tehnica experimentală precum și metodele tehnologice de depunere magnetron a nanostructurilor supraconductor/feromagnetic, metodicile de măsurare a caracteristicilor magnetice și de transport, precum și cercetarea morfologică a structurilor hibride supraconductoare. Pentru realizarea obiectivelor de bază au fost utilizate – elementele fundamentale ale fizicii stării solide, bazele supraconductibilității. Pentru realizarea fizică a supapelor de spin și a elementelor de memorie într – un singur ciclu de vid înalt în atmosferă de Ar, a fost utilizat utilaj de vid – magnetronul "LEYBOLD Z – 400". Rezultatele au fost preluate cu ajutorul pachetului LabView și prelucrate cu ajutorul: PyMca, Origin, wolfram mathematica.

Capitolul III: în capitolul III m – am axat pe cercetarea ce ține nemijlocit de: efectul proximiti supraconductor – feromagnetic cu pătrunderea supraconductibilității singlete în metalul feromagnetic, lucrările de pionerat Efetov – Volkov – Bergeret – Golubov, cu prezicerea posibilității apariției supraconductibilității triplete neuniforme în structurile supraconductor/feromagnetic, detectarea experimentală a supraconductibilității triplete și a efectului valvă de spin triplet; scopul principal fiind propunerea un prototip de supapă de spin cu utilizarea ulterioară ca element de memorie, bazate pe nanostructuri supraconductor/feromagnetic. Competiția dintre feromagnetism și supraconductibilitatea spin – singletă duce la o varietate de fenomene interesante, inclusiv la posibila generare a frecvenței impare, parametrul de ordine spin – triplet. În ultimii ani, acestă stare exotică a fost studiată pe larg atât teoretic [1–4] cât și

experimental [5–8] în diverse heterostructuri supraconductor/feromagnet (S/F). Acest fenomen poate fi folosit pentru crearea noilor dispozitive supraconductoare, în care supracurentul (I_c) este determinat și controlat de starea magnetică a heterostructurii, adică de către orientarea relativă a magnetizărilor în mai multe straturi F [5]. Situația este complicată de o varietate de fenomene coexistente: **(a)** atât curenții singleți, cât și curenții tripleți pot circula prin heterostructuri S/F [9], **(b)** supracurentul depinde puternic de structura de domeniu de obicei necunoscută în F și de cuantificarea fluxului în S, ambele influențate de dimensiunea și geometria heterostructurii, **(c)** supracurentul spin – triplet apare numai în starea magnetică necoliniară. Prin urmare, utilizarea acestui fenomen pentru aplicațiile dispozitivelor necesită determinarea și controlul precis al stării micromagnetice a dispozitivelor la scară micro sau nanometrică. Un control similar este necesar pentru operațiunile unui număr mare de dispozitive spintronice supraconductoare, inclusiv elemente de memorie și supape de spin [10,11,12]. Figura 1.(c) prezintă o simulare numerică a supraconducției parametrului de ordine, Δ, într – o heterostructură S/F. Asta oferă o înțelegere calitativă a modulării efectului de proximitate în heterostructuri în stările P (roșu) și AP (albastru). Un strat S inferior gros, Nb (50 nm), acționează ca un rezervor de perechi Cooper și este doar modest afectat de orientarea magnetică a stratului F. Cu toate acestea, distanțierele S′ subțiri, Nb (6 și 8 nm), cu o grosime comparabilă cu lungimea coerenței supraconductoare, $\xi_S \approx 10$ nm, sunt puternic afectate. Supraconductibilitatea în straturile S′ este mai puternică în starea AP și este aproape stinsă în stratul S′ cel mai îndepărtat în starea P. Acest lucru este cauzat de influențele subtractive (în starea AP) și aditive (în starea P) ale câmpului de schimb din straturile feromagnetice – F vecine, care sunt dăunătoare ordinii spin – singlete în S′ [13,14]. Simulările din fig. 1.(c) demonstrează reglabilitatea supraconductibilității în astfel de structuri S/F prin schimbarea stării magnetice. Din cauza stratului S inferior, există un gradient Δ în straturile S′, ceea ce implică faptul că straturile S′ au proprietăți supraconductoare diferite. În toate cazurile, câmpul magnetic este aplicat paralel cu filmul plan ca în fig. 1.(a). Geometria multiterminală a probelor permite utilizarea simultană a patru sonde măsurătoare la diferite segmente ale probei în ambele direcțiile longitudinale, R_{xx}, R_{xy}. Când curentul este trimis prin podul vertical central, după cum este schițat în fig. 1.(a), măsurătorile corespund orientării de magnetizare în direcția părții lungi a liniei verticale. Alternativ, putem trimite curent prin punțile orizontale, ceea ce corespunde orientării de magnetizare perpendiculare pe latura lungă a punții. În acest din urmă caz, rezistența

întregului electrod este măsurată cu patru sonde – mod în care se utilizează două fire legate de fiecare contact.

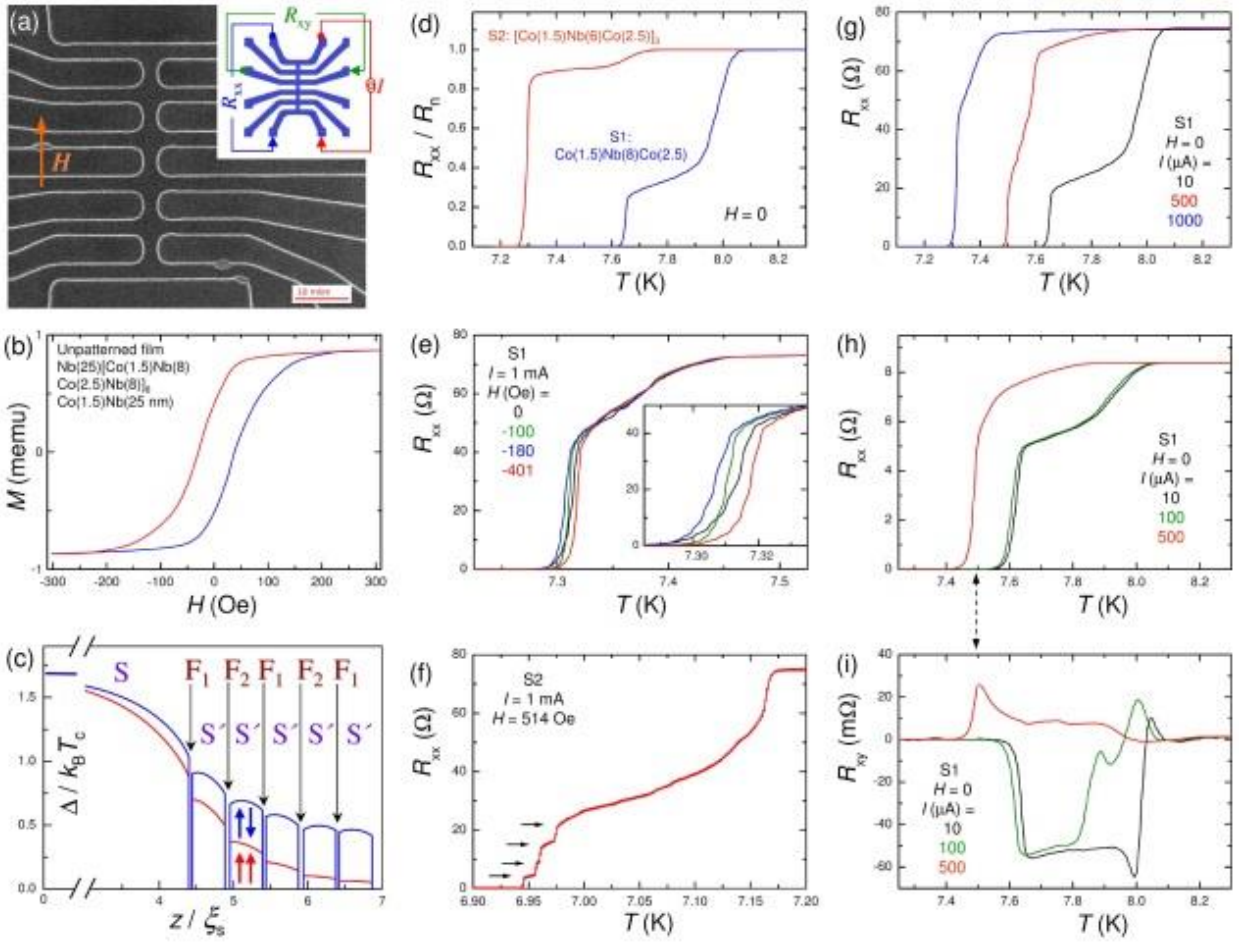


Fig. 1. (a) Imaginea SEM a unui multistrat Nb/Co cu micropunte. Proba conține douăsprezece contacte, șase orizontale și una verticală cu lățimi de câțiva micrometri (4μm).

Fig. 1.(d) prezintă dependențele $R_{xx}(T)$, normalizate de rezistența în stare normală $R_n(T \geq T_c)$, pentru micropunți la S1 (albastru) și S2 (roșu) ale structurilor la H = 0. Rezistențele sunt măsurate la intensitatea – I_{ac} = 10 μA pentru S1 și 20 μA pentru S2, care corespund densităților mici de curent aproximativ egale în ambele structuri. Ambele structuri arată o tranziție dublă, care ar putea fi atribuită diferitelor temperaturi critice în straturile S și S′, $T'_c(S') < T_c(S)$. În concordanță cu această ipoteză, T'_c al S2 cu stratul S′ = 6 nm este mai mic decât cel al S1 cu S′ = 8 nm. Figura 1.(e) prezintă curbele $R_{xx}(T)$ pentru o punte orizontală al eșantionului S1 la patru intensități de câmp magnetic crescând secvenţial cu I_{ac} = 1 mA. Se vede că debutul de rezistivitate la T ≈ 7.3 K este afectată de câmp. Dispozitivele digitale cu supraconductori au atras o atenție din ce în ce mai mare datorită eficienței și performanței lor energetice unice, precum și datorită compatibilității lor în calculatoare cuantice și neuromorfe în curs de dezvoltare [15,16]. Cu toate acestea, lipsa

elementelor de memorie criogenică (inclusiv sinapsele) cu comutare suficient de rapidă între stările stabile și disiparea energiei suficient de mică este încă principalul obstacol în acest domeniu. Utilizând concurența și coexistența corelațiilor supraconductoare (S) și feromagnetice (F) am putea oferi o creștere a performanței și a gradului de integrare pentru dispozitivele de stocare și a memoriei criogenice și elementele sinaptice. Aceste idei pot fi implementate utilizînd un contact Josephson cu două stări stabile: o valoare mare a curentului critic, I_C, corespunde stării „ deschise ” și o valoare scăzută – stării „ închise ”. Un astfel de dispozitiv poate fi asamblat dacă „ legătura slabă ” este un tristrat compozit F/N/F (N este un metal normal) a cărui stare magnetică poate fi comutată între direcțiile paralele și antiparalele ale vectorilor de magnetizare ale straturilor F. În schimb, utilizarea unui strat subțire supraconductor ca distanțier în locul unui strat de metal normal N, poate duce la îmbunătățirea efectului supapă de spin datorită efectului proximiti a straturilor groase de supraconductori și distanțierelor supraconductori subțiri [17]. Pentru a verifica această ipoteză am calculat curentul critic al joncțiunilor Josephson S/F/s/F/S și S/F/N/F/S (fig. 2).

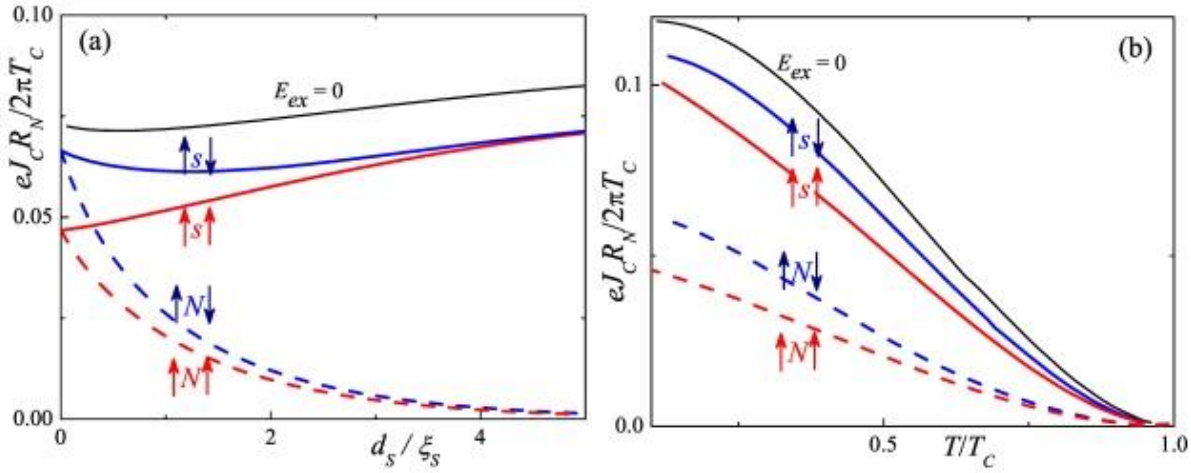


Fig. 2. (a) Curentul critic normalizat al structurilor S/F/s/F/S (linii continue) și S/F/N/F/S (linii întrerupte) în funcție de grosimea stratului distanțier dintre feromagnetici, și (b). Mărimea adimensională a temperaturii. Liniile roșii corespund cazului în care energiile de schimb în ambele straturi ale feromagnetului sunt egale ca mărime, iar vectorii de magnetizare situati în planul straturilor magnetice sunt paraleli (P). Liniile albastre sunt pentru cazul în care energiile de schimb – E_{exc}, în ambele straturi F sunt egale, iar vectorii de magnetizare descriși sunt antiparaleli (AP). Curbele negre corespund cazului $E_{exc} = 0$.

Mai mult, pentru orientarea AP a vectorilor de magnetizare ai straturilor F, apare un mecanism suplimentar pentru renormalizarea energiei efective de schimb, ceea ce duce la scăderea în continuare a acesteia. Pentru a confirma aceste afirmații, am generalizat o structură $S/[F/N]_n$ conform modelul [18], în cazul existenței supraconductibilității proprii în părțile ei neferomagnetice. Pentru ca modelul să devină mai realist, luăm în considerare o structură periodică spin – valvă, în care două straturi feromagnetice învecinate au grosimi ușor diferite d_1 și d_2 (inserat în fig. 3.(b)).

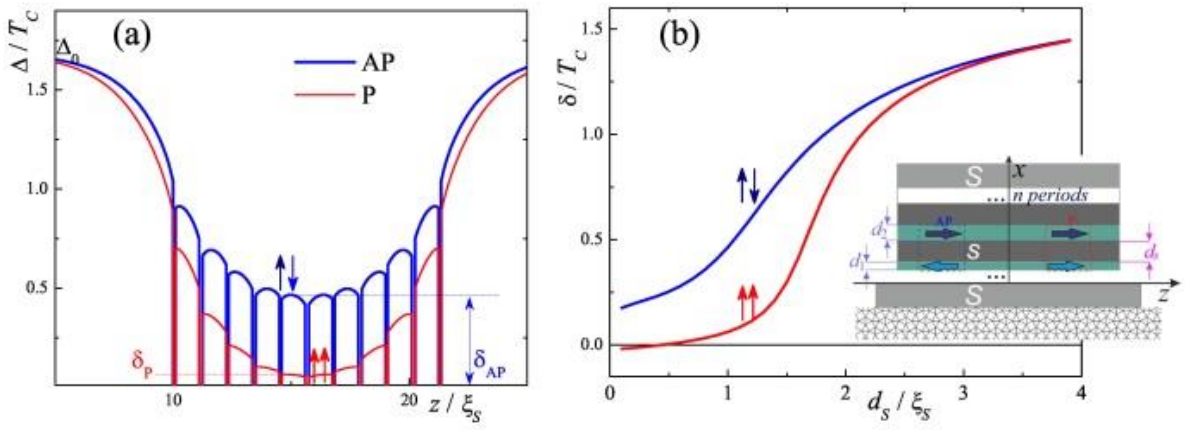


Fig. 3. (a) Profilul de adâncime al amplitudinii perechii supraconductoare a structurii $S/[F_1/s/F_2/s]_5/F_1/S$ în cazurile P și AP. (b). Amplitudinile perechii supraconductoare din mijlocul legăturii slabe pentru alinierea P și AP.

Diferența de grosimi a straturilor F_1 și F_2 oferă o diferență în câmpurile lor coercitive $H_{c1} \neq H_{c2}$ care permite o organizare AP în diapazonul câmpurilor magnetice – H, $\max(H_{c1},H_{c2}) > H > \min(H_{c1},H_{c2})$ după saturație cu magnetizare în sens negativ. Utilizarea conceptului de pseudo – spin – valvă ne permite să organizăm alinierea AP fără schimb sau cuplare magnetostatică a straturilor F învecinate. Figura 3.(a) prezintă distribuția spațială a amplitudinilor perechilor Cooper în structura $S/[F_1/s/F_2/s]n/F_1/S$ pentru orientările P și AP. Din fig. 3.(a) rezultă că structura considerată este o conexiune în serie de joncțiuni Josephson $s/F_1/s$ și $s/F_2/s$ cu cea mai slabă legătura situată în mijlocul structurii. Figura 3.(b) arată amplitudinile potențialului perechii Cooper, δ_P și δ_{AP}, (δ_P și δ_{AP} din fig. 3.(a)) în mijlocul legăturii slabe în funcție de grosimea straturilor **s**. Se poate observa că amplitudinile pentru configurațiile AP și P sunt semnificativ diferite pentru $d_s \sim \xi_S$. De îndată ce I_c este proporțional cu produsul amplitudinii perechii Cooper din supraconductorii groși exteriori, se poate estima că raportul I_c pentru orientarea AP și orientările P este de ordinul $(\delta_{AP}/\delta_P)^2 \approx 25$. Din fig. 3.(b) rezultă că această îmbunătățire depinde de raportul d_s/ξ_S și este maximă în vecinătatea lui $d_s = \xi_S$. Realizarea structurii $S/[F_1/s/F_2/s]n/F_1/S$ ca dispozitiv Josephson necesită dezvoltarea unei tehnologii pentru fabricarea structurilor multistrat care să îndeplinească următoarele condiții: (a) prezența supraconductibilității în

straturile **s** la $T_c \geq 4.2$ K, (b) orientarea în plan a vectorului de magnetizare în filmele F, și (c) capacitatea de comutare coerentă între configurația P și AP în întreaga structură. Aceste cerințe pot fi îndeplinite atunci când se utilizează o combinație de Nb și Co ca materiale pentru superlatice. Pentru a face acest lucru, am fabricat structura – Nb(25 nm)/[Co(1.5 nm)/Nb(8 nm)/Co(2.5 nm)/Nb(8 nm)]$_6$/Co(1.5 nm)/Nb(25 nm). În calitate de material supraconductor s – a luat niobiul, deoarece are cea mai mare $T_c = 9.25$ K dintre toți supraconductorii elementari și formează structuri stabile cu cobaltul în calitate de feromagnetic. Grosimea supraconductorului Nb a fost aleasă să fie aprope de $\xi_S \approx 6 – 10$ nm, valoarea găsită în studiile anterioare. Grosimea straturilor de Co a fost în intervalul $\xi_F \approx 1$ nm [19], ceea ce este suficient pentru a forma un strat omogen și magnetic. Pentru caracterizarea structurală şi ordonarea magnetică a superlaticei de Nb/Co am utilizat reflectometria cu neutroni polarizați (PNR). Măsurătorile au fost efectuate la reflectometrul cu neutroni NREX la reactorul de cercetare FRM – 2 (München, Germania). Coeficienții de reflexie a neutronilor s – au măsurat cu ajutorul unui flux de neutroni polarizați cu lungimea de undă λ = 0,43 nm la temperatura de T = 13 K în prezența câmpului magnetic, aplicat paralel cu planul nanostraturilor cât și perpendicular planului de împrăștiere figura 4.a

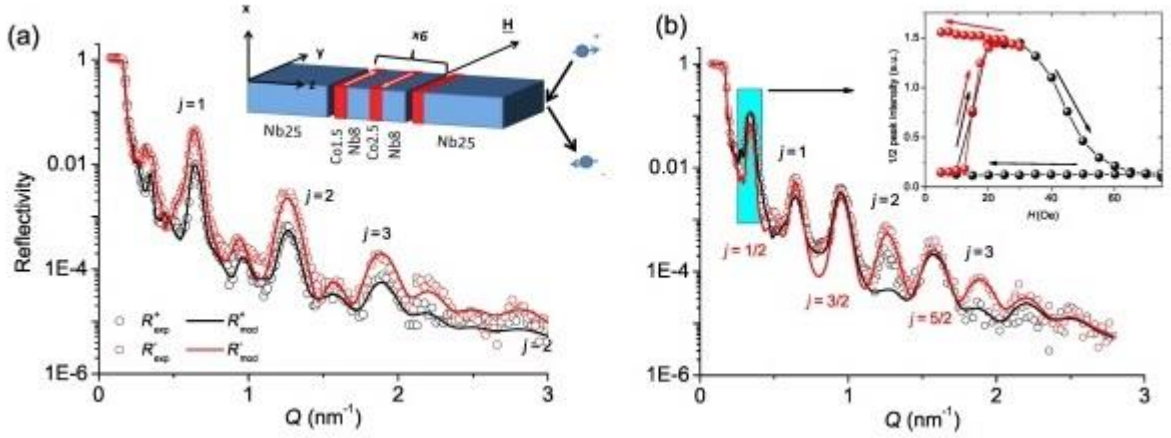


Fig. 4. (a) Reflectivitatea experimentală a neutronilor speculari (puncte) măsurată la T = 13 K în câmpuri magnetice H = 300 Oe și (b) H = 30 Oe. Liniile continue arată curbele modelului pentru profilele de adâncime de magnetizare prezentate în fig. 4.a. Numerele de mai sus arată ordinea corespunzătoare a reflexiei Bragg din structura periodică – superlatice [Co(2nm)/Nb(8nm)]$_{12}$. Insertul din (b) arată dependența de câmp a vârfului j = 1/2 prezentat de dreptunghiul albastru din (b).

Capitolul IV: în acest capitol propun – construcția modelului matematic și calculele teoretice ale nanostructurilor supraconductoare de niobiu – cobalt, cobalt – fier – niobiu cu ajutorul dinamicii moleculare – modelarea matematică a interfețelor adiacente dintre două straturi nanometrice cu scopul de a îmbunătăți calitatea înterfeței lor. Metoda dinamicii moleculare se bazează pe conceptul de potențial, care este responsabil pentru natura și caracterul interacțiunilor atomilor nanosistemului. Am utilizat potențialul metodei modificate a atomului scufundat– **MEAM** (**M**odified **E**mbedded **A**tom **M**ethod). Metoda modificată a atomului scufundat se bazează pe teoria funcțională a densității – DFT (Density Functional Theory). În această metodă, potențialul rezultat al nanosistemului este reprezentat ca suma contribuțiilor energiei atomilor individuali, iar contribuțiile interacțiunilor pereche și cu mai multe elemente sunt considerate separat. Ca modul de calcul al programului pentru cercetare teoretică, a fost utilizat complexul de calcul **LAMMPS** (**L**arge – scale **A**tomic/**M**olecular **M**assively **P**arallel **S**imulator). Rezultatele au fost vizualizate folosind pachetele software **VMD** (**V**isual **M**olecular **D**ynamics) și **OVITO** (**O**pen **V**isualization **T**ool), care furnizează imagini ale structurilor atomice și moleculare nano – obiecte, cât și construiesc profile și distribuții spațiale prin parametrul țintă cum ar fi: înălțimea sau numărul de coordonare. potențialul rezultat al nanosistemului este reprezentat ca suma contribuțiilor energiei atomilor individuali, iar contribuțiile interacțiunilor de perechi și cu mai multe elemente sunt considerate separat.

$$U(r)=\sum_i U_i(r)=\sum_i\left(F_i(\bar{\rho}_i)+\frac{1}{2}\sum_{j\neq i}\phi_{ij}(r_{ij})\right),\ i=1,2,\ldots,N, \qquad (1)$$

unde $U_i(r)$ - este un potențial al unui atom individual, care influențează tipul și gradul de interacțiune în ecuațiile mișcării (1); F_i - este funcția de imersie atomică, dependentă de densitatea de fundal a electronilor; $\bar{\rho}_i$; $\phi_{ij}(r_{ij})$ - este o contribuție a potențialului pereche la energia totală, care variază în funcție de distanță.

Influența parametrilor proceselor de formare „ supraconductor/feromagnetic ” a structurilor hibride a sistemului supapă de spin este studiată pentru un nanosistem multistrat bazat pe cobalt și niobiu. Acest sistem este un material funcțional care a demonstrat un efect gigantic de valvă de spin. A fost propus un nou design și a fost efectuat calculul unei supape de spin constând din plăci supraconductoare și un metamaterial magnetic artificial plasat între ele, format din alternarea periodică a straturilor subțiri și groase ale unui metal feromagnetic. Grosimea straturilor afectează interacțiunea de schimb magnetic dintre straturile feromagnetice, care oferă posibilitatea

proiectării metamaterialelor magnetice artificiale cu proprietăți reglabile. Alegerea niobiului și a cobaltului ca metale care formează nanostraturi se face datorită potențialului larg de utilizare a acestor elemente în spintronică.

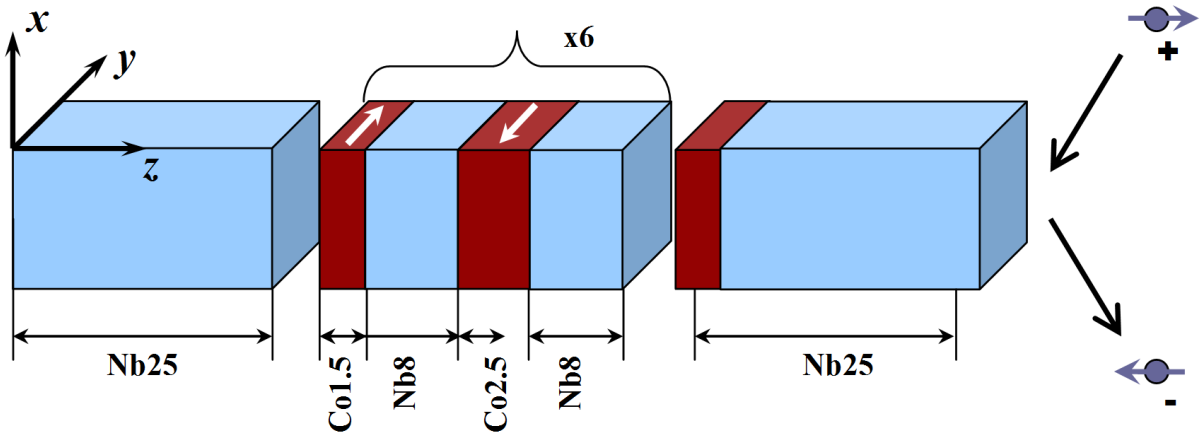


Fig. 5. Schița unui nanosistem supapă de spin Nb/Co (Nb25nm/[Co1.5nm/Nb8nm/Co2.5nm/Nb8nm]$_6$/Nb25nm) modelat pe calculator.

Numerele din figura 5 de lângă elementele din straturi arată grosimea lor în nanometri. Producția de probe se realizează prin metoda de depunere magnetron de materiale în vid. În general, un nanosistem conține aproximativ 20 de straturi.

În această modelare, considerăm depunerea numai a primelor patru straturi de cobalt și niobiu. Formularea generală a problemei de modelarea proceselor de formare a nanosistemelor multistrat este prezentată în figura 6. Primul strat material format din atomi de niobiu monocristal, servește drept substrat și bază pentru depunerea în vid a nanofilmelor ulterioare.

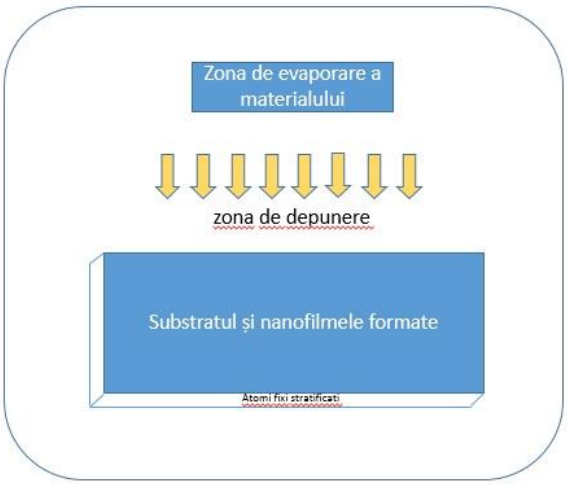


Fig. 6. Schema proceselor de modelare a formării nanosistemelor multistrat. Nanosistemul conține o zonă de evaporare a materialului, o zonă de depunere a atomilor, un substrat cu un strat inferior fix de atomi.

Substratul este plasat în regiunea inferioară a celulei de calcul; stratul său extrem este fixat pentru a preveni mișcarea haotică a probei în timpul simulării. În direcții orizontale, condițiile limită periodice sunt impuse celulei de calcul, care reduc timpul de calcul. În regiunea superioară, sunt prezente condiții de reflectare a limitei, astfel încât atomii depuși să nu părăsească sistemul de modelare. Procesul de depunere este simulat de apariția atomilor în zona de evaporare de deasupra substratului. În acest caz, atomii depuși au câștigat viteză spre substrat. Straturile sunt pulverizate pe etape. În timpul formării tuturor straturilor, câmpul magnetic din nanosistem a fost absent. Temperatura și presiunea pentru atomii depuși sunt reglate. Atomilor depuși li se imprimă o viteză inițială de aproximativ 0,1 Å/ps sau către suprafața substratului. Ulterior, viteza acestor atomi scade treptat din cauza schimbului de energie cu atomii de suprafață ai substratului și straturile atomului superior ale nanostraturilor formate. Temperatura substratului din fiecare calcul este menținută constantă. Concentrația atomilor depuși a fost de aproximativ 5 atomi pe nanometru cub. Limita superioară a celulei de calcul a fost deplasată în timpul tranziției la depunerea următorului nanostrat prin valoarea grosimii sale. Astfel, regiunea de depunere de deasupra substratului sa dovedit a fi aproximativ aceeași pentru fiecare strat de nanosistem. Parametrii de reglementare ai procesului, care afectează proprietățile nanomaterialelor rezultate, au fost: rata de depunere, controlată prin numărul de atomi depuși pe unitate de timp; temperatura substratului; densitatea fluxului de pulverizare, care a fost determinată de aria zonei de evaporare. Ca modul de calcul al programului pentru cercetare teoretică, a fost utilizat complexul de calcul **LAMMPS** (**L**arge–scale **A**tomic/ **M**olecular **M**assively **P**arallel **S**imulator) [158]. Acest pachet software și de instrumente este distribuit în mod liber, conține capacitatea de a efectua calcule paralele și acceptă modele matematice pe mai multe nivele, inclusiv dinamica moleculară. Algoritmii de analiză a rezultatelor au fost descriși în TCL și C ++. Pe baza L**AMMPS**, au fost dezvoltate și implementate scripturi și algoritmi pentru un studiu detaliat al structurii materialelor superconductor–feromagnetic și determinarea profilului său spațial. Rezultatele au fost vizualizate folosind pachetele software **VMD** (**V**isual **M**olecular **D**ynamics) [20] și **OVITO** (**O**pen **V**isualization **T**ool) [21], care nu numai că furnizează imagini ale structurilor atomice și moleculare nano – obiecte, ci și construiesc profiluri și distribuții spațiale prin parametrul țintă, de ex: înălțimea sau numărul de coordonare.

Capitolul V: au fost efectuate o serie de experimente numerice privind modelarea proceselor de formare a structurii hibride multistrat bazate pe cobalt, fier și niobiu. Elementele variabile din experimentele numerice au fost parametrii tehnologici de fabricație a materialului, inclusiv temperatura substratului, intensitatea și aria fluxului de depunere. Influența modurilor

tehnologice a fost evaluată în comparație cu versiunea de bază a formării nanosistemelor. Ca o variantă de bază, procesele de creștere au fost luate în considerare la temperatura normală, 300 K (temperatura substratului), iar depunerea a fost efectuată printr – un flux uniform pe întreaga suprafață a substratului. Temperatura din nanosistem a fost controlată folosind un termostat Nose–Hoover. O altă serie de experimente numerice a fost realizată asupra unui element de memorie MRAM. Nanofilmul format se depune, cu diferențe de înălțime de câțiva angstremi. Acest efect, poate fi explicat prin forțe de interacțiune mai intense care apar între atomii de niobiu în comparație cu alte tipuri de atomi luați în considerare. Analiza sistemului arată că straturile de Co – Fe nu au suferit o restructurare semnificativă și structura lor a rămas predominant cristalină. S – a efectuat o serie de experimente numerice privind modelarea proceselor de formare a structurii hibride multistrat bazate pe Co și Nb. Elementele variabile din studii au fost parametrii tehnologici de fabricație a materialului, inclusiv temperatura substratului, intensitatea și aria fluxului de depunere. Influența modurilor tehnologice a fost evaluată în comparație cu versiunea de bază a formării nanosistemelor. Ca o variantă de bază, procesele de creștere au fost luate în considerare la temperatura normală, 300 K (temperatura substratului), iar depunerea a fost efectuată printr – un flux uniform pe întreaga suprafață a substratului. Temperatura din nanosistem a fost controlată folosind un termostat Nose – Hoover. Termostatul a menținut temperatura substratului. Atomii depuși aveau o viteză direcționată; prin urmare, nu au fost implicați în corectarea directă a termostatului. Formarea unui sistem multistrat a fost efectuată în mai multe etape. Fiecare strat a fost depus prin acoperirea secvențială a metalelor, Nb sau Co. În prima etapă, Co a fost depus pe un substrat format din atomi de Nb. Substratul avea o structură cristalină cu o înălțime de 3.7 nm și o lățime de 13.2 nm în direcții orizontale. Pentru reperul de înălțime zero, din care au început să se formeze straturile materialului depus, s – a ales suprafața substratului. Numărul de atomi de Nb din substrat a fost de 33600. Pentru a se potrivi rezultatelor simulației și datelor experimentale, precum și formarea de nanostraturi de grosime necesară, 18000 de atomi de Co au fost depuși pe substrat în prima etapă, 70000 de atomi de Nb au fost depuși în a doua și 30000 de atomi de Co au fost depuși în a treia etapă. Ca rezultat, s – au format trei nanofilme cu grosimea de 1.5 nm, 8 nm și 2.5 nm. Durata tuturor etapelor de depunere a celor trei straturi pentru versiunea de bază a preparării probei în condiții normale a fost aleasă în funcție de grosimea lor și a fost de 0.2 ns, 0.6

ns și 0.4 ns. Imaginea unui nanosistem multistrat format ca urmare a modelării matematice este prezentată în fig. 7:

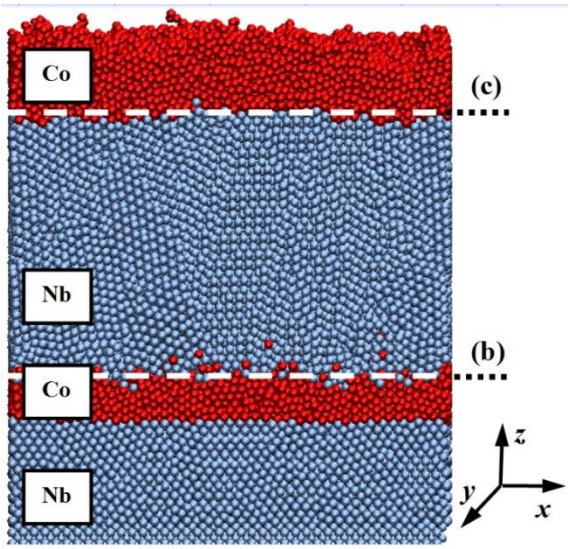


Fig. 7. Nanosistem multistrat Nb/Co. Punctele de contact ale nanofilmelor sunt indicate prin literele (b) și (c). În punctele de contact indicate, distribuția numerelor de coordonare va fi trasată mai jos. Temperatura substratului este fixată la 300 K.

Imaginea din fig. 7 demonstrează în mod clar procesele de formare a nanosistemului stratificat de Nb și Co și structura straturilor: straturile formate din atomi de Nb și Co au o structură policristalină. În acest caz, grupurile de atomi sunt combinați în domenii cu orientări spațiale diferite. Se observă estomparea zonei de contact dintre straturi și un profil de suprafață mai puțin uniform în comparație cu Nb. O caracteristică cantitativă a structurii spațiale a materialului poate fi obținută prin calcularea numărului de coordonare. Numărul de coordonare reflectă numărul de atomi apropiați, de același tip din rețeaua cristalină. Numărul celor mai apropiați vecini determină densitatea ambalajului materialului. Pentru diferite tipuri de rețele de cristal, numărul de coordonare va fi diferit. Rețeaua cubică centrată (caracteristică Nb) are un număr de coordonare egal cu 8, rețeaua hexagonală compactă (corespunde Co) – 12. Pentru nanosistemul format, modificarea valorii medii a numărului de coordonare în straturi au fost calculate – fig. 8. Substratul de Nb are o valoare al parametrului apropiată de 8, care indică structura sa cristalină. Nanofilmele de Co se caracterizează printr – un număr crescut de coordonare în intervalul 10 – 11. Această valoare nu atinge 12, ceea ce corespunde stării cristaline ideale a unei rețele hexagonale, care indică o structură amorfă a nanofilmelor de Co. Variațiile numărului de coordonare din stratul

intermediar de Nb sunt mai semnificative. Când ne apropiem de regiunile de contact cu Co, se observă o creștere a acestui parametru, fig. 8:

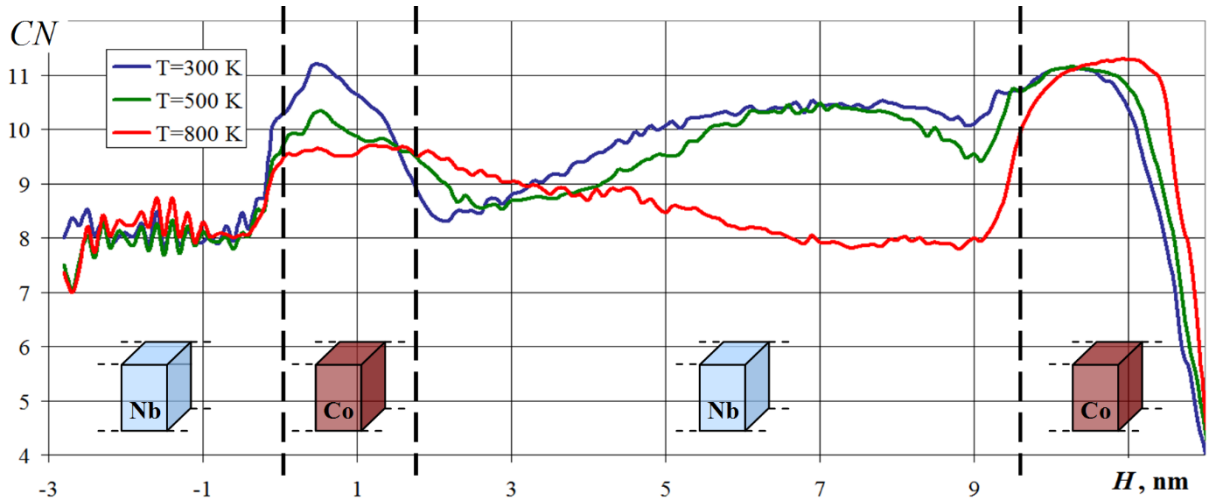


Fig. 8. Schimbarea numărului de coordonare (CN) de - a lungul axei Z (prezentată în fig. 7) în straturile Nb și Co ale nanostructurii. Punctele de contact ale nanofilmelor sunt prezentate prin linii verticale. Distribuția este reprezentată grafic pentru cazurile de depunere pe substraturi la temperaturi de 300, 500 și 800 K.

Astfel, s – a arătat că structura nanomaterialului depinde nu numai de caracteristicile actuale ale stratului, ci și de caracteristicile structurale ale regiunilor adiacente acestuia. În plus, temperatura are un efect clar asupra numărului celor mai apropiați vecini dintr – un nanosistem și, prin urmare, asupra structurii și proprietăților sale. O scădere semnificativă a numărului de coordonare în straturile exterioare ale ultimului nanofilm este asociată cu efectele de suprafață și apariția fenomenelor limită în acea regiune. Distribuția acestui parametru în spațiu este prezentat în fig. 9:

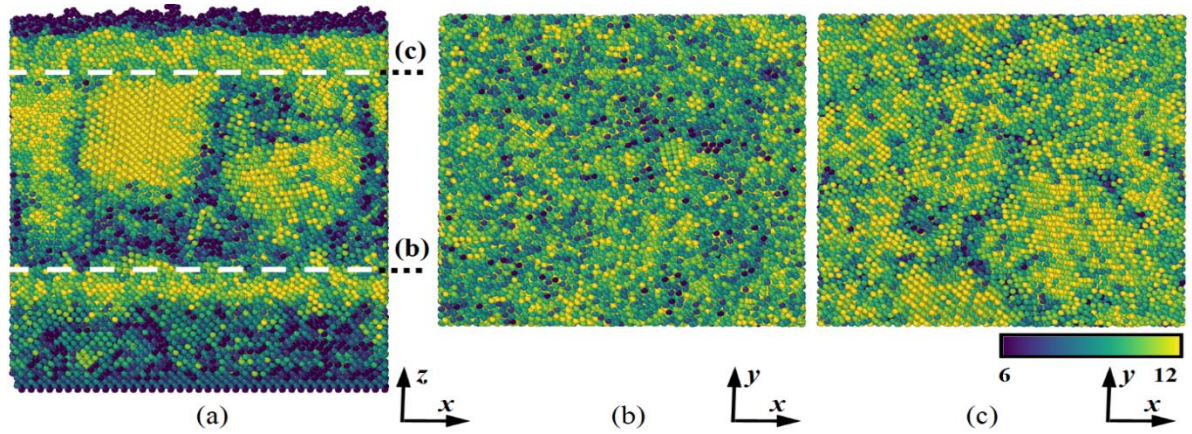


Fig. 9. (a) Distribuția spațială a numărului de coordonare în sistemul multistrat format Nb – Co (a) și în secțiunile sale paralele (b) și (c). Temperatura substratului 300 K.

Distribuția spațială a numărului de coordonare în nanocompozitul multistrat, ilustrat în fig. 9, caracterizează structura acestuia în detaliu. Liniile punctate din fig. 9 indică locațiile secțiunilor paralele prezentate în fig. 9.(b) și 9.(c). Secțiunile corespund zonelor de contact ale nanostraturilor și sunt, de asemenea, marcate în fig. 7. Profilul de culoare al numărului de coordonare confirmă valoarea crescută a acestuia pentru straturile de Co. Valoarea parametrului din aceste straturi este variabilă, cu o răspândire într – un anumit interval de valori. Substratul de Nb are un număr mai mic de coordonare. Structura acestei regiuni a fost inițial cristalină și s – a schimbat nesemnificativ în timpul modelării și depunerii. Un efect interesant este observat în nanostratul intermediar de niobiu, unde au apărut zone distincte de cristalizare. Zonele de cristalizare au un număr mai mare de coordonare și se caracterizează printr – un pachet mai dens de atomi. Regiunile descrise apar în filme suficient de groase, în principal în apropierea straturilor de Co. Nepotrivirea rețelelor cristaline din metalele inițiale determină rearanjări reciproce ale atomilor și transformarea structurii în interiorul materialului. Următoarea serie de experimente a vizat influența zonei fluxului de depunere și dimensiunea regiunii de modelare pe structura și morfologia nanosistemului stratificat simulat. Fig. 10 prezintă acești parametri ai nanosistemului:

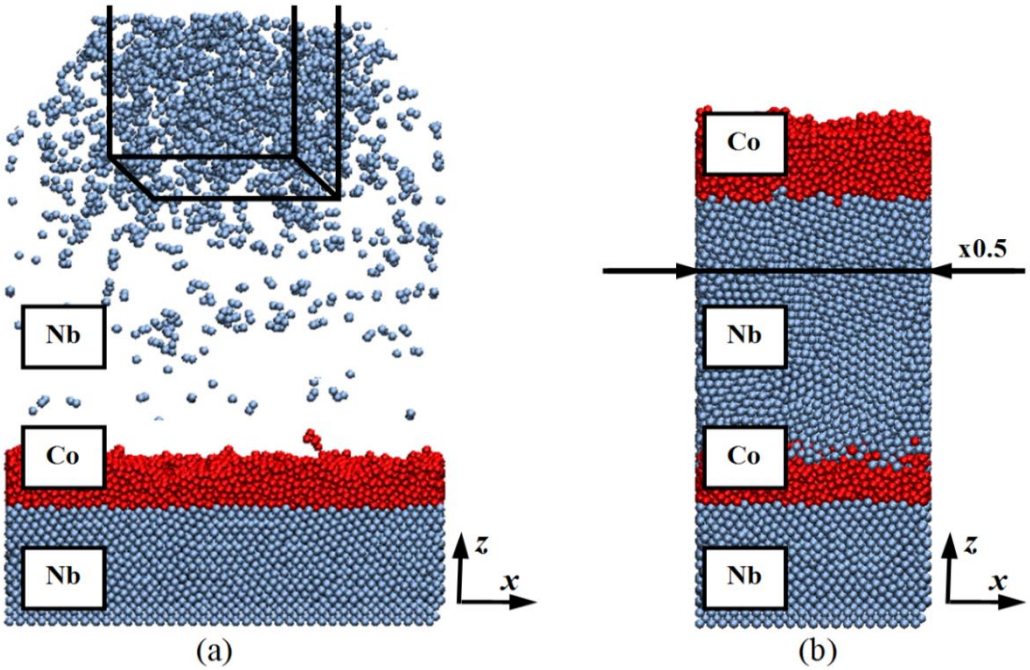


Fig. 10. Zona fluxului de depunere (a) și dimensiunea zonei de simulare (b). Zona fluxului de depunere este prezentată în partea de sus a figurii (a) cu linii negre. Reducerea domeniului de calcul din figura (b) este ilustrată de factorul x0.5 în direcțiile orizontale.

Modificarea zonei debitului de depunere, ilustrată în fig. 10.(a), a fost efectuată prin reducerea zonei de evaporare a materiilor prime prezentate în regiunea superioară a acestei figuri. Suprafața de curgere a pulverizării a fost redusă de patru ori față de valoarea inițială. De asemenea, modelarea proceselor de formare a nanocompozitelor a fost realizată pe o scară redusă de 4 ori. În acest caz, numărul atomilor depuși în fiecare strat a fost proporțional redus, astfel încât grosimea nanofilmelor formate să nu se schimbe.

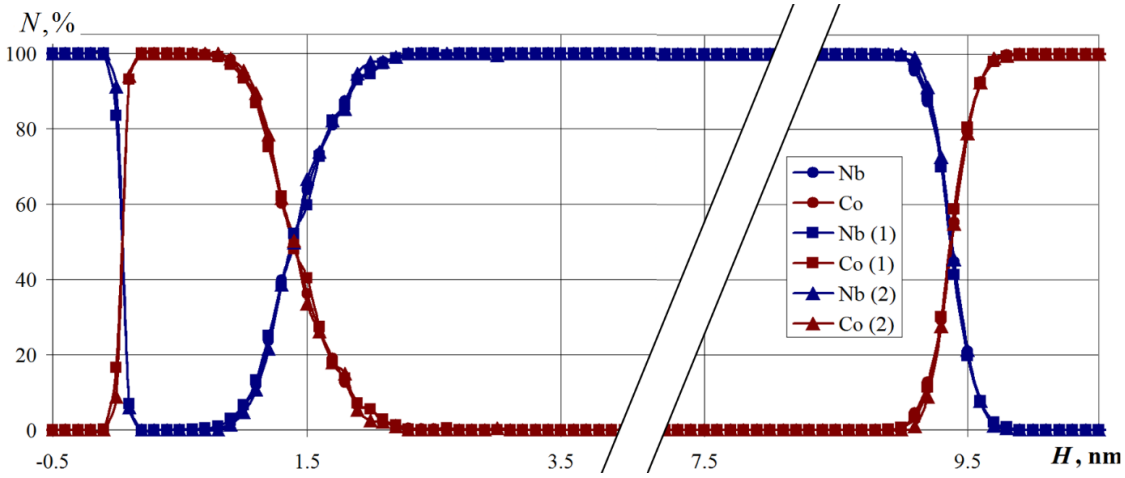


Fig. 11. Compoziția relativă strat cu strat a nanosistemului Nb – Co pentru fluxul de depunere redus de 4 ori (1) și zona de modelare redusă de 4 ori (2). Parametrul N este procentul de Co și Nb din straturile orizontale de nanofilme. Temperatura substratului este de 300 K.

Influența zonei fluxului de depunere și dimensiunea regiunii de modelare pe compoziția relativă a nanosistemului strat cu strat sunt prezentate în fig. 11. Dependențele fără index între paranteze corespund modului de bază de formare a nanosistemului. Analiza graficelor arată că schimbarea în intervalul studiat a unei scăderi a metalelor evaporate și o scădere a regiunii calculate, nu duc la rearanjări ale atomilor activi și la schimbarea compoziției nanostraturilor. O scădere a zonei fluxului de depunere a condus doar la apariția zonei de densitate atomică crescută în regiunea superioară deasupra substratului. Părăsind zona de evaporare, atomii depuși tind să ocupe o stare mai favorabilă din punct de vedere energetic și sunt împrăștiați pe un strat distribuit uniform pe întregul volum liber. Când atomii depuși ajung la suprafața substratului, efectul reducerii fluxului este nivelat. O scădere a dimensiunii transversale a nanosistemului cu un factor de 4, de asemenea, nu a afectat compoziția straturilor de nanosisteme, ceea ce poate fi văzut în fig. 11. Dependențele fracțiilor de Nb și Co diferă ușor de versiunea de bază a formației nanosistemului. Modificarea dimensiunii zonei de simulare ne permite să analizăm reprezentativitatea celulei de calcul. Domeniile computaționale mici pot duce la rezultate greșite de simulare datorită apariției efectelor la graniță. După cum rezultă din calcule, o scădere de patru ori a volumului nanosistemului nu a afectat compoziția straturilor de nanocompozite. Straturile

sunt conectate în aceleași locuri, iar dependențele proporțiilor de Nb și Co diferă ușor de varianta principală a formației probei. Datele obținute indică faptul că aria de modelare selectată inițial îndeplinește pe deplin cerința reprezentativității, iar rezultatele cercetării în mod corespunzător reproduc proprietățile nanosistemului modelat. Următoarea serie de experimente computaționale a avut ca scop elucidarea gradului de dependență a structurii nanosistemului multistrat de densitatea fluxului atomilor depuși. Această valoare este controlată de o creștere sau scădere a numărului de atomi depuși pe unitate de timp introdus în sistem din zona de evaporare. Aici, sunt calculate variantele experimentelor numerice cu privire la formarea nanofilmelor cu o creștere de 2 ori și o reducere de 1.5 ori densitatea fluxului atomilor depuși. Compoziția stratificată relativă a nanocompozitului pentru calcule este prezentată în fig. 11. Aici, fracția de elemente din compoziție în timpul formării nanostraturilor cu o rată de depunere redusă de 1.5 ori este prezentată de linii solide fără markeri, cu intensitate crescută cu puncte, linii fără markeri și intensitatea depunerii atomului de bază prin linii solide cu markeri.

Analiza dependenței din fig. 12 arată că o scădere a ratei de depunere a metalelor nu a afectat în mod semnificativ distribuția compoziției în straturile unui nanosistem multistrat.

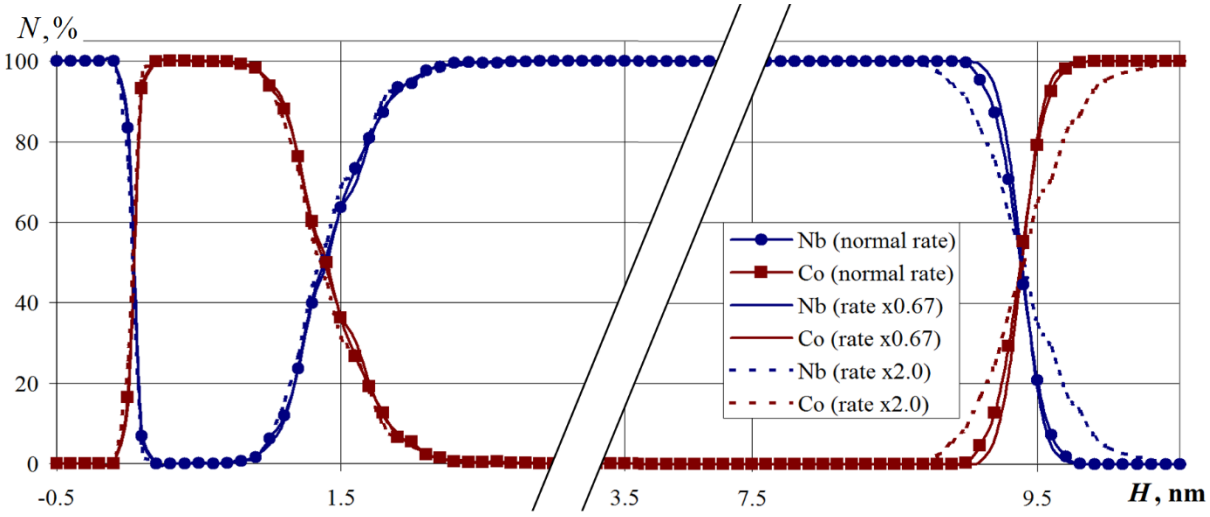


Fig. 12. Compoziția relativă stratificată a nanosistemului Nb – Co pentru diferite rate de depunere. Parametrul N este procentul de Co și Nb din straturile orizontale de nanofilme. Temperatura substratului este de 300 K.

O creștere a vitezei a dus la o deviere a compoziției de la datele obținute în versiunea de bază de calcul. O creștere semnificativă a intensității fluxului duce la faptul că atomii de metal încep să se aglomereze în nanoparticule deasupra suprafeței substratului. Structura nanofilmelor rezultate depinde în mod direct de dimensiunea clusterelor depuse și nu are întotdeauna timp să se reconstruiască la contactul direct cu suprafața. Datorită efectelor respective, pot apărea neomogenități, luxații și goluri în material. Abaterea în dependențele compoziționale construite în straturile superioare ale nanocompozitului, unde datorită unei structuri mai rarefiate, se remarcă în

special amestecarea suplimentară a regiunilor de contact cu nanofilmele. Studiile efectuate indică prezența unei anumite rate critice de depunere, al cărei exces duce la o structură diferită a nanomaterialelor. Deoarece în procesele tehnologice reale depunerea se efectuează cu o intensitate suficient de mică (aproximativ 1000 nm pe oră), pentru a obține rezultate de cercetare adecvate fizic, procesele de depunere trebuie simulate la o viteză care nu depășește această valoare critică. Pe de altă parte, nu este necesară creșterea duratei etapelor de creștere a nanofilmului, aproximând maxim valoarea reală a acestuia, întrucât, în conformitate cu graficele din fig. 4.5, structura și compoziția în acest caz sunt similare. A fost efectuată o serie de experimente pe calculator în care a fost studiată formarea de nanosisteme multistrat Nb – Co în intervalul de temperatură 300 – 800 K, pentru temperaturi ale substratului de 300, 500 și respectiv 800 K. Rezultatele simulării sunt prezentate în fig. 12 sub forma unui grafic compozițional procentual al acestui nanosistem. Calculele au arătat că temperatura substratului afectează semnificativ formarea structurii nanosistemului. O creștere a temperaturii duce la o creștere a grosimii totale a nanosistemului (la 800 K, această valoare a crescut cu 0.3 nm comparativ cu o temperatură de 300 K). Regiunea penetrării reciproce a atomilor de Nb în straturile sistemului de Co, și invers, este de asemenea în creștere, ceea ce se vede clar în graficele din fig. 13:

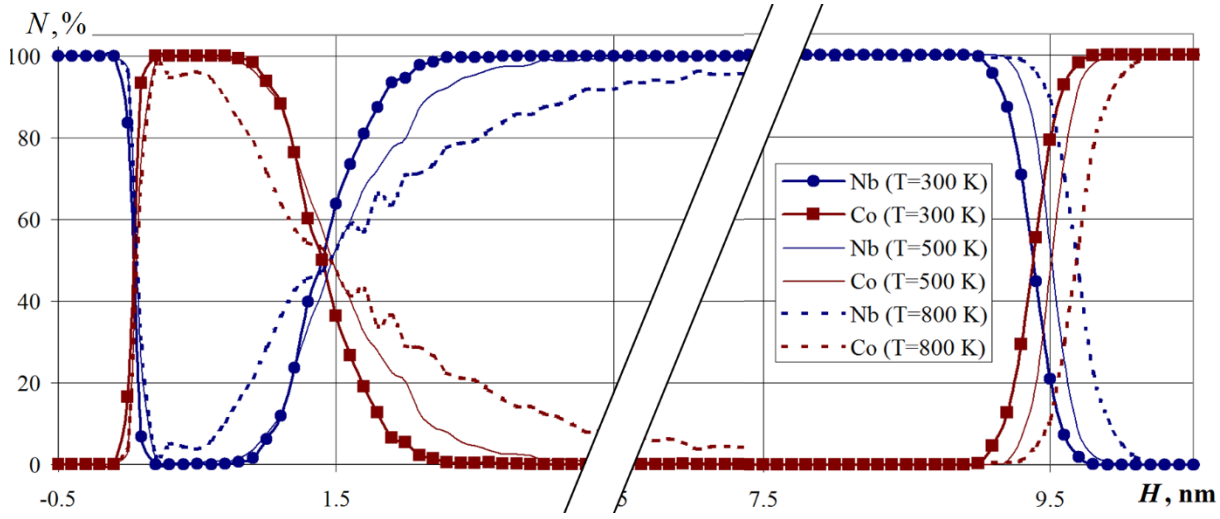


Fig. 13. Compoziția procentuală a nanosistemului multistrat Nb – Co format la o temperatură a substratului de 300, 500 și, respectiv, 800 K. Parametrul N este procentul de Co și Nb din straturile orizontale de nanofilme.

CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI

1. Structurile supraconductoare de Nb/Co, Co/Fe/Nb nu trebuie să fie formate din metale nemiscibile pentru a evita creșterea de tip insulă a nanostraturilor de pelicule din cauza neumezirii lor reciproce la interfață.
2. În urma optimizării parametrilor tehnologici de depunere magnetron s – a reușit depunerea de nanostraturi cu interfețele atomar netede, într – un singur ciclu de vid, în atmosferă de Ar.
3. Analiza interfețelor structurilor supraconductor/feromagnetic prin raze X a arătat calitatea înaltă a interfețelor cu rugozitatea de până la 0.3 nm.
4. O analiză a distribuției numărului de coordonare în material a arătat că straturile au o structură diferită atunci când nanofilmele multistrat sunt formate în condiții normale. Nanofilmele de Co sunt caracterizate de o structură amorfă. Nepotrivirea rețelelor metalelor inițiale determină rearanjări reciproce ale atomilor și transformarea structurii în interiorul nanosistemului.
5. O scădere a zonei fluxului de depunere și a regiunii de simulare cu 75 % din valorile inițiale nu duce la rearanjări ale atomilor și la o modificare a compoziției nanofilmelor. O scădere a zonei de flux de depunere a cauzat apariția zonei de densitate atomică crescută în regiunea superioară deasupra substratului.
6. O creștere semnificativă a intensității fluxului de depunere duce la apariția neomogenităților, luxațiilor și golurilor în interiorul nanosistemului format, datorită grupării preliminare a atomilor liberi.
7. Ca rezultat principal, s – a propus elementul de bază – supapa de spin cu metamaterial magnetic artificial în care rolul principal îl joacă supraconductibilitatea tripletă.

RECOMANDĂRI

1. Cu ajutorul dinamicii moleculare și a modelului atomului scufundat – MEAM, au fost ajustați parametrii de depunere magnetron cu scopul îmbunătățirii calității interfețelor straturilor nanometrice adiacente, ceea ce contribuie semnificativ la îmbunătățirea interfețelor adiacente cu sporirea efectelor cuantice, deci se recomandă a depune structurile la temperatura de 300 K a substratului de siliciu.
2. Se recomandă a aplica metamaterialul artificial alcătuit din nanostraturile: [Co (1.5 nm)/Nb (8 nm)/Co (2.5 nm)/Nb (8 nm)]$_6$ în calitate de legătură slabă a elementului de bază spin – valvă.
3. Configurația de nanostraturi supraconductor/feromagnetic ce alcătuiește legătura slabă a elementului de bază spin – valvă, oferă o diferență de amplitudine a perechii supraconductibile până la $\Delta/T_c = 0.5$ K, la orientarea P și AP a magnetizătii straturile feromagnetice vecine.
4. O joncțiune Josephson cu o legătură slabă compusă dintr – un metamaterial magnetic artificial poate fi comutat între stările paralele și antiparalele prin aplicarea unui un câmp de 30 Oe, sau un curent de 20 mA, ceea ce echivalează cu starea închisă sau deschisă a elementului de bază.

BIBLIOGRAFIE

1. GORKOV, L.P. *Microscopic Derivation of the Ginzburg – Landau Equations in the Theory of Superconductivity*. În: Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics, 1959, 36, 1364.
2. FROLICH, H. *Theory of the Superconducting State. The Ground State at the Absolute Zero of Temperature.* În: Physical Review, 1950, vol. 79, 845.
3. COOPER, L. N, *Bound Electron Pairs in a Degenerate Fermi Gas.* În: Physical Review, 1956, 104, 1189–1190. https://doi.org/10.1103/PhysRev.104.1189.
4. De GENNES, P. G. *Boundary Effects in Superconductors*. În: Reviews of Modern Physics, 1964, vol. 36, p. 225–237. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.36.225.
5. BELL, C., BURNELL, G., LEUNG, C. W., TARTE, E. J., KANG, D.J., BLAMAIRE, M. G. Controlable Josephson current through a pseudospin–valve structure. În: Appied Physics Letters, 2004, vol. 84, p. 1153–1155. doi:10.1063/1.1646217.
6. ROBINSON, J. W. A., HALASZ, G. B., BUZDIN, A. I., BLAMIRE, M. G. Enhanced Supercurrents in Josephson Junction Containing Nonparalel Ferromagnet Domains. În: Physical Review Letters**,** 2010, vol. 104, 207001. doi:10.1103/physrevlett.104.207001.
7. LEKSIN, P. V., GARIFIANOV, N. N., GARIFULLIN, I. A., SCHUMANN, J., KATAEV, V., SCHMIDT, O. G., BUCHNER, B. Manifestation of New Interference Effects in a Superconductor–Ferromagnet Spin Valve. În: Physical Review Letters, 2011, vol. 106, 067005. doi:10.1103/physrevlett.106.067005.
8. ZDRAVKOV, V. I., KEHRLE, J., OBERMEIER, G., LENK, D., KRUG von NIDDA, H. A., MULLER, C., KUPRIYANOV, M. Y., SIDORENKO, A. S., HORN, S., TIDECKS, R., TAGIROV, L. R. Experimental observation of the triplet spin–valve effect in a superconductor–ferromagnet heterostructure. În: Physical Review B, 2013, vol. 87, 144507. doi:10.1103/physrevb.87.144507.
9. SOSNIN, I., CHO, H., PETRASHOV,V. T., VOLKOV, A. F.Superconducting Phase Coherent Electron Transport in Proximity Conical Ferromagnets. În: Physical Review Letters, 2001, vol. 96, 570026. DOI: 10.1038/srep00699.
10. BAEK, B., RIPPARD, W. H., BENZ, S. P., RUSSEK, S. E., DRESSELHAUS, P. D. Hibrid superconducting–magnetic memory device using competing order parameters. În: Nature Communication, 2014, vol. 5, 3888. doi:10.1038/ncomms4888.
11. GLICK, J. A. AGUILAR, V., GOUGAM, A. B., NIEDZIELSKI, B. M., GINGRICH, E. C., LOLOEE, R., PRATT, W. P., BIRGE, N. O. Phase control in a spin – triplet SQUID. În: Science Advances, 2018, vol. 4, p.1-7. doi:10.1126/sciadv.aat9457.

12. KAPRAN, O. M., IOVAN, A., GOLOD, T., KRASNOV, V. M. Observation of the dominant spin–triplet supercurrent in Josephson spin valve with strong Ni ferromagnets. În: Physical Review Research**,** 2020, vol. 2, 013167. doi:10.1103/physrevresearch.2.013167.
13. BUZDIN, A. I., VEDYAYEV, A. V., RYZHANOVA, N. V. Spin–orientation–dependent superconductivity in F/S/F structures. În:Europhysics Letters, 1999, vol. 48, p. 686–691. doi:10.1209/epl/i1999-00539-0.
14. ESCHRIG, M. Spin–polarized supercurrents for spintronics: a review of current progress. În: Reports on Progress in Physics. 2015, vol. 78, 104501. doi:10.1088/0034-4885/78/10/104501.
15. SCHNEIDER, M. L., DONNELLY, C. A., RUSSEK, S. E. Tutorial: High–speed low–power neuromorphic systems based on magnetic Josephson junction. În: Journal of Applied Physics, 2018, vol. 124, 161102. doi:10.1063/1.5042425.
16. SCHEGOLEV, A. E., KLENOV, N. V., SOLOVIEV, I. I., TERESHONOK, M. V. Adiabatic superconducting cells for ultra–low–power artificial neural networks. În: Beilstein Journal of Nanotechnoly, 2016, vol. 7, p. 1397–1403. doi:10.3762/bjnano.7.130.
17. BAKURSKY, S. V., KLENOV, N. V., SOLOVIEV, I. I., KUPRIYANOV, M. Y., GOLUBOV, A. A. Superconducting phase domains for memory applicatons. În: Applied Physics Letters, 2016, vol. 108, 042602**.** doi:10.1063/1.4940440.
18. BAKURSKIY, S. V., KUPRIYANOV, M. Y., BARANOV, A. A., GOLUBOV, A. A., KLENOV, N. V., SOLOVIEV, I. I.Proximity effect in multilayer structures with alternating ferromagnetic and normal layers. În: JETP Letters, 2015, vol. 102, p. 586–593**.** doi:10.1134/s0021364015210043.
19. OBI, Y., IKEBE, M., FUJISHIRO, H. Evidence for Zero–and π–Phase Order Parameters of Superconducting Nb/Co Tri–and Pentalayers from the Oscillatory Bahavoir of the Transition Temperature. În: Physical Review Letters, 2005, vol. 94, 057008**.** doi:10.1103/physrevlett.94.057008.
20. HUMPHREY, W., DALKE, A., SCHULTEN, K. VMD: visual molecular dynamics. În: Journal of Molecular Graphics, 1996, vol. 14, p. 33-38. doi:10.1016/0263-7855(96)008-5.
21. STUKAWSKI, A. Visualization and analysis of atomistic simulation data with OVITO–the Open Visualization Tool. În: Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2009, vol. 18, 015012. doi:10.1088/0965-0393/18/1/015012.

LISTA PUBLICAȚIILOR LA TEMA TEZEI DE DOCTOR

1. Articole în reviste științifice

1.1 în revistele din bazele de date Web of Science și SCOPUS

1. KARPAN, O., MORARI, R., GOLOD, T., BORODIANSKYI, E., **BOIAN, V**., PREPELITSA, A., KLENOV, N., SIDORENKO, A., KRASNOV, V. In situ characterization of magnetic states in Nb/Co superconductor/ferromagnet heterostructures. În: *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 2021, 12, 913–923.https://doi.org/10.3762/bjnano.12.68
2. SIDORENKO, A., MORARI, R., BOIAN, V., PREPELITSA, A., ANTROPOV, E., SAVVA,Yu., FEDOTOV, A., SEVRYUKHINA, O., VAKHHRUSHEV, A. Hybrid nanostructures superconductor-ferromagnet for superconducting spintronics. În: *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1758, 012037. doi: 10.1088/1742-6596/1758/1/012037
3. VAKHRUSHEV, A., FEDOTOV, A., **BOIAN, V**., MORARI, R., SIDORENKO, A. Molecular dynamics modeling of the influence forming process parameters on the structure and morphlogy of a superconducting spin valve. În: *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2020, 11, 1776–1788. https://doi.org/10.3762/bjnano.11.160.
4. 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 criogenic memory. În: *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2019, 10, 833–839. https://doi.org/10.3762/bjnano.10.83.
5. ALEXANDER, V., ALEKSEY, Yu F., OLESYA, S., ANASTASIA S., **VLADIMIR, B**., ANATOLIE S. Numerical study of magnetic properties for Co-Fe-Nb nanofilms as promising materials for magnetoresistive memory. În: *Beilstein Archives*, 2024, 3, 28. https://doi.org/10.3762/bxiv.2024.19.v1

2. Articole în lucrările conferințelor și altor manifestări ştiinţifice

2.1. în lucrările manifestărilor ştiinţifice incluse în bazele de date Web of Science şi SCOPUS

6. **BOIAN VLADIMIR**, Modelarea proceselor de formare a valvei de spin supraconductoare bazate pe nanostructuri multistrat supraconductor-feromagnet. *Universitatea de stat Dimitrie Cantemir, Tendințe contemporane ale dezvoltării științei: viziuni ale tinerilor cercetători,* 2020, Ediția 9, Vol.1, 48–54. https://ibn.idsi.md/ro/collection_view/700
7. ANATOLIE, S., ROMAN, M., **VLADIMIR, B.**, EVGHENI, A., ANDREI, P., IURIE, S., NIKOLAI, K., IGOR, S., ALEXANDER, V. Nanostructures Superconductor/Ferromagnet for Superconducting Spintronics. *"The 12th international conference on intrinsic Josephson effect and horizons of superconducting spintronics"*, Chişinău, Moldova, 2021, 22–25. https://ibn.idsi.md/ro/collection_view/1566
8. **BOIAN, V**. Pregătirea și investigarea Joncțiunii JOSEPHSON Nb/NiPt/Nb. *The 12th international conference on intrinsic Josephson efect and horizons of superconducting spintronics. Chişinău, Moldova*, 2021, 54–55. https://ibn.idsi.md/ro/collection_view/1566
9. **BOIAN, V.** Determination of the critical thikness of Nb superconducting layers coupled proximiti with Co. *The 12th International Conference on Electronics, Communications and Computing*, 2022, 20–21, Chisinau, Republic of Moldova.doi.org/10.52326/ic-ecco.2022/EL.08

10. LUPU, M., KLENOV, N., SOLOVIEV, I., BAKURSKIY, S., **BOIAN, V**., MALCOCI, C., PREPELITSA, A., ANTROPOV, E., MORARI, R., SIDORENKO, A. Spintronic Functional Nanostructures for Artificial Neural Network. *International Conference on Electronics, Communications and Computing*, 2023, 20–21. https://ibn.idsi.md/vizualizare_articol/177456.
11. **BOIAN, V**. Efectul de proximitate în microelectronica supraconductoare. *Conferinţa Tehnico-Ştiinţifică a Studenţilor, Masteranzilor și Doctoranzilor, Universitatea Tehnică a Moldovei*, 5-7 April, 2023, Vol. I, 270–273.ISBN 978-9975-45-957-0. https://ibn.idsi.md/collection_view/2356.
12. SIDORENKO, A., KLENOV, N., SOLOVIEW, I., BAKURSKIY, S., **BOIAN, V**., MORARI, R., SAVVA, Yu., LOMAKIN, A., SIDORENKO, L., SIDORENKO, S., SIDORENKO, I., SEVERYUKHINA, O., FEDOTOV, A., SALOMATINA, A., VAKHRUSHEV, A. Base Elements for Artificial Neural Network: Structure Modeling, Production, Properties. *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, 2023, Vol. 17, 177 – 18. DOI: 10.46300/9106.2023.17.21
13. SIDORENKO, A., **BOIAN, V**., ANTROPOV, E., SAVVA, Yu., LOMAKIN, A., VAKHRUSHEV, A. Functional superconductor–ferromagnet nanostructures for superconducting electronics. *Book of Abstracts JAPMED,* 2023, Vol. 12, 85–86. https://japmed.bsu.edu.ge/index.php/japmed/issue/view/862/366
14. **VLADIMIR, B**., EUGEN, B. Using of the MEAM model for adjusting the technological parameters of magnetron deposition of Nb/Co nanolayers. *NANO-2024: "Quo Vadis – Ethics of the Scientific Research",* 15 – 18. April 2024, Chişinău. https://humboldt-kolleg.utm.md/
15. VAKHRUSHEV, A., FEDOTOV, Yu., **BOIAN, V**., SIDORENKO, A. Simulation of Multilayer Atom Nanostructures for Spinmechatronics. *Mechatronic Systems Design and Solid Materials*, 2021, pp. 187–203. ISBN 9781003045748.

ADNOTARE

la teza cu titlul: "**Supraconductibilitatea tripletă ca bază a spintronicii supraconductoare**", înaintată de candidatul Boian VLADIMIR pentru conferirea titlului științific de doctor în științe fizice la specialitatea 133.04 **«Fizica Stării Solide».**

Structura tezei: Teza înaintată spre susținere a fost realizată în cadrul Institutului de Inginerie Electronică și Nanotehnologii "D. Ghițu" al Univesității Tehnice a Moldovei, Chișinău. Este scrisă în limba română și conține cinci capitole, concluzii generale, recomandări și bibliografie (161 de titluri) fiind expusă pe 112 pagini text de bază, conținând 56 de figuri, 6 tabele. Cercetările și studiile de bază în această teză eu fost pulicate în **15** lucrări științifice publicate în reviste la tema tezei; **5** articole în reviste din bazele de date SCOPUS și Web of Science; **7** publicații la conferințe naționale și internaționale; **4** articole cu un singur autor.

Cuvinte cheie: supraconductibilitatea tripletă, supapă de spin, elemente de memorie MRAM, depunere magnetron, modelare matematică.

Scopul lucrării: realizarea unei supape de spin ca element de bază nedisipativ pentru calculatorul supraconductibil, și ajustarea parametrilor de depunere magnetron a nanostructurilor de Nb/Co, într – un singur ciclu de vid cu interfețele adiacente atomar netede.

Obiectivele cercetării: optimizarea parametrilor tehnologici de depunere a naostraturilor supraconductor/feromagnetic, cu parametri dirijați și strict reproductibili într – un singur ciclu de vid, modelarea matematică a parametrilor tehnologici de depunere magnetron cu ajutorul pachetului LAMMPS, în scopul ajustării lor, studiul proprietăților supraconductoare a structurilor stratificate nanometrice, cu efecte valvă de spin și elemente de memorie.

Noutatea și originalitatea științifică: A fost optimizată tehnologia de depunere magnetron a nanostraturilor de supraconductor/feromagnetic cu interfețe atomar netede în care a fost înregistrată împerecherea tripletă – datorată nanostraturilor de feromagnetic cu magnetizări necolineare. Este propus un element de bază – valvă de spin în care rolul principal îl are supraconductibilitatea tripletă, alcătuit dintr – un metamaterial magnetic artificial.

Problema științifică principală soluționată: constă în optimizarea parametrilor de depunere magnetron a nanostructurilor cu interfețe atomar netede, și studiul caracteristicilor nanostructurilor pentru utilizarea lor în calitate de elemente de memorie și supape de spin.

Semnificația teoretică și valoarea aplicativă a lucrării: În baza măsurărilor caracteristicilor de transport a structurilor hibride de supraconductor/feromagnetic, Nb/Co, a fost realizat elementul cu comutare suficient de rapidă, cu orientările paralele (P) și antiparalele (AP) ale filmelor de feromagnetic. Elementul de bază valvă de spin – $S/[F_1/s/F_2/s]n/F_1/S$, în heterostructurile supraconductor/feromagnet este realizat dacă cel puțin două straturi feromagnetice F_1, F_2 au o aliniere necoliniară a magnetizărilor lor – fapt ce generarează componenta tripletă impară. În domeniul teoretic cu ajutorul dinamicii moleculare și a modelului atomului scufundat – MEAM, au ajustați parametrii de depunere magnetron în scopul îmbunătățirii calității interfețelor straturilor nanometrice, au fost depistați experimental parametrii de depunere magnetron a nanostraturilor ce contribuie semnificativ la îmbunătățirea interfețelor adiacente cu sporirea efectelor cuantice, cum ar fi temperatura substratului de siliciu (300 K).

ABSTRACT

to the thesis with the title: **"Triplet superconductivity as the basis of superconducting spintronics"**, submitted by Boian VLADIMIR for the obtaining of the scientific title of Doctor of Physical Sciences in specialty 133.04 **"Solid State Physics"**.

Structure of the thesis: The thesis submitted was carried out within the Institute of Electronic Engineering and Nanotechnologies "D. Ghițu" of the Technical University of Moldova, Chisinau. It is written in Romanian and contains five chapters, general conclusions, recommendations and bibliography (161 titles) being presented on 112 pages of basic text, containing 56 figures, 6 tables. The basic research and applied studies are presented in **15** scientific papers published in journals on the topic of the thesis; **5** journal articles are inlcuded in the SCOPUS and Web of Science databases; **7** publications in proceedings of national and international conferences; **4** articles without co-authors.

Keywords: triplet superconductivity, spin valve, MRAM memory elements, magnetron deposition, mathematical modeling.

The aim of the work: the realization of a spin valve as a non-dissipative basic element for the superconducting computer, and the adjustment of the magnetron deposition parameters of Nb/Co nanostructures, in a single vacuum cycle with atomically smooth adjacent interfaces.

The objectives of the research: optimization of the technological parameters of the deposition of superconducting/ferromagnetic layers, with determined and strictly reproducible parameters in a single vacuum cycle, mathematical modeling of the technological parameters of magnetron deposition with the help of the LAMMPS package, in order to adjust them, the study of the superconducting properties of nanometric layered structures with spin valve effects and memory elements.

Scientific novelty and originality: The magnetron deposition technology of superconductor/ferromagnetic nanolayers with atomically smooth interfaces was optimized and the triplet pairing was detected – due to presence of ferromagnetic nanolayers with non-collinear magnetizations. A basic element is proposed - spin valve with artificial magnetic metamaterial in which triplet superconductivity plays the main role.

The main scientific problem solved: optimizing the magnetron deposition parameters of nanostructures with atomically smooth interfaces, and studying the characteristics of the nanostructures for their use as memory elements and spin valves.

Theoretical significance and applied value of the work: Based on the measurements of the transport characteristics of the superconductor/ferromagnetic hybrid structures, Nb/Co, the sufficiently fast switching element, the spin valve, was realized with the parallel (P) and antiparallel (AP) orientations of the ferromagnetic films magnetizations. The basic spin valve element – S/[F1/s/F2/s]n/F1/S, in superconductor/ferromagnet heterostructures is realized if at least two ferromagnetic layers F1, F2 have a non-collinear alignment of their magnetizations – a fact which generates the superconducting odd triplet component. In the theoretical part, with the help of molecular dynamics and the immersed atom model (MEAM), it were adjusted the magnetron deposition parameters in order to improve the quality of the interfaces of nanometric layers. Than the optimised parameters of magnetron deposition of nanolayers were experimentally checked (for example, the temperature of the silicon substrate, 300 K), which significantly improved the interfaces quality with the enhancement of quantum effects.

АННОТАЦИЯ

на диссертацию на тему: **«Триплетная сверхпроводимость как основа сверхпроводниковой спинтроники»**, представленную кандидатом Бояном ВЛАДИМИРОМ на соискание ученого звания доктора физических наук по специальности 133.04 **«Физика твердого тела».**

Структура диссертации: Представленная на защиту диссертация выполнена в Институте электронной техники и нанотехнологий «Д. Гицу» Технического университета Молдовы, Кишинев, 2024. Диссертация написана на румынском языке и содержит пять глав, общие выводы, рекомендации и библиографию (161 наименование), представлена на 112 страницах основного текста, содержащих 56 рисунков, 6 таблиц. Фундаментальные и прикладные исследования данной диссертации представлены в **15** научных статях, опубликованных в журналах по теме диссертации; **5** журнальных статей из баз данных SCOPUS и Web of Science; **7** публикаций на национальных и международных конференциях; **4** статьи с без соавторов.

Ключевые слова: триплетная сверхпроводимость, спиновой клапан, элементы памяти MRAM, магнетронное осаждение, математическое моделирование.

Цель работы: реализация спинового клапана как бездиссипативного базового элемента сверхпроводящего компьютера и настройка параметров магнетронного осаждения наноструктур Nb/Co в одном вакуумном цикле с атомарно-гладкими соседними интерфейсами.

Задачи исследования: оптимизация технологических параметров нанесения сверхпроводящих/ферромагнитных слоев с заданными и строго воспроизводимыми параметрами в одном вакуумном цикле, математическое моделирование технологических параметров магнетронного напыления с помощью пакета LAMMPS, и с целью их корректировки - исследование сверхпроводящих свойств нанометровых слоистых структур с эффектами спиновых клапанов и элементами памяти.

Научная новизна и оригинальность: Оптимизирована технология магнетронного осаждения нанослоев сверхпроводник/ферромагнитик с атомарно-гладкими границами раздела, в которых зафиксировано триплетное спаривание – за счет наличия ферромагнитных нанослоев с неколлинеарными намагниченностями. Предлагается базовый элемент - спиновый клапан, в котором главную роль играет слабая связь сверхпроводимость, состоящая из - искусственного магнитного метаматериала Nb/Co.

Основная решаемая научная задача: заключается в оптимизации параметров магнетронного осаждения наноструктур с атомно-гладкими границами раздела и изучении характеристик наноструктур для их использования в качестве элементов памяти и спиновых клапанов.

Теоретическая значимость и прикладная ценность работы: На основе измерений транспортных характеристик гибридных структур сверхпроводник/ферромагнитник Nb/Co реализован достаточно быстро переключающийся элемент с параллельной (P) и антипараллельной (AP) ориентациями намагниченности пленки ферромагнетика. Базовый элемент спинового клапана – S/[F1/s/F2/s]n/F1/S, в гетероструктурах сверхпроводник/ферромагнетик реализуется, если два ферромагнитных слоя F1, F2 имеют неколлинеарное направление намагниченностей. В теоретическом разделе с помощью молекулярной динамики и модели погруженного атома (MEAM) оптимизированы параметры магнетронного осаждения с целью улучшения качества границ раздела нанослоев Nb/Co, экспериментально установлены оптимальные параметры магнетронного осаждения нанослоев (например, температура кремниевой подложки 300 К), что существенно улучшает соседние интерфейсы наноструктуры с усилением квантовых эффектов.

BOIAN VLADIMIR

SUPRACONDUCTIBILITATEA TRIPLETĂ CA BAZĂ A SPINTRONICII SUPRACONDUCTOARE.

133.04 – Fizica stării solide

Rezumatul tezei de doctor în științe fizice

Aprobat spre tipar: 17.08.2024 **Formatul hârtiei: 60x84 1/16**
Hârtie ofset. Tipar Ofset. **Tiraj: 35 ex**
Coli de tipar: 2,0 **Comanda nr. 56**

Centrul Editorial-Poligrafic al Universității Pedagogice de Stat „Ion Creangă”
din Chișinău, str. Ion Creangă, nr. 1, MD-2069