

EFECTUL DE PROXIMITATE ÎN MICROELECTRONICA SUPRACONDUCTOARE

Vladimir BOIAN

Institutul de Inginerie Electronică și Nanotehnologie "D. GITU", UTM, Chisinau, Republica Moldova

Rezumat. – La momentul actual a minituarizării dispozitivelor microelectronice se înregistrează noi rezultate datorită necesităților în acest domeniu, al supraconductibilității și al nanotehnologiei. Un dispozitiv principal a microelectronicii de mare viteză și de mică putere este supapa de spin, care este alcătuită din straturi supraconductoare nanometrice, cum ar fi niobiu și cobaltul. Aceste două ordine – supraconductibilitatea și feromagnetismul, care la prima vedere au tangente diametral opuse și în stare naturală nu se află practic niciodată unul lângă celălalt - datorită stării: Larkin - Ovchinnikov - Fulde - Ferrell (LOFF), demonstrează fenomene cuantice destul de captivante pentru dezvoltarea lor ulterioară cu aplicații în: tehnologia informatică, chimie, biologie, farmacologie, intelctul artificial etc. În acest context de idei prezentăm cercetările privind structurile hibride Nb/Co cu proprietăți supraconductoare și determinarea grosimii critice a stratului supraconductor de Nb în contact cu Co.

Cuvinte chee: efectul de proximitate supraconductor/ferromagnet, împerecherea FFLO, grosimea critică.

Introducere

De la lucrările lui Ginzburg [1], problema coexistenței a două ordine cu rază lungă de acțiune - supraconductibilitatea (S) și feromagnetismul (F) - a fost intens discutată. Ginzburg a ajuns la concluzia că cele două ordine antagoniste nu pot coexista într – un material omogen, deoarece supraconductibilitatea necesită ca electronii de conducție să formeze perechi Cooper, adică perechi de electroni cu spini antiparaleli, în timp ce feromagnetismul forțează spinii electronilor să se alinieze paralel. În cazul în care supraconductibilitatea și feromagnetismul nu pot exista într – un material omogen, acestea pot a fi separate spațial la scară nanometrică, formând un material stratificat artificial. Acest scenariu a fost realizat în supraconductori magnetici multicomponenți [2] și în bistraturi și materiale stratificate S/F create artificial [3]. Acest din urmă sistem are avantajul că grosimea și/sau succesiunea straturilor S și F pot fi modificate în timpul fabricării. Garifianov și alți [4]. a sugerat utilizarea unor perechi de metale imiscibile, cum ar fi Pb și Fe, pentru a evita problema difuziei. Cu toate acestea, o analiză detaliată a arătat [5] că, în acest caz, transparența interfeței S/F este redusă datorită barierei de potențial electrostatic (deplasare de bandă) creată prin ajustarea potențialului electrochimic al metalelor aflate în contact.

Rezultate și discuții

Perechile S/F nu ar trebui să fie formate din metale imiscibile pentru a evita formarea de insule din cauza lipsei de umezire la interfața lor. Mai degrabă, ar trebui utilizate metale cu solubilitate limitată și cu intervale înguste de formare a compușilor intermetalici.

Tipul de substrat, calitatea suprafeței și regimurile de creștere a peliculei trebuie să asigure că rugozitatea interfeței stratului F este cât mai mică posibil în comparație cu grosimea stratului F. În acest sens au fost efectuate o serie de modelări matematice pe calculator cu scop de a scoate în evidență parametri tehnologici ce asigură calitatea interfețelor dintre supraconductori și fieromagnetici în cazul nostru.

Procesele de formare și structura sistemelor multistrat pentru spintronică au fost studiate prin metoda dinamicii moleculare [6,7]. Dinamica moleculară descrie mișcarea fiecărui atom de nanosistem la un anumit moment de timp, prin urmare este posibilă reproducerea evoluției detaliate

a nanoparticulelor și a proprietăților acestora. Baza metodei este ecuațiile mișcării tuturor atomilor, completate de condițiile inițiale sub forma coordonatelor și vitezei atomilor:

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = - \frac{\nabla U(\mathbf{r})}{\|\mathbf{r}_i\|} + \mathbf{F}_{ex}, \quad \mathbf{r}_i(t_0) = \mathbf{r}_{i0}, \quad \frac{d\mathbf{r}_i(t_0)}{dt} = \mathbf{V}_{i0}, \quad i = 1, K, N \quad (1)$$

unde N - este numărul de atomi care au format nanosistemul, m_i - este masa atomului - i ; $\mathbf{r}_{i0}, \mathbf{r}_i(t)$ - sunt vectorul de rază inițială și respectiv al atomului - i , respectiv; $U(\mathbf{r})$ - este potențialul sistemului, care depinde de poziția relativă a tuturor atomilor; $\mathbf{V}_{i0}, \mathbf{V}_i(t)$ - sunt viteza inițială și, respectiv, cea a celui de - al i - atom; $\mathbf{r}(t) = \{\mathbf{r}_1(t), \mathbf{r}_2(t), \dots, \mathbf{r}_K(t)\}$ - arată dependența de amplasare a întregului sistem de atomi; \mathbf{F}_{ex} - este forța externă, reflectă interacțiunea nanosistemului cu mediul extern, inclusiv responsabilă pentru ajustarea energiei pentru a menține o temperatură constantă.

Metoda dinamicii moleculare se bazează pe conceptul de potențial, care este responsabil pentru natura și caracterul interacțiunilor atomilor nanosistemului. Există multe opțiuni posibile pentru tipul de potențial, dar recent datorită acurateței, câmpurile de forță cu multe particule au câștigat o mare popularitate. În această lucrare, am folosit potențialul metodei modificate a atomului încorporat - **MEAM** (**M**odified **E**mbdeded **A**tom **M**ethod). Metoda modificată a atomului scufundat se bazează pe teoria funcțională a densității - **DFT** (**D**ensity **F**unctional **T**heory). În această metodă, 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.

Ca modul de calcul al programului pentru cercetare teoretică, a fost utilizat complexul de calcul **LAMMPS** (**L**arge-scale **A**tom / **M**olecular **M**assively **P**arallel **S**imulator) [8].

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 Figura 2 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 constând din Co, și invers, este de asemenea în creștere, ceea ce se vede clar în graficele din figura 1:

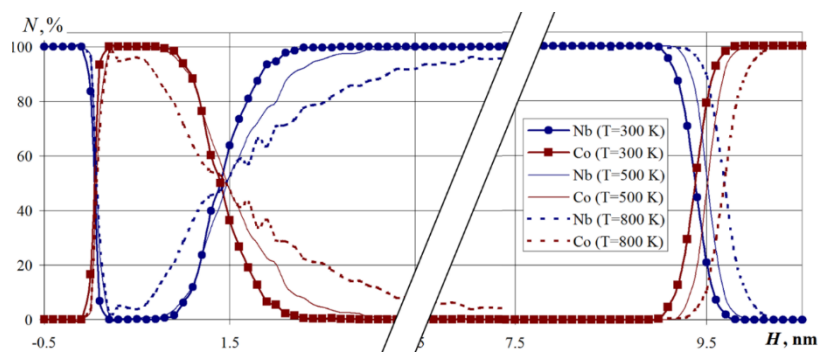


Figura 1. Compoziția procentuală a nanosistemului multistrat Nb - Co format la o temperatură a substratului de 300, 500 și, respectiv, 800 K. Parametrul N este procentul de cobalt și niobiu din straturile orizontale de nanofilme.

Măsurarea grosimii și rugozității straturilor F ar trebui să ofere date corecte și fiabile într - un interval de grosime de aproximativ (1 nm).

Pentru structurile hibride S/F (Nb/Co), persistă următoarele aspecte:

- în procesul de pulverizare magnetronică trebuie exclusă posibilitatea formării insulare a materialului,
- energia nivelelor Fermi trebuie să aibă aproximativ aceeași valoare,
- condiții de vid înalt.

Pentru a determina grosimea critică a Niobiului în contact cu Cobaltul, a fost acoperită o probă de 80mm * 10mm, care a fost plasată asimetric față de ținta magnetronului, iar stratul supraconductor (Nb) a fost depus sub forma unei pene ca în reprezentarea de mai jos:

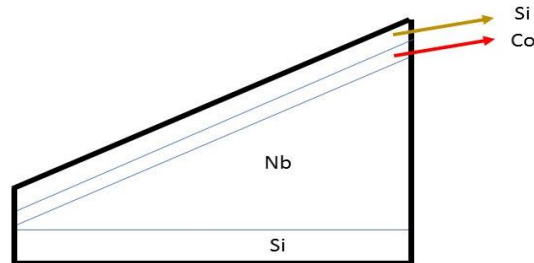


Figura 2. Diagrama de profil a structurii pulverizate cu ajutorul magnetronului Z – 400

Structura de dimensiunile: 80 mm * 10 mm este tăiată în 20 de bucăți. Fiecare dintre aceste 20 de bucăți este măsurată prin metoda celor 4 sonde și lipită pe placa de circuit imprimat pentru a fi introdusă în criostat. În urma experimentului s – a observat că, la o grosime constantă de 2,5 nm a Cobaltului, cuplat în proximitate cu Niobiu, odată cu scăderea grosimii supraconductorului – scade și temperatura critică a structurii hibride. La o grosime mai mică de 17,5 nm de Niobiu cuplat în proximitate cu Cobalt, a cărui temperatură critică este de 1,28 K, supraconductibilitatea dispare. Rezultatele sunt prezentate în figura de mai jos:

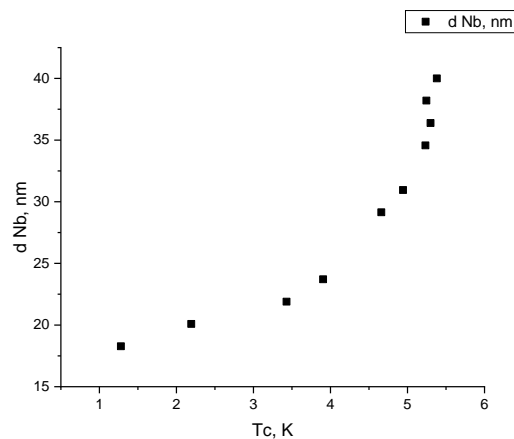


Figura 3. Dependența temperaturii critice de grosimea Niobiului

Concluzie:

Am investigat proprietățile supraconductoare ale bistraturilor de Nb/Co preparate prin pulverizare magnetronică în curent continuu pe substraturi de Si. Calitatea filmelor a fost caracterizată prin analiza difracției de raze X cu unghi mic. Parametrii fizici obținuți prin adaptarea teoriei proximității S/F la experiment se corelează bine cu proprietățile materiale ale perechii S/F, precum și cu datele din literatura de specialitate privind efectul de proximitate S/F în studiile altor perechi de materiale în contact. Rezultatele sunt interpretate cu succes în termenii Fulde – Ferrell – Larkin – Ovchinnikov (FFLO), cum ar fi cuplarea supraconductoare neomogenă într – un strat feromagnetic de Co.

Referințe:

1. V. GINZBURG, Ferromagnetic Superconductors. *Teoret. Fiz.* 31, 202 (1956) [Sov. Phys. JETP 4, 153 (1956)].
2. M. B. MAPLE and Ø. FISCHER (eds.), Superconductivity in Ternary Compounds I and II (*Springer-Verlag*, Berlin, 1982). DOI: 10.1007/978-1-4899-3768-1_1
3. CHIEN, C. L. & REICH, D. H. Proximity effects in superconducting/magnetic multilayers. *J. Magn. Magn. Mater.* 200, 83-94 (1999)
4. N.N. GARIFYANOV, YU.V. GORYUNOV, TH. M. UHGE, L. LAZAR, G.G. KHALIULLIN, K. WESTERHOLT, I.A. GARIFULLIN, H. ZABEL, Proximity effect in Fe/Pb/Fe trilayers, *Eur. Phys. J. B* 1, 405 (1998).
5. L. LAZAR, K.WESTERHOLT, H. ZABEL, L. R. TAGIROV, YU.V. GORYUNOV, N.N. GARIFYANOV, I.A. GARIFULLIN, Superconductor/ferromagnet proximity effect in Fe/Pb/Fe trilayers, *Phys. Rev. B* 61, 3711 (2000).
6. BASKES, M.I. Modified embedded-atom potentials for cubic materials and impurities, *Physical Review B* **1992**, 46, 2727-2742. doi: 10.1103/PhysRevB.46.2727
7. BASKES, M.I.; SRINIVASAN, S.G.; VALONE, S.M.; HOAGLAND, R.G. Multistate modified embedded atom method, *Physical Review B.* **2007**, 75, 094113. doi: 10.1103/PhysRevB.75.094113
8. PLIMPTON, S. Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics, *Journal of Computational Physics* **1995**, 117, Pp. 1-19. doi: 10.1006/jcph.1995.1039