

STUDIAREA SUPRACONDUCTIBILITĂȚII ÎN NANOSTRUCTURI DE NIOBIU-COBALT

Cezar-Casian MALCOCI

Departamentul Microelectronică și Inginerie Biomedicală, gr. MN-211, Facultatea Calculatoare, Informatică și Microelectronică, Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, Moldova

Autorul corespondent: Cezar-Casian Malcoci, sharovasea@gmail.com

Îndrumător/coordonator științific: Anatolie SIDORENKO, acad., dr. hab., prof. univ., Universitatea Tehnică a Moldovei

Rezumat. În lucrare se descriu etapele de pregătire a unei serii de probe și depunere de Niobiu – Cobalt la aceeași temperatură, utilizând un magnetron (Z400). Apoi etapele de selectare a unei probe pentru tăiere în mai multe bucăți cu scopul de a măsura supraconductibilitatea în aceeași probă la diferite grosimi ale straturilor. Cercetarea a avut loc în două etape, prima etapă fiind efectuată în laboratorul "Structuri cu Corp Solid" a Institutului de Inginerie Electronică și Nanotehnologii "D. Ghișu" din Chișinău, departamentul "Criogenie". A doua etapă a cercetării a fost efectuată la Universitatea din Stockholm în centrul AlbaNova.

Cuvinte cheie: materiale supraconductoare, temperatura critică, probe, LHZ400, Criocooler-ul 17T.

Introducere

În ultimii ani, interesul pentru studierea supraconductivității în nanostructuri metalice a crescut semnificativ, datorită potențialului lor de a furniza proprietăți unice, în special datorită dimensiunilor lor reduse. În acest context, nanostructurile de niobiu-cobalt au atras atenția cercetătorilor datorită proprietăților lor interesante, cum ar fi supraconductivitatea la temperaturi relativ ridicate și durata mare de viață a electronilor supraconductori.

Scopul acestui studiu este de a investiga proprietățile supraconductoare ale nanostructurilor de niobiu-cobalt, în vederea identificării factorilor care influențează comportamentul supraconductiv al acestor materiale și a dezvoltării de aplicații practice bazate pe acestea. Cercetarea se va concentra pe sinteza, caracterizarea structurală și electrică, precum și pe evaluarea proprietăților termice ale nanostructurilor de niobiu-cobalt, cu accent pe comportamentul supraconductiv și potențialul lor de utilizare în tehnologii avansate.

1. Supraconductori: definiție și evoluție

Un supraconductor este un element sau aliaj metalic, atunci când este răcit sub o anumită temperatură prag, materialul pierde toată rezistența electrică. Pragul de temperatură sub care un material trece într-o stare supraconductoare este desemnat ca *temperatura critică* (T_c). S-a demonstrat că nu toate materialele se transformă în supraconductori, deoarece materialele au fiecare propria lor valoare de T_c [1].

Fenomenul a fost observat pentru prima dată de către specialistul Heike Kamerlingh Onnes în anul 1911, care i-a adus Premiul Nobel pentru fizică în anul 1913 [1-3]. Acesta studiind dependența de temperatură a rezistivității electrice a mercurului a observat că sub o anumită temperatură, apropiată de temperatura heliului lichid (4,2 K), rezistivitatea scade brusc către zero. Ulterior cercetările a permis să se determine temperatura critică pentru diferite elemente chimice, atât simple, cât și compuse.

Pe parcursul anilor acest domeniu s-a extins foarte mult și au fost descoperite multe alte forme de supraconductori, inclusiv și supraconductori de tip 2 în anul 1930. Specialiștii Meissner W. și Ochsenfeld R. în anul 1933 descoperă că un material supraconductor expulzează un câmp magnetic. Fenomenul dat este astăzi cunoscut ca *efectul Meissner* (-Ochsenfeld). Acesta este atât de puternic, încât un magnet poate fi levitat deasupra unui material supraconductor.

În anul 1941 a fost identificată supraconductibilitatea în niobura de niobiu la 16 K. Iar în anul 1953 este descoperit Vanadium-3 Siliciu ca supraconductor la temperatura de 17,5 K. Primul cablu supraconductor comercial de niobiu-titan este dezvoltat de Westinghouse scientists în 1962 [3]. Pentru prima dată acest fir de înaltă energie a fost utilizat pentru electromagneții unui accelerator de particule.

Teoria de bază a supraconductivității (BSD) a fost prezentată în anul 1957 de către fizicienii americani, aceasta le-a adus oamenilor de știință - John Bardeen, Leon Cooper și John Schrieffer - Premiul Nobel pentru fizică din anul 1972. Pentru munca cu superconductivitatea o parte din Premiul Nobel pentru fizică în anul 1973, ia revenit lui Brian Josephson [1].

Domnul Brian D. Josephson, în anul 1962, fiind un student din ciclul trei al universității din Cambridge, a prezis că un curent electric va circula între două materiale supraconductoare, chiar și atunci când ele sunt separate de un material ne-supraconductor sau un izolant. Acest fenomen de tunelare este astăzi cunoscut sub numele de *efect Josephson*. Fiind aplicat la fabricarea unor dispozitive electronice, ca de exemplu CALMAR, un instrument capabil să detecteze câmpuri magnetice de intensitate foarte reduse.

Primul supraconductor organic (pe bază de carbon) a fost sintetizat cu succes în anul 1979 de către cercetătorul danez Klaus Bechgaard de la Universitatea din Copenhaga împreună cu alți trei membri ai unei echipe franceze. Materialul abreviat $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$ a fost răcit la o temperatură de numai 1,2 K și apoi supus unei presiuni înalte pentru a deveni supraconductor.

Specialiștii Karl Muller și Johannes Bednorz, în anul 1986, au făcut o descoperire care a revoluționat modul în care oamenii de știință utilizau și apreciau superconductorii. Se considera că superconductivitatea se manifesta numai atunci când este răcită până aproape de zero absolut, dar folosind un oxid de bariu, lantan și cupru, au descoperit că a devenit un supraconductor la aproximativ 40 de grade Kelvin.

Cercetătorii de la University of Houston și University of Alabama din Huntsville (SUA) în anul 1987 substituie lantan cu ytriu și obțin un compus ceramic supraconductor la 92 K, aducând supraconductibilitate în domeniul temperaturii azotului lichid, YBCO. În anul 1988 specialistul Allen Hermann de la University of Arkansas realizează un supraconductor ceramic conținând calciu și taliiu la temperatura de 120 K. Apoi, cercetătorii de la IBM și AT&T Bell Labs produc un supraconductor la 125 K. Peste ceva timp în anul 1993 specialiștii A. Schilling, M. Cantoni, J. D. Guo, și H. R. Ott din ETH Zurich, din Elveția, propun un supraconductor pe bază de mercur, bariu, calciu și cupru oxigen, $(\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8)$ la care temperatura critică este 133K [4].

În prezent supraconductorii sunt folosiți în: cabluri supraconductoare, biomagnetism, levitație magnetică, motoare și generatoare, magneți, transformatori, calculatoare cuantice etc.

2. Partea experimentală

Scopul lucrării constă în realizarea unor serii de probe prin depunerea straturilor nanometrice de cobalt și niobiu și cercetarea fenomenului de supraconductibilitate, utilizând criostatul. Cercetarea a avut loc în două etape, prima etapă fiind efectuată în cadrul laboratorului "Structuri cu Corp Solid" a Institutului de Inginerie Electronică și Nanotehnologii "D. Ghițu" din Chișinău, departamentul "Criogenie".

În perioada ianuarie 2022 au fost realizate 5 probe, utilizând instalația Z400 din laborator.

Pentru realizarea experimentului s-au parcurs etapele:

1. *Pregătirea probelor*. Începem prin selectarea plăcuței de siliciu. Orice acțiune cu placheta se va desfășura utilizând penșeta și un șervețel curat pentru evitarea depunerilor particulelor nedorite pe suprafața acesteia. Tăierea plachetei se realizează utilizând pixul cu vârf de diamant sau utilizând utilajul special de tăiere.

După obținerea probelor cu dimensiunile și forma dorită urmează curățirea acestora:

- Probele se introduc în curățătorul cu microunde (unde urmează de a fi spălate de 4-5 ori câte 15 minute).
- Extragem probele cu penșeta și le clătim cu izopropanol.

- În containerul oval le clătim cu apă distilată.
- Le uscăm cu uscătorul cu gaz.
- Curățim preventiv capacul magnetronului și locul lui de aplicație cu un șervețel umed în izopropanol.

2. *Introducerea probelor în aparatul Z400.* Înaintea introducerii probelor curățim utilizând un șervețel umed în izopropanol capacul magnetronului și locul lui de contact. După curățire amplasăm probele pe ținta magnetronului.

3. *Depunerea straturilor.* După amplasarea probelor se închide magnetronul și efectuăm următorii pași pentru crearea vidului (presiunii necesare): pornim sistemul de răcire cu apă; verificăm indicatorul pentru a confirma circulația apei în sistem, în caz contrar revenim la pasul 1; pornim blocul central; pornim pompa; deschidem "robinetul"; așteptăm scăderea presiunii până la 10^{-2} ; pornim al 2-lea indicator; apăsăm butonul Test 1; pornim pompa turbomoleculară. Când utilajul ajunge la presiunea dorită efectuăm depunerea straturilor prin apăsarea unor butoane respectând parametrii doriți.

La final s-au obținut 5 probe, astfel s-a încheiat prima etapă de cercetare. Rezultatele obținute sunt centralizate în tabelul 1.

Tabelul 1

Rezultatele obținute pentru cele 5 probe

Nr. probei	Data	Componenta	Temperatura substratului
1	22.01.2022	Si – substrat/Nb(150)/Co(10)/Nb(150)/Si-cap	200 C
2	20.01.2022	Si – substrat/Nb(150)/Co(10)/Nb(150)/Si-cap	200 C
3	21.01.2022	Si – substrat/Nb(50)/Co(1,5)/Nb(8)/Co(2,5)/Nb(8)/Si-cap	200 C
4	26.01.2022	Si – substrat/Nb(150)/Co(4)/Nb(150)/Si-cap	200 C
5	31.01.2022	Si – substrat/Nb(150)/Co(1,5)/Nb(8)/Co(2,5)/Nb(150)/Si-cap	200 C

A doua etapă a cercetării a fost efectuată la Universitatea din Stockholm în centrul AlbaNova, unde s-au verificat probele utilizând Criocooler-ul 17T. Sistemul utilizează o pereche de criocooler în două trepte pentru a produce temperaturi de aproximativ 4,2 Kelvin la magnet și permit funcționarea VTI-ului între 1,6K și temperatura camerei. În continuare se prezintă etapele parcurse în laboratorul din centrul AlbaNova.

Pregătirea probei nr. 3:

1. Zgârierea probei pentru amplasarea în Fascicul de ioni focalizat (FIB).
2. Amplasarea în FIB.
3. Fotografierea probei nr. 3.
4. Amplasarea probei nr. 3 în microscop pentru analiza zgârieturilor.

Pregătirea probei nr. 1:

1. Selectarea și tăierea probei nr. 1 în 22 de bucăți.
2. După tăiere urmează lipirea probelor pe PCB (uscarea durează 12 ore).
3. După ce proba sa uscat pe PCB, urmează lipirea (bondarea) în camera curată pentru crearea contactelor de măsurare a temperaturii critice T_c .
4. Urmează fixarea probei în undița criostatului.
5. Introducerea undiței cu proba în criostat.
6. Răcirea criostatului până la temperatura de 4 K pentru a verifica supraconductibilitatea probei. Răcirea criostatului se datorește cuptorului din cadrul Criocooler-ul 17T.
7. În cazul în care nu s-a găsit supraconductibilitate până la 4 K urmează răcirea până la valori mai joase utilizând soft-ul LabVIEW.
8. Când atingem starea de supraconductibilitate menținem temperatura stabilă și obținem Temperatura critică a probei. Aceasta se determină datorită soft-ului LabVIEW.
9. După ce s-a obținut temperatura critică pornim cuptorul pentru a încălzi criostatul până la temperatura camerei ca să putem schimba proba și repeta procesul.

În urma efectuării pașilor descriși mai sus s-a obținut pentru proba nr. 1 temperatura critică. Rezultatele obținute se prezintă în tabelul 2.

Analizând tabelul 2 se poate spune că subproba 2 și 7 nu au temperatură critică, de aceea au fost eliminate din studiu. Totodată se observă că odată cu micșorarea grosimii are loc o scădere a temperaturii critice.

Tabelul 2

Rezultatele obținute pentru proba 1

Nr. subprobei	X, mm de la capătul gros și grosimea de Nb, dNb nm	Tc, K	Nr. subprobei	X, mm de la capătul gros și grosimea de Nb, dNb nm	Tc, K
2	-	-	16	Aprox = 29.14	4.660
7	-	-	17	Aprox = 30.95	4.942
10	Aprox = 18.28	1.28	19	Aprox = 34.57	5.233
11	Aprox = 20.09	2.193	20	Aprox = 36.38	5.3
12	Aprox = 21.9	3.43	21	Aprox = 38.2	5.245
13	Aprox = 23.71	3.905	22	Aprox = 40	5.381

Criostatul permite înregistrarea tuturor datelor în timpul celor trei faze: răcire, menținerea temperaturii și încălzirii. Aceste date sunt necesare pentru a lua decizii privind starea probei pe parcursul experimentului și utilizarea ulterioară a ei.

Concluzii

Lucrarea descrie fenomenele fizice și influența acestora asupra supraconductorilor. Probele au fost testate în studiul proceselor de formare a unei nanostructuri bazate pe Niobiu și Cobalt. A fost investigată influența diferiților parametri tehnologici: grosime; temperatura depunerii; rezistență etc.

În urma efectuării pașilor descriși în lucrare s-a obținut pentru proba nr. 1 temperatura critică. Analizând rezultatele obținute se poate spune că subproba 2 și 7 nu au temperatură critică, de aceea au fost eliminate din studiu. Totodată se observă că odată cu micșorarea grosimii are loc o scădere a temperaturii critice.

Temperatura substratului este un factor principal care afectează formarea nanosistemelor multistrat, structura atomică a zonelor de contact ale interfeței, precum și compoziția și structura nanosistemului multistrat în ansamblu.

Referințe

1. Ce este un supraconductor? Definiție și utilizări. [online]. [accesat 10.10.2022]. Disponibil: <https://www.greelane.com/ro/știință-tehnologie-math>
2. Supraconductibilitate. [online]. [citat 13.10.2022]. Disponibil: <https://ro.wikipedia.org/wiki/Supraconductibilitate>.
3. The History of Superconductors. [online]. [citat 27.11.2022]. Disponibil: www.superconductors.org/History.htm
4. Introducere în supraconductibilitate. [online]. [citat 20.11.2022]. Disponibil: www.phys.ubbcluj.ro/~iosif.deac/courses/FCS/c...