

RESTABILIREA DUBLĂ A SUPRACONDUCTIBILITĂȚII, PENTRU PRIMA DATĂ ÎNREGISTRATĂ EXPERIMENTAL

Dr. hab., prof. univ.
Anatolie SIDORENCO

DOUBLE RE-ENTRANT SUPER- CONDUCTIVITY FOR THE FIRST TIME REGISTERED EXPERIMENTALLY

The author presents a new physical effect – double re-entrant behavior of the superconducting state in layered nanostructures, for the first time detected and investigated by Moldavian physicists in collaboration with German colleagues. In superconductor-ferromagnet metallic (S/F) contacts the superconducting condensate penetrates through the S/F interface into a ferromagnetic layer, where the superconducting pairing wave function not only decays deep into the F metal, but simultaneously oscillates. Based on these oscillations several new physical effects were recently predicted, and one of them now is observed experimentally: a non-monotonous, re-entrant superconducting critical temperature behavior on the SF-nanostructures Nb/Cu1-xNix as a function of the F metal (Cu1-xNix) thickness. The experimental results give evidence for the pairing function oscillations associated with a realization of the macroscopic quantum-mechanical effect - a quasi-one dimensional Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov (FFLO) state in the ferromagnetic layer. It opens up the real prospects for building up the principally new microelectronic device - superconducting spin switch for superconducting spintronics.

Efectul supraconductibilității, adică dispariția completă a rezistenței electrice în unele materiale, este cauzat de „fenomenul Cooper” – formarea cuaziparticulei (așa-numita „perechea Cooper”) ce constă din doi electroni cu spini orientați antiparaleli (spin – momentul magnetic propriu al electronului). Astfel de cuaziparticule se descriu printr-o funcție de undă unică pentru întreg supraconductorul și se deplasează în interiorul materialului, fără a avea loc împrăștierea pe defecte sau impurități, fără disipare a energiei, respectiv fără rezistență electrică. Este firesc de considerat că o altă stare, corelată puternic, și anume feromagnetismul, reprezintă antipodul, antagonistul stării supraconductoare, deoarece orientarea feromagnetică presupune o orientare paralelă a spinilor electronilor, ceea ce trebuie să conducă la distrugerea perechilor Cooper și a supraconductibilității.

În a. 1964 au fost publicate două lucrări remarcabile ale fizicienilor teoreticieni Anatoliei Larkin și Yurii Ovchinnikov [1], Peter Fulde și

Richard Ferrell [2], în care a fost prezisă posibilitatea apariției supraconductibilității în feromagnet! În realitate, această posibilitate era limitată de o serie de condiții greu de îndeplinit și de limitarea strictă a energiei de schimb a feromagnetului, ceea ce a făcut ca problema observării stării supraconductoare Fulde – Ferrell – Larkin – Ovchinnikov (starea – FFLO, numită astfel cu numele teoreticienilor ce au prezis acest efect) să fie practic imposibil de soluționat. Însă, dacă separăm spațial supraconductorul și feromagnetul, de exemplu prin crearea nanostructurilor stratificate ce constau din alternarea straturilor de feromagnet (F) și supraconductor (S), după cum a propus fizicianul-teoretician Buzdin [3], atunci limitarea strictă a energiei de schimb a feromagnetului va fi nesemnificativă și astfel va apărea posibilitatea realizării stării supraconductoare „exotice” de tipul FFLO. Două stări antagoniste (supraconductibilitate și feromagnetism) vor acționa una asupra celeilalte datorită pătrunderii electronilor prin interfața lor comună – suprafața de contact a structurii stratificate. Supraconductibilitatea într-o asemenea structură poate „supraviețui”, chiar dacă energia despicerii de schimb a zonei de conducție în metalul feromagnet, ce se opune împerechierii supraconductoare în material omogen, este cu mult mai mare decât fanta energetică a supraconductorului. Electronii cu spini antiparaleli, ce formează perechea Cooper, nimeresc în diferite subzone de spin ale zonei de conducție a metalului, în care ei au impulsuri Fermi ce se deosebesc semnificativ. Drept rezultat, impulsul total al perechii Cooper se dovedește diferit de zero și funcția de undă a perechilor Cooper devine oscilatorie în spațiu, după cum este arătat în *fig. 1*. Prezența fazei la funcția de undă conduce la efecte de interferență, iar stratul plan-paralel de material feromagnet în structura stratificată joacă rolul interferometrului Fabri-Perot. Dacă grosimea stratului metalului feromagnetic variază, atunci se modifică condițiile de interferență ale funcției de undă a perechilor pe interfața S/F. În conformitate cu aceasta are loc modularea fluxului de perechi Cooper din supraconductor în feromagnet, adică legătura dintre straturile S și F se amplifică sau se atenuază, iar temperatura tranziției supraconductoare, T_c , devine dependentă de grosimea stratului feromagnet.

O problemă a experimentatorilor a devenit identificarea posibilității de a pregăti nanostructuri stratificate potrivite de supraconductor-feromagnet din materiale ce posedă solubilitate reciprocă minimală și care sunt capabile să asigure o interfață de separare omogenă drastică, necesară pentru realizarea condiției, pentru care este posibilă apariția și detectarea stării neobișnuite prezise.

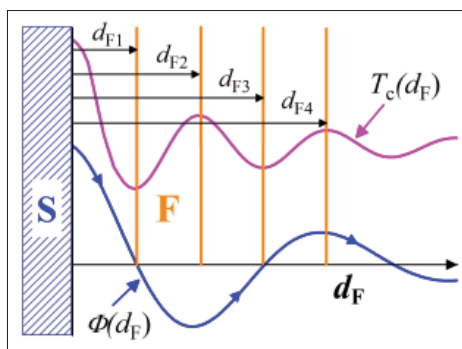


Fig.1.

Structura stratificată „supraconductor-feromagnet”: funcția de undă constantă după amplitudine a perechilor Cooper, Φ , în supraconductor (S) devine oscilantă în stratul de feromagnet (F); modificarea grosimii stratului de feromagnet (linii verticale) conduce la atenuarea sau amplificarea supraconductibilității induse în stratul de feromagnet și, respectiv, la apariția dependenței oscilatorii a temperaturii supraconductoare, T_c , de grosimea stratului de feromagnet, d_F .

Pentru soluționarea acestei probleme a fost necesar de rezolvat multe altele: tehnice, tehnologice, analitice, măsurătorii. Pentru pregătirea nanostructurilor stratificate cu proprietăți date și reproduse la Institutul de Inginerie Electronică și Tehnologii Industriale al AȘM, a fost elaborată și brevetată o procedură tehnologică specială și un șir de dispozitive [4,5,6] ce au permis unui grup de cercetători din cadrul Institutului să pregătească nanostructurile necesare pe bază de niobiu și aliaj cupru-nichel și să observe oscilații distincte ale temperaturii de tranziție supraconductoare a nanostructurilor „niobiu – nichel”, de asemenea și oscilațiile T_c , ce ating suprimarea totală a supraconductibilității urmând restabilirea ei ulterioară – restabilirea dublă a supraconductibilității în nanostructuri de niobiu / cupru – nichel [7], după cum este arătat în fig.2.

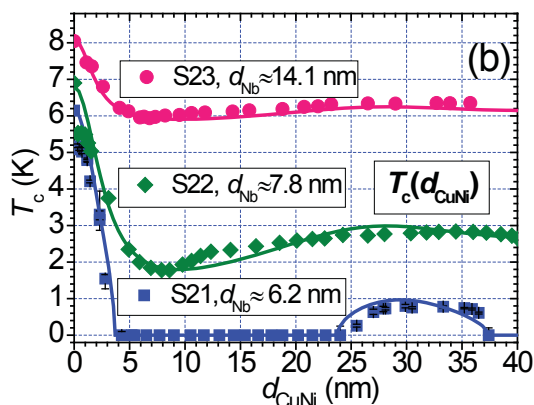


Fig. 2. Dependența nemonotonică a T_c (d_F) și restabilirea supraconductibilității în nanostructuri Nb/Cu41Ni59

La variația grosimii stratului feromagnetic temperatura critică a tranziției supraconductibile, T_c , scade brusc până la suprimarea totală a supraconductibilității la $d_{CuNi} \approx 4$ nm. Odată cu creșterea în continuare a grosimii stratului feromagnetic, supraconductibilitatea se restabilește la $d_{CuNi} \geq 24$ nm. Creșterea ulterioară a grosimii stratului duce la dispariția supraconductibilității la $d_{CuNi} \approx 38$ nm. Efectul înregistrat **pentru prima dată experimental** [7] este o evidență a realizării unei stări quasi-uni-dimensionale Fulde – Ferrell – Larkin – Ovchinnikov în straturi feromagnetice.

În urma cercetărilor nanostructurilor supraconductor/feromagnetice a fost lansată și argumentată experimental o idee conceptual nouă – *efectul de restabilire dublă a supraconductibilității în nanostructurile supraconductor-feromagnet* [8].

Rezultatul obținut este o consecință a colaborării îndelungate între IETI al AȘM, Institutul de Nanotehnologii din or. Karlsruhe (Germania) și Universitatea de Stat din or. Augsburg (Germania) în domeniul investigațiilor la problema coexistenței supraconductibilității și ordonării feromagnetice. Fenomenul de restabilire dublă a supraconductibilității în sistemele de pelicule subțiri supraconductor-feromagnet condiționează perspectiva de realizare a celulelor supraconductoare cu memorie ultrarapide – valve de spin, ce funcționează în baza principiilor fizice noi cu utilizarea fluxurilor electronice cu spin ordonat, dirijate prin intermediul câmpului magnetic extern [9,10]. Valva de spin reprezintă elementul de bază pentru una din direcțiile moderne de amploare ale microelectronicii – spintronica supraconductoare.

Bibliografie

- [1] A. I. Larkin and Yu.N. Ovchinnikov, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 47, 1136 (1964) [Sov. Phys. JETP 20, 762 (1965)].
- [2] P. Fulde and R. Ferrell, Phys. Rev. 135, A550 (1964).
- [3] A. I. Buzdin, Rev. Mod. Phys. 77, 935 (2005).
- [4] V. Zdravkov, A. Sidorenko, G. Obermeier, S. Gsell, M. Schreck, C. Müller, S. Horn, R. Tidecks, L.R. Tagirov, Phys. Rev. Lett. 97, 057004 (2006).
- [5] A.S. Sidorenko, V.I. Zdravkov. “Instalație pentru obținerea peliculelor conductoare”, Brevet №3135 din 31.08.2006.
- [6] A.S. Sidorenko, V.I. Zdravkov, R.A. Morari. “Dispozitiv de obținere a peliculelor supraconductoare”, Brevet №6324 din 22.01.2010.
- [7] A.S. Sidorenko, V.I. Zdravkov, J. Kehrle, R. Morari, G. Obermeier, S. Gsell, M. Schreck, C. Müller, M. Yu. Kupriyanov, V.V. Ryazanov, S. Horn, L.R. Tagirov, R. Tidecks. JETP Letters. 90, 139 (2009).
- [8] Nanoscale Phenomena – Fundamentals and Applications, ed. By H. Hahn, A. Sidorenko, I. Tiginyanu, «Springer», 2009, 237 p.
- [9] L.R. Tagirov. Phys. Rev. Lett. 83, 2058 (1999).
- [10] A.I. Buzdin, A.V. Vedyayev, N.V. Rythanova. Europhys. Lett. 46, 686 (1999).