

UN FIZICIAN STRĂLUCIT, DOCTORUL EVGHENI MOSCALENCO

Doctorul Evgheni Sveatoslav Moscalenco, originar din Republica Moldova, s-a născut la Chișinău în ziua de 5 mai 1963. A absolvit școala medie din Chișinău în 1980 și Universitatea de Stat din Sankt Petersburg în 1986. A fost doctorand la Institutul Fizico-Tehnic (IFT) „A.F. Ioffe” al Academiei de Științe a Rusiei, în Laboratorul de Spectroscopie optică a corpului solid condus de academicianul A.A. Kaplianskii și a obținut gradul de doctor (candidat) în științele fizico-matematice în anul 1991.

Toată activitatea științifică ulterioară a doctorului E. Moscalenco a fost legată de IFT, unde a activat timp de 20 de ani până la decesul său subit din cauza emboliei inimii la 11 martie 2012 la vârsta de 49 de ani. În ultimii 12 ani, concomitent cu funcția de cercetător științific superior al IFT a luat parte în calitate de colaborator invitat la cercetarea proprietăților optice ale punctelor cuantice de semiconductor în cadrul Departamentului de fizică și tehnologii de măsurare al Universității din Linköping, Suedia, condus de profesorul Per Olof Holtz. Despre Evgheni Moscalenco, el avea să spună următoarele:

Nu încapă nicio îndoială că Evgheni s-a manifestat ca un membru important și prețios al echipei noastre pe parcursul acestor 12 ani. El a fost un fizician strălucit, care a contribuit considerabil la elaborările noastre și la perceperea mai desăvârșită a proprietăților punctelor cuantice. Își lansa ideile și obținea rezultate într-un mod convingător. Evgheni a fost o persoană de o curiozitate debordantă, de o tenacitate excepțională, avea obiective bine determinate și lucra cu mare însuflețire spre a-și atinge scopul. Am apreciat pe parcursul anilor experiența, intensitatea și capacitatea lui de lucru. El a contribuit esențial la formarea câtorva doctoranzi. Impactul lui Evgheni asupra tinerilor prin felul cum își împărtășea cunoștințele sale vaste și experiența au fost inestimabile și s-au bucurat de cea mai înaltă apreciere a studenților.

La referințele de mai sus, mai alăturăm câteva cuvinte scrise de doctorandul Chih-Wei Hsu: *Eu apreciez timpul pe care împreună cu Evgheni l-am petrecut în laborator. Deși încăperea era rece și întunecată, atitudinea lui entuziasmată și mintea strălucită aprindeau lumina făcliei pentru mine, ca*



05.05.1963-11.03.2012

să vad frumusețea spectrelor. Știu că totul are un sfârșit, până acum păstrez în inima mea sentimentul neconținut al pierderii în legătură cu această trecere neașteptată a sa în eternitate...

În continuare vom descrie pe scurt, într-un stil cât mai simplu posibil, fenomenele de orientare optică și de polarizare a spinilor electronilor și nucleelor în punctele cuantice de semiconductor studiate de grupul de cercetători din Linköping cu participarea dr. E. Moscalenco, pentru a comemora activitatea D-lui științifică cu prilejul aniversării sale de 50 de ani la care n-a ajuns să fie în viață. Rezultatele obținute în această direcție au fost expuse în articolul publicat în Physical Review B, v. 80, 193413 (2009), pe care ne bazăm.

Orientarea optică și polarizarea spinilor electronilor și nucleelor în punctele cuantice de semiconductor

Posibilitatea de a polariza sau orienta spinii nucleelor într-un metal sub influența spinilor electronilor de conductibilitate în condițiile de echilibru termodinamic a fost menționată pentru prima dată de Overhauser. El a stabilit faptul că polarizarea spinilor electronilor poate conduce la polarizarea spinilor nucleelor. La rândul său, polarizarea spinilor electronilor în semiconductori poate fi efectuată cu ajutorul luminii polarizate circular a laserului, atunci când fotonii absorbiți provoacă tranzițiile optice ale electronilor din banda de valență în cea de conductibilitate, ceea ce conduce la crearea perechilor electron-gol cu spini orientați în direcția propagării luminii.

Teoria acestor fenomene de orientare optică și de polarizare a spinilor și nucleelor în semiconduc-

tori a fost elaborata de Diakonov și Perel din IFT și continuatorii lor. Vom discuta cazul când lumina incidentă este orientată perpendicular pe suprafața stratului bidimensional (2D) de semiconductor, de exemplu de tipul InGaAs, iar pe suprafața lui sunt împrăștiate puncte cuantice (PC) în formă de bobite sau piramide mici cu dimensiuni nanometrice în toate trei direcții (structuri 0D), însă formate din alt semiconductor, de exemplu, InAs.

Prin „gol” se numește locul liber din banda de valență complet umplută în starea de bază a semiconductorului, apărut după extragerea electronului și transferarea lui în banda de conductibilitate. Interacțiunea Coulombiană a electronului de conductibilitate, zis simplu electron (e), cu locul vacant în banda de valență, zis simplu gol (g), conduce la formarea stării legate a perechii electron-gol (e-g) de tipul atomului de hidrogen sau de pozitroniu, care se numește exciton (X). Este important faptul, că energia de creare a excitonului în PC din InAs este esențial mai mică decât energia de creare a perechii e-g pe suprafața stratului de InGaAs. De aceea perechile e-g cu spini polarizați se iau la întrecere să ajungă cât mai repede în interiorul punctelor cuantice, unde nivelele energetice sunt mai joase și stările lor mai stabile. Electronul de conductibilitate fiind mai ușurel și având o viteză termică mai mare decât golul, ajunge în PC mai repede decât golul. În condițiile experienței lucrării de referință, electronul se găsea de unul singur în interiorul PC în lipsa golului timp de 26 picosecunde. ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$). În acest timp spinul electronului dovedește să intre în interacțiune hiperfină de contact Fermi cu spinul nucleului, funcția de undă a electronului fiind diferită de zero în punctul unde se afla nucleul și să viziteze toate nucleele care se găsesc în interiorul PC, numărul nucleelelor fiind de la 10^3 - 10^5 . Electronul, polarizând toate nucleele, contribuie la crearea câmpului magnetic nuclear, numit câmp Overhauser. Atunci când golul ajunge și el în interiorul PC, electronul deja a creat câmpul Overhauser. Însă golul nu-l simte, deoarece n-are contact și capacitatea de a interacționa cu spinii nucleelelor, în banda de valență funcția lui de undă fiind egală cu zero în punctul unde se află nucleul. În schimb, golul intră imediat în interacțiune Coulombiană cu electronul și creează excitonul. În afară de mișcarea relativă e-g, ca și în interiorul atomului de hidrogen la o distanță medie numită raza lui Bohr, electronul și golul mai au puțină să se reîntâlnească în locul de origine, adică se produce și interacțiunea de contact e-g numită interacțiune de schimb care există paralel cu cea Coulombiană directă. Prin această

interacțiune de schimb, golul forțează electronul să-și orienteze spinul după placul golului, ceea ce este echivalent cu apariția unui câmp magnetic de schimb orientat în planul stratului și nu perpendicular lui. De exemplu, când interacțiunea de schimb este egală cu $25 \mu\text{eV}$, câmpul magnetic de schimb este de $0,43 \text{ T}$. Atunci când electronul se întoarce definitiv în locul unde se găsește golul, acest proces se numește recombinare. Procesul de recombinare, acompaniat cu emiterea fotonului, se numește recombinare radiativă.

Perioada de timp cât există excitonul până la recombinare se numește timp de recombinare. În cazul dat el este egal cu 800 ps . Excitonul creat în PC prin mecanismul de capturare separată a electronului și golului, așa cum a fost descris mai sus, se găsește în prezența a două câmpuri magnetice: unul nuclear numit Overhauser și altul de proveniență pur electronică numit câmp de schimb Bexch. Excitonul poate fi considerat ca având un spin efectiv care este supus acțiunii unui câmp magnetic total compus din două câmpuri magnetice perpendiculare, după cum am văzut mai sus. Precesia spinului efectiv al excitonului în jurul câmpului magnetic total duce la faptul că emisia luminei de către excitonul din interiorul punctului cuantic este parțial circular polarizată. Dacă era numai câmpul Overhauser, atunci polarizarea ar fi fost circulară complet ca și la lumina de excitare a perechilor e-g, iar dacă n-ar exista câmpul Overhauser, atunci emisia ar fi fost complet nepolarizată. Este foarte important să menționăm că dacă excitonul ar fi fost creat direct în interiorul PC, spinul electronului ar fi fost supus imediat interacțiunii de schimb care determină numai spinul sumar al perechii e-g și duce la o proiecție arbitrară a spinului electronului pe direcția de propagare a luminii de excitare. În așa condiții, crearea câmpului magnetic nuclear este imposibilă.

În lucrarea de referință a fost înregistrat experimental un grad înalt de polarizare circulară până la 60% a emisiei excitonului capturat în punctul cuantic. Meritul acestei lucrări este că autorii și-au dat seama că fenomenul aparent trivial de polarizare parțială a emisiei excitonului din PC este legat cu un fenomen atât de fin cum este interacțiunea hiperfină de contact Fermi. Cât este de interesant și neobișnuit acest fenomen vom vedea în continuare.

Câmpul magnetic creat de electron se numește câmp Knight Be și la distanța constantei rețelei cristaline a_0 are valoarea de $0,1 \text{ T}$ atunci când $a_0^3 = 10^{-23} \text{ cm}^3$. Câmpul magnetic produs de un nucleu la aceeași distanță a_0 este aproximativ de 2000 de ori mai mic decât Be. Însă în PC cu 10^4 de nuclee

câmpul magnetic nuclear total numit Overhauser B_N este egal cu 0,5 T. El este de aceeași mărime ca și câmpul magnetic de schimb Bexch, și-i capabil să polarizeze circular lumina emisă de exciton din interiorul punctului cuantic. Cele afirmate rămân valabile dacă durata de existență a câmpului Overhauser este mare și el persistă cel puțin 800 ps până când se începe recombinarea excitonului și emiterea luminii. S-a dovedit că el trăiește un timp mult mai îndelungat. Aceasta se datorează faptului că defazarea nucleelor, adică dezorientarea lor, se produce în urma interacțiunii dipole-dipol a spinilor celor două nuclee situate alături la distanța a_0 . Deoarece ambele nuclee au momentul nuclear magnetic foarte mic în comparație cu magnetonul lui Bohr, această interacțiune este foarte mică și defazarea începe abia după 10^{-4} s. Câmpul Overhauser există și atunci când excitonul dispare și așteaptă reciclarea procesului, când vine alt electron cu aceeași polarizare și continue edificarea câmpului Overhauser. Mai mult ca atât: câmpul Overhauser acționează asupra

electronului și, datorită efectului Zeeman, duce la deplasarea nivelului energetic al electronului, ceea ce se numește deplasarea lui Overhauser. Starea polarizată în formă de câmp Overhauser se păstrează 0,1 ms, cu toate că temperatura rețelei este de 10 K, iar mișcarea orbitală a nucleului și deplasarea lui din nodul rețelei se petrece în timp de 4 ps.

Aceasta înseamnă că temperatura efectivă a subsistemului format din spinii nucleelor este de 10^7 ori mai mică decât temperatura rețelei cristaline. Spinul nucleului rămâne neclintit chiar și atunci când centrul de greutate al nucleului este zdruncinat de mișcarea lui termică. Așa temperaturi extrem de joase au fost atinse în faimoasele experiențe dedicate Condensării Bose-Einstein a atomilor în capcane. Polarizarea emisiei excitonului în PC s-a dovedit a fi martorul polarizării spinilor nucleelor și o consecință a interacțiunii hiperfine de contact Fermi.

*Prezentare scrisă
de acad. S. Moscalenco*



Assistant Professor
Fredrik Karlsson



Professor Per Olof Holtz



Mats Larsson,
former PhD student



Arvid Larsson,
former PhD student



Doctor Evgheni Moskalenko,
ChihWei Hsu, PhD student



Supaluck Amloy,
PhD student

Grupul de cercetători condus de profesorul Per Olof Holtz de la Universitatea din Linköping, Suedia