

LASERUL POLARITONIC – TRIUMF AL CERCETĂRIILOR FUNDAMENTALE ȘI TEHNOLOGIILOR MODERNE

Academician **Sveatoslav MOSCALENCO**

Institutul de Fizică Aplicată al AȘM

Academician **Ion TIGHINEANU**

Academia de Științe a Moldovei

LASER POLARITON – TRIUMPH OF FUNDAMENTAL RESEARCH AND MODERN TECHNOLOGY

Summary. Our review article is dedicated to the investigations of the Bose-Einstein Condensation (BEC) of the two-dimensional cavity polaritons, the spontaneous photoluminescence of which gives rise to the coherent radiation named as polariton lasing. In the case of the conventional lasers the radiant media have the electrons with inversed occupation numbers and the coherent radiation appears due to the stimulated emission processes. In the case of the polariton laser, the polaritons themselves are in a coherent macroscopic state due to their BEC, whereas the coherent radiation outside the microcavity appears due to the spontaneous emission of the polariton condensate.

Keywords: exciton, polariton, cavity, Bose-Einstein Condensation, coherence, suprafluidity.

Rezumat. Articolul prezintă o trecere în revistă a lucrărilor dedicate fenomenului de Condensare Bose-Einstein a polaritonilor bidimensionali în microcavități, fotoluminescența cărora dă naștere la radiația coerentă de tip laser. În laserii obișnuiți materia radiantă se găsește în stare cu numere de ocupare inversate și coerența apare la fotoni datorită emisie lor stimulate. În cazul laserului polaritonic, însuși polaritonii se găsesc în stare coerentă macroscopică, iar fotonii apar în urma emiterii spontane a condensatului polaritonic.

Cuvinte-cheie: exciton, polariton, cavitate, Condensare Bose-Einstein, coerență, laser, suprafluiditate.

INTRODUCERE

În acest articol se va face o trecere în revistă a investigațiilor efectuate în ultimele decenii ale fenomenului de Condensare Bose-Einstein (CBE) într-un sistem bidimensional (2D) de polaritoni în microcavități formate din nanostructuri semiconductoare.

Deoarece polaritonii în microcavități pot forma așa-numitul gaz Bose cu interacțiune slabă, asemănător cu un gaz de excitoni în semiconductori, CBE a polaritonilor excitonici în microcavități s-a afirmat în ultimele decenii ca o direcție nouă a fenomenului general de CBE a excitonilor în corpurile solide, promițătoare de aplicații practice. Interesul imens față de CBE a polaritonilor excitonici în microcavități semiconductoare este determinat de faptul că emiteria lor de tip laser are un prag de pompare ultra jos. Această posibilitate a fost demonstrată, în particular, în cazul laserului polaritonic cu injecție electrică a unei diode în formă de microcavitate care funcționează la temperatura de cameră. Dioda constă dintr-o joncțiune p-n creată din semiconductoarele de volum GaN , încadrată între sisteme de oglinzi reflectoare situate din ambele părți

ale joncțiunii. Curentul electric se aplică la o placă situată deasupra joncțiunii și la una de sub ea.

O astfel de structură este reprezentată în figura 1, fiind elaborată de un grup de cercetători în frunte cu P. Bhattacharya. Ea a fost descrisă în articolul semnat de P. Bhattacharya et al., PRL 112, 236802 (2014).

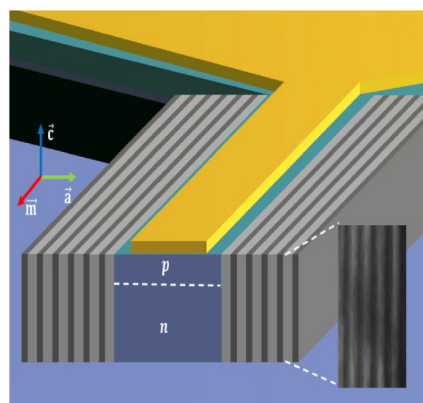


Figura 1. Reprezentarea schematică a diodei cu microcavitate bazate pe semiconductorul de volum. Direcțiile de injecție ale curentului și de emisie a polaritonilor sunt indicate de săgeți. Sursa: articolul lui Zunaid Baten, M. et al. [1]

EXCITONUL, POLARITONUL, FENOMENUL DE CONDENSARE BOSE-EINSTEIN

Excitonii în semiconductori sunt perechi electron-gol legate prin interacțiunea Coulombiană a electronului și golului. Aceste stări legate electron-gol sunt asemănătoare cu atomii de hidrogen în care rolul protonului îl joacă golul apărut în banda de valență a semiconductorului atunci când electronul de valență este transferat în urma absorbției unui foton în banda de conductibilitate. Excitonul are mișcare de translare a centrului lui de gravitate cu masa totală m_{ex} egală cu suma maselor efective ale electronului m_e și a golului m_h ($m_{ex} = m_t + m_h$). Energia cinetică a excitonului are dependența

$$\frac{\hbar^2 \vec{k}^2}{2m_{ex}}$$

de vectorul de undă \vec{k} . Excitonul are o mișcare relativă electron-gol care este cuantificată și conduce la un spectru energetic asemănător cu cel al atomului de hidrogen. Prin urmare, excitonul dispune de un spectru discret hidrogenoid de mișcare relativă și un spectru continuu de mișcare a centrului de greutate, după cum e prezentat în figura 2. Electronul din banda de conductibilitate poate reveni în banda de valență ocupând locul gol și acest proces se numește recombinare electron-gol. Energia eliberată în acest caz poate fi emisă în formă de foton. Spre deosebire de atomul de hidrogen, excitonul are capacitatea de a se transforma în foton și viceversa, fiind creat în urma absorbției fotonului sau emițând fotonul în urma recombinării sale radiative. Atunci când conversia exciton-foton

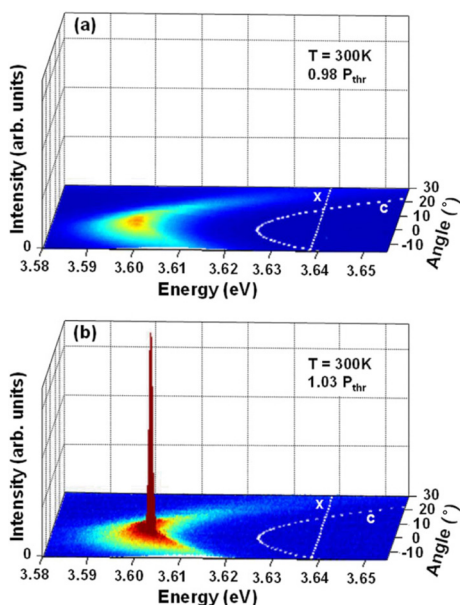


Figura 2. Emiterea laser polaritonică la temperatura de cameră într-o mostră bazată pe GaN. Sursa: lucrarea lui D. Bajoni [4]

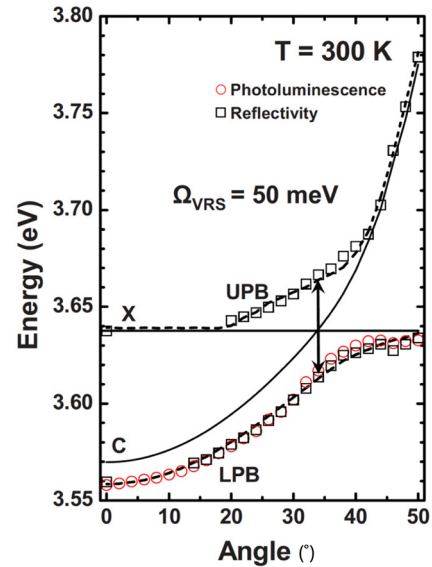


Figura 3. Curbele de dispersie experimentale ale ramurilor polaritonice formate în interiorul microcavității bazate pe GaN, fiind deduse din spectrele de reflectivitate și de fotoluminescență. Sursa: lucrarea lui D. Bajoni [4]

este reversibilă și multiplă, se creează o cvasiparticulă nouă semi-materie-semi-lumină numită polariton. Noțiunea de exciton a fost introdusă în fizică de Ia.I. Frenkel, iar de polariton de J.J. Hopfield. Spectrul energetic al polaritonului cu banda polaritonică de sus (UPB) și cea de jos (LPB) este reprezentat de figura 3.

Polaritonul este o cvasiparticulă mixtă care a moștenit de la foton o masă de translare m_{LP} extrem de mică, aproximativ egală cu $10^{-4} m_0$, unde m_0 este masa electronului liber și în același timp o posibilitate de interacțiune între cvasiparticule moștenită de la componenta excitonică. Polaritonul poate fi asemănat cu ființa mitologică numită centaur (figura 4). Masa mică a polaritonilor și interacțiunea lor au permis realizarea cu succes a fenomenelor de Condensare Bose-Einstein (CBE) și de suprafluiditate chiar și la temperaturi de cameră.

Vom aminti ce este **fenomenul de Condensare Bose-Einstein**. În anul 1924, fizicianul Satyendra Nath Bose a introdus conceptul de gaz fonic ideal, pe baza căruia a dedus repartizarea Planck a fotonilor după ener-



Figura 4. Centaur

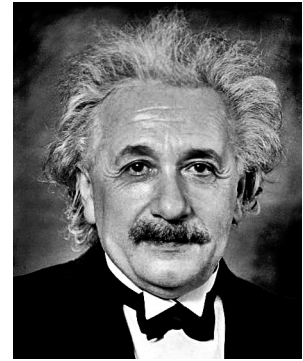
gii. Marele Albert Einstein a generalizat aceste rezultate aplicându-le la un model de gaz ideal monoatomic, ajungând la concluzia că în echilibrul termodinamic numărul atomilor în volumul dat și la temperatura dată nu poate depăși o densitate anumită și surplusul de atomi în sistem se va acumula într-un număr macroscopic în starea cu o energie minimală – energia cinetică zero.

Lucrările renumiților fizicieni au condus la formularea concepțiilor de gaz Bose ideal, de Condensare Bose-Einstein și de statistică Bose-Einstein. Ulterior, P. Kapița a descoperit fenomenul de suprafluiditate a Heliului II mai jos de temperatura punctului λ . F. London a sugerat ideea că supraconductibilitatea și suprafluiditatea se datorează fenomenului de Condensare Bose-Einstein. N.N. Bogoliubov a introdus noțiunea de amplitudine macroscopică coerentă a condensatului Bose-Einstein, care se caracterizează printr-un vector de undă și o fază bine determinate. Astfel, CBE poate exista în formă de cvasimedii ce apar în sistemele cu simetria de etalonare distrusă. Această stare coerentă macroscopică, echivalentă cu funcția de undă cuantică macroscopică, care caracterizează sistemul în ansamblu, este descrisă prin parametru de ordine. Noțiunea a fost introdusă de V.L. Ghinzburg și L.D. Landau în teoria lor fenomenologică a supraconductibilității. Starea coerentă macroscopică este echivalentă cu transformarea u-v a lui N.N. Bogoliubov din teoria supraconductibilității, care se datorează CBE a perechilor Cooper de electroni. Teoria dată a fost generalizată de L.V. Keldas și A.N. Kozlov și pusă la baza teoriei microscopice a fenomenului de CBE a excitonilor în semiconductori luând în considerare structura lor electron-gol și faptul că excitonii sunt cvasibosoni compuși. Anterior, teoria CBE a excitonilor se baza pe modelul gazului neideal de tip Bose aplicând teoria microscopică a superfluidității elaborată de N.N. Bogoliubov.

Coerența spontană care apare drept rezultat al Condensării Bose-Einstein cuprinde sistemul de particule în întregime. Ea se caracterizează prin parametrul de



Satyendra Nath Bose

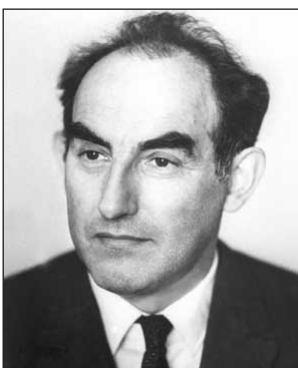


Albert Einstein

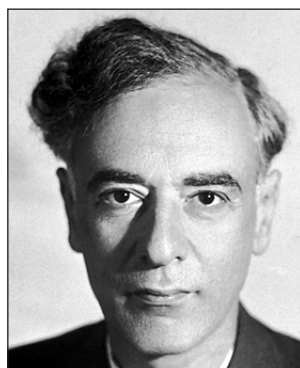
ordine cu o amplitudine macroscopică și cu o fază bine determinată, ceea ce-i echivalent cu o funcție de undă cuantică, care însă nu se referă la o singură particulă din microunivers, ci la un obiect macroscopic în întregime. Coerența spontană macroscopică duce la tranzițiile de fază în cazul supraconductorilor, suprafluidității heliului lichid și la crearea laserului polaritonic. Spre a explica mai bine ce înseamnă coerența macroscopică, vom compara un miting organizat de oameni în jurul unei tribune cu o paradă militară (foto 1) sau repetiția balerinelor într-o scenă de balet clasic (foto 2).

În cazul paradei militare, toți participanții țin pasul și respectă cadența, ceea ce nu este caracteristic pentru un miting. Cu cât numărul de unități militare și de participanți la paradă e mai mare, cu atât cadența se respectă mai strict. Faza în cazul stării coerente este echivalentă cu cadența la parada militară.

În mecanica cuantică, cu cât faza e mai precisă, cu atât numărul de particule e mai indefinit și invers. Sistemele care au numărul de particule bine determinat se numesc sisteme cu simetrie de etalonare. Stările coerente macroscopice pot apărea numai în sisteme cu simetrie de etalonare distrusă. Stările de bază ale acestor două sisteme sunt reproduse de figura 5. În cazul simetriei de etalonare, starea de bază este degenerată, fiind reprezentată prin ulucul circular al energiei potențiale a sistemului în raport cu funcția lui de undă. Faza unghiulară a funcției de undă se schimbă arbitrar în intervalul de la



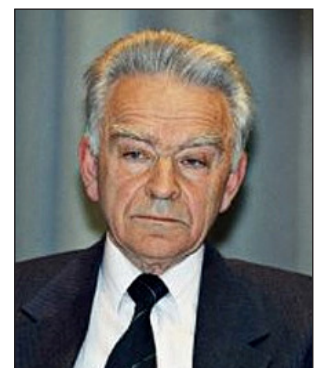
V.L. Ghinzburg



L.D. Landau



N.N. Bogoliubov



L.V. Keldas



Foto 1. Paradă militară



Foto 2. Scenă de balet clasic

0 la 2π . Atunci când simetria de etalonare este distrusă și faza devine bine fixată, starea de bază a sistemului nu mai este degenerată și este reprezentată doar printr-un punct al ulucului.

Astfel de sisteme au o proprietate uimitoare a excitațiilor colective elementare. A excita sistemul înseamnă a schimba locul punctului inițial de pe suprafața energiei potențiale. Dacă noul punct se găsește la fel pe uluc în preajma celui inițial, înseamnă că o asemenea excitație n-are nevoie de energie. Deci în sistemele cu simetrie de etalonare distrusă pot apărea ramuri de excitații elementare fără gap energetic, sau cum se spune în fizica relativistă, fără masă. Acest fel de spectru energetic în cazul CBE, obținut de N.N. Bogoliubov în teoria sa microscopică a superfluidității, a fost evidențiat experimental în cazul CBE a polaritonilor în microcavități. Tocmai existența unui astfel de spectru aduce la suprafluiditatea lichidului, torentul căruia, întâlnind un obstacol, îl ocolește fără pierderea energiei de mișcare și fără destrămarea frontului, ceea ce va fi demonstrat în continuare.

Din cele spuse ne putem aștepta ca în procesul tranziției de fază energia potențială a sistemului în funcție de parametrul de ordine se schimbă de la o formă parabolică cu minimum în punctul zero la o formă cu uluc (figura 5) sau cu valori minimale în afara punctului

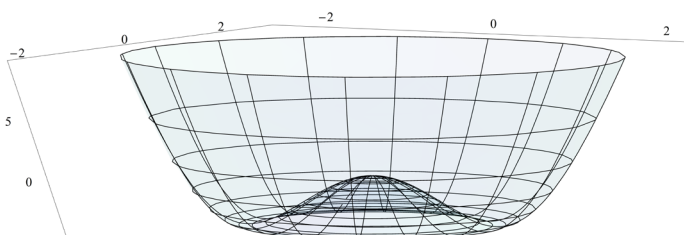


Figura 5. Energia potențială $V(\varphi)$ cu minimumul la valoarea unghiului $|\varphi|=a$ și cu maximumul locat în punctul $\varphi=0$

zero (figura 6). Tranziția de fază dintre cele două stări reprezentate prin aceste două curbe din figura 6 a fost descrisă de H.T.C. Stoof și constă din trei etape.

Prima este faza cinetică, în care sistemul inițial excitat se răcește și se apropie de temperatura de trecere. Apoi are loc însuși procesul de trecere care se datorează proceselor de instabilitate apărute în sistem, în urma cărora particulele necondensate se transformă în cele condensate și formează embrionul condensatului Bose-Einstein. După această fază, numită coerentă, are loc al doilea proces cinetic, în care embrionul condensatului se dezvoltă și revine în cvasiechilibru termodinamic cu necondensatul. Este uimitor faptul, dar s-a constatat că prima fază cinetică în procesul evoluției particulelor necondensate, numite necondensat, nu poate duce la apariția condensatului, dacă existența lui n-a fost presupusă apriori. Condensatul se naște din necondensat, după părerea lui H.T.C. Stoof, în urma proceselor de instabilitate și de generare a noi unde și cvasiparticule. Însăși instabilitatea apare în urma surplusului de excitații elementare în punctul tranziției de fază și interacțiunii lor. Deoarece polaritonii se formează în microcavități, proprietățile acestora influențează

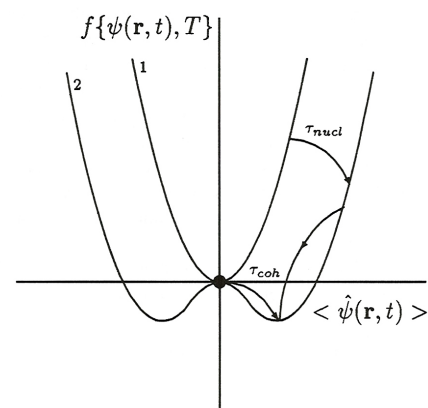


Figura 6. Funcționalul energiei libere $f(\Psi(r,t), T)$ în dependență de parametrul de ordine $\langle \Psi(r,t) \rangle$. Sursa: articolul lui H.T.C. Stoof publicat în monografia [5]

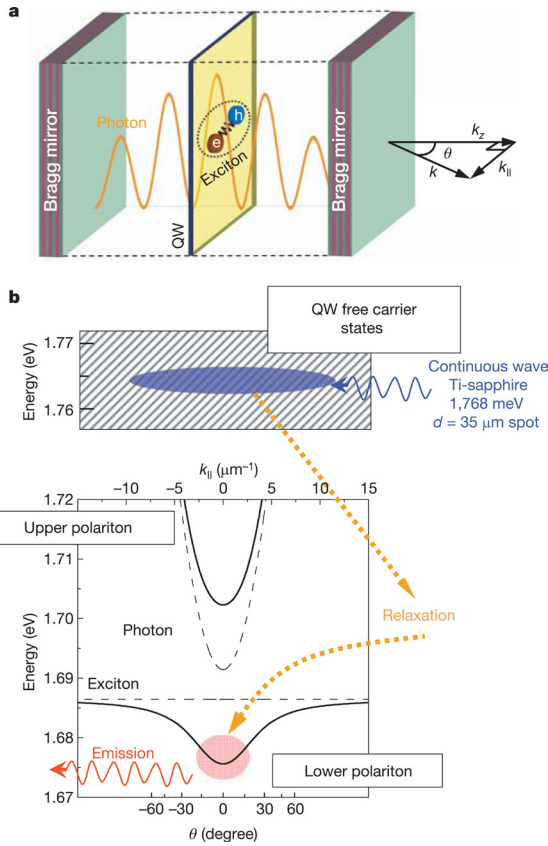


Figura 7. Diagrama microcavității și legea de dispersie a energiei polaritonilor. Sursa: articolul lui J. Kasprzyk et al. [6]

asupra spectrului energetic al polaritonilor. După cum am menționat mai sus, microcavitatea este un rezonator cu oglinzi din ambele părți ale axei lui, în interiorul căruia este încadrată o groapă cuantică de semiconductor, cum e arătat în figura 7, sau o joncțiune p-n formată din cristalul de volum, cum este demonstrat pe desenul 1. Datorită oglinzilor, în interiorul rezonatorului pot exista unde electromagnetice, semilungimea de undă a cărora $\frac{\lambda}{2}$

se încadrează un număr întreg de ori pe lungimea axei rezonatorului. De aici reiese că există o frecvență de rețazare a undelor electromagnetice cu lungimi de undă mai mari. Fotonii, intrând în interacțiune cu excitonii formați pe groapa cuantică de semiconductor instalată în antinodul undelor electromagnetice, generează formarea polaritonilor excitonici (figura 7). Polaritonii în microcavitate au două ramuri energetice în funcție de vectorul de undă $k_{||}$ orientat în planul gropii cuantice. Pe ramura de jos, în punctul $k_{||} = 0$, în urma relaxării se acumulează polaritonii pompați de către o sursă exterioară de excitație și are loc fenomenul de Condensare Bose-Einstein, atunci când intensitatea laserului de pompă depășește mărimea pragului P_{thr} (figura 8).

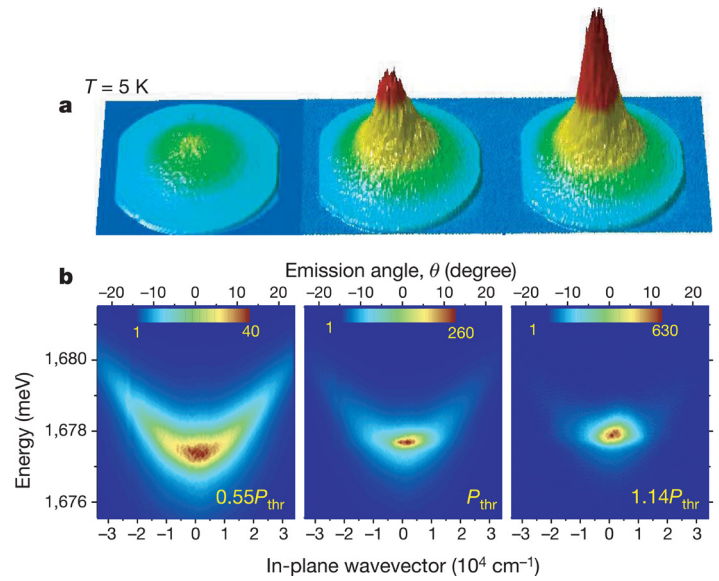


Figura 8. Spectrele de luminiscentă măsurate la diferite unghiuri de emisie la 5K pentru trei intensități de excitație. Sursa: lucrarea lui J. Kasprzyk et al. [6]

Gradul de ocupare al stării $k_{||} = 0$ pe ramura polaritonice de jos în funcție de intensitatea laserului de pompă este reprezentat pe figura 9a. Putem vedea că ocuparea stării de jos crește linear până la pragul de pompă, după ce are loc o creștere bruscă în preajma pragului de pompă legată cu apariția și formarea condensatului Bose-Einstein. Numerele de ocupare ale stărilor polaritonice pe ramura de jos cu vectorii de undă $k_{||}$ diferiți de zero ne arată că numerele polaritonilor necondensați se descriu cu funcția de distribuție Bose-Einstein, potențialul chimic al căreia, fiind negativ, crește odată cu creșterea intensității pomparei și se apropie de valoarea zero în regiunea pragului de pompă. Această comportare a polaritonilor necondensați este reprezentată pe figura 9b. Fenomenul de CBE a polaritonilor bidimensionali în nanostructurile de tip $CdTe$ și

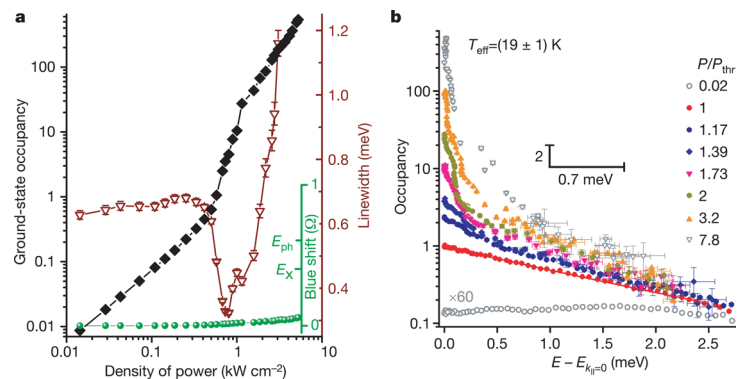


Figura 9. Ocuparea stărilor polaritonice la 5K. Sursa: lucrarea lui J. Kasprzyk et al. [6]

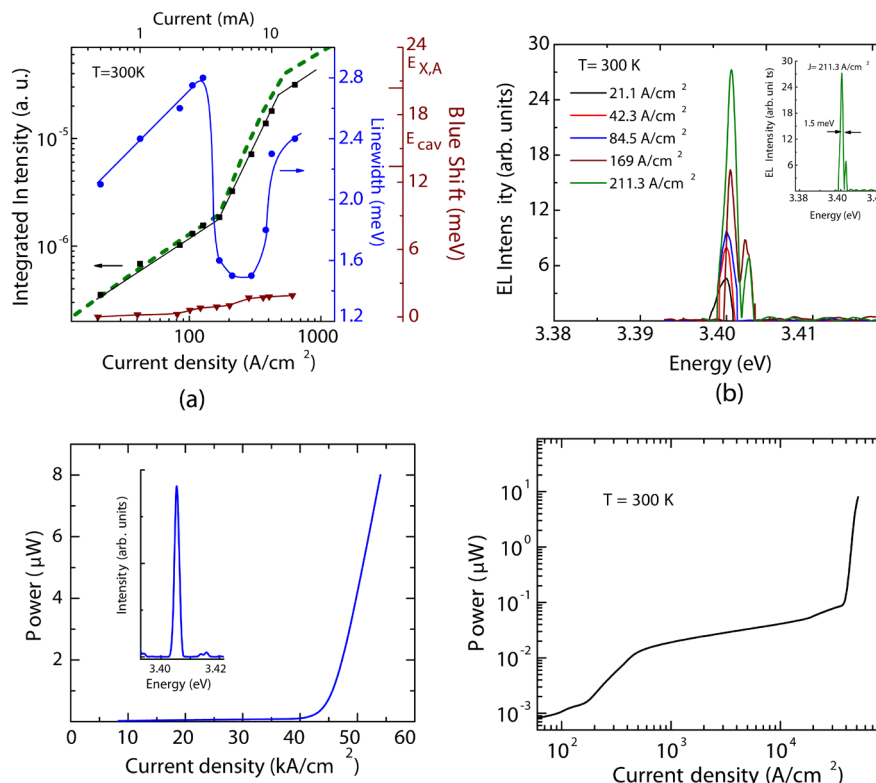


Figure 10. Caracteristicile emiterii laser polaritonice și fotonice la un unghi normal de detectare. Sursa: articolul lui P. Bhattacharya et al. [2]

GaAs a fost observat la temperaturi joase (figura 9). Figura 10 demonstrează că acest fenomen a fost înregistrat și în cazul cristalului de volum, adică tridimensional (3D) de tip GaN la temperatura de cameră. Tocmai această performanță a permis crearea laserului polaritonic la temperaturi de cameră folosind dioda în formă de microcavitate cu joncțiune p-n în interiorul ei și cu plăci de contact prin care cu

ajutorul curentului electric se pompează o densitate înaltă de perechi electron-gol.

Aceștia conduc la crearea excitonilor Wannier-Mott și ulterior la formarea polaritonilor excitonici precum este demonstrat de figurile 1-3. Spre deosebire de alte sisteme ale naturii în care a fost descoperit fenomenul de CBE și de suprafluiditate, cum ar fi heliul suprafluid cu un condensat creat din atomii de heliu, sau supraconductorii, condensatul cărora

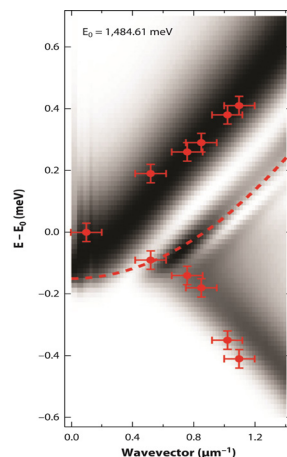
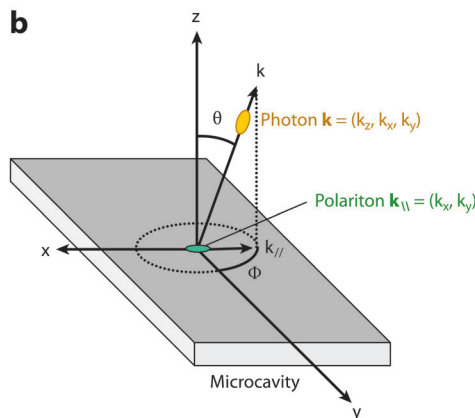
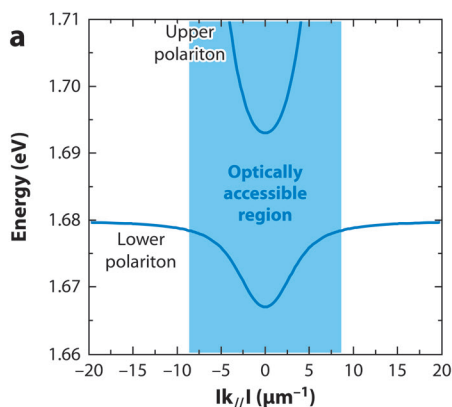


Figure 11. (a) Curbele polaritonice de dispersie (ramurile de sus și de jos) colorate cu albastru sunt regiunea în care polaritonii pot emite lumina. În această regiune energiile polaritonilor pot fi determinate măsurând vectorii de undă ai fotonilor evadați din microcavitate. (b) Determinarea detaliată a interdependenței dintre vectorul de undă al polaritonului în planul gropii cuantice și vectorul de undă al fotonului emis. Sursa: lucrarea lui Richard M. 2004 [7].

Figure 12. Relația de dispersie a polaritonilor. Sursa: articolul lui V. Kohnle et al. [8]

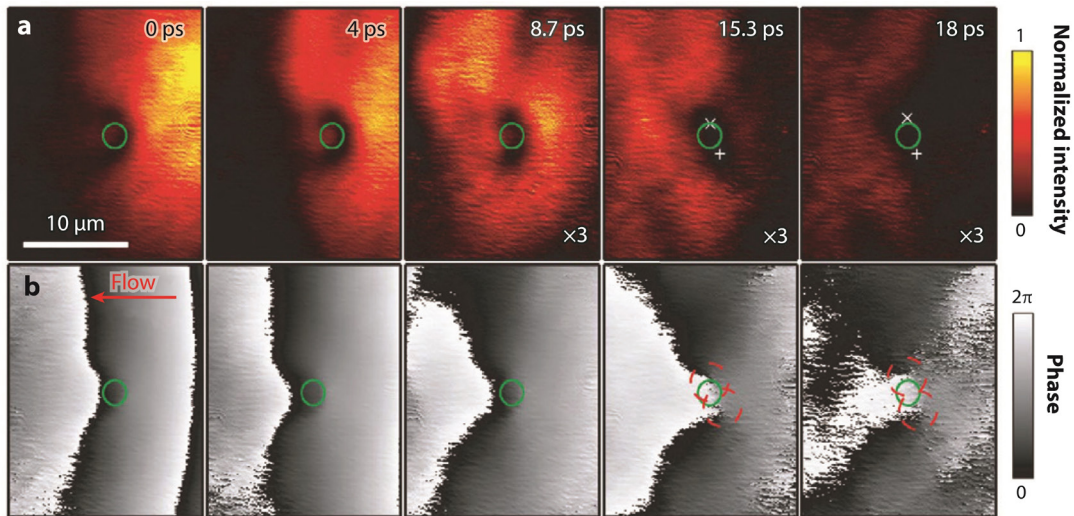


Figura 13. Comportarea suprafluidă fără perturbări: a) densitatea polaritonilor; b) faza polaritonilor la diferite intervale de timp după momentul excitației. Figura luată din lucrarea lui Nardin G. 2011 [9]

este creat din perechi Cooper de electroni, condensatul exciton-polaritonic are o proprietate uimitoare legată de existența componente fotonice a polaritonilor. Fotonii din componența polaritonilor creați în interiorul microcavității se pot transforma în fotonii din spațiul exterior trecând prin oglinzile ei (figura 11).

Datorită faptului că această transformare are loc cu respectarea legilor conservării energiei și a vectorilor de undă orientați în planul rezonatorului, care descriu fotonii încadrați în proces, a devenit posibilă studierea statisticii cuantice a polaritonilor în microcavitate prin înregistrarea experimentală a proprietăților fotonilor evadați prin oglinzile ei. După cum vedem din figurile 11 și 12, fotonul din componența polaritonului în microcavitate poate evada din ea ducând cu sine energia totală a polaritonului inițial. Vectorul de undă al fotonului ajuns în afara cavității este tridimensional, însă componenta lui $\vec{k}_{||}$ este moștenită de la polaritonul părăsit. În prezența condensatului Bose-Einstein cu polaritoni condensati în punctul $\vec{k}_{||} = 0$, polaritonii necondensați cu vectorii de undă $\vec{k}_{||} \neq 0$ au un spectru energetic renormat, care fiind calculat de la energia polaritonului condensat are valori pozitive și negative și o dependență lineară de vectorul de undă $\vec{k}_{||}$ în regiunea $\vec{k}_{||} \rightarrow 0$.

Un astfel de spectru reiese din teoria microscopică a suprafluidității elaborată de N.N. Bogoliubov. Măsurătorile au fost făcute folosind tehnica amestecării a patru unde, în cadrul căreia două unde joacă rolul de pompare și aduc la crearea condensatului Bose-Einstein al polaritonilor, iar a treia undă se numește unda de sondare și are menirea să evidențieze cele întâmplare în sistem. În urma interacțiunii ei cu sistemul excitat apa-

re și a patra undă de semnal. Suma energiilor fotonului din unda de sondare și a fotonului din unda de semnal este egală cu energia a doi polaritoni din condensat și procesul care are loc este transformarea a doi polaritoni condensati în doi polaritoni necondensați. Dacă energia unuia din polaritonii necondensați este mai mare decât energia polaritonului condensat, atunci energia celui de al doilea polariton necondensat nou apărut este mai mică decât a celui condensat, astfel că legea conservării energiei este satisfăcută. De asemenea, se manifestă și legea conservării vectorilor de undă orientați în planul stratului. În cazul când polaritonii din condensat au vectorii de undă $\vec{k}_{||} = 0$, cei doi polaritoni necondensați au vectorii de undă cu orientare opusă. Energiile polaritonilor necondensați calculate de la energiile polaritonilor condensati fiind desenate în funcție de vectorii de undă $\vec{k}_{||}$ dau naștere la două curbe: una cu valori pozitive, iar alta cu valori negative. Ele s-au dovedit a fi coincidente cu spectrele excitațiilor elementare obținute de N.N. Bogoliubov. Să ne amintim că spectrul excitațiilor elementare obținut de N.N. Bogoliubov are două ramuri, una pozitivă și una negativă. De obicei, cea pozitivă e numită energetică sau normală, iar celei negative i se spune cvasienergetică sau fantomă. Tocmai aceste două ramuri, ambele cu dependențe lineare în funcție de vectorul de undă $\vec{k}_{||}$, au fost evidențiate experimental în cazul CBE al polaritonilor în microcavități (figura 12). Renormarea legii de dispersie a polaritonilor condensati Bose-Einstein și apariția legii de dispersie lineară în funcție de vectorul de undă $\vec{k}_{||}$ în locul celei parabolice permite desfășurarea fenomenului de suprafluiditate, care într-adevăr a fost descoperit experimental și este demonstrat mai jos.

Figura 13 reprezintă fenomenul suprafluidității polaritonilor excitați rezonant de un impuls ultracurt de lumină laser incident oblic pe suprafața gropii cuantice încadrate în microcavitate, în așa fel încât vectorul de undă $\vec{k}_{||}$ al polaritonilor bidimensionali este diferit de zero. În acest caz polaritonii creați rezonant cu vectorul de undă $\vec{k}_{||}$ formează un torent de fluid care se mișcă cu viteză, unde m_{eff} este masa efectivă a polaritonilor. Pe figura 13 direcția curgerii torentului este indicată cu săgeata orientată de la dreapta la stânga. În rândul de sus sunt arătate densitățile polaritonilor în diferite momente de timp după momentul excitării. Densitatea polaritonilor $|\psi|^2$ descrește cu timpul datorită recombinațiilor lor, ceea ce conduce la descreșterea vitezei critice v_{cr} a suprafluidității. Ea este determinată din spectrul excitațiilor elementare obținut de N.N. Bogoliubov. Această viteză se mai numește și viteza sunetului (în mediul polaritonic) și se exprimă prin formula

$$v_{cr} = \sqrt{\frac{|\psi|^2 g}{m_{eff}}},$$

unde g este constanta de interacțiune a polaritonilor bidimensionali. Conform criteriului suprafluidității formulat de L.D. Landau, fluidul se mișcă fără disipație atâta timp cât viteza lui v_{tor} este mai mică decât viteza critică, adică $v_{tor} < v_{cr}$. Torontul de polaritoni cu densitate mare și cu viteza v_{tor} mică are o comportare suprafluidă, adică ocolește fără disipație și perturbări obstacolul care în figura 13 este însemnat printr-un cerculeț. În rândul de jos al figurii 13, în diferite coloane ale lui, corespunzătoare la diferite momente de timp după excitare, sunt reprezentate stările, forma și faza frontului fluidului. Putem vedea că pe măsură ce descrește densi-

tatea $|\psi|^2$ polaritonilor și viteza critică v_{cr} , care devine treptat mai mică decât viteza torentului v_{tor} , frontul fluidului în jurul obstacolului devine tot mai perturbat și disipat. Suprafluiditatea inițială a torentului treptat dispare și torentul de polaritoni se transformă în fluid cu viscozitate. Aceeași transformare a polaritonilor din starea suprafluidă în cea vâscoasă poate fi explicată prin faptul că polaritonii cu spectru energetic linear în funcție de vectorul de undă $\vec{k}_{||}$ nu pot fi împrăștiați de o impuritate, spre deosebire de polaritonii cu o lege de dispersie parabolică, în care procesul de împrăștiere are loc cu satisfacerea legilor conservării energiei și vectorilor de undă.

CONCLUZII

Inventarea laserului polaritonic a încununat cercetările fundamentale și aplicative, întreprinse de câteva generații de cercetători pe parcursul a peste 55 de ani. Descoperirea și dezvoltarea fenomenului de suprafluiditate, realizarea lui la temperatura de cameră, este un succes de excepție care reflectă la justa valoare capacitățile intelectuale ale omului. E semnificativ faptul că savanții din Republica Moldova și-au adus și continuă să-și aducă contribuția la dezvoltarea acestui domeniu prin cercetări de anvergură [10, 11]. Suntem siguri că laserul polaritonic cu injecție electronică este doar un prim pas în „materializarea” în practică a fenomenului de suprafluiditate și în anii ce urmează vom fi martorii elaborării de noi dispozitive nanoelectronice, de noi sal-turi tehnologice.

BIBLIOGRAFIE

1. Zunaid Baten M. et al. Sci. Rep. 5, 11915, 2015.
2. Bhattacharza P. et al. Phys. Rev. Lett. 112, 236802, 2014.
3. Cristian Shneider et al. Semiconductor Today 8, 5, 2013.
4. Bajoni D.J. Phys. D: Appl. Phys. 45, 313001, 2012.
5. H.T.C. Stoof in Bose-Einstein Condensation, eds: A. Griffin, D. W. Snoke and S. Stringari, Cambridge U. Press, Cambridge, 1995.
6. Kasprzak J. et al. Nature 443, pp. 409-414, 2006.
7. Richard M. 2004. Quasi-condensation des polaritons
8. Kohnle V. et al. Phys. Rev. Lett. 106, 255302, 2011.
9. Nardin G. 2011. Phase-resolved imaging of exciton polaritons. PhD Thesis. EPFL, Lausanne.
10. Moskalenko S. A. and Snoke D.W. Bose-Einstein condensation of excitons and biexcitons and coherent nonlinear optics with excitons Cambridge University Press. Cambridge, 2000.
11. Moskalenko S. A., Tiginyanu I.M. Exciton-polariton laser, Low Temperature Physics/Fizika Nizkikh Temperatur (2016) v 42, N 5. pp. 426-437.