

DESPRE APLICAREA ÎN PRACTICĂ A FENOMENULUI DE CONDENSARE BOSE-EINSTEIN A POLARITONILOR ÎN MICROCAVITĂȚI

Acad. Sveatoslav MOSCALENCO
Dr. Evghenii DUMANOV
Inginer Valentina BAJIREANU
Institutul de Fizică Aplicată al AȘM

POSSIBLE PRACTICAL IMPLEMENTATIONS OF THE CAVITY POLARITONS BOSE-EINSTEIN CONDENSATION PHENOMENON

Summary. The present article is a continuation of the another one published in Akademos №4(31) 2013 on the pages 53-67 dedicated to the phenomenon of the Bose-Einstein Condensation (BEC) of microcavity polaritons. Below the possible applications of the revealed properties are discussed. One of them is the creation of the polariton laser in the forme of a diode with the electron injection. It has two thresholds for the injection currents, which correspond to two different densities of the excitatons and lead to two types of BEC. In one of them the excitons conserve their hydrogen-like structure, whereas in another limit the Cooper-type electron-hole pairs are created. Another application is related with the polarization properties of the Bose-Einstein condensed polaritons. In the GaAs-type quantum wells (QWs) with p-type valence band they have two circular polarizations oriented perpendicular to the plane of the QW. The existence of two exciton polarization projections is similar with two electron spin projections, gives rise to the pseudo-spin polariton model and to the spinoptronics similar with the well known spintronics. There are also implementations based on the creation of the qubits on the base of the Bose-Einstein condensed polaritons and on the generation of bifotons by the biexcitons.

Keywords: microcavity polaritons, Bose-Einstein condensation, spinoptronics, qubit, biexciton, pseudospin polarization.

Rezumat. Articolul dat este o continuare a celui precedent, publicat în revista Akademos № 4(31) 2013 pe paginile 53-67 și dedicat fenomenului de condensare Bose-Einstein(CBE) a polaritonilor în microcavități. El are menirea de a descrie aplicările în practică a legităților și proprietăților descoperite experimental și teoretic. Una din aceste implementări este crearea recentă a laserului polaritonic în formă de diodă cu injecție electronică. S-a dovedit că sunt două praguri de injecție corespunzătoare la două densități diferite ale perechilor electron-gol și ale excitonilor și la două forme de CBE. În una din ele excitonii își păstrează forma atomară, iar în cealaltă limită se formează perechi electron-gol de tip Cooper. O alta formă de implementare este legată de două polarizări diferite ale excitonilor bidimensionali în cristalele de tip GaAs cu banda de valență de tip p și cu două polarizări circulare orientate perpendicular pe suprafața stratului. Aceste două polarizări formează două componente ale pseudospinului excitonic, asemănătoare cu două componente ale spinului electronic. În așa fel a apărut o nouă direcție a optoelectronicii numită spinoptronica similară cu binecunoscuta spintronică. Alte aplicații sunt legate de folosirea în calitate de qubit a condensatului Bose-Einstein creat din polaritoni în microcavitare și de posibilitatea de generare de bifotoni drept rezultat al emiterii biexcitonilor în regim de cascadă.

Cuvinte-cheie: microcavitare polariton, exciton, biexciton, qubit, pseudospin polarizare.

Fenomenul de Condensare Bose-Einstein a polaritonilor bidimensionali în gropile cuantice de tip *GaAs* introduse (și) în microrezonator la temperaturi joase, precum și a polaritonilor tridimensionali în cristalele de tip *GaN* la temperatura de cameră, a fost descoperit experimental [1-3]. În primul caz el a fost studiat detaliat în ultimul deceniu, iar rezultatele obținute au fost reflectate în articolele de sinteză [4-6].

În al doilea caz, primele rezultate pozitive au fost de asemenea menționate în referințele [4, 5], însă într-un mod decisiv și, mai mult ca atât, bun pentru aplicare în practică în formă de diodă au fost publicate recent în articolele [7, 8].

Institutul de Fizică Aplicată (IFA) și colectivul Laboratorului de Fizică Teoretică au inițiat și promovat constant cercetările teoretice în domeniul nominalizat în ultimii 50 de ani, fapt care a contribuit la dezvoltarea fizicii excitonilor și biexcitonilor de înaltă densitate în semiconductori, inclusiv la studierea biexcitonilor, Condensării Bose-Einstein (CBE) a excitonilor și biexcitonilor, cât și a fenomenului de suprafluiditate în stare de cvasiechilibru, însă îndepărtată de echilibrul termodinamic al cvasiparticulelor cu durată finită de viață. Cercetările inițiate au fost descrise în lucrările [9, 10], iar rezultatele obținute au fost reflectate în monografie [11].

Luând parte la investigațiile încununuate cu descoperiri și performanțe teoretice și experimentale uimitoare ale multor laboratoare și colective de specialiști de cea mai înaltă calificare din lume, ar fi rațional ca IFA și AȘM să beneficieze de roadele acestor performanțe ale fizicii contemporane și să fie antrenate în procesul de implementare a noilor legități și descoperiri.

Eventualele implementări legate de procesul de CBE al polaritonilor excitonici în microcavități au fost studiate în mod special de autorii referinței [8] și într-o formă mai decisivă în articolul [7]. Implementările fenomenelor legate de CBE și participarea biexcitonilor la crearea bifotonilor folosiți în informatica cuantică sunt reflectate în articolele [12, 13] și altele.

Astfel, pot fi numite patru implementări care se discută în prezent:

1. Crearea laserului polaritonic fără inversie a numerelor de ocupare;
2. Crearea unei noi ramuri, numite spinoptronica, similară cu spintronica;
3. Crearea qubiturilor pe baza polaritonilor condensați Bose-Einstein și crearea bifotonilor pe baza emiterii biexcitonilor în cascadă;
4. O posibilă implementare se studiază teoretic actualmente în IFA pe baza polaritonilor magnetoexcitonici bidimensionali în microcavități în prezența câmpurilor puternice magnetice și electrice perpendiculare pe suprafața stratului.

Vom aborda primele trei oportunități

1. Ideea laserului polaritonic se bazează pe faptul că în urma CBE se creează o stare coerentă macroscopică a excitonilor. Ea se transmite direct fotonilor în procesul de tranziție cuantică exciton-foton și coincide complet cu starea coerentă a laserului. CBE are loc când concentrația totală a excitonilor n_{ex} depășește un prag anumit, însă nu are nevoie de o inversie a numerelor de ocupare ale stărilor benzii energetice excitonice. De aceea laserul polaritonic se numește laser fără inversie.

Să ne aducem aminte că supraconductibilitatea are loc atunci când se formează o stare coerentă macroscopică din perechi Cooper de electroni în metale, iar suprafluiditatea se manifestă atunci când se formează o stare coerentă macroscopică din atomi sau din perechi electron-gol. Pe de altă parte, radiația laserului înseamnă formarea unei stări coerente macroscopice de fotoni. Nu-i de mirare că formarea condensatului Bose-Einstein al polaritonilor duce la generarea luminii laser și la crearea laserului polaritonic.

Ținem să amintim încă o dată că, prin definiție,

Condensatul Bose-Einstein este o stare coerentă macroscopică exact cu aceleași proprietăți statistice cuantice ca și lumina laserului. Ceea ce-i nou și mai puțin cunoscut în cazul excitonilor și polaritonilor condensați Bose-Einstein este faptul că aici sunt două posibilități și două praguri de condensare.

Unul are loc când excitonii își păstrează structura asemănătoare cu atomul de hidrogen sau de pozitroniu. Concentrația necesară este aceeași ca și în cazul gazului ideal Bose. Descrierea acestui caz în limbajul electronilor și golurilor constituianți ai excitonilor le aparține lui Keldas și Kozlov [14].

Al doilea prag are loc atunci când densitatea electronilor și golurilor este atât de mare încât excitonii nu mai există. În acest caz, electronii și golurile formează repartizări de tip Fermi în benzile lor energetice, iar cvasiparticulele din vecinătățile nivelelor energetice Fermi corespunzătoare formează perechi electron-gol (e-g) de tip Cooper ca și în cazul formării perechilor Cooper de electroni.

În cazul supraconductorilor, fenomenul a fost descris de Bardeen Cooper și Schrieffer [15], iar în cazul perechilor e-g – de către Keldas și Kopaev [16] și este cunoscut sub denumirea de dielectric excitonic. Trebuie de menționat că celebra lucrare a lui L.V. Keldas și A.N. Kozlov [14] a pus bazele teoriei CBE a excitonilor în semiconductori în limbajul electronilor și golurilor care se supun statisticii Fermi și principiului de excludere al lui Pauli.

Electronii și golurile sunt părți constituante ale excitonilor Wannier-Mott sau magnetici, care sunt particule compuse și se numesc cvasibosoni deoarece se supun statisticii Bose numai la concentrații nu prea mari, când orbitele a doi excitoni vecini nu se suprapun. Tocmai aceste fenomene legate de concentrațiile mari ale excitonilor au fost evidențiate de teoria lui L. V. Keldas și A. N. Kozlov [14] și prin aceasta ea diferă de descrierea bazată pe teoria gazului Bose propusă inițial în lucrările lui N. N. Bogoliubov [17] și aplicată concret în cazul excitonilor în lucrările [10, 4-6, 18-19] și altele.

Condensatul Bose-Einstein din perechi e-g de tip Cooper are un prag mai înalt de excitare decât în cazul excitonilor atomari. Lumina laser, care apare în acest caz, are o frecvență mai mare decât în cazul precedent, deoarece stările energetice de jos în benzile energetice ale electronilor și golurilor sunt ocupate. Acest laser se numește fonic, deoarece electronii și golurile nu mai formează excitoni ci perechi de tip Cooper.

Deci avem laser polaritonic și laser fonic. Ambele variante au fost descrise în referințele [20, 4-6]. Este uimitor faptul că aceste variante au fost realizate la temperaturi de cameră folosind cristalele de

tip *GaN* și pomparea electronilor și golurilor de înaltă densitate cu ajutorul injecției unui curent electric cu două praguri, unul de $169 \frac{A}{cm^2} (4mA)$ și altul de $44 \frac{kA}{cm^2} (1.04A)$.

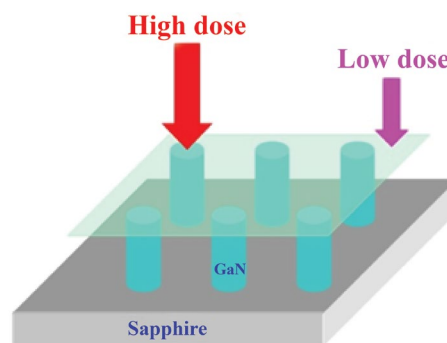
După cum se vede din referința [7], excitonii în cristalul *GaN* au o energie de legătură $E_x^B = (28 \pm 8) meV$, o rază $a_B = (3,5 \pm 0,1) nm$ cu o despicare Rabi între ramurile polaritonice de $32 meV$. Moda cavității are o energie de $3,413 eV$ cu o durată de viață de $0,387 ps$. Concentrația excitonilor tridimensionali la pragul de jos al CBE este egală cu $N_{3D} = 1,53 \cdot 10^{17} cm^{-3}$ și deplasarea nivelului energetic excitonic în partea albastră a spectrului egală cu $1,9 meV$, pe când concentrația de tranziție Mott este egală cu $N_{Mott} = (1-2) \times 10^{19} cm^{-3}$.

Laserii polaritonici pot deveni un produs industrial în câțiva ani.

Semiconductorul *GaN* este un material important în tehnologiile moderne. Posibilitățile cercetătorilor din Republica Moldova de a se implica în crearea dispozitivelor electronice bazate pe acest material se datorează faptului că în perioada precedentă, pe lângă Universitatea Tehnică a Moldovei a fost creat Centrul de studii și testare a materialelor condus de academicianul Ion Tighineanu.

Tehnologiile originale sunt bazate pe folosirea în calitate de creion a fasciculelor de ioni pentru a scrie fără mască și a crea desene pe suprafața cristalului *GaN*, adică a așa-numitei litografii de suprafață cu încărcături electrice, precum și a metodelor fotoelectrochimice de dizolvare a materialului nedorit. Ele au adus la rezultate uimitoare. Unele dintre acestea au fost menționate de mai multe ori pe portalul *NanoTechWeb.org* din Londra și pe copertele revistei *Physica Status Solidi*. Am putea menționa, de asemenea, crearea peliculelor ultrasubțiri de *GaN*, suspendate în aer deasupra stratului de bază sau cu suport în formă de nanocoloane, după cum se vede pe desenul 1 reprodus din lucrarea [21]. Mai este de remarcat crearea cristalelor fotonice bazate pe membrane ultrasubțiri perforate de *GaN* cu grosimea de 15 nm și spații goale cu diametru de 150 nm care formează structuri intermediare între cele 3D și 2D. Alte rezultate pot fi găsite în referințele [22-27].

2. Spinoptronica polaritică. Polaritonii posedă un grad intern de mișcare, cum ar fi polarizarea circulară în două direcții de rotire. Această proprietate este numită pseudospin și este asemănătoare cu două proiecții ale spinului electronului pe direcția de creștere a gropii cuantice sau a câmpului magnetic exterior.



Desenul 1. Reprodus din lucrarea [21].
Membrană ultrasubțire de *GaN*

Polarizarea polaritonilor determină proprietățile optice ale cristalelor în regiunea excitonică a spectrului și în același timp este asemănătoare cu spinul electronilor. Această ramură a fizicii contemporane se numește spinoptronică, prin analogie cu spintronica bazată pe participarea electronilor. Spintronica se dezvoltă extrem de rapid, prezentând un interes atât fundamental, cât și practic.

Întâi vom aminti principalele idei propuse de Data și Das [28] de schimbare a curentului electric prin influența spinului electronilor. De menționat că interacțiunea spin-orbită de tip Rașba în cazul electronului pe suprafața stratului bidimensional de semiconductor sub acțiunea câmpului electric perpendicular pe strat se descrie cu ajutorul Hamiltonianului

$$H_R = \alpha (\sigma_x k_y - \sigma_y k_x); \quad \alpha \sim E_z \quad (1)$$

El poate fi transcris în forma

$$H_R = \mu_B \vec{B}_R \vec{\sigma}; \quad B_{R,x} = \frac{\alpha k_y}{\mu_B}; \quad B_{R,y} = -\frac{\alpha k_x}{\mu_B} \quad (2)$$

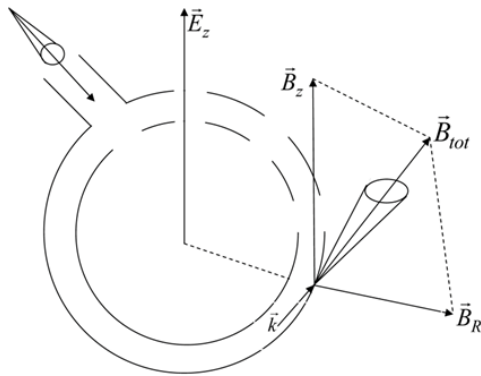
Câmpul efectiv magnetic de tip Rașba \vec{B}_R este perpendicular vectorului de undă bidimensional \vec{k} al electronului și-i proporțional cu mărimea absolută a acestuia

$$\vec{B}_R \cdot \vec{k} = 0; \quad |\vec{B}_R| \sim |\vec{k}| \quad (3)$$

Atunci când electronul se mișcă într-un circuit inelar situat într-un câmp electric perpendicular, pe suprafața planului și vectorul de undă \vec{k} formează o tangentă la curba cercului în punctul dat, câmpul efectiv magnetic Rașba \vec{B}_R este îndreptat în direcția razei cercului cum este arătat pe desenul 2. În prezența unui câmp magnetic exterior, perpendicular pe suprafața inelului \vec{B}_z , câmpul magnetic total este

$$\vec{B}_{tot} = \vec{B}_z + \vec{B}_R \quad (4)$$

În aproximația adiabatică, spinul electronului este orientat în lungul vectorului \vec{B}_{tot} cum este arătat pe desen. Planul în care se găsesc \vec{B}_{tot} și spinul electronului se rotesc în jurul axei \vec{E}_z și această rotație aduce la o fază geometrică Berry θ [29] a funcției de undă a spinului. Funcția de undă care descrie mișcarea orbitală a încărcăturii electrice a electronului în câmpul magnetic \vec{B}_z duce la o altă fază legată de efectul Aharonov-Bohm [30].



Desenul 2. Schema tranzistorului propusă de Datta și Das [28]. Schema este reprodusă din desenul 9 al referinței [8].

Schimbarea programată și controlată a orientării spinului electronului stă la baza schemei tranzistorului propusă de Datta și Das [28]. Electronul care ajunge la un element al circuitului electric format din feromagnetic cu o magnetizare anumită va putea trece sau va fi respins în funcție de orientarea reciprocă a spinului și a magnetizării feromagnetice.

Acum să revenim la structura momentului unghiular total al excitonului și al polaritonului în gropile cuantice de semiconductor de tip *GaAs* cu banda de conductibilitate de tip *S* și proiecția spinului electronului în direcția creșterii cristalului $S_z^e = \pm 1/2$. Banda de valență este de tip p_1 cu polarizare circulară în planul stratului de tip $\frac{1}{\sqrt{2}}(x \pm iy)$ și cu proiecția momentului orbital $M_z = \pm 1$ a funcției orbitale de undă a electronului de valență. Electronul de valență și golul greu au proiecția momentului unghiular total $J_z = \pm 3/2$. Excitonul Wannier-Mott, creat din electronul de conductibilitate și golul greu, are patru posibile proiecții ale momentului unghiular total

$$J_z^{ex} = S_z^e + J_z^h = \pm 1/2 \pm 3/2 = \pm 1, \pm 2$$

În cristalele *GaAs* stările excitonului cu $J_z^{ex} = \pm 1$ sunt dipol-active sau lucitoare, iar cele cu $J_z^{ex} = \pm 2$

sunt interzise în tranzițiile optice și se numesc întunecate. Stările dipol-active lucitoare se caracterizează tocmai prin acele polarizări circulare cu $M_z = \pm 1$ menționate mai sus. Despicierea acestor stări poate fi obținută luând în considerare efectul Zeeman și valorile diferite ale g-factorilor Lande ale electronilor și golurilor. Aceste două polarizări circulare ale excitonului joacă rolul a două proiecții ale spinului și vor juca în spinoptronică același rol ca și proiecțiile spinului în spintronică.

Excitonul în starea dipol activă cu $J_z^{ex} = M_z = \pm 1$ interacționează cu fotonul și dă naștere la polariton. Fotonul de asemenea are două proiecții ale momentului unghiular orientate în direcția vectorului de undă și în direcția opusă. Ele se caracterizează prin polarizări circulare ca și în cazul excitonului. Legea conservării momentului unghiular permite interacțiunea fotonului cu stările lucitoare ale excitonului și interzice interacțiunea cu stările întunecate. Astfel, polaritonii, ca și excitonii lucitori, au două stări de polarizare circulară și posibilitatea de a lua parte la crearea dispozitivelor spinoptronice.

3. Actualmente se discută posibilitatea implementării fenomenului de CBE al polaritonilor bazați pe excitonii Wannier-Mott în microcavități [12] în interesul informaticii cuantice. Qubiturile polaritonice se formează pe baza superpoziției condensatului Bose-Einstein (BE) polaritonic pe ramura de jos cu condensatul BE pe ramura de sus. În așa fel se organizează oscilatorul Rabi al polaritonilor condensați în microcavități. Durata oscilațiilor Rabi poate fi mărită considerabil datorită împrăștierei stimulate a polaritonilor din rezervor în modelele coerente macroscopice ale celor două condensate. Qubiturile bazate pe oscilatorii Rabi din diferite microcavități datorită entanglementului (interdependenței, încălcării lor) pot fi aranjate într-o arhitectură unică. După cum a fost menționat în referința [12], avantajele principale care favorizează folosirea polaritonilor excitonici condensați Bose-Einstein în informatica cuantică sunt legate de posibilitățile de comutare rapidă cu durata de picosecunde, cu existența nelinierităților relativ puternice cu intensități joase necesare la executarea operațiilor logice cu perspectiva folosirii suprafluidității în procesele de transmitere a informației și energiei. Toate aceste avantaje sunt esențiale în realizarea multor algoritme în știința informaticii cuantice. Dispozitivele polaritonice au fost descrise mai sus. Polaritonii sunt un obiect de studii interdisciplinar la intersecția dintre optica cuantică coerentă și nelinieră și fizica corpului solid.

În referința [13] se menționează ca emiterea luminii în formă de cascadă de către biexcitonii lo-

calizați în punctele cuantice de semiconductor este o sursă eficientă de bifotoni, adică de doi fotoni în stare de entanglement. Emiterea biexcitonului în prima treaptă a cascadei duce la crearea unui foton și la apariția unui exciton în una din cele două stări dipol-active. Această treaptă se numește conversie biexciton-excitonică. A doua treaptă a cascadei este

legată de recombinarea excitonului apărut și emite-rea celui de al doilea foton. Datorită legii conservării momentului unghiular ambii fotoni sunt corelați în privința polarizărilor, ambele polarizări având aceeași orientare, sau orizontală sau verticală. Astfel apar bifotonii corelați.

BIBLIOGRAFIE

- Deng H., Press D., Göttinger St., Solomon G., Hey R., Ploog K.H. and Yamamoto Y. Quantum degenerate exciton polaritons in thermal equilibrium. *Phys. Rev. Lett.* 97, 146402 (2006).
- Kasprzak J., Richard M., Kunderman S., Geambrun P., Keeling J.M., Marchetti F.M., Szymanska M.H., Andre R., Stachl J.L., Savona V., Baas A., Littlewood P.B., Deveaud B. and le Si Dang. Bose-Einstein condensation of exciton polaritons, *Nature*, 443, 409-414 (2006).
- Balatsky A.V., Joglekar Y.N. and Littlewood P.B. Dipolar superfluidity in electron-hole bilayer systems. *Phys. Rev. Lett.*, 93, 266801 (2004).
- Deng H., Haug H., Yamamoto Y. Exciton-polariton Bose-Einstein condensation. *Rev. Mod. Phys.*, 82, 1489-1537 (2010).
- Keeling J., Marchetti F. M., Szymanska M. H. and Littlewood P.B. Collective coherence in planar semiconductor microcavities. *Semicond. Sci. Technol.* 22, R1-R26 (2007).
- Snoke D.V. and Kavoulakis G.M. Bose-Einstein condensation of excitons in Cu_2O : progress over 30 years. *Rep. Prog. Phys.* 77, 116501(17p) (2014).
- Bhattacharya P., Frost T., Deshpande S., Md. Z. Baten. Room temperature electrically injected Polariton laser. *Phys. Rev. Lett.*, 112, 236802 (2014).
- Liew T.C.H., Shelykh I.A., Malpuech G. Polariton devices. *Physica E*, 43, 1543-1568 (2011).
- Москаленко С.А. К теории экситона Мотта в целочно-голоидных кристаллах. *Оптика и Спектроскопия*, 5, 147 (1958).
- Москаленко С.А. Обратимые оптико-гидродинамические явления в неидеальном экситонном газе. *Физ. Тверд. Тела*, 4, 276 (1962).
- Moskalenko S.A. and Snoke D.W. Bose-Einstein Condensation of excitons and biexcitons and coherent nonlinear optics with excitons. Cambridge University Press, Cambridge UK (2000), 428 p.
- Demirchyan S.S, Chestnev I.Yu., Alodjants A.P., Glazov M.M. and Kavokin A.V., Qubits based on Polariton Rabi oscillators, *Phys. Rev. Lett.*, 112, 196403 (2014).
- Hein S.M., Shulze F., Carmele A. and Knorr A., Optical Feedback-enhanced photon entanglement from biexciton cascade. *Phys. Rev. Lett.*, 113, 02740 (2014).
- Келдыш Л.В. и Козлов А.Н. Коллективные свойства экситонов в полупроводниках. *ЖЭТФ*, 54, 978 (1968).
- Bardeen J., Cooper L.N. and Schrieffer J.R. Microscopic Theory of Superconductivity. *Phys. Rev.* 106, 162 (1957); *Theory of Superconductivity*, *Ibid* 108, 1175 (1957).
- Келдыш Л. В. и Копяев Ю. В. *ФТТ*, 6, 2791 (1964).
- Боголюбов Н.Н., Собрание трудов в 3-х томах. Тома 2 и 3. Издание Наукова Думка Киев, 1970.
- Blatt J.M., Böer K. and Brandt W., Bose-Einstein Condensation of Excitons, *Phys. Rev.* 126, 1691 (1962).
- Casella R.C. On the possibility of observing a Bose-Einstein condensation of excitons in CdS and CdSe, *J. Phys. Chem. Solids.* 24, 19 (1963).
- Imamoglu A.I., Ram R.J., Pau S. and Yamamoto Y. Nonequilibrium condensates and lasers without inversion: exciton-polariton lasers. *Phys. Rev. A*, 53, 4250 (1996).
- Tiginyanu I. M., Popa V., Stevens-Kalceff M. A., Gerthsen D., Brenner P. and Pavlidis D. Design and maskless fabrication of ultrathin suspended membranes of GaN, *Phys. Status Solidi – Rapid Research Letters*, 6(4), 148-150 (2012).
- Tiginyanu I. M., Popa V. and Volciuc O. Surface-charge lithography for GaN microstructuring based on photoelectrochemical etching techniques, *Appl. Phys Lett.* 86, 174102 (2005).
- Tiginyanu I. M., Popa V. and Stevens-Kalceff M. A. Nanoperforated and Continuous Ultra-Thin GaN Membranes, *Electrochem. and Solid-State Lett.* 14(9), k51-k54 (2011); Membrane-assisted revelation of the spatial nanoarchitecture of dislocation networks. *Mater. Lett.* 65(2), 360-362 (2011).
- Stevens-Kalceff M.A., Tiginyanu I.M., Popa V., Braniște T. and Brenner P. J. Cathodoluminescence characterization of suspended GaN nanomembranes. *Appl. Phys.* 114, 043516 (2013).
- Ursaki V.V., Tiginyanu I.M., Ricci P.C., Anedda A., Hubbard S. and Pavlidis D. Persistent photoconductivity and optical quenching of photocurrent in GaN layers under dual excitation. *J. Appl. Phys.* 94(6), 3875 (2003).
- Popa V., Tiginyanu I.M., Volciuc O. et al. Fabrication of GaN nanowalls and nanowires using surface charge lithography. *Mater. Letters*, 62, 4576 (2008).
- Volciuc O., Sergentu V., Tiginyan I.M., Schowalter M., Ursaki V., Rosenaner A., Hommel D. and Gutowski T. Photonic Crystal Structures Based on GaN Ultrathin Membranes. *J. Nanoelectronics and Optoelectronics*, 9, 271-275 (2014).
- Datta S., Das B. Electronic analog of the electrooptic modulator. *Appl. Phys. Lett.*, 56, 655 (1990).
- Berry M.V. Quantal Phase Factors Accompanying Adiabatic Changes. *Proceedings of the Royal Society A*, 392, 45-57 (1984).
- Aharonov Y. and Bohm D., Significance of electromagnetic potentials in quantum theory. *Phys. Rev.* 115, 485 (1959).