

## FONDATOR AL UNEI ȘCOLI ȘTIINȚIFICE VALOROASE ÎN DOMENIUL FIZICII TEORETICE

Academician **Sveatoslav MOSCALENCO**  
Doctor în științe fizico-matematice **Igor PODLESNÎI**  
Institutul de Fizică Aplicată „Dumitru Ghițu”

Profesorul universitar, doctorul habilitat în științe fizico-matematice Piotr Hadji, colaboratorul științific principal timp de mulți ani al Laboratorului de Teorie a Semiconducătorilor și Electronică Cuantică, în ultimii ani consultant al Laboratorului de Fizică Teoretică „Vsevolod Moscalenco” al Institutului de Fizică Aplicată, va rămâne în istoria științei moldovenești drept fondator al unei școli științifice vaste în domeniul fizicii teoretice. În cadrul acesteia au fost susținute 19 teze de doctor și publicate peste 1 500 de lucrări științifice, inclusiv 6 monografii. Lista discipolilor și monografiilor este alăturată.

Profesorul Piotr Hadji s-a născut în satul Cairaclia, raionul Taraclia, Republica Moldova la 3 aprilie 1939 și a decedat subit la 3 august 2018 în cel de-al optzecelea an de viață. A fost fecior de țaran, lucrul la țară și în câmp fiind acel mediu în care și-a trăit copilăria și din care și-a moștenit deprinderea de a munci din greu.

P. Hadji a absolvit Universitatea de Stat din Chișinău și a continuat studiile postuniversitare la Institutul de Fizică Aplicată al Academiei de Științe a Moldovei. A devenit doctor în științe în anul 1968 și a susținut teza de doctor habilitat în anul 1983 la Institutul de Fizică Teoretică „N. N. Bogoliubov” din Kiev la consiliul științific condus de academicianul A. S. Davidov. Datorită cunoștințelor sale excepționale în domeniul funcțiilor speciale, a performanțelor multiple în fizica excitonilor și biexcitonilor de înaltă densitate în semiconductori, devenise lider și conducător științific al unui colectiv de cercetători, absolvenți ai Universităților de Stat din Chișinău și din Tiraspol – centru de atracție pentru generații de studenți, masteranzi și doctoranzi. Aria de interese ale profesorului P. Hadji cuprinde propagarea coerentă, nelineară a luminii în semiconductori, a undelor electromagnetice în capleri și în ghiduri optice, inclusiv a undelor materiei în sistemele atomice și moleculare în stare de condensare Bose-Einstein la temperaturi ultra-joase ca în cazul chimiei ultra-reci.

Pe profesorul P. Hadji îl caracterizau o capacitate de muncă enormă și un interes nesecat față de știință. El se impunea în echipa noastră, după cum am men-



Prof. univ., dr. hab. Piotr HADJI  
(03.04.1939–03.08.2018)

ționat anterior, prin cunoștințe profunde în domeniul funcțiilor speciale, introducând două funcții noi ale erorilor. Pe baza acestor cunoștințe a reușit să calculeze un șir de integrale noi care conțineau funcții speciale și a publicat o culegere de integrale pe larg folosită și cunoscută de specialiști.

Capacitățile sale uimitoare i-au permis să abordeze cu ușurință numeroase procese descrise prin ecuații diferențiale și să contribuie la rezolvarea lor. Implicarea în descrierea matematică a oscilațiilor mecanice s-a soldat cu elaborarea unui manual didactic pentru studenți. Unele rezultate concrete ale cercetărilor sale vor fi enumerate în continuare pe baza articolului [1] publicat cu ocazia jubileului său de 70 de ani, completat cu rezultatele noi obținute în ultimul deceniu al vieții sale atât de prodigioase și impunătoare.

**1. Ecuația diferențială nelineară, care descrie solitonul polaritonic în aproximația undei de propagare cu anvelopă lentă** a fost soluționată exact luând în considerare modularea fazei. S-a stabilit că are loc un proces aperiodic nelinier. În prima jumătate a evoluției lui, lumina care pătrunde în cristal se transformă în excitoni. În a doua jumătate a procesului energia acumulată în cristal este reînțoarsă luminii, care continuă în așa mod propagarea. Soluția exactă descrie profilul pachetului undular al solitonului, viteza lui de grup și legea de dispersie, potrivit căreia

există o legătură între frecvența și vectorul de undă al undei de propagare. S-a dovedit că această lege de dispersie descrie și a treia ramură polaritonică cu dispersie inversată.

**2. Contribuția lui P. Hadji și a colaboratorilor săi la teoria nutației exciton fotonice** constă în generalizarea teoriei lineare dezvoltată anterior de Davîdov și Sericov luând în considerare efectele nelineare legate de densitățile înalte ale fotonilor. A fost demonstrat că frecvența de nutație crește monoton odată cu creșterea densității fotonilor atunci când abaterea de la rezonanță dintre frecvențele excitonilor și fotonilor este egală cu zero.

**3. Fenomenul ecoului fonic a fost descris pentru prima dată de P. Hadji și coautorii săi evitând aproximația câmpului electromagnetic fix.** Ecoul optic este răspunsul unui sistem la acțiunea a două semnale optice scurte consecutive, primul cu suprafața  $\frac{\pi}{2}$ , iar al doilea cu suprafața  $\pi$ . De obicei, fenomenul este descris neglijând influența inversă a sistemului asupra câmpului electromagnetic. Luând în considerare această influență, P. Hadji a obținut soluția exactă a problemei. S-a dovedit că fenomenul nu depinde numai de suprafețele impulsurilor de lumină, ci și de densitățile lor inițiale.

**4.** Un alt aspect al propagării impulsurilor ultrascurte ale laserului în cristale este perioada intermediară de la pătrunderea luminii în cristal până la formarea pachetelor undulare staționare. Se numește stagiul de tranziție și este descris de către **teorema su-**

**prafetelor dedusă de McCall și Hahn** în cazul când atomii în starea inițială nu sunt excitați. Teorema a fost **generalizată de P. Hadji** evitând această constrângere într-un sistem cu multe componente.

**5.** Propagarea luminii de-a lungul a două ghiduri optice numite capleri este o problemă a fizicii tehnice și se referă la elaborarea dispozitivelor opticii integrate. **P. Hadji împreună cu colaboratorii săi a studiat din punct de vedere teoretic propagarea luminii în condiții staționare de-a lungul a doi capleri cu nelinearitate saturabilă, care interacționează între dâșii.** Procesul este exprimat prin două ecuații diferențiale nelineare care descriu intensitatea torentului de lumina de-a lungul axei caplerilor, atunci când inițial fasciculul de lumina intră în primul capler cu intensitatea  $y_1$ . Problema a fost rezolvată exact în cuadratură. A fost demonstrat că distribuția intensității luminii în lungul axei ghidurilor optice poate fi determinată studiind proprietățile energiei potențiale a unui oscilator efectiv neliniar. Energia potențială depinde de doi parametri principali, unul dintre care este parametrul nelinearității  $a$  și al doilea este  $y_1$ . Valorile critice ale lui  $a$ , numite  $a_c$ , corespund valorilor energiei potențiale egale cu zero. Valorile  $a_c(y_1)$  sunt diferite la diferite valori ale lui  $y_1$  și determină intensitatea care introduce în circuit dispozitivul. Dependența  $a_c(y_1)$  se numește curbă de bifurcație. Dacă valoarea intensității la intrare  $y_1$  este mai mică decât valoarea critică și energia potențială este negativă, atunci intensitatea luminii în primul ghid optic variază periodic de-a lun-



Echipa de prieteni și colegi, anii 1980. Rândul 1, de la stânga la dreapta: E. Sineavski, S. Belkin, G. Șibarșina, P. Hadji, I. Belousov, I. Ceaikovski, A. Bobrășeva, S. Rusu, V. Buzov; rândul 2: A. Belousov, A. Rotaru, B. Filip, V. Sineak.



Profesorii Piotr Hadji și Igor Belousov, anul 2000.

gul axei lui. Atunci când valoarea  $y_1$  este puțin mai mare sau mai mică decât valoarea critică și variază lent în jurul acesteia, au loc schimbări drastice în repartizarea intensității luminii în ambele ghiduri. Acest fenomen poate fi folosit în toate comutatoarele optice, în amplificatoarele de semnale slabe, în tranzistoarele optice și în alte dispozitive [2, 3].

6. Un domeniu de activitate mai recentă a profesorului P. Hadji și a colaboratorilor săi este **oscilatorul parametric optic format din polaritoni excitonici în gropile cuantice singulare și din dipolaritoni excitonici în gropile cuantice duble de semiconductori**. În primul caz, electronii și golurile care formează excitonii sunt excitați în aceeași groapă cuantică și sunt excitoni direcți. În al doilea caz, electronii și golurile se excită în ambele gropi cuantice cuplate. Când excitonul este format dintr-un electron și un gol din aceeași groapă cuantică, el se numește direct, iar cel format din încărcături electrice excitate în diferite gropi cuantice se numește indirect. Dacă groapa cuantica singulară este introdusă în microcavitate, este excitată și are loc conversia multiplă coerentă exciton-foton, atunci se formează o excitație elementară, combinată din doi parteneri, numită polariton, care are două ramuri de dispersie. În cazul gropii cuantice duble fotonul din cavitate poate excita atât excitonul direct, cât și cel indirect. În superpoziția coerentă iau parte trei parteneri: un exciton direct, un exciton indirect și un foton. Această excitație elementară se numește dipolariton și are trei ramuri de dispersie. Oscilatorul parametric optic de tip polaritonic se formează atunci când impulsul ultracurt de pompă laser excită polaritoni coerenți la valoarea magică a vectorului de undă  $K_p$  pe ramura de jos a polaritonilor. Datorită interacțiunii lor au loc procese de împrăștiere a polaritonilor pompați, care se transformă în polaritoni coerenți de semnal pe ramura de jos cu vectorul de undă  $K = 0$  și în pola-

ritoni coerenți auxiliari pe ramura de sus cu vectorul de undă  $2K_p$ . Procesele nestaționare oscilatorii cu participarea a trei tipuri de polaritoni coerenți conduc la formarea oscilatorului parametric optic. Ecuțiile diferențiale, care descriu evoluția în timp a acestor unde coerente macroscopice, au fost soluționate luând în considerare condițiile în momentul inițial de timp  $t = 0$ . Soluțiile exacte ale problemei ne arată că sunt oscilații în timp ale unui oscilator neliniar cu energie cinetică și potențială și cu amplitudinea  $y(t)$ . Atunci când abaterea de la rezonanță dintre frecvențele modelor excitonului și a fotonului cavității este egală cu zero, există numai un regim aperiodic de evoluție în timp cu caracter de creștere sau descreștere care depinde de derivata în timp a amplitudinii  $\left. \frac{dy(t)}{dt} \right|_{t=0}$  în momentul inițial.

În cazul când derivata este pozitivă, toți polaritonii modei de semnal și a modei auxiliare revin și se transformă în perechi de polaritoni de pompă. Oscilația se oprește. Procesul invers de descompunere a polaritonilor de pompă în cei de semnal și cei auxiliari nu are loc.

Dacă în momentul inițial derivata este negativă  $\left. \frac{dy(t)}{dt} \right|_{t=0} < 0$ , atunci procesul aperiodic se încheie odată cu formarea modelor de semnal și auxiliare.

În cazul abaterii de la rezonanța diferită de zero apar procese periodice neliniare. În lucrările [4-6] într-un mod similar a fost studiată dinamica dipolaritonilor. Ca și în cazul precedent, impulsurile sunt ultracurte cu durata de femtosecunde, iar evoluția oscilatorului parametric optic se studiază în intervale de timp mai scurte decât timpul de relaxare al excitațiilor elementare. Deosebirea constă în faptul că pomparea se face pe ramura dipolaritonică medie, pe când undele coerente de semnal și cea auxiliară se pot forma în două variante diferite. O posibilitate este formarea undei de semnal pe ramura de jos și a undei auxiliare pe ramura de sus [7]. În a doua variantă ambele unde rămân pe ramura medie, aici având loc pomparea. Ambele variante satisfac legile conservării energiei, sunt descrise prin soluții exacte și se reduc la oscilații neliniare periodice și aperiodice. A fost discutat și cazul când în momentul inițial sunt dipolaritoni în trei mode concomitent: în cele de pompă, de semnal și auxiliare. În așa condiții apar două procese aperiodice similare cu cele descrise mai sus.

7. O altă problemă abordată și studiată de P. Hadji și colaboratorii săi este **efectul Autler-Townes cu participarea excitonilor și biexcitonilor coerenți în semiconductori**. Au fost studiate proprietățile optice ale cristalelor în regiunea excitonică a spectrului în



Discuții în cadrul seminarului.

De la stânga la dreapta: P. Hadji, S. Moscalenco, I. Belousov, anul 1996.

condițiile de pompare-sondare staționară cu două impulsuri de lumină laser. Unul puternic, de pompare, care schimbă stările cuantice ale semiconductorului, și altul mai slab, de sondare, care sondează și scoate la iveală schimbările efectuate de primul impuls. În ref. [7], Hadji și Tkacenko au stabilit că în aceste condiții susceptibilitatea semiconductorului în regiunea excitonică a spectrului are o dependență bistabilă față de frecvența și intensitatea laserului de pompare. Acest rezultat se datorează faptului că laserul de pompare creează excitoni și biexcitoni de înaltă densitate și interacțiunea elastică a excitonilor constituie mecanismul principal de neliniaritate. Energia de legătură a biexcitonului fiind mică, laserul de pompare avea posibilitatea de a crea excitoni și de a transforma excitonii prezenți în biexcitoni. Cu totul altă situație are loc în cristalul  $CuCl$ , unde energia de legătură a biexcitonului este considerabilă și frecvența laserului de pompare se găsește în rezonanță cu tranziția cuantică de conversie biexciton-exciton. În acest caz, studiat de Hadji și Nadkin [8], laserul de pompare nu poate excita excitoni direct din starea de bază a cristalului. În schimb frecvența laserului de sondare se alege în regiunea excitonică a spectrului și cercetează schimbările apărute în urma acțiunii laserului de pompare. Acțiunea sa principală constă în crearea replicii nivelului energetic al biexcitonului. Or, replica unui nivel înseamnă apariția altui nivel cu frecvență mai mică și această diferență este egală cu frecvența laserului de pompare. Apariția replicii nivelului energetic al biexcitonului în regiunea excitonică a spectrului constituie esența efectului Autler-Townes. Spectrul energetic depinde de constantele interacțiunilor exciton-fotonice,

de conversia radiativă biexciton-excitonică și de crearea bifotonică a biexcitonului direct din starea de bază a cristalului. Și în acest caz în lucrare [8] a fost studiată susceptibilitatea semiconductorului în regiunea excitonică a spectrului.

8. Hadji și colaboratorii săi [9] au propus **un mecanism nou de generare și amplificare a undelor terahertziene bazat pe tranzițiile cuantice dintre starea a doi excitoni liberi și cea a biexcitonului**. Energia fotonilor terahertzieni este egală cu energia de legătură a biexcitonului. A fost studiat cazul, când laserul cu frecvența  $\omega_0$  excită excitoni de înaltă densitate din starea de bază a cristalului. Se presupune că nivelul excitonic este ocupat macroscopic, formând o stare coerentă macroscopică cu aceeași frecvență  $\omega_0$ . Armonica secundă a laserului poate duce la crearea unei stări coerente macroscopice formate din perechi de excitoni cu frecvență dublă  $2\omega_0$  a perechii. Fiecare pereche de excitoni poate forma un biexciton cu frecvența  $\Omega_m$ , care este mai mică decât frecvența a doi excitoni liberi  $2\omega_0$ . Această diferență ( $2\omega_0 - \Omega_m$ ) este determinată în special de energia de legătură a biexcitonului. Se studiază situația când un impuls slab electromagnetic cu frecvența  $\omega_1 = 2\omega_0 - \Omega_m$  pătrunde în cristalul supus acțiunii staționare a impulsului de pompare  $\omega_0$ , care a produs o stare de inversie dintre ocuparea nivelelor energetice  $2\omega_0$  și  $\Omega_m$ . În acest caz va avea loc amplificarea impulsului slab. A fost determinat coeficientul de amplificare și susceptibilitatea mediului în regiunea frecvenței  $\omega_1$ , care are o dependență bistabilă de frecvența și intensitatea laserului de pompare. Același tip de histereză apare la determinarea densității excitonilor coerenti.

### 9. Transmisia impulsurilor de lumină ultrascurte printr-o peliculă subțire de semiconductor în regiunea excitonică a spectrului.

Un alt aspect al activității multilaterale a profesorului P. Hadji este legat de propagarea undelor electromagnetice prin pelicule subțiri de semiconductor în regiunea excitonică a spectrului. Această problemă a fost studiată de Hadji, Belousov, Marcov, Corovai și Vasilev [10] pornind de la interacțiunea exciton-foton și interacțiunea elastică exciton-exciton. Autorii au prezis apariția modulației în timp a fazei luminii și deplasarea dinamică spre roșu sau albastru a frecvenței impulsului transmis sau reflectat în funcție de semnul constantei de interacțiune a excitonilor. Cercetările proprietăților optice unice ale peliculelor subțiri de semiconductor (PSS) trezesc un interes sporit datorită posibilităților multiple de aplicări practice. Dependența neliniară dintre câmpul electromagnetic al undei de propagare și polarizarea mediului duce la apariția anumitor fenomene fizice în cazul excitării staționare sau nestaționare. Este foarte important că PSS are proprietatea de bistabilitate optică în cazul undei transmise prin peliculă sau reflectate de ea fără a folosi un dispozitiv suplimentar. Particularitățile interacțiunii nestaționare a impulsurilor ultrascurte (IUS) ale radiației laser cu PSS au fost studiate în baza fenomenului de saturație a interacțiunii exciton-fotonice, conversiei optice biexciton-excitonice și posibilităților de excitare bifotonică a biexcitonului direct din starea de bază a cristalului cu un singur impuls laser sau cu două impulsuri. Au fost prezise noi posibilități de control ultrarapid al transmisiei sau al reflexiei PSS, care promit diverse utilizări în procesarea informației optice.

Aceste cercetări prezintă interes sub aspectul aplicărilor posibile. Principalele rezultate țin de impulsul ultrascurt al radiației laser în rezonanță cu energia excitonilor, incident perpendicular pe suprafața peliculei de semiconductor, grosimea căreia este mai mică decât lungimea de undă a luminii, însă mult mai mare decât raza excitonului. Sub acțiunea impulsului în peliculă se creează excitoni de înaltă densitate, interacțiunea elastică a cărora este principalul mecanism de nelinearitate. Se presupune că există o singură modă a câmpului electromagnetic și o singură modă a excitonilor coerenți în interacțiune între ele descrise de ecuații diferențiale de tipul ecuațiilor lui Maxwell pentru câmpul electromagnetic și de tipul ecuației neliniare a lui Schrodinger pentru excitonii coerenți. Soluțiile exacte ale acestor ecuații au arătat că deplasarea nivelului energetic în funcție de densitatea excitonilor este principala cauză pentru apariția fenomenului de histereză, bistabilitate optică

și schimbare a frecvenței luminii transmise și reflectate de pelicula ultrasubțire.

Ultimul compartiment al acestei scurte relatări este legat de fenomenul de Condensare Bose-Einstein (BEC) a atomilor și moleculelor la temperaturi ultrajoase în cadrul chimiei ultra-reci.

### 10. Conversia atomico-moleculară stimulată optic prin formarea moleculelor heteronucleare.

Hadji și Zingan au studiat în lucrarea lor eminentă [11] dinamica procesului de conversie atomico-moleculară stimulată optic în condițiile de condensare Bose-Einstein (CBE) la temperaturi ultrajoase. Este vorba despre asocierea în molecule a unor atomi diferiți, însă de tip Bose, care se descriu ca un tot întreg prin operatori Bose și pot fi condensați Bose-Einstein în stări coerente macroscopice, care au o amplitudine macroscopică și o fază anumită ca și funcția de undă în mecanica cuantică. Astfel de stări la fotoni, cunoscute în optica coerentă, pot apărea și la particulele materiei în stare de CBE. Tocmai în aceste condiții se descriu procesele mai jos. Atomii inițiali, moleculele formate și două fascicule de lumină laser, care stimulează conversia, se găsesc în stări coerente macroscopice și sunt caracterizate prin amplitudini și prin faze. Rolul fazelor s-a dovedit a fi foarte important și determină deosebirea chimiei tradiționale, în care contează numai densitatea reagenților, de chimia coerentă, unde fazele și amplitudinea acestora sunt decisive.

Procesul de conversie atomico-moleculară stimulată optic constă în transformarea a doi atomi cu frecvențele nivelelor energetice  $\omega_{01}$  și  $\omega_{02}$  în moleculă cu frecvența  $\Omega_m$ . Deoarece  $\omega_{01} + \omega_{02}$  este mai mare decât  $\Omega_m$  și legea conservării energiei nu este respectată, acest proces de sine stătător nu are loc. Pentru a înlesni conversia a doi atomi în moleculă se folosește împrăștierea Raman. La doi atomi se adăuga un foton incident cu frecvența  $\omega_1$  care este absorbit în sistem și odată cu formarea moleculei se emite un alt foton cu frecvența mai mare  $\omega_2$ , care tocmai satisface legea conservării energiei cu participarea a 5 parteneri și anume

$$\omega_{01} + \omega_{02} + \omega_1 = \Omega_m + \omega_2 \quad (1)$$

Ceea ce era imposibil în componența a trei parteneri, a devenit posibil în componența a cinci parteneri. Acest proces poate avea loc spontan atunci când cinci reagenți sunt reprezentați fiecare printr-o particulă, însă el devine stimulată optic când avem două impulsuri laser cu frecvențele  $\omega_1$  și  $\omega_2$ . Mai mult ca atât: el devine stimulată de reagenții materiali care sunt reprezentați prin trei condensate Bose-Einstein formate din atomii de două tipuri și de molecule.

Atunci când molecula se găsește într-o stare excitată în prezența câmpului magnetic exterior, rela-

ția exprimată prin ecuația (1) se numește rezonanță Feschbach.

Hadji și Zingan [11] pentru prima dată au studiat evoluția în timp a procesului de conversie a doi atomi heterogeni într-o moleculă heteronucleară stimulată optic de două impulsuri de lumină laser și stimulată statistic prin formarea condensatelor Bose-Einstein din atomi și din molecule.

Procesul de conversie și împrăștiere Raman a fost atestat ca un proces indivizibil unic cu participarea a cinci parteneri descriși prin stări coerente macroscopice. Ecuațiile de mișcare pentru operatorii de tip Bose corespunzătorii acestor stări au fost analizate gă-sind integralele de mișcare care se exprimă prin densitățile partenerilor implicați în proces. Soluția ecuației de mișcare pentru densitatea moleculelor a fost exprimată în formă de integral hipereliptic generalizat. Deoarece el nu poate fi exprimat prin funcții ordinare, cercetările ulterioare au fost efectuate numeric.

A fost demonstrat că evoluția în timp a procesului de conversie se desfășoară periodic și aperiodic și depinde esențial de fazele și amplitudinile inițiale ale participanților la proces. A fost studiat cazul când condiția de rezonanță (1) este satisfăcută exact. Procesele staționare pot avea loc și la o abatere de la rezonanță. Însă în ambele cazuri evoluția în timp depinde esențial de diferența dintre fazele sumare a trei participanți înainte de conversie și a doi participanți după conversie. Această dependență de fază are loc în toate procesele coerente macroscopice. Conversia stimulată atomico-moleculară descrisă mai sus este un exemplu de chimie coerentă ultra-rece evidențiată de profesorul Piotr Hadji și colaboratorii săi. Profesorul Piotr Hadji a pus bazele teoretice ale descrierii reacțiilor chimice coerente în cadrul suprachimiei coerente ultra-rece.

## REFERINȚE

1. Moskalenko S. A. *Mold. J. Phys. Sci.* 8, 1, 114, (2009).
2. Khadzhi P. I. and Vasil'eva O. F. *Physics of solid state* 53, 6, 1283, (2011).
3. Khadzhi P. I. and Vasil'eva O. F. *Optics and Spectroscopy* 111, 5, 814, (2011).
4. Khadzhi P. I. and Vasil'eva O. F. *JETP Letters* 102, 9, 581, (2015).
5. Khadzhi P. I. and Vasil'eva O. F. and Belousov I. V. *Optics and spectroscopy* 120, 5, 760, (2016).
6. Khadzhi P. I. and Vasil'eva O. F. and Belousov I. V. *JETP*, 126, 2, 147, (2018).
7. Khadzhi P. I. and Tkacenko D. V., *Fiz. Tverd. Tela (St. Petersburg)* 40, 934, (1998) [*Phys. Solid State* 40, 860, (1998)].
8. Khadzhi P. I. and Nad'kin L. Yu. *Physics of solid State* 47, 12, 2237, (2005).
9. Khadzhi P. I., Nad'kin L. Yu. and Markov D. A. *Physics of Solid state*, 60, 4, 663 (2018).
10. P. I. Khadzhi P. I., Belousov I. V., Markov D. A., Korovai A. V. and Vasiliev V. V. in the edition with H. Hahn et al. (eds). *Nanoscale phenomena: fundamentals and applications, nanoscience and technology*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, chapter 4, 2009, as well as in the references wherein.
11. Khadzhi P. I. and Zingan A. P. *JETP Letters* 92, 7, 444, (2010), as well as in the references wherein.

## Lista monografiilor scrise de profesorul P. I. Hadji împreună cu colaboratorii săi

1. P. I. Khadzhi. *Funktsiya veroyatnosti*, RIO AN MSSR, Chisinau, 398, 1971.
2. S. A. Moskalenko, A. I. Bobrysheva, A. V. Lelyakov, M. F. Miglej, P. I. Khadzhi, and M. I. Shmiglyuk. *Vzaimodestvie eksitonov v poluprovodnikakh*, RIO AN MSSR, Chisinau, Shtiintsa, 211, 1974.
3. P. I. Khadzhi. *Kinetika rekombinatsionnogo izlučenja eksitonov i bieksitonov v poluprovodnikakh*, Chisinau, Shtiintsa, 243, 1977.
4. S. A. Moskalenko, P. I. Khadzhi, and A. Kh. Rotaru. *Solitony i nutatsiya v eksitonnoi oblasti spektra*, Chisinau, Shtiintsa, 195, 1980.
5. P. I. Khadzhi, *Nelineinye opticheskie processy v sisteme eksitonov i bieksitonov v poluprovodnikakh*, Chisinau, Shtiintsa, 213, 1985.
6. P. I. Khadzhi and G.D. Shibarshina, *Opticheskaya bistabil'nost' v sisteme kogerentnykh eksitonov i bieksitonov v poluprovodnikakh*, Chisinau, Shtiintsa, 120, 1988.
7. P. I. Khadzhi. *Izbrannye zadachi po teorii kolebanii*, Tiraspol', RIO PGKU, 1996.

## Lista persoanelor, care au susținut teza de doctor în științe fizico-matematice sub conducerea profesorului P. I. Hadji:

1. C. G. Petrașcu în cotutelă cu S. A. Moscalenco
2. A. S. Rusu în cotutelă cu S. A. Moscalenco
3. S. S. Rusu în cotutelă cu S. A. Moscalenco
4. S. N. Belkin în cotutelă cu S. A. Moscalenco
5. E. S. Kiseliova în cotutelă cu E. P. Pocatilov
6. G. D. Shibarshina în cotutelă cu S. A. Moscalenco
7. Lu. D. Slavov
8. O. F. Pasecinic
9. S. L. Gaivan
10. L. P. Glazova (consultant științific)
11. K. D. Lyakhomskaia
12. A. M. Rusanov împreună cu E. P. Sineavskii
13. A. V. Corovai
14. O. V. Corovai
15. D. V. Tkachenko
16. D. A. Markov
17. L. Yu. Nadkin
18. A. P. Zingan
19. O. F. Vasilieva.