INSTITUTUL DE FIZICĂ APLICATĂ

Cu titlu de manuscris C.Z.U. 530.145+535.14

CEBAN VICTOR

DINAMICA CUANTICĂ A SISTEMELOR OPTICE ȘI OPTOMECANICE CU ATOMI ARTIFICIALI

131.01 - FIZICĂ MATEMATICĂ

Rezumatul tezei de doctor în științe fizice

CHIŞINĂU, 2020

Teza a fost elaborată în Laboratorul Fotonica Cuantică al Institutului de Fizică Aplicată.

Conducător științific:

MACOVEI Mihai dr. hab. în șt. fiz.-mat., conf. cer.

Referenți oficiali:

ISAR Aurelian	dr. în șt. fiz., prof. asoc.
	Institutul Național de Fizică și Inginerie Nucleară "Horia Hulubei",
	București-Măgurele, România

TRONCIU Vasile dr. hab. în șt. fiz.-mat., prof. univ. Universitatea Tehnică a Moldovei

Componența consiliului științific specializat::

CLOCHIȘNER Sofia, președinte,	dr. hab. în șt. fizmat., prof. cer.
OSTROVSCHI Serghei, secretar,	dr. hab. în șt. fizmat., conf. cer.
BELOUSOV Igor	dr. hab. în șt. fizmat., prof. cer.
PALADI Florentin	dr. hab. în șt. fizmat., prof. univ.
NICA Denis	dr. hab. în șt. fizmat., conf. cer.

Susținerea va avea loc la 18 septembrie, 2020, ora 15:00 în ședința Consiliului științific specializat D 131.01-03 din cadrul Institutului de Fizică Aplicată, str. Academiei 5, Chișinău, Moldova.

Teza de doctor și rezumatul pot fi consultate la Biblioteca Centrală "A. Lupan" și pe pagina web a ANACEC.

Rezumatul a fost expediat la 10 august 2020.

Secretar științific al Consiliului științific specializat, OSTROVSCHI Serghei, dr. hab. în șt. fiz.-mat., conf. cer.

Conducător științific,

MACOVEI Mihai, dr. hab. în șt. fiz.-mat., conf. cer.

Autor,

CEBAN Victor

© Ceban Victor, 2020

Verrpob M. Maraver

CUPRINS

REPERELE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII
CONȚINUTUL TEZEI
CONCLUZII ȘI RECOMANDĂRI22
REFERINȚE25
LISTA PUBLICAȚIILOR AUTORULUI27
ADNOTARE (în Română, Engleză și Rusă)29

REPERELE CONCEPTUALE ALE CERCETÀRII

Actualitatea problemei abordate:

Implementarea tehnologiilor cuantice informaționale, precum și diverse aplicații de detectare și imagistică cu ajutorul luminii, necesită un grad înalt de control și manipulare a fenomenelor de emisie, ghidare și detectare a fotonilor. Atomii artificiali posedă unele caracteristici importante care îi fac buni candidați pentru astfel de implementări tehnologice. Diverse tipuri și arhitecturi ale atomilor artificiali permit obținerea emițătorilor optici cu anumite caracteristici particulare ajustate cerințelor unui dispozitiv experimental. În deosebi în cazul circuitelor fotonice cuantice integrate cu pierderi mici și dispozitivelor optice realizate pe cip, aspectul tehnic al dispozitivului poate impune importante limitări și constrângeri. În acest context, circuitele supraconductoare și atomii artificiali pe bază de semiconductori, cum ar fi punctele cuantice, demonstrează o eficiență înaltă în calitate de surse de fotoni singulari [1], care sunt ingredientul cheie pentru tehnologiile din domeniul informației cuantice.

Atomii artificiali posedă unele deosebiri importante față de atomii reali, fiindcă aceștia interacționează cu semnalele electrice și cu mișcarea mecanică. Datorită cuplării optoelectrice și celei optomecanice, devin posibile diverse aplicații ale metodelor optice de detectare și metrologie, precum și aplicații pentru tehnologii cuantice hibride, în calitate de interfață pentru integrarea dispozitivelor fotonice în sisteme electronice moderne. Mai mult, cuplarea optomecanică deschide o nouă ușă spre confinarea cuantică a mișcării mecanice a materiei la scară mezoscopică.

Interacțiunile optomecanice devin un actor important pentru nanodispozitivile optice cum ar fi nanofibrele, detectorii supraconductori, cavități fotonice cristaline și diverse circuite fotonice integrate. La astfel de scări de dimensiune, vibrațiile mecanice ale dispozitivului influențează intrinsec efectele cuantice optice, prin intermediul forței de radiație a luminii. În mod reciproc, manipularea mișcării mecanice cuantice poate fi realizată prin intermediul controlului optic.

Implementarea atomilor artificiali în dispozitivele optomecanice introduce un nou regim de cuplare între părțile optice și mecanice, deoarece puterea cuplării optomecanice efective crește cu câteva ordine de mărime [2]. Printre diversele scheme de cuplare, punctele cuantice încastrate în rezonatori mecanici se deosebesc prin faptul ca ei nu necesită adițional un câmp electric sau magnetic pentru a se cupla cu mișcarea mecanică. Cuplarea optomecanică intrinsecă a punctului cuantic încastrat într-un cristal apare datorită deformărilor punctului cuantic în urma vibrațiilor mecanice ale rețelei cristaline.

Regimurile de cuplare optomecanică puternice pot fi explorate pentru a putea controla optic starea cuantică a mișcării mecanice. Optica cuantică dispune de o gamă largă de instrumente pre-

cise capabile să manipuleze un dispozitiv optomecanic. În premieră, aceasta a permis prepararea diverselor stări cuantice a mișcării materiei la scară mezoscopică. În acest context, realizări importante au fost raportate în ultimii ani. Acest fapt datorează progresului continuu a tehnicilor de ultimă oră în construcția dispozitivelor optomecanice [2]. Stări uni-fononice au fost observate în rezonatoare nanomecanice răcite pe cale optică [3]. Stări cuantice comprimate ale mișcării mecanice au fost observate cu succes în rezonatoare cuantice de dimensiuni micrometrice [4]. Analogul acustic al laserului optic a fost observat experimental în diverse dispozitive optomecanice bazate pe rezonatoare electromecanice [5], microcavități compuse [6] sau ioni pompați cu lumină laser [7]. În același timp, cercetările teoretice prezic o varietate mare de scheme de lasere fononice, unde dispozitivele bazate pe puncte cuantice încastrate pe rezonatoare mecanice cuantice au fost descrise în [8, 9, 10]. Un interes sporit este îndreptat spre identificarea dispozitivelor optomecanice au fost identificate pentru generarea câmpurilor fononice cu statistici cuantice specifice, cum ar fi efectul antibunching [10], funcții Wigner negative ale stărilor fononilor [11] și distribuții sub-poissoniene ale fononilor [12].

O importantă provocare tehnologică în implementarea atomilor artificiali în experimentele de optică și optomecanică apare în contextul fenomenelor colective. Efectele colective frecvent necesită ca emițătorii considerați să fie identici. Chiar dacă această condiție este ușor validată în experimente bazate pe atomi reali, în cazul atomilor artificiali există o limitare severă în sintetizarea atomilor artificiali cu caracteristici quasi-identice. Limitările curente ale tehnicilor de creștere a punctelor cuantice sunt caracterizate de necesitatea de a obține un înalt grad de asemănare în dimensiune și geometrie. Mai mult, fizica fenomenelor colective impune restricții suplimentare și asupra distribuției spațiale a emițătorilor considerați. Aceste restricțiuni devin deosebit de provocătoare în cazul dispozitivelor experimentale bazate pe puncte cuantice.

O realizare experimentală remarcabilă a unei scheme de interferență cu doi fotoni a fost raportată în [13]. Dispozitivul considerat este alcătuit din două puncte cuantice separate cu un înalt grad de asemănare. Un alt experiment bazat pe stările colective ale lui Dicke pentru puncte cuantice distanțate aproape unul de altul a fost recent raportat în [14].

Obiectivele tezei:

• Identificarea diferitor scheme de cuplare emițător-rezonator legate de diferite proprietăți caracteristice atomilor artificiali.

• Demonstrarea statisticii cuantice a unui rezonator optic sau mecanic, când acesta interacționează cu atomii artificiali.

• Identificarea eventualelor interferențe cuantice în sisteme care conțin atomi artificiali cu mai multe niveluri.

• Observarea comportamentului distribuției cuantelor unui rezonator nanomecanic pentru diferite condiții de interacțiune.

• Demonstrarea influenței fenomenelor colective asupra comportamentului sistemelor optomecanice.

Ipoteza de cercetare:

Atomii artificiali posedă caracteristici distinctive în raport cu atomii reali. Sisteme cuantice cu proprietăți unice pot fi identificate datorită caracteristicilor cuplării punctelor cuantice cu câmpuri fononice și fotonice

Sinteza metodologiei de cercetare:

• Formalismul matricei de densitate a fost adoptat pentru a aplica teoria generală a rezervorului cu scopul de a caracteriza fenomenele de amortizare ale mediului ambiant, fapt care permite descrierea sistemelor cuantice deschise.

• Aproximarea undei rotative, aproximarea seculară, transformarea stărilor îmbrăcate, teoria perturbațiilor și diferite schimbări ale reprezentării au fost aplicate la studierea dinamicii sistemelor cuantice pentru a reduce complexitatea acestora, fără a pierde informații esențiale ale sistemelor.

• Metoda proiectării ecuației master în baza stărilor sistemului a fost aplicată pentru a soluționa sistemul de ecuații ale elementelor modificate ale matricei de densitate.

 Metoda construcției ecuațiilor de mișcare direct din ecuația master a fost aplicată pentru a soluționa sistemul de ecuații care descrie dinamica cuantică.

 Metoda factorizării corelațiilor de ordin înalt a fost aplicată pentru a reduce complexitatea sistemelor de ecuații cu operatori colectivi.

6

CONȚINUTUL TEZEI

În primul capitol sunt discutate diverse abordări în implementarea atomilor artificiali în domeniul opticii cuantice la scară nanometrică. Sunt descrise realizările experimentale importante in domeniul electrodinamicii de cavitate și dispozitive optomecanice care conțin diferite tipuri de atomi artificiali. Sunt discutate diverse provocări, avantaje și limitări legate de anumite tipuri de atomi artificiali și de integrarea lor în cavități optice și rezonatoare mecanice cuantice. Per ansamblu, discuția are drept scop să realizeze o prezentare generală asupra dezvoltării moderne a nano-dispozitivelor optice și optomecanice, pentru a defini cadrul de lucru al acestei teze.

În capitolul doi, cadrul teoretic al tezei este demonstrat și adaptat pentru investigațiile care urmează. Principiile fundamentale ale tezei sunt bazate pe teoria interacțiunii unui emițător cu un oscilator armonic cuantic. În calitate de emițători sunt folosiți atomi artificiali. Sunt considerate caracteristicile specifice acestui tip de emițători în raport cu atomii reali, și anume, atomi artificiali cum ar fi punctele cuantice pot fi depuși pe diferite tipuri de rezonatoare mecanice cuantice, astfel devine posibilă interacțiunea cu fononii în limita bunei cavități. În același timp, alte tipuri de atomi artificiali cum ar fi gropile cuantice pot fi sintetizate astfel încât să formeze emițători cu trei niveluri energetice echidistante. Acest tip de emițători permit obținerea interferențelor cuantice la interacțiunea cu un rezonator optic. Cercetările elaborate în capitolele ce urmează sunt bazate pe aceeași teorie fundamentală, chiar dacă fiecare caz particular necesită o abordare specifică. Astfel, acest capitol regrupează teoria fundamentală prezentă în toate cercetările tezei, având drept scop de a reda cititorului un punct de vedere general asupra proceselor care urmează să fie discutate în teză.

Partea optică a sistemelor cuantice este discutată în primul paragraf al capitolului. Atât efectele optice, cât și cele optomecanice sunt direct legate de interacțiunea cuantică a emițătorului cu câmpul electromagnetic. Mai mult, procesele de amortizare, cum ar fi emisia spontană care este omniprezentă în sisteme cuantice cu emițători atomici, pot fi explicate în totalitate doar prin prisma interacțiunii cubitului cu câmpul electromagnetic. Toate detaliile necesare pentru a descrie interacțiunea unui sistem cu un câmp electromagnetic sunt deduse și discutate pentru a putea fi aplicate în capitolele următoare. Descrierea efectului de pompare a unui punct cuantic cu lumina laser, discutat în capitolul trei, este bazat pe interacțiunea semi-clasică prezentată aici. La fel, descrierea complet cuantică a interacțiunii unei gropi cuantice cu un câmp electromagnetic va fi utilizată în capitolul patru.

Partea mecanică a sistemelor optomecanice este abordată în paragraful doi al capitolului. Această abordare poate afecta atât comportamentul optic al sistemului cât și cel mecanic. Particularitatea

abordării constă în a trata fononii ca niște câmpuri bosonice. Astfel, se poate aplica tot instrumentarul teoretic al opticii cuantice pentru a descrie fononii. Chiar dacă fononii și fotonii sunt destul de similari din punct de vedere analitic, interpretarea lor fizică este complet diferită și necesită o abordare separată. Sistemele cuantice studiate în capitolele trei și cinci sunt axate pe cercetarea statisticii cuantice a fononilor rezonatorului mecanic.

Toate sistemele cuantice prezentate în teză sunt sisteme cuantice deschise, unde fiecare element, cum ar fi atomul artificial, fononii sau fotonii, este expus efectului de amortizare de către mediul ambiant. Pierderile fotonilor în vacuumul electromagnetic, mediul ambiant termic al fononilor sau emisia spontană a atomilor artificiali sunt descrise și definite în al treilea paragraf al capitolului. Pentru fiecare tip de amortizare, este aplicată teoria generala a rezervorului pentru fiecare tip specific de interacțiune.

În capitolul trei, este studiat un sistem compus dintr-un atom artificial plasat pe un rezonator mecanic cuantic. Dinamica sistemului este cercetată pentru cuplări moderat-puternice ale atomului artificial cu vibrațiile mecanice. Pentru astfel de regimuri de cuplare, abordarea teoretică necesită ca dinamica cuantică să fie tratată în afara ecuației seculare aplicată Hamiltonianului sistemului în reprezentarea interacțiunii. A fost identificat că vibrațiile mecanice generate în regimuri de cuplare moderat-puternică, manifestă caracteristici pur cuantice cum ar fi distribuția sub-poissoniană a cuantelor vibraționale. Mai mult, în configurația de răcire cuantică, efectul răcirii este intensificat pentru acest regim de cuplare.



Fig. 1: Schema modelului: Un punct cuantic cu două niveluri încastrat într-o nano-cavitate acustică de tip multi-strat. Punctul cuantic este pompat aproape de rezonanță cu o sursă laser coerentă și poate să emită spontan fotoni.

Este considerat modelul unui punct cuantic cu două niveluri, pompat, încastrat într-un rezonator mecanic format de o nano-cavitate acustică de tip multi-strat. În figura 1, este reprezentat cum punctul cuantic este pompat de o lumină laser intensă și interacționează cu câmpul uni-modal fononic. Acest model permite fononilor cavității să fie creați sau anihilați în funcție de alegerea abaterei de la rezonanță a laserului față de punctul cuantic. Fizica acestor procese este explicată în următorul fel: excitarea punctului cuantic corespunde formării unui exciton (gaură-electron) localizat în interiorul punctului cuantic. Sarcina excitonului interacționează cu deformațiile vibraționale ale rețelei prin intermediul potențialului de deformare. Astfel, pentru un laser abătut de la rezonanță, apar tranziții de tip Raman.

Pentru un laser abătut de la rezonanță în albastru, adică pentru o frecvență laser superioară celei de rezonanță, excitarea produsă de laser duce la crearea unui exciton și a fononilor în cavitatea acustică prin intermediului tranzițiilor de tip anti-Stokes. Această schemă nu duce la generarea fononilor, deoarece fononii creați sunt anihilați atunci când tranziția se produce în sens invers. Acest fapt este valid atât timp cât nu este considerată interacțiunea punctului cuantic cu vacuumul electromagnetic ambiant, adică fenomenul de emisie spontană. Acest fenomen deschide o altă posibilitatea de dezexcitare a punctului cuantic, de data aceasta fără a anihila vibrațiile mecanice. Atunci când sunt considerate ambele mecanisme de dezexcitare, sistemul generează fononi, însă câmpul lor crește infinit atât timp cât rezonatorul mecanic este considerat perfect, adică nu presupune fenomene de amortizare. Astfel, un al treilea efect introdus pentru a obține un sistem realistic, este amortizarea cavității acustice de un rezervor termic ambiant. Prin urmare, efectul de scurgere din cavitate nu va permite cuantelor vibraționale să se acumuleze infinit.

Dinamica studiată este determinată din Hamiltonianul sistemului și ecuația master care include și termenii de amortizare ai mediului înconjurător. Modelul consistă din un punct cuantic pompat, cu două niveluri, descris de frecvența de tranziție ω_{qd} dintre nivelul excitat $|e\rangle$ și cel fundamental $|g\rangle$. Operatorii atomici sunt definiți ca: $S^+ = |e\rangle\langle g|, S^- = |g\rangle\langle e|, S_z = (|e\rangle\langle e| - |g\rangle\langle g|)/2$ și se supun relațiilor de comutare standarde ale algebrei SU(2). Efectul de pompare laser este exprimat prin termenul de interacțiune semi-clasică descris de frecvența laser ω_L și frecvența Rabi Ω . Punctul cuantic este încastrat pe un rezonator mecanic cu frecvența ω_{ph} care este descris de operatorii bosonici de anihilare și creare, b și b^{\dagger} respectiv. Interacțiunea punctului cuantic cu rezonatorul mecanic cuantic este descris de constanta de cuplare g. Hamiltonianul sistemului este definit ca:

$$H = \hbar\omega_{qd}S_z + \hbar\omega_{ph}b^{\dagger}b + \hbar\Omega(S^+e^{-i\omega_L t} + e^{i\omega_L t}S^-) + \hbar g S^+ S^-(b^{\dagger} + b).$$
(1)

Ecuația master a operatorului matricei de densitate ρ este formată din ecuația Liouville-von Neumann împreuna cu termenii de amortizare care descriu emisia spontană a punctului cuantic definită de rata γ , efectul de defazare definit de rata γ_c și efectele de scurgere și pompare ale câmpului fononic a rezonatorului cauzate de interacțiunea rezonatorului cu mediul ambiant termal cu o rată de amortizare κ . Rezervorul termal este descris de numărul mediu de fononi $\bar{n} = 1/[\exp(\hbar\omega_{ph}/k_BT) - 1]$, unde k_B este constanta lui Boltzmann și T reprezintă temperatura ambiantă.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar} [H, \rho] + \kappa (1 + \bar{n}) \mathcal{L}(b) + \kappa \bar{n} \mathcal{L}(b^{\dagger}) + \gamma \mathcal{L}(S^{-}) + \gamma_c \mathcal{L}(S_z), \qquad (2)$$

unde efectele de amortizare sunt exprimate prin intermediul super-operatorului lui Liouville \mathcal{L} , care acționează asupra unui operator \mathcal{O} în următorul fel: $\mathcal{L}(\mathcal{O}) = 2\mathcal{O}\rho\mathcal{O}^{\dagger} - \mathcal{O}^{\dagger}\mathcal{O}\rho - \rho\mathcal{O}^{\dagger}\mathcal{O}$.

În cele urmează, dinamica sistemului este determinată prin proiecția ecuației master în baza stărilor sistemului fonon-punct-cuantic. Aceasta duce la un sistem de ecuații cuplate care poate fi rezolvat numeric datorită faptului că proprietățile fizice ale modelului permit de a trunca sistemul de ecuații. O serie de transformări este aplicată pentru a aduce ecuația master la o formă rezolvabilă fără a reduce din generalitatea cercetării. Mai precis, dinamica sistemului este rezolvată aplicând transformarea stărilor îmbrăcate asupra bazei stărilor punctului cuantic și, apoi, în reprezentarea interacțiunii sunt simplificați termenii Hamiltonianului și cei ai ecuației master.

În această reprezentare, este posibil de a distinge diverși termeni de interacțiune a punctului cuantic cu rezonatorul care se rotesc cu diferite frecvențe. Considerând frecvența fononilor ω_{ph} și frecvența Rabi generalizată $\overline{\Omega} = \sqrt{\Omega^2 + (\Delta/2)^2}$ de același ordin de mărime, termenii Hamiltonianului sistemului sunt împărțiți în cei rapid și încet oscilanți. În plus, cu condiția că $g \ll \omega_{ph}, \overline{\Omega}$, termenii rapizi pot fi neglijați prin intermediul unei aproximații seculare [15, 16]. Această condiție aplicată cuplării punctului cuantic cu fononii g definește regimul cuplării slabe. Când valoarea constantei de cuplare g crește aproape de ordinul de mărime a valorilor lui ω_{ph} și $\overline{\Omega}$, contribuția termenilor rapid oscilanți la dinamica sistemului continuă să fie mică, însă nu poate fi tot timpul complet neglijată. În acest caz, contribuția acestora poate fi tratată ca o perturbație de primul ordin [17, 18]. Acest regim de cuplare este definit ca un regim puternic de cuplare, chiar dacă în continuare vor fi considerate constante de cuplare cu valori moderat-puternice astfel încât să fie justificată abordarea perturbativă de primul ordin.

Hamiltonianul final este definit ca suma termenilor încet oscilanți H_{slow} și contribuția de ordinul

întâi a termenilor rapid oscilanți H_{fast}^{eff} :

$$H = H_{slow} + H_{fast}^{eff},$$

$$H_{slow} = \hbar(\omega_{ph} - 2\bar{\Omega})b^{\dagger}b - \hbar g \frac{\sin(2\theta)}{2} \left(b^{\dagger}R^{-} + R^{+}b\right),$$

$$H_{fast}^{eff} = -\hbar\bar{\Delta}R_{z} + \hbar\beta b^{\dagger}bR_{z}.$$
(3)

unde, $\theta = \arctan(2\Omega/\Delta)/2$, $\Delta = \omega_{qd} - \omega_L$. Noul set de operatori atomici exprimați în baza stărilor îmbrăcate $\{|+\rangle, |-\rangle\}$ este definit ca $R^{\pm} = |\pm\rangle\langle\mp|, R_{\pm\pm} = |\pm\rangle\langle\pm|, R_z = R_{++} - R_{--}$. Contribuția termenilor rapid oscilați este definită de constantele:

$$\bar{\Delta} = \frac{g^2}{2} \left(\frac{\cos\left(2\theta\right)}{\omega_{ph}} - \frac{\sin^2\left(2\theta\right)}{4(\omega_{ph} + 2\bar{\Omega})} \right) \quad \text{si} \quad \beta = g^2 \frac{\sin^2\left(2\theta\right)}{4(\omega_{ph} + 2\bar{\Omega})}. \tag{4}$$

De notat că pentru $g \ll \omega_{ph}, \bar{\Omega}, \{\bar{\Delta}, \beta\} \simeq 0$ similar cu cazul unei aproximații seculare.



Fig. 2: Statistica fononilor reprezentată de funcția de corelație de ordinul doi $g^{(2)}(0)$ în linii albastre și numărul mediu de fononi $\langle n \rangle$ în linii roșii, în funcție de rata normalizată de amortizare a cavității κ . Modelul perturbativ este reprezentat în linii continue, iar liniile întrerupte reprezintă modelul tratat în cadrul aproximației seculare [5^{*a*}].

Cel mai distinctiv aspect al modelului teoretic curent consistă în implementarea unei tratări perturbative. Această metodă permite o abordare în afara unei aproximații seculare și consideră regimul cuplărilor moderat puternice unde termenii rapid oscilanți pot fi tratați ca o perturbație a Hamiltonianului sistemului, în loc de a fi complet neglijați. Pentru a evidenția contribuția terme-

nilor rapizi la dinamica sistemului, modelul curent este comparat cu un model similar unde a fost aplicată aproximația seculară. În figura 2 este prezentată statistica fononilor pentru cele două modele, adică, modelul care cu o abordare în afara ecuației seculare (linii continue) și cel ce folosește ecuația seculară (linii întrerupte). Funcția de corelație de ordinul doi $g^{(2)}(0)$ este reprezentată în linii albastre și numărul mediu de fononi $\langle n \rangle$ în linii roșii. Alți parametrii ai sistemului sunt $2\Omega/\gamma = 25$, $\Delta/(2\Omega) = -0.7$, $\bar{n} = 0.04$, $\gamma_c/\gamma = 0.1$, $g/\gamma = 15$ și $\omega_{ph}/\gamma = 35$.

Se observă că funcțiile de corelație de ordinul doi estimate, în ambele cazuri, converg pentru rate de amortizare mici și mari. Chiar dacă ambele modele prezic $g^{(2)}(0) \simeq 1$ pentru valori mai mici ale lui κ/γ , proprietățile cuantice sunt bine descrise doar de modelul perturbativ. Graficul inserat din figura 2, prezintă mai de aproape convergența funcțiilor de corelație de ordinul doi la un câmp cuasi-coerent în regimul amortizării slabe, în regiunea $10^{-3} \le \kappa/\gamma \le 10^{-2}$. Aceasta este regiunea de interes, deoarece în acest regim de amortizare este generat un număr semnificativ de fononi. Modelul aproximației seculare prezice un câmp clasic deoarece distribuția sa este mereu mai largă decât cea poissoniană, adică se observă că $g^{(2)}(0) > 1$ în timp ce converge asimptotic. În mod contrar, abordarea perturbativă prezice o distribuție cuasi-coerentă a fononilor, însă cu $g^{(2)}(0) <$ 1. Astfel, doar modelul perturbativ poate elucida proprietățile cuantice a câmpului fononic. Mai mult, pentru regimul de amortizare slabă, este introdusă o schimbare semnificativă în estimarea numărului mediu de fononi $\langle n \rangle$, în cadrul modelului perturbativ.

În capitolul patru, este cercetat cazul unei gropi cuantice cu trei niveluri echidistante de tip Ξ , plasat într-o cavitate optică. În figura 3 este reprezentată groapa cuantică pompată de două lasere cu faze diferite. Fiecare laser este aplicat în rezonanță asupra uneia din cele două tranziții ale gropii cuantice. Sub efectul de pompaj laser, nivelurile energetice ale gropii cuantice sunt supuse efectului de despicare Stark dinamic. Diverse tranziții cu diferite frecvențe de tranziție apar între nivelurile energetice despicate. În cazul unui emițător pompat, cu două niveluri, se observă trei tranziții distincte în spectrul de emisie al emițătorului, așa numitul triplet Mollow. Tripletul Mollow este constituit din un maxim central corespunzător energiei de tranziție a emițătorului liber și două benzi laterale, distanțate egal de ambele părți ale maximului central. În cazul unui emițător cu trei niveluri, apar și mai multe benzi laterale. În cadrul acestei cercetări a fost considerat un emițător cu trei niveluri echidistante. Astfel, deoarece ambele tranziții au loc la aceeași frecvență, spectrul de emisie al gropii cuantice pompată cu laser este alcătuit din maximul central și două perechi de benzi laterale.

Deoarece arhitectura gropii cuantice are niveluri energetice echidistante și dipolii de tranziție ortogonali, cavitatea optică se cuplează cu ambele tranziții ale emițătorului în limita bunei cav-



Fig. 3: Schema modelului: O groapă cuantică cu trei niveluri, amplasată într-o cavitate optică amortizată, care interacționează cu două câmpuri externe coerente descrise de frecvențele Rabi corespunzătoare $\Omega_{2,1}$. γ_{32} și γ_{21} sunt ratele emisie spontane ale stărilor excitate. Săgețile reprezintă tranzițiile între stările îmbrăcate în rezonanță cu frecvența cavității, care duc la interferențe cuantice.

ități. Deoarece groapa cuantică este preparată într-o superpoziție de stări datorită pompării laser, cavitatea interacționează indistinctibil cu tranzițiile superioară și inferioară. Aceste amplitudini indistinctibile ale interacțiunii cavității cu diferitele tranziții ale gropii cuantice, duc la efectul de interferență. Pentru a rezolva dinamica sistemului, a fost posibil de a reduce semnificativ complexitatea dinamicii cuantice, fără a pierde mult din generalitatea problemei, acordând succesiv cavitatea în rezonanță cu una din frecvențele spectrului energetic a emițătorului.

Puternice interferențe cuantice destructive au fost obținute datorită faptului că amplitudinile de interacțiune pot fi influențate de intensitățile si fazele laserelor. Astfel, câmpul electromagnetic al cavității poate fi anulat pentru o diferență de faze laser bine aleasă, deoarece fazele laserelor sunt transferate amplitudinilor de interacțiune. În acest caz, groapa cuantică pompată emite spontan fotoni în toate direcțiile cu excepția cavității. Mai mult, acest comportament al sistemului de interferență format de groapa cuantică și cavitate, este asociat cu un întrerupător cuantic, unde semnalele de intrare ale laserelor poate să "deconecteze" câmpul cavității prin varierea diferenței de faze sau a intensității laser.

Groapa cuantică este descrisă de stările sale $|i\rangle$, $\{i = 1, 2, 3\}$ și energiile lor corespunzătoare $\hbar\omega_i$. Operatorii atomici ai emițătorului cu trei niveluri sunt definiți ca $S_{ij} = |i\rangle\langle j|$, $\{i, j = 1, 2, 3\}$ și se supun relațiilor de comutare $[S_{\alpha,\beta}, S_{\beta',\alpha'}] = \delta_{\beta,\beta'}S_{\alpha,\alpha'} - \delta_{\alpha',\alpha}S_{\beta',\beta}$. Nivelul cel mai înalt $|3\rangle$ poate să se dezexcite spontan la nivelul intermediar $|2\rangle$ cu o rată de emisie γ_{32} , iar cel din urmă poate să se dezexcite la nivelul fundamental $|1\rangle$ cu o rată γ_{21} .

Hamiltonianul sistemului, în forma sa generală, este definit ca:

$$H = \hbar \omega_c a^{\dagger} a + \hbar \sum_{i=1}^{3} \omega_i S_{ii} + i \hbar g_1 (a^{\dagger} S_{12} - S_{21} a) + i \hbar g_2 (a^{\dagger} S_{23} - S_{32} a) + \hbar \Omega_1 (S_{21} e^{-i(\omega_{L1}t + \phi_1)} + S_{12} e^{i(\omega_{L1}t + \phi_1)}) + \hbar \Omega_2 (S_{32} e^{-i(\omega_{L2}t + \phi_2)} + S_{23} e^{i(\omega_{L2}t + \phi_2)}).$$
(5)

Efectul de pompare a gropii cuantice este obținut prin aplicarea diferitor lasere pentru fiecare tranziție atomică. Laserul care pompează tranziția inferioară este descris de frecvența ω_{L1} și faza ϕ_1 , iar laserul aplicat tranziției superioare este descris de ω_{L2} și ϕ_2 . Efectul de pomparea a gropii cuantice este descris de frecvențele Rabi Ω_1 și Ω_2 , pentru frecvențele inferioară și superioară, respectiv. Interacțiunea complet cuantică a cavității cu groapa cuantică este exprimată prin doi termeni separați ai Hamiltonianului, câte unul pentru fiecare tranziție. Termenii corespunzători sunt descriși de constantele de cuplare g_1 și g_2 . Prima constantă de cuplare reprezintă interacțiunea rezonatorului optic cu tranziția inferioară, iar al doilea termen - cu cea superioară. Câmpul cuantificat al cavității este definit de frecvența sa ω_c și operatorii bosonici de creare a^{\dagger} și anihilare a.

Dinamica cuantică a sistemului este definită de ecuația master a operatorului de densitate ρ :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar} [H,\rho] + \frac{\kappa}{2} \mathcal{L}(a) + \frac{\gamma_{32}}{2} \mathcal{L}(S_{23}) + \frac{\gamma_{21}}{2} \mathcal{L}(S_{12}), \tag{6}$$

unde primul termen reprezintă partea coerentă dată de ecuația lui von-Neumann, iar ceilalți termeni descriu fenomenele de amortizare. Al doilea termen al ecuației este termenul de pierdere a fotonilor cavității, care apare în urma interacțiunii rezonatorului optic cu vacuumul electromagnetic ambiant. Ultimii doi termeni reprezintă emisia spontană a celor două stări excitate, cu două rate diferite corespunzătoare celor două tranziții ale gropii cuantice. În cazul unii structuri atomice cu mai multe niveluri, cum ar fi cazul curent, teoria rezervorului poate fi aplicată separat asupra fiecărei tranziții. Astfel, dinamica emisiei spontane va fi definită de termeni de amortizare separați, adaptați pentru fiecare din tranzițiile posibile.

Similar cu capitolul trecut, ecuația master este prea complexă pentru a putea fi rezolvată direct. Astfel, este efectuată o serie de schimbări de reprezentare în acord cu diferite referențiale rotative, cu scopul de a putea aplica transformarea stărilor îmbrăcate pentru un emițător cu trei niveluri. În cadrul bazei stărilor îmbrăcate și a reprezentării interacțiunii, este posibil de a distinge diverșii termeni de interacțiune a cavității cu groapa cuantică, care se rotesc cu diferite frecvențe în acord cu diversele tranziții posibile între stările îmbrăcate ale emițătorului. Aceasta permite de a simplifica semnificativ Hamiltonianul sistemului acordând cavitatea optică în rezonanță cu una din tranzițiile posibile ale gropii cuantice pompate. Cazul de rezonanță permite de a păstra doar termenul de interacțiune rezonant și de a neglija ceilalți termeni de interacțiune prin intermediul unei aproximații seculare. Hamiltonianul simplificat descrie precis dinamica cuantică în cadrul aproximației seculare adoptate, cu condiția că $g_{1,2}/\Omega \ll 1$, unde frecvența Rabi generalizată este definită ca $\Omega = \sqrt{\Omega_1^2 + \Omega_2^2}$. În ceea ce urmează, fiecare caz de rezonanță va fi studiat separat.

Primul caz discutat reprezintă cavitatea setată în rezonanță cu una din benzile laterale externe. Dinamica și rezultatele obținute sunt similare atunci când cavitatea este în rezonanță fie cu cea mai energetică sau cea mai puțin energetică bandă laterală, adică când $\omega_c = \omega_L + 2\Omega$ sau $\omega_c = \omega_L - 2\Omega$, respectiv. Atunci când cavitatea este setată ca $\omega_c = \omega_L + 2\Omega$, Hamiltonianul exprimat în baza stărilor îmbrăcate $\{|+\rangle, |0\rangle |-\rangle\}$ este redus la expresia:

$$H = i|g|\left(a^{\dagger}R_{-+}e^{i\psi} - e^{-i\psi}R_{+-}a\right), \text{ unde } g = \frac{1}{2}(g_2e^{-i\phi_2}\sin\theta - g_1e^{-i\phi_1}\cos\theta), \quad (7)$$

 $\psi = \arg(g)$ și $\theta = \arctan(\Omega_2/\Omega_1)$.

Hamiltonianul obținut este similar cu modelul Jaynes-Cummings pentru un atom cu două niveluri care interacționează cu o cavitate cu o cuplare efectivă g. Această cuplare efectivă apare în urma interferenței cuantice dintre cele două amplitudini de tranziție, care contribuie la pomparea modului cavității de către groapa cuantică. De notat că cuplarea efectivă dispare atunci când cei doi termeni care definesc expresia lui g devin egali, adică $g_1/g_2 = \Omega_2/\Omega_1$, și în fază, adică $\phi_2 = \phi_1 + 2\pi m, m \in \mathcal{Z}$.



Fig. 4: Numărul mediu de fotoni în cavitate $\langle n \rangle$ în funcție de raportul frecvențelor Rabi Ω_2/Ω_1 și faza laser ϕ_2 în timp cealaltă fază laser este fixată la $\phi_1 = \pi/4$ [2^a].

Comportamentul staționar al numărului mediu de fotoni în cavitate este reprezentat în figura 4, pentru un sistem definit de $g_1/\gamma_1 = 6$, $g_2/\gamma_1 = 4$, $\gamma_2/\gamma_1 = 2$ și $\kappa/\gamma = 10^{-3}$. Faza laserului care pompează frecvența inferioară este fixată la $\phi_1 = \pi/4$, în timp ce este variată faza laserului care pompează tranziția superioară ϕ_2 . La fel este variat raportul Ω_2/Ω_1 . Un minim în graficul numărului mediu de fotoni este bine vizibilă atunci când cuplarea efectivă g dispare. Acest fapt este cauzat de efectele de interferență cuantică de natură destructivă asupra fotonilor cavității. Aceste interferențe se produc deoarece ambele tranziții ale stărilor îmbrăcate se cuplează cu modul cavității, ce face amplitudinile interacțiunii indistinctibile. Când amplitudinile interacțiunii ale celor două cuplări devin egale și în fază, câmpul cavității dispare complet și groapa cuantică se decuplează efectiv de câmpul cavității. În acest caz, atomul este pompat și emite spontan în toate direcțiile cu excepția axei cavității unde nu se produce nici un fel de emisie de fotoni.

Un caz similar de interferență cuantică destructivă este obținut atunci când cavitatea este setată în rezonanță cu picul central a gropii cuantice pompate, adică pentru $\omega_c = \omega_L$. De notat că, chiar dacă cavitatea este setată în rezonanță cu tranziția gropii cuantice libere, modelul necesită ca pompajul laser să fie aplicat. Pentru acest caz, Hamiltonianul rezonant este obținut în urma neglijării termenilor rapid oscilanți, în forma:

$$H = i|g| \left(a^{\dagger} e^{i\psi} - e^{-i\psi} a \right) R_z, \text{ unde } g = \frac{1}{2} (g_1 e^{-i\phi_1} \cos \theta + g_2 e^{-i\phi_2} \sin \theta)$$
(8)

 $\mathrm{si}\;\psi=\mathrm{arg}(g).$

La fel ca și în cazul ecuației (7), în termenul Hamiltonianului rezonant apare o constantă de cuplare efectivă. Diferența față de cazul precedent constă în faptul că fazele laserelor trebuie să fie în defazaj de π , adică în anti-fază, pentru a obține fenomene de interferență destructivă. Mai precis, cuplarea efectivă dispare atunci când amplitudinile interacțiunii sunt egale, adică $g_1/g_2 = \Omega_2/\Omega_1$ și în anti-fază, adică $\phi_2 = \phi_1 + (2m + 1)\pi, m \in \mathbb{Z}$. Această condiție este verificată în figura 5, unde numărul mediu de fotoni $\langle n \rangle$ este reprezentat ca funcție de raportul frecvențelor Rabi Ω_2/Ω_1 și a fazei laserului ϕ_2 , ținând faza laserului care pompează tranziția inferioară la o valoare fixă de $\phi_1 = 0$. Alți parametrii a sistemului reprezentat în figură sunt $\gamma_{32} = \gamma_{21} = \gamma$, $g_1/\gamma = 4$, $g_2/\gamma = 2$ și $\kappa/\gamma = 10^{-3}$. Cele două minime în suprafața lui $\langle n \rangle$ corespund condiției de interferență menționate anterior, unde $g_1/g_2 = \Omega_2/\Omega_1 = 2$ și $\phi_2 = \phi_1 + \pi$ sau $\phi_2 = \phi_1 + 3\pi$. În aceste două puncte particulare, similar cu cel din figura 4, se observă o cavitate optică vidă din cauza decuplării efective a gropii cuantice de cavitate.



Fig. 5: Numărul mediu de fotoni în cavitate $\langle n \rangle$ în funcție de raportul frecvențelor Rabi Ω_2/Ω_1 și faza laser ϕ_2 pentru o valoare fixată a lui $\phi_1 = 0$ [8^a]

În capitolul cinci, este considerat un dispozitiv unde efectele radiative colective și mișcarea nanomecanică sunt puse la un loc. În particular, modelul este alcătuit din un ansamblu de puncte cuantice cu două niveluri, inițial excitate, care sunt încastrate pe un rezonator nanomecanic. Punctele cuantice sunt aranjate spațial pentru a permite o dezexcitare colectivă superradiantă. Vibrațiile nanomecanice se cuplează cu stările excitate ale punctelor cuantice și, astfel, modifică dinamica fononilor. Dinamica cuantică a sistemului este rezolvată considerând un număr mare de emițători încastrați pe rezonatorul mecanic. Aceasta permite să fie neglijate unele fluctuații statistice ale corelațiilor de ordin înalt în interacțiunea punctelor cuantice cu fononii.

Dezexcitarea punctelor cuantice contribuie la emisia fononilor în rezonatorul mecanic. O caracteristică a comportamentului superradiant constă în dinamica rapidă a procesului de dezexcitare al emițătorilor. Astfel, se observă că dinamica rezonatorului mecanic are caracteristici superradiante atât în scara de timp a emisiei fononilor, cât și în intensitatea câmpului fononic generat. Totuși, intensitatea emisiei fononilor este influențată de fenomenele de amortizare care apar în urma interacțiunii rezonatorului cu rezervorul termic ambiant. În consecință, comportamentul superradiant al intensității emisiei fotonilor nu poate fi echivalat în cazul fononilor.



Fig. 6: Schema modelului: Un ansamblu de puncte cuantice (QDs) cu două niveluri, inițial excitate este fixat pe un rezonator nanomecanic vibrant. Dimensiunea lineară d a ansamblului este mai mică decât lungimea de undă a fotonilor corespunzătoare tranziției atomice λ , adică $d < \lambda$.

În figura 6, este reprezentat modelul constituit din un ansamblu de N puncte cuantice identice, cu două niveluri, inițial excitate, fixate pe o membrană vibrantă. Membrana se comportă ca un oscilator armonic cuantic care vibrează la o frecvență ω . Acesta este amortizat de un rezervor termic ambiant de temperatură T. Oscilatorul mecanic se cuplează cu fiecare punct cuantic în mod egal, cu o constantă de cuplare η . La temperaturi ambiante joase, este considerată doar moda mecanică fundamentală. Astfel, oscilatorul mecanic este tratat în aproximația uni-modală, unde alte mode de frecvențe diferite contribuie puțin la dinamica cuantică. Acesta este cazul când lungimea L a rezonatorului nanomecanic este considerabil superioară lățimii l și grosimii a [19], adică $L \gg l \gg$ a. Pentru $L \sim 10^3$ nm, $a \sim 30$ nm și $l \sim 100$ nm este posibil de a depune un număr suficient de puncte mecanice pe rezonatorul mecanic pentru a obține efectul de superradianță, considerând că dimensiunile punctelor cuantice sunt de ordinul a cățiva nanometrii.

Hamiltonianul sistemului are forma:

$$H = \hbar\omega b^{\dagger}b + \sum_{j=1}^{N} \hbar\omega_{qd} S_z^{(j)} + \sum_{j=1}^{N} \hbar\eta |e\rangle_{jj} \langle e|(b+b^{\dagger}).$$
(9)

Primul termen al lui H este Hamiltonianul liber uni-modal al membranei, exprimat prin intermediul operatorilor fononici de anihilare și creare b și b^{\dagger} , respectiv. Al doilea termen reprezintă Hamiltonianul liber al ansamblului de puncte cuantice, unde ω_{qd} denotă frecvența de tranziție a punctului cuantic. A fost considerat că toate punctele cuantice sunt identice. Astfel, suma tuturor termenilor Hamiltonianilor liberi, individuali, ale punctelor cuantice a fost reprezentată de operatorul inversiei colectiv al ansamblului de puncte cuantice, exprimat ca $S_z = \sum_{j=1}^N S_z^{(j)}$. Aici, al *j*-lea punct cuantic este descris de starea sa excitată $|e\rangle_j$ și cea fundamentală $|g\rangle_j$. Operatorii unui singur punct cuantic sunt definiți corespunzător ca $S_j^+ = |e\rangle_{jj} \langle g|, S_j^- = |g\rangle_{jj} \langle e|, şi S_z^{(j)} = (|e\rangle_{jj} \langle e| - |g\rangle_{jj} \langle g|)/2$.

În cele din urmă, ultimul termen în Hamiltonianul ecuației (9), reprezintă interacțiunea ansamblului de puncte cuantice cu câmpul fononic. Dimensiunile spațiale ale membranei au fost considerate superioare decât limitele ansamblului de puncte cuantice. Astfel, constantele de cuplare ale fiecărui punct cuantic cu gradele de libertate vibraționale sunt identice și de aceeași magnitudine η . În consecință, suma tuturor interacțiunilor individuale ale membranei cu punctele cuantice a fost exprimată prin intermediul operatorului colectiv a stării excitate a ansamblului, definit ca $S_{22} = \sum_{j=1}^{N} |e\rangle_{jj} \langle e|$. Deci, în urma introducerii operatorilor atomici colectivi în ecuația eq.(9), Hamiltonianul sistemului devine:

$$H = \hbar \omega b^{\dagger} b + \hbar \omega_{\rm qd} S_z + \hbar \eta S_{22} (b + b^{\dagger}). \tag{10}$$

Dinamica sistemului este descrisă de ecuația master pentru operatorul de densitate ρ . Operatorii colectivi pot fi introduși și în ecuația master a sistemului [16]. Ecuația dinamicii cuantice este definită ca:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar} [H, \rho] + \kappa \bar{n} \mathcal{L}(b^{\dagger}) + \kappa (1 + \bar{n}) \mathcal{L}(b) + \gamma \mathcal{L}(S^{-}).$$
(11)

Aici, primul termen al ecuației master reprezintă evoluția coerentă dat de ecuația lui Liouvillevon Neumann, al doilea și al treilea termen denotă, respectiv, efectul de pompare și amortizare a rezonatorului mecanic de către rezervorul termic ambiant. Ultimul termen de amortizare caracterizează efectul colectiv de emisie spontană al ansamblului de puncte cuantice, ca rezultat al interacțiunii a ansamblului cu modurilor vacuumului electromagnetic ambiant. Acest termen este caracterizat de rata emisiei spontane γ și este exprimat prin intermediul operatorului colectiv $S^{\pm} =$ $\sum_{j=1}^{N} S_j^{\pm}$. Desfășurând termenul definit de superoperatorul lui Liouville $\mathcal{L}(S^-)$, se observă ca termenul emisiei spontane colective conține nu doar suma termenilor individuali a emisiei spontane a fiecărui punct cuantic independent. Acesta conține și interacțiunile inter-atomice care apar în condiția ca separarea spațială între diferite puncte cuantice a ansamblului este inferioară decât lungimea de undă a tranziției punctelor cuantice, adică în cazul unui ansamblu de volum mic.

Dinamica sistemului este rezolvată prin elaborarea ecuațiilor mișcării pentru parametrii de interes, din ecuația master. Și anume, este cercetată evoluția temporală a numărului mediu de fononi a membranei $\langle n \rangle = \langle b^{\dagger}b \rangle$ și un sistem de ecuații a mișcării a fost elaborat pentru a estima această evoluție. Sunt considerate ansambluri formate din un număr mare de puncte cuantice, adică $N \gg 1$, ceea ce permite factorizarea termenilor de corelație de ordin înalt. Se presupune că $\langle S_z^2 \rangle \simeq \langle S_z \rangle^2$, ce este echivalent cu neglijarea fluctuațiilor ale inversiei populației colective a ansamblului de puncte cuantice. Această asumpție nu strică simetria sistemului deoarece nu sunt introduse variabile noi în sistem. La fel, simetria sistemului este păstrată dacă se consideră $\langle S_z^2b \rangle \simeq \langle S_z \rangle \langle S_zb \rangle$ sau $\langle S_z^2b \rangle \simeq \langle S_z \rangle^2 \langle b \rangle$. În mod similar, se procedează cu termenul $\langle S_z^2b^{\dagger} \rangle$. De notat că aceste două scheme de factorizare sunt justificate pentru ansambluri mari de puncte cuantice și pentru numere mari de fononi în rezonator [20]. Sub această condiție, se verifică că ambele scheme de factorizare duc la un rezultat similar a dinamicii cuantice a sistemului. În urma factorizării termenilor de corelație de ordin înalt, sistemul de ecuații a mișcării este închis și rezolvat numeric.



Fig. 7: Evoluția temporală a numărului mediu de fononi ai rezonatorului mecanic $\langle n \rangle$. Aici, un ansamblu de N = 200 puncte cuantice este inițial excitat. Rezultatele sunt prezentate pentru diferite rate de amortizare κ , și anume: pentru $\kappa/\gamma = 1$ (curba punctată), $\kappa/\gamma = 5$ (curba întreruptă) și $\kappa/\gamma = 20$ (curba continuă) [3^a].

În figura 7 se arată cum dinamica fononilor este afectată de efectele colective din ansamblu de puncte cuantice. Pentru acest grafic, sistemul este definit de parametrii $\omega/\gamma = 50$, $\eta/\gamma = 5$ și $\bar{n} = 10$. Ansamblu de puncte cuantice este inițial excitat cu un puls laser scurt, de durată $\Delta t < 1/\eta$, pentru a evita influența fononilor la etapa de preparare. Alte condiții inițiale sunt: $\langle S_z \rangle_{t=0} = j$, $\langle S_z b \rangle_{t=0} = 0$, $\langle S_z b^{\dagger} \rangle_{t=0} = 0$, $\langle b \rangle_{t=0} = 0$, $\langle b^{\dagger} \rangle_{t=0} = 0$, $\langle b^{\dagger} b \rangle_{t=0} = \bar{n}$.

Un comportament superradiant este observat atât în durata de viață a fononilor, cât și în mărirea numărului mediu de fononi. Acest fapt se explică în următorul fel. Vibrațiile membranei interacționează cu stările excitate ale punctelor cuantice și, astfel, scara de timp când fononii sunt creați este legată de rata de dezexcitare a ansamblului atomic. Apoi, când ansamblu de puncte cuantice se apropie de starea colectivă fundamentală, dinamica fononilor începe să fie dominată de fenomenele de amortizare a rezervorului ambiant. Astfel, numărul mediu de fononi descrește la valoarea sa inițială \bar{n} , ceea ce caracterizează echilibru cu rezervorul termic. Mai mult, efectul de superradianță manifestă un profil de tip clopot al intensității colective. Totuși, intensitatea nu este proporțională cu N^2 , chiar dacă se observă clar o intensificare a emisiei fononilor. Chiar dacă superradianța fononilor este interconectată cu efectele colective din cadrul ansamblului de puncte cuantice și, astfel, la numărul N a punctelor cuantice, maximum numărului mediu de fononi este la fel determinat și de rata de amortizare κ . Acest fapt este observat în figura 7, unde emisia superradiantă a fononilor crește în lățime și înălțime pentru amortizări mai slabe, adică pentru valori mai mici ale lui κ , semănând cu limita bunei sau relei cavități, respectiv.

CONCLUZII ȘI RECOMANDĂRI

Obiectivele tezei au fost îndeplinite și efectele cuantice discutate au fost identificate prin studierea problemei științifice a atomilor artificiali care interacționează cu rezonatoare optice sau mecanice. Conform obiectivelor tezei, au fost propuse și cercetate trei modele distincte, fiecare necesitând o abordare separată în rezolvare pentru a putea estima cu acuratețe dinamica cuantică. În particular, investigarea diferitor scheme de cuplare a emițătorului cu rezonatorul, a permis identificarea a două cazuri distincte. În primul caz, tratarea specifică pentru cuplări optomecanice moderat-puternice a permis identificarea cuantelor mișcării vibraționale cu distribuții cuantice. În al doilea caz, considerarea unei gropi cuantice cu trei niveluri unde ambele tranziții se cuplează cu un rezonator optic, a permis identificarea fenomenului de interferență cuantică. Cercetarea fenomenelor colective a unui ansamblu de atomi artificiali amplasați aproape unul de altul pe un rezonator nanomecanic, a permis identificarea unui comportament superradiant a mișcării mecanice.

Principalele rezultate științifice prezentate în teză sunt:

1) Noua tratare aplicată modelului unui punct cuantic încastrat pe un rezonator mecanic cuantic a ameliorat descrierea dinamicii cuantice a sistemului pentru regimuri de cuplare optomecanică puternice. Pentru cuplări caracteristice de același ordin de magnitudine ca și frecvența mecanică, o tratare perturbativă introduce noi termeni rapid oscilanți în Hamiltonianul care descrie dinamica coerentă a sistemului. Observarea proprietăților cuantice, cum ar fi distribuții sub-poissoniene ale cuantelor vibrațiilor mecanice, a fost posibilă numai atunci când noii termeni au fost introduși în calcul. Mai mult, a fost estimată o valoare diferită a numărului mediu de fononi în comparație cu cazul când ecuația seculară este aplicată pentru a neglija termenii rapid oscilanți. Studiul corespunzător a fost publicat în $[5^a]$.

2) Modelul adaptat la cuplări optomecanice moderat puternice, a fost studiat și în alte scenarii posibile cum ar fi regimuri de răcire cuantică și regimuri de amortizare puternică. Un efect mai intens de răcire a fost prezis prin intermediul noii abordări a regimurilor de cuplare puternică. Pentru regimuri de amortizare puternică, a fost observată inversia populației asistată de fononi. Studiul efectului de răcire cuantică a fost publicat în [1^a].

3) Investigarea dinamicii cuantice a unei gropi cuantice cu trei niveluri, de tip Ξ, care interacționează cu un rezonator optic, a fost posibilă datorită adoptării tehnicii de rezolvare numerică la cazul unui emițător cu trei niveluri. Au fost cercetate interferențele cuantice între diferite tranziții atomice care apar în urma despicării nivelurilor energetice ale gropii cuantice sub pompajul laser. Au fost identificate diferite scheme de interferență. Faza și intensitatea laserului au fost ajustate pentru a acorda sistemul la o interferență complet destructivă care duce la anularea câmpului cavității. Primul studiu a acestui model este publicat în $[4^a]$, iar dependența de fază a fost descrisă mai târziu în $[2^a]$.

4) Chiar dacă efectul de interferență cuantică prezentat necesită implementarea unui emițător cu trei niveluri echidistante, modelul rezolvat poate fi aplicat și pentru emițători cu tranziții energetice nedegenerate, cum ar fi atomii de He care au tranziția superioară în domeniul vizibil, iar cea inferioară în domeniul ultravioletului extrem. În acest caz, modelul rezolvat prezice fenomenul CPT (Coherent Population Trapping), unde emițătorul a fost preparat în o stare întunecată obținută pentru un raport potrivit ale intensităților laserelor de pompare.

5) Dinamica rapidă a fononilor a fost observată pentru cazul unui ansamblu de puncte cuantice încastrate pe o membrană vibrantă. Când punctele cuantice amplasate aproape unul de altul satisfac condițiile de superradianță, comportamentul colectiv de dinamică rapidă a procesului de dezexcitare este transferat dinamicii rezonatorului mecanic. Caracteristica superradiantă a dinamicii de N ori mai rapidă, a fost observată și în dinamica emisiei de fononi a unui ansamblu de Npuncte cuantice. Dinamica sistemului a fost rezolvată considerând un număr mare de emițători și un număr mare de cuante vibraționale, fapt care a permis despicarea corelațiilor de ordin înalt și definirea unui sistem închis de ecuații ale mișcării. Rezultatele prezentate au fost publicate în [3^{*a*}], fiind unele din primele raportări despre efectul de superradianță fononică.

Luând în considerare concluziile de mai sus, se propun următoarele recomandări:

1) Metoda aplicată în abordarea teoretică a modelului unui punct cuantic amplasat pe un rezonator mecanic, a ameliorat semnificativ estimarea statisticii cuantice a rezonatorului mecanic pentru cuplări optomecanice specifice. Astfel, se recomandă investigarea validității ecuației seculare și în alte modele axate pe dispozitive optomecanice care au la bază puncte cuantice, cu scopul de a identifica cazurile unde tratarea dinamicii în afara ecuației seculare ar putea ameliora precizia de calcul a rezultatelor.

2) Un fenomen puternic de interferență cuantică destructivă observat în modelul unei gropi cuantice amplasate într-un rezonator optic, duce la anularea completă a câmpului cavității pentru raporturi specifice ale intensităților laser. Acest model poate fi implementat pentru măsurarea constantelor de cuplare a emițătorului, deoarece raportul acestora este proporțional cu raportul intensităților laser în cazul când câmpul cavității este complet anulat. Acest caz este ușor de detectat experimental.

3) Un întrerupător cuantic unde câmpul cavității este "oprit" sau "pornit" prin intermediul varierii parametrilor laserelor, este recomandat în calitate de aplicație a modelului unei gropi cuantice amplasate într-un rezonator optic. Mai mult, o potențială introducere a altor efecte care ar influența amplitudinile de interacțiune, sugerează o altă aplicare pentru tehnicile de detectare. Se recomandă introducerea cuplării optomecanice în modelul curent, fapt care ar afecta numai stările excitate ale emițătorului.

4) Studiul fenomenelor colective a unui ansamblu de puncte cuantice amplasate pe un rezonator mecanic a dezvăluit un comportament superradiant a dinamicii fononice. Se recomandă implementarea acestui efect în tehnicile de detectare bazate pe fononi unde sunt necesare pulsuri scurte și intense de fononi.

5) La fel, se recomandă de a continua cercetarea influenței proprietăților superradiante a fononilor asupra altor efecte optomecanice. De exemplu, sporirea dinamicii de dezexcitare datorită fenomenului de superradianță poate afecta dinamica proceselor de răcire și generare a fononilor descris în Capitolul 3 pentru un singur emițător. A fost menționat că efectele de laser fononic și de răcire cuantică prin intermediul abaterii de la rezonanță a laserului de pompare, sunt dependente de efectul emisiei spontane. Astfel, se recomandă implementarea dinamicii colective în acest tip de modele, din cauza măririi ratei de emisie spontană colective care apare în condițiile de superradianță.

Limitările rezultatelor obținute sunt legate de modelele teoretice prezentate în capitolele precedente. În Capitolul 2, a fost prezentat cadrul teoretic a fiecărui element a dinamicii, unde o serie de asumpții a fost aplicată pentru a defini Hamiltonienii care descriu diversele interacțiuni, la fel și procesele de amortizare. Toate aceste asumpții au fost respectate cu strictețe la rezolvarea modelelor. Mai mult, tratarea teoretică ulterioară a modelelor prezentate în capitolele 3, 4 și 5, a necesitat aplicarea anumitor aproximații, cum ar fi aproximația undei rotative sau aproximația seculară. Validitatea acestor aproximații a fost discutată și respectată la calculul rezultatelor. Tehnicile de rezolvare numerică aplicate în capitolele 3 și 4, au necesitat o altă seria de aproximări, din cauză numărului infinit de stări cuantice a rezonatorului optic sau mecanic. Aceste asumpții și aproximații nu afectează generalitatea problemelor studiate și au fost aprobate experimental în diferite scenarii.

Contribuția personală a autorului la rezultatele prezentate: Autorul a participat la identificarea obiectivelor, sarcinilor și modelelor prezentate; pentru fiecare model acesta a rezolvat tratarea teoretică aplicată dinamicii cuantice și a rezolvat independent diferitele sisteme de ecuații care definesc dinamica cuantică; el a scris primele versiuni a publicațiilor legate de rezultatele prezentate în teză.

Referințe

- [1] BEVERATOS, A., ABRAM, I., GERARD, J.-M., ROBERT-PHILIP, I.. Quantum optics with quantum dots. In: *Eur. Phys. J. D*, 2014, vol. 68, pp. 377/1-14.
- [2] ASPELMEYER, M., KIPPENBERG, T. J., MARQUARDT, F. Cavity Optomechanics. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. 357 p.
- [3] O'CONNELL, A. D., HOFHEINZ, M., ANSMANN, M., RADOSLAW, C. BIALCZAK, LENANDER, M., LUCERO, E., NEELEY, M., SANK, D., WANG, H., WEIDES, M., WENNER, J., MARTINIS, J. M., CLELAND, A. N.. Quantum ground state and singlephonon control of a mechanical resonator. In: *Nature*, 2010, vol. 464, nr. 7289, pp. 697-703.
- [4] WOLLMAN, E. E., LEI, C. U., WEINSTEIN, A. J., SUH, J., KRONWALD, A., MAR-QUARDT, F., CLERK, A. A., SCHWAB, K. C.. Quantum squeezing of motion in a mechanical resonator. In: *Science*, 2015, vol. 349, pp. 952-955.
- [5] MAHBOOB, I., NISHIGUCHI, K., FUJIWARA, A., YAMAGUCHI, H., Phonon Lasing in an Electromechanical Resonator. In: *Phys. Rev. Lett.*, 2013, vol. 110, nr. 12, pp. 127202/1-5.
- [6] GRUDININ, I. S., LEE, H., PAINTER, O., VAHALA, K. J.. Phonon Laser Action in a Tunable Two-Level System. In: *Phys. Rev. Lett.*, 2010, vol. 104, nr. 8, pp. 083901/1-4.
- [7] VAHALA, K., HERRMANN, M., KNÜNZ, S., BATTEIGER, V., SAATHOFF, G., HÄN-SCH, T. W., UDEM, T.. A phonon laser. In: *Nat. Phys.*, 2009, vol. 5, pp. 682–686.
- [8] KABUSS, J., CARMELE, A., BRANDES, T., KNORR, A.. Optically Driven Quantum Dots as Source of Coherent Cavity Phonons: A Proposal for a Phonon Laser Scheme. In: *Phys. Rev. Lett.*, 2012, vol. 109, nr. 5, pp. 054301/1-5.
- [9] KABUSS, J., CARMELE, A., KNORR, A.. Threshold behavior and operating regimes of an optically driven phonon laser: Semiclassical theory. In: *Phys. Rev. B*, 2013, vol. 88, nr. 6, pp. 064305/1-6.
- [10] OKUYAMA, R., ETO, M., BRANDES, T.. Lasing and antibunching of optical phonons in semiconductor double quantum dots. In: *New J. Phys.*, 2013, vol. 15, pp. 083032/1-27.
- [11] QIAN, J., CLERK, A. A., HAMMERER, K., MARQUARDT, F. Quantum Signatures of the Optomechanical Instability. In: *Phys. Rev. Lett.*, 2012, vol. 109, nr. 25, pp. 253601/1-5.

- [12] NATION, P. D.. Nonclassical mechanical states in an optomechanical micromaser analog. In: *Phys. Rev. A*, 2013, vol. 88, pp. 053828/1-7.
- [13] PATEL, R. B., BENNETT, A. J., FARRER, I., NICOLL, C. A., RITCHIE, D. A., SHIELDS,
 A. J.. Two-photon interference of the emission from electrically tunable remote quantum dots. In: *Nat. Photon.*, 2010, vol. 4, pp. 632–635.
- [14] SCHEIBNER, M., SCHMIDT, T., WORSCHECH, L., FORCHEL, A., BACHER, G., PAS-SOW, T., HOMMEL, D.. Superradiance of quantum dots. In: *Nat. Phys.*, 2007, vol. 3, pp. 106–110.
- [15] SCULLY, M., ZUBAIRY, M.. Quantum optics, Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 624 p.
- [16] KIFFNER, M., MACOVEI, M., EVERS, J., KEITEL, C. H. Vacuum-Induced Processes in Multilevel Atoms. In: *Prog. Optics*, 2010, vol. 55, pp. 85-197.
- [17] JAMES, D. F. V. Quantum Computation with Hot and Cold Ions: An Assessment of Proposed Schemes, In: *Fortschr. Phys.*, 2000, vol. 48, pp. 823-837.
- [18] TAN, R., LI, G.-X., FICEK, Z. Squeezed single-atom laser in a photonic crystal. In: *Phys. Rev. A*, 2008, vol. 78, nr. 2, pp. 023833/1-11.
- [19] WILSON-RAE, I., ZOLLER, P., IMAMOGLU, A.. Laser Cooling of a Nanomechanical Resonator Mode to its Quantum Ground State. In: *Phys. Rev. Lett.*, 2004, vol. 92, pp. 075507/1-4.
- [20] ANDREEV, A. V., EMEL'YANOV, V. I., IL'INSKII, Yu. A. Cooperative Effects in Optics. Superfluorescence and Phase Transitions. London: IOP Publishing, 1993. 470 p.

LISTA PUBLICAȚIILOR AUTORULUI

Articole în reviste științifice:

- [1^a] CEBAN, V., MACOVEI, M. A. Enhanced cooling for stronger qubit-phonon couplings. In: *Rom. Rep. Phys.*, 2018, vol. 70(1), pp. 407/1-8. ISSN 1221-1451 (IF: 1,467).
- [2^a] CEBAN, V. Phase-dependent quantum interferences with three-level artificial atoms. In: *Rom. J. Phys.*, 2017, vol. 62(5-6), pp. 207/1-8. ISSN 1221-146X (IF: 1,398).
- [3^a] CEBAN, V., LONGO, P., MACOVEI, M.A. Fast phonon dynamics of a nanomechanical oscilator due to cooperative effects. In: *Phys. Rev. A*, 2017, vol. 95(2), pp. 023806/1-5. ISSN 1050-2947. (IF: 2,765).
- [4^a] CEBAN, V., MACOVEI, M.A. Cavity quantum interferences with three-level atoms. In: J. Opt. Soc. Am. B, 2016, vol. 33(5), pp. 942—946. ISSN 0740-3224. (IF: 1,97).
- [5^a] CEBAN, V., MACOVEI, M.A. Sub-Poissonian phonon statistics in an acoustical rezonator coupled to a pumped two-level emitter. In: *J. Exp. Theor. Phys.*, 2015, vol. 121(5), pp. 793—798. ISSN 1063-7761. (IF: 0,879).
- [6^a] CEBAN, V., MACOVEI, M. A. Quantum dynamics of acoustical phonon statistics. In: *Fizică şi Tehnică*, 2015, vol. 2, pp. 18-22. ISSN 1857-0437.
- [7^a] CARLIG, S., CEBAN, V., MACOVEI M. A. Optomechanical systems A bridge between nano- and macro- worlds. In: *Akademos*, 2015, vol. 4, pp. 21-27. ISSN 1857-0437.

Culegeri și teze la conferințe:

- [8^a] CEBAN, V., MACOVEI, M. A. Quantum Interferences with Equidistant Three-Level Quantum Wells. In: 4th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering 2019. IFMBE Proceedings 77, pp. 155-159 (2020). Springer, Cham.
- [9^a] CEBAN, V., MACOVEI, M. A. The quantum dynamics of a nanomechanical resonator coupled to two quantum dots. In: *Proceedings of the 9th International Conference of "Microelectronics and Computer Science"* pp. 37-40, October, 2017, Chisinau, Moldova.
- [10^a] CEBAN, V., MACOVEI, M. A. Quantum interferences with equidistant three level quantum wells. In: *The 4th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering*, Chişinău Moldova (2019), p.76.
- [11^a] CEBAN, V., MACOVEI, M. A. Single-phonon quantum dynamics with nonlinear mechanical resonators. In: *the 9th International Conference on Material Science and Condensed*

Matter Physics, Chișinău, Moldova (2018). p. 67. ISBN: 978-9975-142-35-9

- [12^a] CEBAN, V. Collective effects in phonon generation with artificial atoms. In: Conferința Științifică a doctoranzilor Tendințe Contemporane ale Dezvoltării Științei: Viziuni ale tinerilor Cercetători, edița a VI-a, UnAȘM, Chişinău, Moldova (2017), p. 45.
- [13^a] CEBAN, V., MACOVEI, M. A. The quantum dynamics of a nanomechanical resonator coupled to two quantum dots. In: *IX International Conference on Microelectronics and Computer Science*, Chişinău, Moldova (2017), p. 37. ISBN: 978-9975-4264-8-0.
- [14^a] CEBAN, V. Quantum behaviors in optomechanical systems possessing artificial atoms.
 In: *Humboldt Kolleg Multidisciplinaryty in Modern Science for the Benefit of Society,* Chişinău, Moldova (2017), p. 27. ISBN: 978-9975-9787-1-2.
- [15^a] CEBAN, V. Quantum cooling beyond the secular approximation. In: Conferința ştiințifică internațională Perspectivele şi Problemele Integrării în Spațiul European al Cercetării şi Educației. Universitatea de Stat Bogdan Petricescu Haşdeu din Cahul, Moldova (2016), vol. 2, pp. 337-339.
- [16^a] CEBAN, V. Cavity quantum dynamics with three level atoms. In: *the 8th International Conference on Material Science and Condensed Matter Physics*, Chişinău, Moldova (2016), p. 55. ISBN: 978-9975-71-819-6.
- [17^a] CEBAN, V. Quantum interferences in cavity-atom systems. In: Conferința Științifică a doctoranzilor Tendințe Contemporane ale Dezvoltării Științei: Viziuni ale tinerilor Cercetători, edița a V-a, UnAȘM, Chişinău, Moldova (2016), p. 17. ISBN: 978-9975-933-84-1.
- [18^a] CEBAN, V., MACOVEI, M. A. Quantum dynamics of acoustical phonon statistics. In: *Light and Photonics*, Bălți, Moldova (2015), p. 13. ISBN: 978-606-93704-1-4
- [19^a] CEBAN, V. Phonon statistics in an acoustical cavity. In: Conferința Științifică a doctoranzilor Tendințe Contemporane ale Dezvoltării Științei: Viziuni ale tinerilor Cercetători, edița a IV-a, UnAȘM, Chişinău, Moldova (2015), p. 32. ISBN: 978-9975-3036-4-4.
- [20^a] CEBAN, V., MACOVEI, M. A. Quantum dynamics of phonon lasing, In: *the 7th International Conference on Material Science and Condensed Matter Physics*, Chişinău, Moldova (2014), p. 62.

ADNOTARE

la teza "Dinamica cuantică a sistemelor optice și optomecanice cu atomi artificiali", elaborată de Victor Ceban pentru conferirea gradului științific de doctor în științe fizice la specialitatea 131.01 "Fizică matematică", Chisinău, 2020.

Teza este scrisă în limba engleză și constă din introducere, 5 capitole, concluzii generale și recomandări, și lista a 200 titluri bibliografice. Teza conține 127 pagini de text de bază, 25 figuri și 145 formule. Rezultatele prezentate în teză sunt publicate în 20 lucrări științifice.

Cuvinte cheie: laser fononic de tip sub-Poissonian, interferențe cuantice, superradianță fononică, dinamică rapidă a fononilor, inversia populației asistată de fononi, atomi artificiali, puncte cuantice, gropi cuantice, optomecanică cuantică, electrodinamica cuantică de cavitate.

Scopul tezei: Determinarea și analiza diferitor proprietăți cuantice ale dinamicii unui rezonator optic sau mecanic care interacționează cu un atom artificial pe bază de semiconductor.

Obiectivele tezei: Identificarea diferitor scheme de cuplare emițător-rezonator legate de diferite proprietăți caracteristice atomilor artificiali; Demonstrarea statisticii cuantice a unui rezonator optic sau mecanic, când acesta interacționează cu atomii artificiali; Identificarea eventualelor interferențe cuantice în sisteme care conțin atomi artificiali cu mai multe nivele; Observarea comportamentului distribuției cuantelor unui rezonator nanomecanic pentru diferite condiții de interacțiune; Demonstrarea influenței fenomenelor colective asupra comportamentului sistemelor optomecanice.

Noutatea științifică și originalitatea rezultatelor: Comportamentul superradiant al fononilor a fost demonstrat pentru rezonatoare nanomecanice cuantice pe bază de materie solidă; Fenomenul de interferență destructivă a fost manipulat pentru a decupla efectiv un atom artificial de o cavitate optică; Tratarea dinamicii la nivel perturbativ a permis observarea fononilor distribuiți sub-Poissonian, adică observarea efectului laser fononic cuantic, pentru regimuri de cuplare moderat intens a punctului cuantic cu rezonatorul acustic.

Problema științifică soluționată constă în analiza fenomenelor legate de statistica cuantică ale diferitor tipuri de oscilatoare cuantice care interacționează cu atomi artificiali, cu scopul de a prezice condițiile necesare pentru a pregăti oscilatorul cuantic într-o stare cuantică specifică.

Semnificația teoretică și valoarea aplicativă: în această teză, este demonstrată dinamica cuantică a sistemelor cuantice deschise cu un grad înalt de complexitate, care includ diverse interacțiuni între diferite componente, cum ar fi: atomi artificiali, lumină laser, cavități optice, rezonatoare nanomecanice și mediul ambiant.

Modelul unui punct cuantic pompat, cu două nivele, care interacționează cu un rezonator nanomecanic a fost rezolvat pentru un regim de cuplare moderat intens. A fost popusă o schemă de generare a fononilor coerenți, în care a fost obținută o distribuție sub-Poissoniană ale cuantelor vibraționale a rezonatorului nanomecanic acustic.

Un dispozitiv constituit dintr-o groapă cuantică cu trei nivele echidistante amplasată într-o cavitate optică a fost investigat în limita cavității cu factor de calitate înalt. A fost propusă o schemă a unui întrerupător cuantic bazată pe efectul de interferență cuantică. Câmpul electromagnetic a cavității apare și dispare variind parametrii laserelor de pompare.

Comportamentul colectiv a unui eșantion de puncte cuantice cu două nivele, inițial excitate, amplasate pe un rezonator nanomecanic, a fost studiat printre primii în literatura de specialitate. Astfel, a fost stabilit un mecanism de generare a fononilor cu dinamică rapidă. Prin intermediul acestui mecanism sunt generate pulsuri ultra-scurte și intense de fononi, similar efectului de super-radianță.

Implementarea rezultatelor științifice: studiile prezentate în această teză au fost cu succes implementate în cadrul proiectului bilateral moldo-german 13.820.05.07/GF și proiectului național instituțional 15.817.02.09F; și pot fi utilizate cu scop didactic pentru studenții ciclului universitar și post-universitar.

SUMMARY

to the thesis "Quantum behaviors of optical and optomechanical systems possessing artificial atoms", presented by Victor Ceban for conferring the scientific degree of Ph.D. in Physics, Speciality 131.01 "Mathematical Physics", Chişinau, 2020.

The thesis has been written in English language and consists of the introduction, 5 chapters, general conclusions and recommendations, and the list of 200 references. The thesis contains 127 pages of basic text, 25 figures and 145 formulas. The results presented in the thesis are published in 20 scientific publications.

Key words: sub-Poissonian phonon laser, quantum interferences, phonon superradiance, fast phonon dynamics, phonon assisted population inversion, artificial atoms, quantum-dots, quantum-wells, quantum optomechanics, cavity quantum electrodynamics.

The goal: The determination and analysis of different quantum properties of the dynamics of an optical or mechanical resonator interacting with semiconductor artificial atoms.

Research objectives: The identification of various emitter-resonator coupling schemes related to different characteristic features of artificial atoms; The demonstration of the quantum statistics of an optical or mechanical resonator when interacting with an artificial atom; The identification of possible quantum interferences in systems possessing multi-level artificial atoms; The observation of the behaviour of the quanta distribution of a nanomechanical resonator under different interaction conditions; The demonstration of the influence of collective phenomena to the behaviour of an optomechanical system.

Scientific novelty and originality of the results: the phonon superradiant behaviour has been demonstrated in solid matter quantum nanomechanical resonators; the phenomenon of destructive quantum interference has been manipulated in order to effectively decouple an artificial atom from an optical cavity; a perturbation treatment of moderately strong quantum-dot-acoustic-resonator dynamics has allowed the observation of sub-Poissonian distributed phonon fields, i.e., quantum phonon lasing.

The main scientific problem solved consists in analysing the phenomena related to the quantum statistics of different types of quantum oscillators interacting with artificial atoms, in order to predict the conditions required to prepare the quantum oscillator in a specific quantum state.

Theoretical significance and applicative value: in this thesis it was demonstrated the quantum dynamics of open quantum systems with an elevated degree of complexity, which include diverse interactions among various components such as artificial atoms, laser light, optical cavities, nanomechanical resonators and the surrounding environment.

The model of a pumped two-level quantum-dot coupled to a quantum mechanical resonator operating in a moderately strong coupling regime has been solved. A coherent phonon generation scheme with sub-Poissonian quantum distribution of the vibrational quanta of the acoustic nanomechanical resonator has been proposed in order to improve phonon based sensing techniques.

A setup made of an equidistant ladder-type three-level quantum-well with perpendicular dipoles placed in an optical cavity has been investigated in the good cavity limit. A scheme for a quantum switch based on quantum interference effect was proposed. The cavity electromagnetic field is turned on and off by varying the parameters of the input pumping lasers.

The collective behaviour of a sample of initially excited two-level quantum-dots placed on a quantum mechanical resonator has been reported among the firsts investigations in the current literature. Therefore, a mechanism generating phonons with fast dynamics has been established. Ultra-short intense phonon pulses are generated via this mechanism, similarly to the superradiance effect.

The implementation of the scientific results: the research presented in this thesis has been successfully implemented in the framework of the bilateral moldo-german project 13.820.05.07/GF and national institutional project 15.817.02.09F; and may be further used for educational purposes.

АННОТАЦИЯ

к диссертации «Квантовая динамика оптических и оптомеханических систем искусственных атомов», представленной Виктором Чебан на соискание ученой степени доктора физических наук по специальности 131.01 «Математическая физика», Кишинэу, 2020

Диссертация написана на английском языке и состоит из введения, пяти глав, общих заключений и рекомендаций, и списка цитируемой литературы из 200 источников. Диссертация содержит 127 страниц базового текста, 25 графиков и 145 формул. Результаты диссертационной работы опубликованы в 20 научных публикациях.

Ключевые слова: фононный лазер субпуассоновского типа, квантовая интерференция, фононное сверхизлучение, инверсия населенности обусловленной фононами, искусственные атомы, квантовая оптика и квантовая оптомеханика.

Цель диссертации: Определение и изучение различных квантовых свойств оптического либо механического резонатора, взаимодействующего с искусственными атомами, возникающими в полупроводниковой среде.

Задачи диссертации: Выявление различных схем соединения излучатель-резонатор в зависимости от характеристических свойств искусственных атомов. Доказательство квантовой статистики оптического либо механического резонатора при его взаимодействии с искусственными атомами. Выявление возможных явлений квантовой интерференции в системах, содержащих многоуровневые искусственные атомы. Изучение поведения распределения квантов возбуждения наномеханических резонаторов в различных условиях их взаимодействия с искусственными атомами. Доказательство влияния коллективных явлений на поведение оптомеханической системы.

Научная новизна и оригинальность результатов: Выяснены особенности поведения фононов в сверхизлучательном состоянии в случае твердотельных квантовых наномеханических резонаторов; установлена возможность манипулирования явлением деструктивной квантовой интерференции с целью эффективного отключения взаимодействия искусственного атома и оптического резонатора; доказана возможность получения субпуассоновских фононов, т.е. возможность осуществления квантового фононного лазера.

Основная научная задача, решаемая диссертацией, заключается в исследовании явлений, обусловленных видами статистики различных квантовых осцилляторов, взаимодействующих с искусственными атомами, в целях определения условий, необходимых для создания квантового осциллятора в определенном квантовом состоянии.

Теоретическая значимость и прикладная ценность: в настоящей диссертационной работе изучена квантовая динамика сложных открытых квантовых систем, включающих различные виды взаимодействия между разными компонентами системы, такими как искусственные атомы, лазерное излучение, оптические и наномеханические резонаторы, и окружающая среда. Исследована динамика двухуровневой модели квантовой точки в поле лазера, умеренно сильно взаимодействующей с наномеханическим резонатором. Предложен способ генерации когерентных фононов, которым получено субпуассоновское распределение вибрационных квантов акустического наномеханического резонатора, способствующий улучшению сенсорных технологий, основанных на фононах. Теоретически предложена схема устройства, состоящего из эквидистантной многозвенной трехуровневой квантовой ямы с перпендикулярными диполями, расположенной в оптическом резонаторе высокой добротности. На базе последней предлагается создать квантовый триггер на основе явления квантовой интерференции. Показано, что изменяя параметры лазеров накачки возникает возможность манипулирования интенсивностью электромагнитного поля в резонаторе. Впервые изучен коллектив возбужденных двухуровневых квантовых точек, расположенных на квантовом наномеханическом резонаторе и показана возможность излучения интенсивных ультракоротких импульсов фононов по аналогии со сверхизлучательным эффектом.

Внедрение научных результатов: представленные в настоящей диссертации результаты были успешно применены в рамках двухстороннего молдавско-немецкого проекта 13.820.05.07/GF и национального институционного проекта 15.817.02.09F.

CEBAN VICTOR

DINAMICA CUANTICĂ A SISTEMELOR OPTICE ȘI OPTOMECANICE CU ATOMI ARTIFICIALI

131.01 - FIZICĂ MATEMATICĂ

Rezumatul tezei de doctor în științe fizice

Aprobat spre tipar: 24.07.2020 Hârtie ofset. Tipar ofset. Coli de tipar: 2,0. Formatul hârtiei 60x84 1/16 Tiraj: 30 ex. Comanda nr. 36

Tipografia MS Logo, str. Columna 145, Chişinău