

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

Hamid Reza Hamedi

TIESINIAI IR NETIESINIAI LĖTOS ŠVIESOS REIŠKINIAI

Daktaro disertacijos santrauka

Fiziniai mokslai, fizika (02P)

Vilnius, 2017

Disertacija rengta 2013 - 2017 metais Vilniaus universiteto Teorinės fizikos ir astronomijos institute.

Mokslinis vadovas – prof. habil. dr. Gediminas Juzeliūnas (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P);

Mokslinis konsultantas – prof. dr. Julius Ruseckas (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P)

Disertacija ginama viešame disertacijos Gynimo tarybos posėdyje.

Pirmininkas – prof. dr. Egidijus Anisimovas (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

Nariai:

doc. dr. Vygandas Jarutis (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P);

dr. Valdas Jonauskas (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P);

prof. dr. Mohammad Mahmoudi (Zanjano universitetas, Iranas, fiziniai mokslai, fizika – 02P);

prof. dr. Paulius Miškinis (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

Disertacija bus ginama viešame Gynimo tarybos posėdyje 2017 m. spalio 2 d. 14 val. Teorinės fizikos ir astronomijos institute, D401 auditorijoje. Adresas: Saulėtekio al. 3, LT–10222, Vilnius, Lietuva.

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2017 m. rugsėjo 2 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus universiteto bibliotekoje ir VU interneto svetainėje adresu: www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius

VILNIUS UNIVERSITY
CENTER FOR PHYSICAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

Hamid Reza Hamedi

LINEAR AND NONLINEAR PHENOMENA FOR SLOW LIGHT

Summary of Doctoral dissertation

Physical sciences
Physics (02P)

Vilnius, 2017

Doctoral dissertation was prepared in 2013 – 2017 at the Institute of Theoretical Physics and Astronomy of Vilnius University.

Scientific supervisor:

Prof. Habil. Dr. Gediminas Juzeliūnas (Institute of Theoretical Physics and Astronomy of Vilnius University)

Scientific consultant:

Prof. Julius Ruseckas (Institute of Theoretical Physics and Astronomy of Vilnius University)

Doctoral committee:

Chairman:

prof. dr. Egidijus Anisimovas (Vilnius University, Physical Sciences, Physics – 02P).

Members:

doc. dr. Vygandas Jarutis (Vilnius University, Physical Sciences, Physics – 02P);

dr. Valdas Jonauskas (Vilnius University, Physical Sciences, Physics – 02P);

prof. dr. Mohammad Mahmoudi (Zanjan University, Iran, Physical Sciences, Physics – 02P);

prof. dr. Paulius Miškinis (Vilnius Gediminas Technical University, Physical Sciences, Physics – 02P).

The dissertation will be defended at an Open meeting of the Doctoral committee on the 2nd of October 2017 at 2 p. m. at the Institute of Theoretical Physics and Astronomy, room D401. Address: Saulėtekio ave. 3, LT–10222, Vilnius, Lithuania.

The Summary of the dissertation was distributed on the 2nd of September 2017.

The dissertation is available at the Vilnius University Library and the VU webpage at: www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius

Turinys

1 Įvadas	5
1.1 Motyvacija ir pagrindas	5
1.2 Pagrindiniai darbo tikslai	6
1.3 Pagrindinės darbo užduotys	6
1.4 Mokslinis naujumas	6
1.5 Ginamieji teiginiai	7
1.6 Asmeninis autoriaus indėlis ir rezultatų apibavimas	8
1.7 Padėka	10
1.8 Darbo struktūra ir turinys	11
2 Pagrindai, ir literatūros apžvalga.	12
2.1 Atomo ir šviesos sąveika	12
2.2 Trijų lygmenų Λ atomų schema	13
2.3 Netiesiniai optiniai reiškiniai	14
3 Sustiprintas Kerr netiesiškumas	15
4 Atomo lokalizacija dvimačiu ir trimačiu atveju	18
4.1 1 Schema: Penkių lygmenų KR5 sistema	18
4.2 2 Schema: Keturių lygmenų sistema su dvigubais apatiniais lygmenimis	20
5 Tiesiniai ir netiesiniai efektai penkių lygmenų dviejų kopetėlių atomo sistemose	22
6 Elektromagnetinio lauko indikuotas praskaidrėjimas ir netiesinių impulsų sklidimas	24
7 Išvados	27
Literatūra	29

Trumpiniai

- ELIP.....Elektromagnetinio lauko indikuotas praskaidrėjimas
- CPT.....Koherentinė užpildos pagava
- 1D.....Vienmatis
- 2D.....Dvimatis
- 3D.....Trimatis
- KR5 modelis.....Kobrak ir Rice penkių lygmenų modelis
- LKGA.....Lėtai kintančios gaubtinės aproksimacija
- BBA.....Besisukančios bangos aproksimacija
- NTŠL.....Netiesinė Šrėdingerio lygtis

1 Įvadas

1.1 Motyvacija ir pagrindas

Kas atsitinka kai šviesa veikia medžiagą? Kvantinėje optikoje bei spektroskopijoje tiriančioje elektromagnetinės spinduliuotės ir materijos sąveiką, šis klausimas visuomet buvo vienas svarbiausių. Šviesai veikiant medžiagą įvyksta jų tarpusavio sąveika. Tai kaip šviesa sąveikauja su medžiaga, priklauso nuo šviesos lauko bangų ilgio, jo stiprumo ir pačios materijos. Šviesa gali būti atspindima, laužiama, išsklaidoma, praleidžiama ar sugerama. 1960 metais, lazerio išradimas iš pagrindų pakeitė optikos studijas, ir tai padėjo suprasti daug įdomių tiesinių ir netiesinių optinių reiškinių. Svarbu paminėti, kad optiniai reiškiniai būna tiesiniai (netiesiniai), atsižvelgiant į tai, jog sistemos atsakas į sukurtą elektromagnetinį lauką, priklauso nuo optinio lauko stiprumo tiesiškai (netiesiškai).

Naujausios kvantinės ir netiesinės optikos vystymosi dėka, daug dėmesio skirta naujoms technikoms, leidžiančioms manipuliuoti tiesinių ir netiesinių zonduojančio elektromagnetinio lauko sklidimų charakteristikas, tyrimui naudojant daugialygmenines atomines konfigūracijas. [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Perspektyvus ir lankstus tiesinio ir netiesinio impulso sklidimo savybių manipuliavimo atominuose garuose metodas pasitelkia kvantinės interferencijos ir koherentiškumą efektus [1, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

Yra daugybė priežasčių skatinančių norą suprasti impulso bangų sklidimo savybes per atomų ansamblius tiesiniuose ir netiesiniuose režimuose. Daugelis šių priežasčių yra susijusios su įdomiais fizikiniais reiškiniais ir jų taikymais. Tai kaip šviesos impulsas elgiasi įvairiose daugialygmeninėse atominėse struktūrose, yra ne tik įdomu kaip reiškinys, bet kartu sudaro daugelio modernių technologijų pagrindą.

Tinkama lygmenų sandaros sistema su tinkamomis kvantinės interferencijos ir koherentiškumą savybėmis padeda įgyvendinti įvairius optinius efektus. Populiariausia yra trijų lygmenų sistema vadinama Λ atominių lygmenų konfigūracija. Pasirodo, kad kvantinė interferencija ir koherentiškumai Λ lygmenų schemoje, gali lemti Elektromagnetinio lauko indikuoto praskaidrėjimo (ELIP) [1, 5] ir lėtos šviesos [8, 12, 16, 15] buvimą. ELIP režime, terpė gali būti stipriai sklaidanti, o tai sukelia lėta elektromagnetinės bangos sklidimą. ELIP suformuota lėta šviesa, gali stipriai padidinti atomo ir šviesos sąveiką, taip sukeldama keletą įdomių netiesinių optinių reiškinių. [17, 18, 19, 20, 21]. Sudėtingesnės lygmenų schemos su papildomais interferencijos ir koherentiškumą bruožais, sukeltos papildomų atominių lygmenų, gali generuoti dar įdomesnius efektus.

Vis dėl to, nepaisant augančio suvokimo ir besiplečiančių galimų pritaikymų, vis dar lieka daug svarbių neatsakytų klausimų, susijusių su tiesinėmis ir ne-

tiesinėmis optinėmis charakteristikomis, sukeltomis kvantinės interferencijos ir koherentiškumų, naujose daugialygmeninėse atominėse konfigūracijose. Šiame darbe nagrinėjami kai kurie iš šių atvirų klausimų, susijusių su ELIP mechanizmais ir lėta šviesa, išsamiu fizikiniu supratimu apie atomų lokalizaciją dvejuose ar trijuose dimensijose, lėtos šviesos optinių solitonų formavimąsi ir sklidimą bei Kerr netiesinį daugialygmeninių atominių schemų charakterizavimą.

1.2 Pagrindiniai darbo tikslai

Šio darbo tikslas yra sumodeliuoti teorinį pagrindą zondavimo lazerių impulsų charakteristikų manipuliavimui, impulsams sklindant atomų terpėse, kai sąveika su šviesa apima daugelį atomų lygmenų. Taip pat pateikti išsamų svarbių tiesinių ir netiesinių koherentinių reiškinių, kurie vyksta dėl sąveikos tarp atomų ir lazerio laukų, tyrimą. Pagrindinis šios disertacijos tikslas yra pasiūlyti naujas atomų ir šviesos sukabinimo schemas, kurios palaiko lėtą šviesą be nuostolių, didžiulį Kerr netiesiškumo sustiprinimą, tobulą 2D ir 3D atomų lokalizaciją, taip pat ir lėtą, formą išlaikančių optinių solitonų, sklidimą.

1.3 Pagrindinės darbo užduotys

- Naudoti kvaziklasikinį tankio matricos metodą, tam kad būtų gautos judėjimo lygtys, apibūdinančios atomų evoliuciją įvairiose atomų ir šviesos sąveikos schemose, atomus apšvietus valdymo ir zondavimo laukais.
- Parodyti Kerr netiesiškumo stiprinimo galimybę, kartu su nereikšminga sugertimi, esant lėtai šviesai, daugialygmeninėse atominėse struktūrose.
- Ištirti santykinės fazės tarp naudojamų laukų įtaką tiesiniams ir netiesiniams optiniams jautriams, kai terpę sudarantys atomai yra apibūdinami uždaros kilpos lygmenų sandara.
- Pasiūlyti naujas didelio tikslumo 2D ir 3D atomų lokalizavimo schemas, naudojant daugialygmenines atomų ir šviesos sąveikos konfigūracijas.
- Ištirti fazei jautrių 2D ir 3D atomų lokalizaciją atominėse terpėse, matuojant silpno zondavimo lauko sugertį.
- Pateikti naujus ELIP ir lėtos šviesos mechanizmus, naudojant daugialygmenines atomų ir šviesos sąveikos konfigūracijas.
- Naudoti lėtos šviesos ir ELIP koncepcijas, stabilią formą išlaikančių optinių solitonų generacijai, daugialygmeninių atomų ir šviesos sąveikos schemose.

1.4 Mokslinis naujumas

- Norint pasiekti Kerr netiesiškumo stiprinimą, siūloma nauja penkių lygmenų faziškai jautri atominė schema. Parodyta, kad, padidindami lygmenų

skaičių taip, kad jie sudarytų ciklišką grandinę iš keturių atominių būsenų susietų su pagrindine būsena, galima sukurti aukštesnės eilės netiesiškumus, nei keturių ar trijų lygmenų schemomis.

- Siūlomas analitinis modelis, išsiaiškinti faziškai jautrų Kerr netiesiškumą penkių lygmenų kvantinėse sistemose. Ši fazei jautri atomų lygmenų schema suteikia papildomą laisvės laipsnį Kerr netiesiškumo indekso kontrolei - tai savybė, kurios nebuvo ansktesniuose tyrimuose. [13, 22].
- Be pastovios būsenos netiesinio jautrio, tiriamas ir Kerr netiesiškumo perjungimas. Gauti rezultatai yra naudingi greito optinio netiesiškumo ir optiškai valdomų optinių įrenginių realizavimui.
- Nustatyta, kad Doppler išplitimo poveikis gali sukelti milžinišką Kerr netiesiškumą. Šis naujas Kerr netiesinis stiprinimas yra patrauklesnis už ELIP metodą ([13, 22, 14, 23]), nes nereikia naudoti labai stiprių sąveikos lazerinių laukų.
- Trimatis (3D) atomo lokalizavimas pateikia konkretesnę informaciją apie judančio atomo padėtį nei 1D ar 2D lokalizavimas. Šiame darbe, 3D atomo lokalizacijos fazės valdymas pirmą kartą nagrinėjamas 3D erdvėje. Nustatyta, kad aptikimo tikimybė rasti atomą tam tikro tūrio 3D erdvėje ir per vieną stovinčios bangos periodą, tinkamai suregulius santykinę taikomų laukų fazę, gali siekti 50%.
- Mes tyrėme zonduojančios šviesos sklidimą naujoje atominėje struktūroje, kuriai būdinga kombinuota trikojo ir Lambda (Λ) atomų ir šviesos sąveikos konfigūracija. Tai suteikia naują elektromagnetiniu būdu sukeltą skaidrumą ir lėtą šviesą, lyginant su Λ [5, 6], trikojo [12, 24, 25], ar dvigubo trikojo schemomis [26, 27]. Schema suteikia galimybę keičiant lazerio laukų fazę kontroliuoti ELIP.

1.5 Ginamieji teiginiai

1. Penkių lygmenų KR5 atominėje sistemoje didžiulis Kerr koeficientas su sumažinta sugertimi gali būti gautas esant subluminialios šviesos sklidimo sąlygai tinkamai suregulius naudojamus laukus.
2. KR5 schemos netiesinė dispersija ir sugertis, apimanti uždarojo ciklo atominius šuolius yra labai jautrūs santykinei naudojamų laukų fazei.
3. Santykinė fazė atlieka svarbų vaidmenį, norint pasiekti idealią atomo aptikimo tikimybę dvejose dimensijose ir tam tikroje padėtyje per vieną stovinčios bangos lauko periodą. Santykinė fazė taip pat gali kontroliuoti atominių konfigūracijų 3D aptikimo lokalizacijos elgesį uždarojo ciklo posistemėje.
4. Veikiant kontroliniam laukui, zondavimo laukui penkių lygmenų dviejų kopetėlių atominėje terpėse įvyksta praskaidrėjimas, kuomet tuo pačiu metu terpėje sklinda subluminialinė šviesa.

5. ELIP būtinos tamsiosios būsenos egzistuoja bendrame trikojo ir Lambda (Λ) atomų ir šviesos sąveikos scheme. Ribiniais atvejais schema supaprastėja iki įprastinių Λ arba N tipo atomų ir šviesos sąveikos schemų, atitinkamai suteikiant ELIP arba sugertį.
6. Stabilių lėtos šviesos optinių solitonų generacija bendroje trikojo ir Λ atominėje sistemoje yra galima.

1.6 Asmeninis autoriaus indėlis ir rezultatų aprobavimas

Disertacijos autorius atliko didžiąją analitinių lygčių išvedimų dalį, skaitinius skaičiavimus ir kartu su bendraautoriais paruošė publikacijas.

Moksliniai straipsniai disertacijos tema

1. **Hamid Reza Hamedi** and Gediminas Juzeliunas, *Phase-sensitive Kerr nonlinearity for closed-loop quantum systems*, Phys. Rev. A 91, 053823 (2015)
2. Ali Raheli, M. Sahrai, **Hamid Reza Hamedi**, *Atom position measurement in a four-level Lambda-shaped scheme with twofold lower-levels*, Opt. Quant Electronics 47, 3221-3236 (2015)
3. Ali Raheli, **Hamid Reza Hamedi** and M Sahrai, *Atom localization in two dimensions for five-level atomic schemes in X-configuration*, Laser Phys. 25, 095202 (2015)
4. **Hamid Reza Hamedi**, *Perfect Precision Detecting Probability Of An Atom Via SGC Mechanism*, Int J Theor Phys. 54, 2012-2021 (2015)
5. **Hamid Reza Hamedi** and Gediminas Juzeliunas, *Phase-sensitive atom localization for closed-loop quantum systems*, Phys. Rev. A 94, 013842 (2016)
6. **Hamid Reza Hamedi**, Ali Hamrah Gharamaleki, M. Sahrai, *Colossal Kerr nonlinearity based on electromagnetically induced transparency in a five-level double-ladder atomic system*, Appl. Opt. 55, 5892-5899 (2016)
7. **Hamid Reza Hamedi**, M. R. Mehmannaavaz, *Phase control of three-dimensional atom localization in a four-level atomic system in Lambda configuration*, J. Opt. Soc. Am. B 33, 41-45 (2016)
8. **Hamid Reza Hamedi**, *Optical switching, bistability and pulse propagation in five-level quantum schemes*, Laser Phys. 27, 066002 (2017)
9. **Hamid Reza Hamedi**, Julius Ruseckas and Gediminas Juzeliunas, *Electromagnetically induced transparency and nonlinear pulse propagation in a combined tripod and Λ atom-light coupling scheme*, accepted for publication in J. Phys. B (2017)

Keletas kitų mokslinių straipsnių

1. **Hamid Reza Hamed**i, *Ultra-slow propagation of light located in ultra-narrow transparency windows through four quantum dot molecules*, Laser Phys. Lett. 11, 085201 (2014)
2. **Hamid Reza Hamed**i, Arash Radmehr, and M. Sahrai, *Manipulation of Goos-Hänchen shifts in the atomic configuration of mercury via interacting dark-state resonances*, Phys. Rev. A 90, 053836 (2014)
3. **Hamid Reza Hamed**i, *Optical bistability through the cavity effect in a four-level open atomic medium*, JETP Letters 100, 299-305 (2014)
4. **Hamid Reza Hamed**i, *Enormous enhancements of the Kerr nonlinearity at C-band telecommunication wavelength in an Er^{3+} -doped YAG crystal*, Physica B 442, 60–65 (2014)
5. **Hamid Reza Hamed**i, *Optical bistability and multistability via magnetic field intensities in a solid*, Appl. Opt. 53, 5391-5397 (2014)
6. **Hamid Reza Hamed**i, and S. H. Asadpour, *Realization of optical bistability and multistability in Landau-quantized graphene*, J. Appl. Phys. 117, 183101 (2015)
7. **Hamid Reza Hamed**i, Mohammad Reza Mehmannaavaz, *Switching feature of EIT-based slow light giant phase-sensitive Kerr nonlinearity in a semiconductor quantum well*, Physica E 66, 309-316 (2015)
8. Seyyed Hossein Asadpour, **Hamid Reza Hamed**i and Hamid Rahimpour Soleimani, *Slow light propagation and bistable switching in a graphene under an external magnetic field*, Laser Phys. Lett. 12, 045202 (2015)
9. **Hamid Reza Hamed**i, *Storage and retrieval of light pulse propagating in quadruple quantum dot molecules*, J. Opt. Soc. Am. B 33, 151-157 (2016)
10. **Hamid Reza Hamed**i, *Pulse propagation and optically controllable switch in coupled semiconductor-double-quantum-dot nanostructures*, J. Appl. Phys. 119, 183104 (2016)
11. **Hamid Reza Hamed**i, Mostafa Sahrai, Habib Khoshsima and Gediminas Juzeliunas, *Optical bistability forming due to a Rydberg state*, J. Opt. Soc. Am. B 34, 1923-1929 (2017)

Disertacijos rezultatų pateikimas konferencijose**Tarptautinės konferencijos**

1. **Hamid Reza Hamed**i and Gediminas Juzeliunas, *Transient switching of the Kerr nonlinearity and effect of Doppler broadening in a five-level Quantum system*, 47th conference of the European Group on Atomic Systems (EGAS) July 14-17, Riga, Latvia (2015)

2. **Hamid Reza Hamedi** and Gediminas Juzeliūnas, *Phase Sensitive 2D Atom Localization Via Probe Absorption measurement For Closed Loop Quantum Systems*, 12th European Conference on Atoms Molecules and Photons (ECAMP12) September 5-9, Frankfurt, Germany (2016)
3. **Hamid Reza Hamedi**, Julius Ruseckas and Gediminas Juzeliūnas, *A new type of EIT in combined Tripod and Lambda atom-light coupling schemes*, 24th Central European Workshop on Quantum Optics (CEWQO) June 26-30, Copenhagen, Denmark (2017)

Vietinės konferencijos

1. **Hamid Reza Hamedi** and G. Juzeliūnas, *Phase-Sensitive Kerr Nonlinearity for Closed Loop Quantum Systems*, 16th International Conference-School ADVANCED MATERIALS AND TECHNOLOGIES, August 27-31, Palanga, Lithuania (2014)
2. **Hamid Reza Hamedi** and G. Juzeliūnas, *Phase sensitive atom localization for Closed Loop Quantum Systems*, 17th International Conference-School ADVANCED MATERIALS AND TECHNOLOGIES, August 27-31, Palanga, Lithuania (2015)
3. **Hamid Reza Hamedi** and G. Juzeliūnas, *An enhanced Kerr nonlinearity for closed loop quantum systems*, Open readings, 59th International Conference for Students of Physics and Natural Sciences, March 15-18, Vilnius, Lithuania (2016)
4. **Hamid Reza Hamedi** and G. Juzeliūnas, *Dynamic Control of Pulse Propagation through Phase-Sensitive Five-Level Closed Loop Quantum Systems*, 18th International Conference-School, ADVANCED MATERIALS AND TECHNOLOGIES, August 27-31, Palanga, Lithuania (2016)
5. **Hamid Reza Hamedi** and G. Juzeliūnas, *Pulse propagation for closed loop quantum systems*, Open readings, 60th International Conference for Students of Physics and Natural Sciences, March 14- 17, Vilnius, Lithuania (2017)

1.7 Padėka

Visų pirmą, norėčiau padėkoti savo vadovui, profesoriui Gediminui Juzeliūnui, Vilniaus universiteto, Teorinės fizikos ir astronomijos instituto direktoriui. Visuomet buvo didelė garbė būti jo pirmam doktorantūros studentui iš užsienio. Esu labai dėkingas už jo kantrybę, pagalbą, idėjas ir mano doktorantūros disertacijos medžiagos rengimui skirtą laiką. Jis mane palaikė nuo pat pirmos dienos Lietuvoje. Dar noriu išreikšti didelę padėką profesoriui Julijui Ruseckui, ne tik dėl jo neįkainojamų komentarų, bet ir dėl to, jog jis mane konsultavo bet kokių mokslinių klausimų kilusiu tyrimo metu. Taip pat dėkoju Tomui Andrijauskui, Algirdui Mekiui ir Viktorui Novičenko už jų vertingą pagalbą, ypač susijusią su lietuvių kalba ir kultūra. Norėčiau

padėkoti visiems komandos nariams, už jų stiprų palaikymą kurį jaučiau visą laiką. Ypatingai noriu paminėti Artūrą Acų, ir Viačeslavą Kudriašovą už jų komentarus reikšmingai patobulinusius mano doktorantūros disertaciją. Taip pat noriu paminėti Lietuvos mokslo tarybai už suteiktą paramą (No. VP1-3.1-ŠMM-01-V-03-001). Esu dėkingas profesoriui Lorenzo Marrucci iš Italijos, Napels universiteto, ir profesoriui Mostafa Sahrai iš Irano, Tabriz universiteto, kad pasiūlė man praktikos galimybę savo grupėse, nuvedusią mane iki darbo įvairiuose įdomiuose projektuose. Dar norėčiau padėkoti savo šeimai, už visą palaikymą ir meilę. Savo broliams, kurie man nebūnant visus šiuos metus rūpinosi mano tėvais. Savo mamai ir tėvui, kurie buvo mano stiprybės ir įkvėpimo šaltinis. Ir savo palaikančiai, skatinančiai ir mylinčiai žmonai Nedai, kuri buvo kantri ir tikėjo manimi, net ir pačiomis sunkiausiomis akimirkomis. Ačiū jums.

1.8 Darbo struktūra ir turinys

Daktaro disertaciją sudaro 167 puslapiai. Joje yra 36 paveikslėliai. Darbą sudaro septyni skyriai, priedai ir bibliografija.

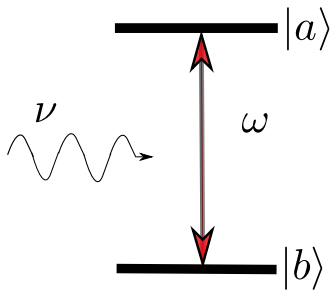
2 Pagindai, ir literatūros apžvalga.

Tiesinės ir netiesinės optinės atomų ansamblių savybės susilaukė daug dėmesio dėl galimybių panaudoti spektroskopijoje, optinėje komunikacijoje, kvantinėje ir netiesinėje optikoje, kvantinėje informacijoje ir t.t. Moderni netiesinė optika panaudoja kvantinės interferencijos ir atominių koherentiškumų efektus, tarpusavyje sąveikaujančių optinių laukų ir atomų manipuliavimui ir modifikavimui. Manipuliuojant kvantinę interferenciją ir koherentiškumus tarp skirtingų atominių energijos lygmenų, tiesinė sugerties ir dispersija, taip pat kaip ir atominės terpės netiesiškumai gali būti stipriai pakeisti. Tai sukelia svarbius reiškinius, susijusius su elektromagnetinio lauko indikuotu praskaidrėjimu (ELIP). Šios disertacijos tikslas yra įgyti gilesnį tiesinės ir netiesinės optikos reiškinių supratimą, taikant anksčiau minėtas naujas lygmenų struktūras kartu su tinkamomis kvantinės interferencijos ir koherentiškumų ypatybėmis.

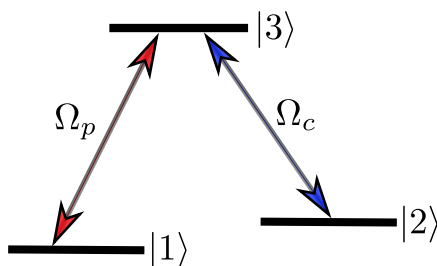
2.1 Atomo ir šviesos sąveika

Kadangi atomo ir spinduliuotės sąveika atlieka pamatinę šios disertacijos funkciją, šiame skyriuje siūlome peržiūrėti jos pagrindus. Čia apžvelgiamas paprastas vienos elektromagnetinio lauko modos, pavyzdžiui sukurto lazeriu, sąveikos su dviejų lygmenų atomu atvejis, pavaizduotas pav. 2.1.

Šis paprastas atvejis gali būti apibendrintas sudėtingesnėms problemoms. Mes naudojame kvaziklasikinį aprašymą. Šio metodo rėmuose elektromagnetinė spinduliuotė yra laikoma klasikiniu lauku, o atominė materija, su kuria sąveikauja šviesa, yra aprašoma pagal kvantinę mechaniką. Mes parodome kad kvantinės sistemos būseną, gali būti apibūdinama per tankio operatorių. Tankio



2.1 pav.: Dviejų lygmenų atomas, sąveikaujantis su vienos modos lauku



2.2 pav.: Trys dviejų lygmenų Λ atominės sistemos.

matricos lygtis, įskaitant skilimo spartas, yra:

$$\dot{\rho} = -\frac{i}{\hbar}[H, \rho] - \frac{1}{2}\{\Gamma, \rho\}, \quad (2.1)$$

kur $\{\Gamma, \rho\} = \Gamma\rho + \rho\Gamma$, o relaksavimo matrica Γ yra aprašyta elementais $\langle i|\Gamma|j\rangle = \gamma_i\delta_{ij}$. Lygtis (2.1) vadinama kvantine Liuvilio lygtimi.

2.2 Trijų lygmenų Λ atomų schema

Šiame skyriuje aprašoma tai, kad trijų lygmenų atominė sistema gali lemti daugybės naujų optinių reiškinių atsiradimą, lyginant su dviejų lygmenų sistema. Aprašomi tokie gerai žinomi pavyzdžiai, kaip elektromagnetinio lauko indikuotas praskaidrėjimas (ELIP), lėta šviesa ir su jais susiję reiškiniai. Pateikiant trijų lygmenų Λ atominę schemą (pav. 2.2), supažinsime su teoriniu pagrindu ir formuluotėmis, būtinomis gilesniam šių optinių savybių supratimui.

Pagrindinė šios disertacijos darbo dalis tiria ELIP. Tai toks reiškinys, kuriame elektromagnetinės spinduliuotės pluoštas sklinda per rezonansinę terpę, beveik taip, lyg terpės ten nebūtu. Paprasčiausia ELIP atsiradimą sąlygojanti atomų lygmenų konfigūracija yra trijų lygmenų Λ schema, parodyta pav. 2.2. Indukuotas skaidrumas gali būti suprantamas, kaip destruktivi tikimybės amplitudžių tarp skirtingų sužadavimo kanalų interferencija, pasinaudojant dvejais lazerio, Λ atomų ir šviesos sąveikos schemas rėmuose [6], sukurtais laukais. Aprengtųjų būsenų atvaizdavime yra koherentinė pagrindinių būsenų $|1\rangle$ ir $|2\rangle$ superpozicija, vadinamos tamsiąja būsena. Tamsioji būsena nesąveikauja su šviesa, dėl to terpė tampa skaidri zonduojančiam laukui.

Lėtos, arba subluminalios, šviesos tema sukėlė didelį susidomėjimą po to, kai 1999 metais Harriso grupės atliktame eksperimente grupinis šviesos greitis buvo sumažintas iki 17 m s^{-1} [28]. ELIP yra lėtos šviesos fizinė prigimtis. [5, 28]. ELIP atveria skaidrumo langą visiškai nepermatomoje terpėje. Esant tokiai situacijai, terpės dispersijos profilis patiria ryškius pokyčius per skaidraus lango spektrinį diapazoną. Teigiamas dispersijos nuolydis šalia ELIP lango atitinka lėtą šviesos impulso sklidimą [15]. Dėl to silpnėsnis zonduojančio šviesos spindulys, priderintas atomų rezonansui sukelti, gali sklirti lėtai ir beveik be

nuostolių, kai terpė yra valdoma vienu ar keliais didesnio intensyvumo šviesos spinduliais.

2.3 Netiesiniai optiniai reiškiniai

Šiame skyriuje trumpai supažindinama su pagrindinėmis trečios eilės netiesinių optinių reiškinų savybėmis. Apsvarstysime kaip medžiagos poliarizuotumas priklauso nuo išorinio optinio lauko stiprumo, kad būtų galima suprasti optinio netiesiškumo sąvokos fizinę reikšmę. Kai lazerio spindulys šviečia į medžiagą, jis gali perorientuoti atomo dipolinį momentą, ko pasekoje gali keistis vidutinio nulinio dipolinio momento vienam tūrio vienetui vertė arba medžiagos sistemos poliarizacija. Tiesinėje optikoje naudojamų laukų stipriai nėra per dideli, tuomet poliarizuotumą išreiškiame taip:

$$\mathbf{P}(t) = \epsilon_0 \chi^{(1)} \mathbf{E}(t), \quad (2.2)$$

čia ϵ_0 yra vakuumo dielektrinė skvarba, o $\chi^{(1)}$ – tiesinis optinis jautris. Akivaizdu, kad sukeltas poliarizuotumas $\mathbf{P}(t)$ yra tiesiškai priklausomas nuo elektrinio lauko stiprio $\mathbf{E}(t)$. Tokia tiesinė poliarizacija lemia kitus tiesinius optinius reiškinus, tokius kaip elektromagnetinio lauko indikuotą praskaidrėjimą, lėtą šviesą ir kitus. Kai didėja elektrinio lauko stipris, tiesinis ryšys tarp $\mathbf{P}(t)$ ir $\mathbf{E}(t)$ nebegalioja ir mes patenkame į netiesinės optikos sritį. Tokiu atveju, galime užrašyti apibendrintą poliarizuotumo $\mathbf{P}(t)$ išraišką per lauko stiprio $\mathbf{E}(t)$ eilutę:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(t) &= \mathbf{P}^{(1)}(t) + \mathbf{P}^{(2)}(t) + \mathbf{P}^{(3)}(t) + \dots \\ &= \epsilon_0 \left(\chi^{(1)} + \chi^{(2)} \mathbf{E}(t) + \chi^{(3)} \mathbf{E}(t) \mathbf{E}(t) + \dots \right) \mathbf{E}(t), \end{aligned} \quad (2.3)$$

kur $\mathbf{P}^{(1)}$, $\mathbf{P}^{(2)}$, ir $\mathbf{P}^{(3)}$ yra tiesinis, antros ir trečios eilės netiesinės poliarizuotumas. Be to, $\chi^{(1)}$, $\chi^{(2)}$ ir $\chi^{(3)}$ yra vadinami pirmojo, antrojo ir trečiojo laipsnio jautriais. Rašydami (2.2) ir (2.3), paprastumo dėlei $\mathbf{E}(t)$ ir $\mathbf{P}(t)$ laikėme skaliariniais dydžiais. Šiame skyriuje apžvelgti kai kurie svarbiausi trečiosios eilės netiesiniai optiniai efektai, kuriuos sukelia kvantinė interferencija ir koherentiškumai. Visų pirma išvedamas Kerr netiesinis indeksas, kuris proporcingas trečiosios eilės netiesinio jautrio refrakcinei daliai. Taip pat, pateikiamos bazinės lygtys, apibūdinančios netiesinį impulsinio lauko sklidimą.

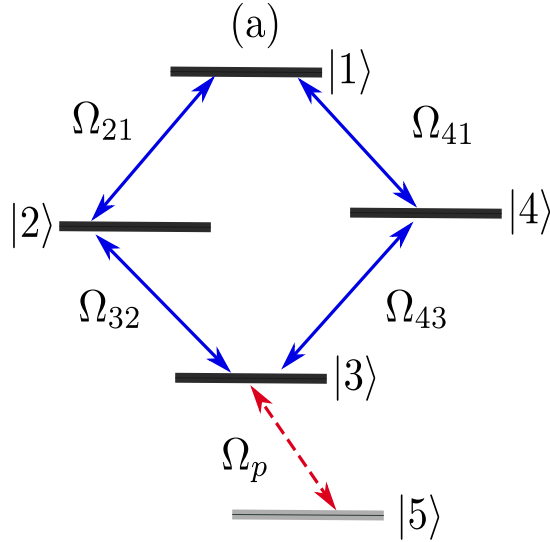
3 Sustiprintas Kerr netiesiškumas

Kerr netiesiškumas, kuris yra proporcingas trečios eilės jautrio refrakcinei daliai, vaidina svarbų vaidmenį optiniuose duomenų apdorojimo procesuose, nes jį galima valdyti šviesos signalu naudojant kitą šviesos spindulį. Pageidautina turėti didelį trečiosios eilės netiesinę jautrį, esant mažai spindulio galiai ir aukštam jautriui [20, 29], nes jis gali būti naudojamas vienfotonų netiesinių prietaisų realizavimui. Dėl to lyginant su netiesiniais, tiesinis jautrumas turi būti kuo mažesnis. Daugelį metų eksperimentiniai netiesinės kvantinės optikos tyrimai buvo riboti dėl net geriausių medžiagų silpno netiesinio atsako. Elektromagnetinio lauko indikuotas praskaidrėjimas (ELIP) [5, 30] atvėrė galimybę pasiekti didelių netiesiškumų [2].

Neseniai, Sheng su grupe tyrėjų ištyrė keturių lygmenų N tipo atominės sistemos savarankišką Kerr netiesiškumą [13]. Jie naudodami ir eksperimentinį ir teorinį metodus palygino savarankiškus Kerr netiesinius koeficientus skirtinigiems dviejų, trijų ir keturių energijos lygmenų atomų schemoms. Visų pirma, jie nustatė kad Kerr netiesinio indekso dydis, keturių lygmenų N tipo atomų sistemai turi tą pačią vertę, kaip ir trijų lygmenų sistemai. Visai neseniai Khoa ir kt. [22] teoriškai ištyrė galimybę gauti patobulintą Kerr netiesiškumą, taikant ELIP reiškinį penkių lygmenų kaskadinėje sistemoje. Jie taip pat palygino savarankiškos Kerr netiesinio koeficiento elgesį tokios penkių lygmenų atominėje sistemoje, su keturių ir trijų lygmenų kaskadinėje sistemoje, ir nustatė tą pačią Kerr netiesinio koeficiento reikšmę tarp trijų sistemų. Tikimasi, kad bus galima atlikti daugiau su tuo susijusių eksperimentinių tyrimų, nes tai gali būti pritaikoma optinio perjungimo, kvantinės informacijos apdorojimo ir naujų fotoninių prietaisų, ypač kelių fotonų lygmenyje [31, 32]. Taigi, reikalingos praktinės Kerr netiesiškumo didinimui pasiekti schemas.

Šiame skyriuje pateikiama penkių lygmenų atominė sistema, kurią Korbak ir Rice pirmą kartą nagrinėjo [33] siekiant nustatyti visišką užpildos pernašą [34, 35] į vieną pora išsigimusių lygmenų būsenas (pav. 3.1). Korbak-Rice penkių lygmenų modelis (KR5) taip pat buvo naudojamas siekiant parodyti koherentinės atomų arba molekulinų procesų kontrolės pranašumus [36]. Be to, naudojant intensyvius lazerinius laukus KR5 sistemoje buvo pasiūlytas naujas kvantinis matavimas [37]. Taip pat buvo tirta šios konfigūracijos dispersija, sugerties bei optinis bistabilumas [38, 39]. Tačiau, šiam tyrimui mus motyvavo trečiosios eilės netiesinės KR5 sistemos jautris.

Parodyta, kad padidėjęs Kerr netiesiškumas su sumažėjusia sugertimi gali būti pasiekiamas esant lėtam šviesos sklidimui KR5 atominėje sistemoje. Nustatyta, kad Kerr netiesiškumas yra labai jautrus santykinei naudojamų laukų fazei ir ištirta santykinės fazės įtaką tiesinėms ir netiesinėms optinėms savybėms duotoje terpėje. Parodyta, kad esant daugiafotoninio rezonanso sąlygoms ga-



3.1 pav.: Scheminė penkių lygmenų kvantinės sistemos diagrama.

lima padidinti Kerr netiesiškumą tokioje terpėje, tinkamai sureguliuojant naudojamų laukų amplitudes ir fazes. Tokiu atveju tiesinė ir netiesinė sugertis žymiai sumažėja lėtos šviesos sklaidimo srityje. Taip pat palyginame Kerr netiesinius indeksus šiai penkių lygmenų sistemai su esamų keturių ir trijų lygmenų atominėmis sistemomis. Mes nustatėme, kad KR5 sistemos Kerr netiesiškumo dydis yra didesnis nei keturių ir trijų lygmenų sistemose. Taip pat buvo ištirtas Doppler išplitimo poveikis Kerr netiesiškumui. Mes pastebėjome esminius Kerr netiesiškumo formos pokyčius, kai Doppler plotis yra mažesnis už zonduojančio lauko sukeltus šuolius, tuomet, formos prasme, tiesinis jautris elgiasi labai panašiai į neišplitusios linijos atvejį. Be to pastebėjome, kad Doppler išplitimo poveikis gali sukelti milžinišką Kerr netiesiškumą [40].

Pagrindiniai pranašumai, taikant aptartą penkių lygmenų sistemą, o ne schemas pasiūlytas [13, 22] šaltiniuose yra tokie. Pirma priešingai nuo atominių schemų tirtų pateiktuose šaltiniuose, šiame tyrime pasiekta aukštesnė netiesiškumo eilė, padidinant atominių lygmenų skaičių. Tai gali būti naudojama ne tik neklasikinių šviesos būsenų konstravimui, bet ir koherentiniams kvantinės informacijos apdorojimo procesams. Antra dėl uždaros kilpos struktūros, sąveikaujančios su pagrindine būseną, ši terpė yra jautri fazei. Ši fazei jautrumo savybė suteikia papildomą laisvės laipsnį Kerr netiesinio indekso kontrolei. Tai bruožas, kuriuo nepasižymi [13, 22] pateiktos schemos, ir galimybė mums pateikti analitinį modelį, leidžiantį išsiaiškinti Kerr netiesiškumo fazės valdymą. Trečia, be nuostovaus netiesinio jautrio, taip pat tiriamas ir Kerr netiesiškumo perjungimas, kuris gali būti naudingas greitų optinių netiesiškumų ir optiškai valdomų optinių įtaisų realizavimui. Galiausiai, tyrinėjamas ir Doppler išplitimo efekto poveikis Kerr netiesiškumui. Nustatyta, kad Doppler išplitimo poveikis gali sukelti milžinišką Kerr netiesiškumą. Tai suteikia šio tipo Kerr netiesiškumo stiprinimui pranašumą, lyginant su ELIP technologiją (žiūrėti šaltinius [13, 22, 14, 23]), nes nereikia labai stiprių sukabintų lazerio laukų. Šio metodo

3 Sustiprintas Kerr netiesiškumas

trūkumas yra tas, kad tiesinė ir netiesinė sugerties nėra pašalinta.

4 Atomo lokalizacija dvimačiu ir trimačiu atveju

Tiksli atomų lokalizacija pastaraisiais metais susilaukė daug dėmesio. Ankstesčiau buvo teoriškai tirta 1D atomo lokalizacija (vienmatėje erdvėje) remiantis atomų koherentiškumo ir kvantinės interferencijos efektais [11, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51]. Visai neseniai buvo pasiūlyta keletas schemų dvimačio (2D) atomo lokalizavimui [52, 53, 54, 55]. Tačiau trijų matmenų (3D) atomų lokalizacija buvo iširta tik keliuose darbuose [56, 57, 58]. Lyginant su 1D ir 2D lokalizavimu, 3D atomo lokalizavimas suteikia daugiau konkrečios informacijos apie judančio atomo padėtį.

Šiame skyriuje pristatome teorinį atomo lokalizacijos modelį dviejose ir trijose dimensijose. Šiame skyriuje aptariamos dvi skirtingo atomo ir šviesos sąveikos schemos. Pirmoji yra penkių lygmenų atominė konfigūracija, kurioje deimanto formos posistemė yra susieta su pagrindiniu lygmeniu per silpną zonduojantį lauką [59], o pastaroji yra keturių lygmenų atominė sistema su trimis valdymo laukais ir silpnu zonduojančiu lauku [60, 61].

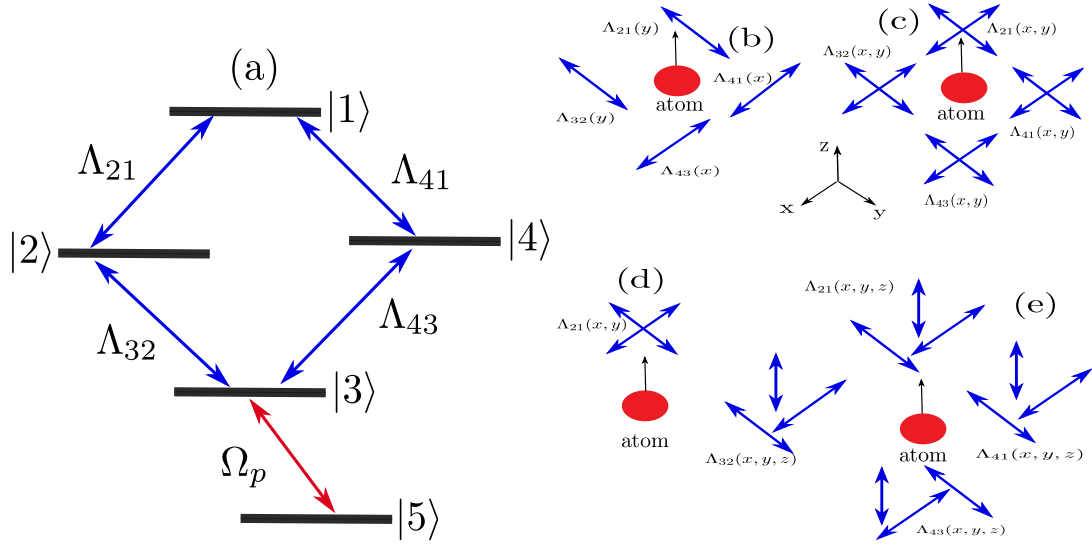
4.1 1 Schema: Penkių lygmenų KR5 sistema

Tiriame 2D ir 3D atomo lokalizaciją penkių lygmenų sistemoje, kurioje lazerio spinduliai sujungia pagrindinį lygmenį su keturių lygmenų uždaros kilpos sistema, taip, kaip parodyta pav. 4.1(a).

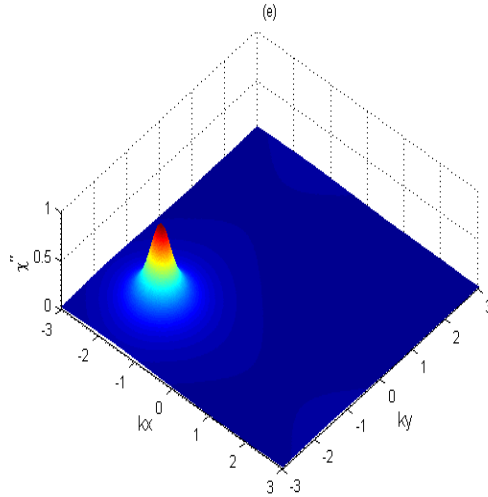
Čia mes naudojame KR5 schemą lokalizuoti atomus dviem ir trimis matmenimis. Mes naudojame tris skirtingas situacijas, kuriose atomas gali sąveikauti su nuo padėties priklausančiais nuolatiniais bangų laukais (pav. 4.1(b)-(d)). Pirmaisiais dviem atvejais visi keturi lazerio laukai yra stovinčios bangos, o trečiu atveju tik vienas iš laukų yra stovinčioji banga, o kiti yra sklindančios bangos. Tai rodo, kad galima išgauti informaciją apie atomo padėtį, matuojant zondo sugertį. Kadangi KR5 atominė schema yra jautri fazei, fazinis atomo lokalizavimo valdymas taip pat įmanomas, tinkamai sureguliuojant santykinę fazę. Vėliau parodoma, kad pirmosios dvi atomo ir lauko sąveikos situacijos nėra tinkamos, kad būtų pasiekta unikali atomo lokalizavimo smailė. Siekiant gauti maksimalią atomo aptikimo tikimybę tam tikroje 2D erdvės padėtyje, mes tiriamo situaciją, kai susietas atomas ir stovinčių bangų laukai, ir iliustruojame, kad maksimali tikimybė rasti atomą viename nuolatinės bangos periode pasiekia didžiausią galimą vertę (žr. 4.2 pav.).

Galiausiai, 3D lygmens atominės lokalizacijos fazės kontrolė, šiai penkių lygmenų schemai, tirama skaitmeniškai 3D erdvėje (pav. 4.1(e)). Nustatyta, kad aptikimo tikimybė rasti atomą tam tikro tūrio 3D erdvėje ir viename stovinčios bangos periode, gali tapti 50% [59] (pav. 4.3).

4 Atomo lokalizacija dvimačiu ir trimačiu atveju

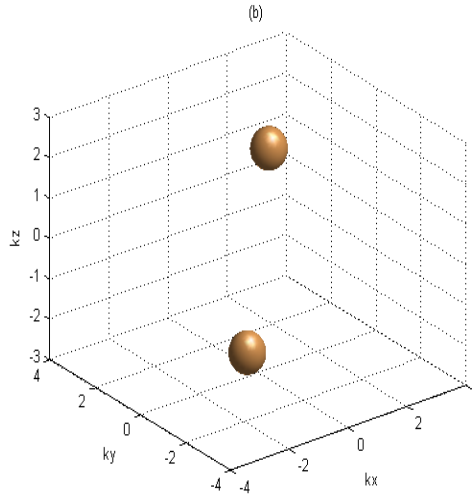


4.1 pav.: Scheminė penkių lygmenų kvantinės sistemos diagrama. (a), (b), (c), ir (e) apžvelgiamos skirtingos situacijos, kuriose atomai gali sąveikauti su nuo padėties priklausančiais nuolatiniais bangų laukais.



4.2 pav.: Sugerties χ'' priklausomybės nuo (k_x, k_y) atomo ir šviesos sąveikai parodytai 4.1(d) pav. Pasirinkti parametrai yra $\phi = \pi$ ir $(\Omega_{43}, \Omega_{32}, \Omega_{41}, \Omega_{21}) = (10\gamma, 10\gamma, 10\gamma, 14.8\gamma)$. Kiti parinkti parametrai yra $\gamma_{14} = \gamma_{12} = \gamma_{23} = \gamma_{43} = \gamma_{35} = \gamma$, $\Delta = \Delta_{12} = \Delta_{14} = \Delta_{23} = \Delta_{43} = 0$, taip pat $\Delta_p = 8\gamma$, $\Omega_p = 0.01\gamma$.

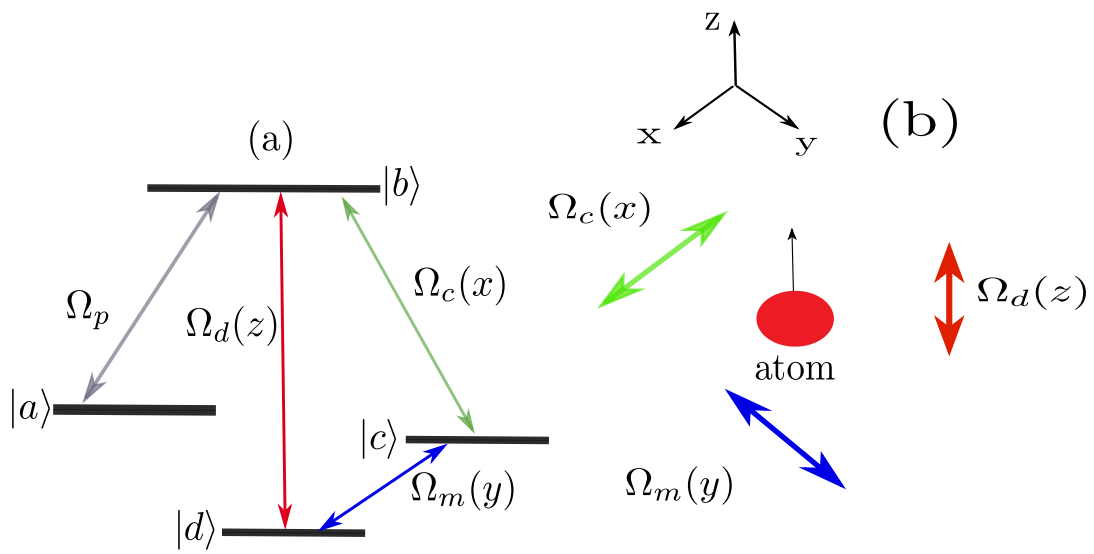
4 Atomo lokalizacija dvimačiu ir trimačiu atveju



4.3 pav.: Sugerties χ'' priklausomybės izopaviršiai nuo parametrų (kx, ky, kz) . Pasirinkti parametrai yra $\phi = \pi/3$, ir $(\Omega_{43}, \Omega_{32}, \Omega_{41}, \Omega_{21}) = (10\gamma, 10\gamma, 10\gamma, 10\gamma), \Delta_{12} = \Delta_{14} = \Delta_{23} = \Delta_{43} = \Delta_p = 10\gamma$. Kiti pasirinkti parametrai yra tokie pat, kaip ir pav. 4.2.

4.2 2 Schema: Keturių lygmenų sistema su dvigubais apatiniais lygmenimis

Toliau mes pasiūlome schemą, skirtą fazei jautriam 3D atomo lokalizavimui, įvertinant silpnojo zondo lauko sugertį. Schema pritaikyta atvejui, kai keturių lygmenų atominę sistemą veikia trys ortogonalios stovinčios bangos ir silpnas zonduojantis laukas (pav. 4.4). Dėl nuo erdvės priklausomo atomo lauko sąveikos trimatėje erdvėje, atomų tikimybinis pasiskirstymas stovinčioje bangoje gali būti tiesiogiai nustatomas matuojant zonduojančios spinduliuotės lauko sugerties spektrą. Sutelkiant dėmesį į naudojamų laukų santykinę fazę, kylančia iš uždaros kilpos sistemos struktūros, pastebime, kad galima gauti skirtingus periodinius lokalizacijos izopaviršius 3D erdvėje [60].



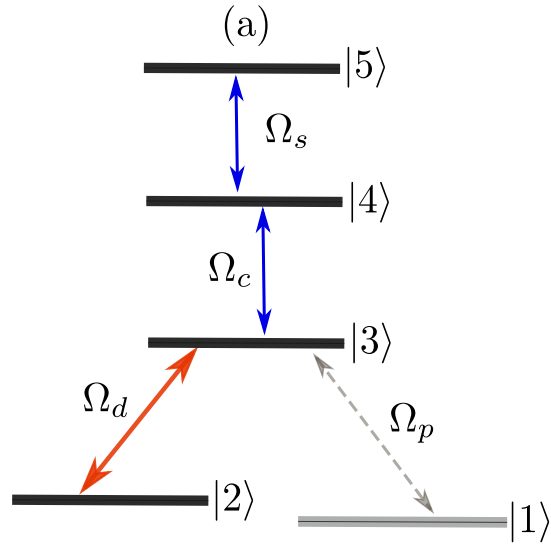
4.4 pav.: (a) Keturių lygmenų atominės sistemos schema su dviem žemesniais lygmenimis. (b) Situacija, kai atomas gali sąveikauti su nuo padėties priklausančiais nuolatinės bangos laukais.

5 Tiesiniai ir netiesiniai efektai penkių lygmenų dviejų kopetėlių atomo sistemose

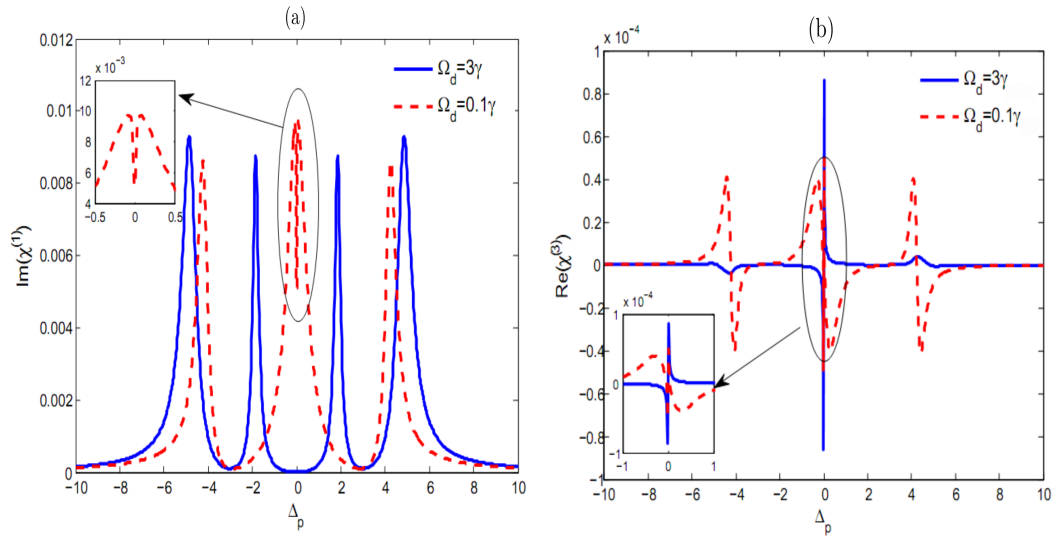
Šiame skyriuje pateiktas tyrimas susijęs su tiesiniais ir netiesiniais optiniais reiškiniiais, penkių lygmenų dviejų kopetėlių atomo ir šviesos sąveikos schemoje, kaip parodyta pav. 5.1.

Mes tiriamo kontroliuojamo lauko Ω_d efektą tiesinių ir netiesinių optinių savybių zondo laukui, tokioje terpėje naudojant kvaziklasikinio tankio matricos metodą. Jei kontrolės lauko nėra, matoma, jog zondo laukas yra sugeriamas sistemos. Kai valdymo laukas įjungtas, terpė tampa skaidri zondo laukui. Tokiu atveju subluminalinė šviesa sklinda terpe. Prie analitinės išraiškos, pateikiami ir skaitmeniniai rezultatai, gauti pagal zondo lauko Gaussian intensyvumo profilį, siekiant išsiaiškinti tokį optinį jungimą [62]. Šis skyrius taip pat skirtas modeliuoti sustiprintą Kerr netiesiškumą tokiai atomo šviesos sąveikos schemai. Mes nustatėme, kad milžiniškas Kerr netiesiškumas gali būti pasiektas kartu su nykstama sugertimi, tinkamai manipuluojant valdymo lauko Rabi dažnį [63] (pav. 5.2).

5 Tiesiniai ir netiesiniai efektai penkių lygmenų dviejų kopetėlių atomo sistemose



5.1 pav.: Penkių lygmenų dviejų kopetėlių sistemos diagrama.



5.2 pav.: (a) Tiesinė sugertis ir (b) netiesinė dispersija kaip zondo išderinimo Δ_p funkcija, kai $\Omega_d = 0.1\gamma$ (punktyrinė linija) ir $\Omega_d = 3\gamma$ (vientisa linija). Pasirinkti parametrai yra $\Omega_p = 0.01\gamma, \Omega_c = \Omega_s = 3\gamma, \gamma_{32} = \gamma_{31} = \gamma, \gamma_{51} = \gamma_{52} = \gamma_{54} = 0.02\gamma$ ir $\gamma_{43} = 0.13\gamma$, ir $\Delta_d = \Delta_c = \Delta_s = 0$.

6 Elektromagnetinio lauko indukuotas praskaidrėjimas ir netiesinių impulsų sklidimas

Šiame skyriuje mes aptariame zondo pulso sklidimą atominėje terpėje, kurią charakterizuoja kombinuotas trikojis ir Lambda (Λ) uždaros kilpos atomo ir šviesos sąveikos schema, iliustruota pav. 6.1.

Mūsų iliustruotame pasiūlyme pav. 6.1, atomo ir šviesos sąveiką atspindi penkių lygmenų kombinuotą Lambda-trikojo schemą, kurioje trys atomų pagrindinės būsenos yra sujungtos su dviem sužadintomis būsenomis, keturiomis valdymo ir vieno zondo lazerio laukais. Kitaip tariant, schema apima keturis atomų lygmenis, tarpusavyje sujungtus keturiais valdymo laukais, ir sąveikaujančius su pagrindiniu lygmeniu per silpną zondo lauką. Perėję į naują atvaizdavimą, mes parodome, kad tokia atomo ir šviesos sukabinimo schema atrodo panaši į penkių lygmenų schemą, parodytą pav. 6.2(a), kur koeficientas

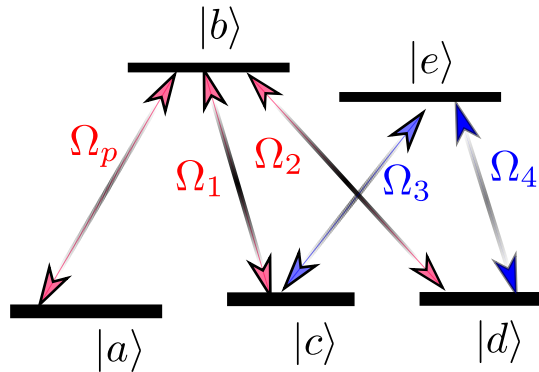
$$\beta = \langle D_b | B_e \rangle = \langle D_e | B_d \rangle = \frac{1}{\Omega} (\Omega_1^* \Omega_4^* - \Omega_2^* \Omega_3^*) \quad (6.1)$$

atspindi keturių valdymo laukų interferenciją, kurie atlieka pagrindinį vaidmenį derinant dispersijos ir sugerties savybes, kombinuojant trikojo ir Λ schemą, o mes apibrėžiame

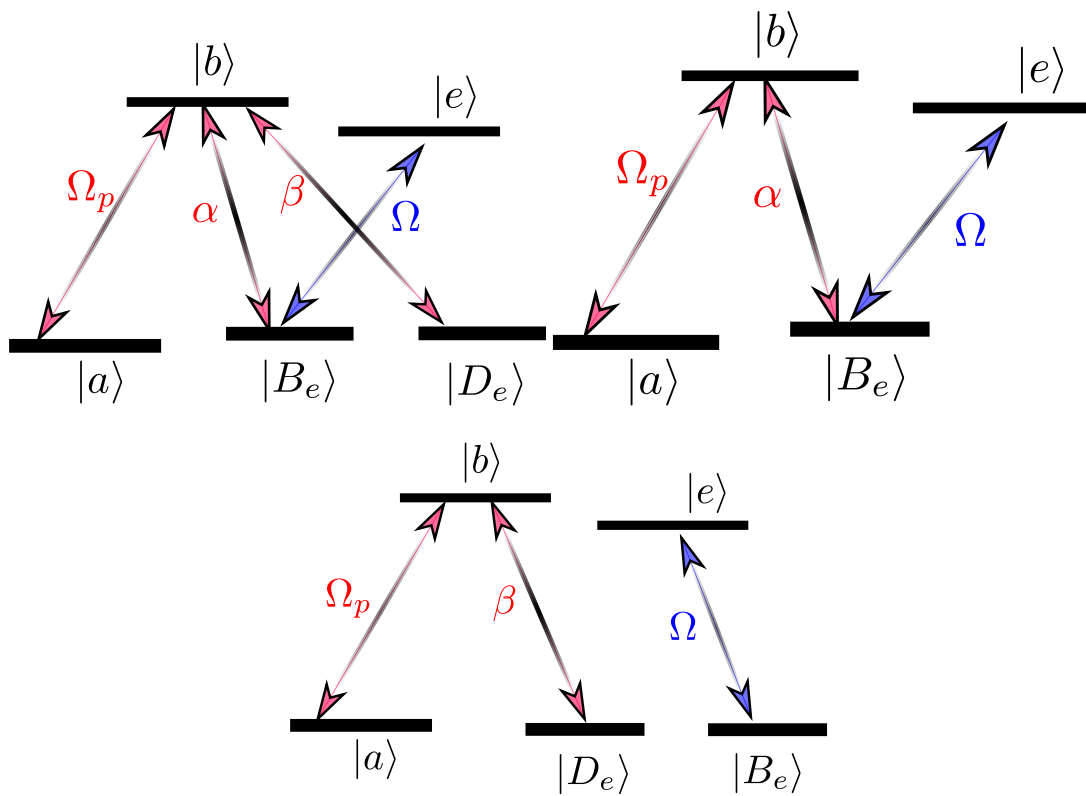
$$\alpha = \langle D_b | D_e \rangle = \langle B_e | B_d \rangle = \frac{1}{\Omega} (\Omega_1^* \Omega_3 + \Omega_2^* \Omega_4) \quad (6.2)$$

ir bendras Rabi dažnis yra

$$\Omega = \sqrt{|\Omega_3|^2 + |\Omega_4|^2}. \quad (6.3)$$



6.1 pav.: Penkių lygmenų Lambda-trikojo kvantinės sistemos schema.



6.2 pav.: Penkių lygmenų kvantinė sistema transformuotoje bazėje (a) $\beta \neq 0$ ir $\alpha \neq 0$, (b) $\beta = 0$ ir $\alpha \neq 0$ ir $\beta \neq 0$ bet $\alpha = 0$.

Keičiant kvantinės interferencijos koeficientą β ir koeficientą α , pasireiškia skirtingos situacijos.

Parodyta, kad esant tokiai atomo ir šviesos sąveikai, gali būti sudarytos tamsios būsenos. ELIP yra įmanoma kombinuotoje trikojo ir Λ schemoje, kai Rabi dažnių valdomi laukai tenkina sąlygą $\beta \neq 0$, $\alpha \neq 0$, kai β ir α išraiškos pateiktos (6.1)–(6.2) formulėse, kurios apibūdina keturių valdymo laukų santykinės amplitudės ir fazės. Esant tokioms sąlygoms, terpė palaiko lėtos šviesos sklidimą be nuostolių. Analitiniu būdu įrodyta, kad bendra trikojo ir Λ schema gali būti redukuota į paprastesnes atomo ir šviesos sąveikos schemas, esant įvairioms kvantinės interferencijos situacijoms. Ši schema yra lygi keturių lygmenų N -tipo schemai, kai $\beta = 0$ ir $\alpha \neq 0$ (pav. 6.2(b)).

Kita vertus, jei $\beta \neq 0$ bet $\alpha = 0$, galima sukurti trijų lygmenų Λ -tipo atomo ir šviesos sąveikos schemą (pav. 6.2(c)), kuri tampa nesusieta su dviejų lygmenų sistema, su būsenomis $|B_e\rangle$ ir $|e\rangle$. Dėl to, keičiant kontroliuojančių laukų Rabi dažnius, galima pereiti nuo vieno kraštinio atvejo prie kito. Tai gali lemti perėjimą nuo lėtos šviesos, kartu su ELIP, į didelio greičio šviesą su sugertimi, ir atvirkščiai. Remiantis sukabintomis Maxwell-Bloch lygtimis, gaunama netiesinė lygtis, reguliuojanti zondo impulso gaubtinės evoliuciją. Dėl to atsiranda stabilūs lėtai sklindantys optiniai solitonai, susiformuojantys dėl balanso tarp dispersijos ir Kerr netiesiškumo.

7 Išvados

1. Buvo teoriškai ištirtas Kerr netiesiškumo elgesys penkių lygmenų KR5 kvantinėje sistemoje. Parodyta, kad galima gauti didelį Kerr koeficientą su sumažėjusia sugertimi, esant subluminalios šviesos sklidimui, tinkamai sureguliuojant naudojamus laukus. Nustačius daugiafotoninę rezonanso sąlygą, ir tinkamai suregulius išderinimo parametrus, galima pasiekti didelio subluminalumo Kerr netiesiškumus su netiesine sugertimi dideliame santykinių fazių ruože. Parodyta, kad šios sistemos netiesinė dispersija ir absorbcija, apimanti uždarojo ciklo atominius šuolius, yra labai jautrios santykiniai taikomų sričių fazei. Pateikiamas analitinis modelis, skirtas paaiškinti Kerr netiesiškumo fazės kontrolę. Mes palyginome netiesinius Kerr koeficientus, taikomus penkių lygmenų KR5, su esamais trijų ir keturių lygmenų tipo kaskadinėmis sistemomis. Mes nustatėme, kad KR5 sistemoje Kerr netiesiškumo koeficiento dydis yra didesnis nei trijų ir keturių lygmenų sistemose. Vadinas padidinus lygmenų skaičių, galima padidinti netiesiškumų eilę. Galiausiai buvo aptarta Doppler išplitimo įtaka tiesiniam ir netiesiniam jautriams.
2. Mes pasiūlėme aukšto tikslumo 2D ir 3D atomų lokalizaciją penkių lygmenų atomo ir šviesos sąveikos konfigūracijoje. Mes apsvairstėme situacijas, kai vienas ar keli spinduliuotės laukai priklauso nuo pozicijos, todėl menamoji zonduojančio lauko jautrio dalis taip pat priklauso nuo pozicijos. Todėl galima gauti informaciją apie atomo padėtį, matuojant sugerties spektrą. Konkrečiai, išnagrinėtas santykinis naudojamų laukų fazės poveikis, dėl uždaros kilpos deimantinės formos posistemės struktūros.
3. Pasiūlyta keturių lygmenų atominė sistema, norint tirti 3D atomo lokalizaciją. Kadangi sąveika tarp atomo ir lazerio laukų yra priklausoma nuo padėties, gautas zonduojančio lauko sugerties spektras suteikia informaciją apie atomo padėtį 3D stovinčių laukų erdvėje. Parodyta, kad taikomų laukų santykinė fazė ϕ gali kontroliuoti 3D atomo lokalizavimo elgseną sistemoje.
4. Pademonstravome galimybę nuosekliai valdyti silpnojo zonduojančio lauko tiesines ir netiesines optines savybes penkių lygmenų dviejų kopetelių atomo ir šviesos sąveikos schemeje. Parodėme, kad kai kontrolės laukas Ω_d įvedamas perėjimui $|2\rangle \leftrightarrow |3\rangle$, patenkinant $\Omega_s = \Omega_c = \Omega_d = \Omega$, atsiranda praskaidrėjimo langas kitaip nepermatomoje terpėje. Dėl šios priežasties valdymo sritis Ω_d gali veikti kaip rankenėlė, kuri perjungia sistemą iš sugerties į skaidrumą. Toliau mes ištyrėme galimybę pastiprinti Kerr netiesiškumo koeficientą tokioje atominėje konfigūracijoje. Buvo nustaty-

ta, kad geresnį Kerr netiesiškumą, su nykstama tiesine sugertimi, galima gauti reguliuojant valdymo lauką.

5. Mes pademonstravome tamsiosios būsenos egzistavimą, kuris yra būtinas elektromagnetinio lauko sukeltam praskaidrėjimui (ELIP) atsirasti, kai atomo ir šviesos sąveikos schema yra penkių lygmenų kombinuota trikojo ir Λ konfigūracija. ELIP yra įmanoma kombinuotoje trikojo ir Λ schemeje, kai Rabi dažnių valdymo laukai tenkina sąlygas $\beta \neq 0$, $\alpha \neq 0$, kai β ir α išraiškos pateiktos (6.1)–(6.2) formulėse, kurios apibūdina keturių valdymo laukų santykinės amplitudės ir fazės. Esant tokioms sąlygoms, terpė palaiko lėtą šviesą be nuostolių. Analitiniu būdu įrodyta, kad bendrą trikojo ir Λ schemą galima redukuoti iki paprastesnės atomo ir šviesos sąveikos konfigūracijos, esant įvairioms kvantinės interferencijos situacijoms. Visu pirmą ši schema lygiavertė keturių lygmenų N -tipo schemai, kai $\beta = 0$ ir $\alpha \neq 0$. Kita vertus, kai $\beta \neq 0$ bet $\alpha = 0$, galima sukurti trijų lygmenų Λ -tipo atomo ir šviesos sąveikos schemą. Dėl to, keičiant kontrolinių laukų Rabi dažnius, galima pereiti nuo vienos schemos prie kitos. Tai galimas perėjimas nuo subluminalumo kartu su ELIP, į greitą šviesą ir sugertį, ir atvirkščiai. Remiantis sukabintomis Maxwell-Bloch lygtimis, gauta netiesinė lygtis, aprašanti zondojuančio impulso gaubtinės evoliuciją. Tai lemia stabilių optinių solitonų atsiradimą su lėta sklidimo sparta dėl dispersijos ir Kerr netiesiškumo sistemoje pusiausvyros.

Literatūra

- [1] Michael Fleischhauer, Atac Imamoglu, and Jonathan P. Marangos. Electromagnetically induced transparency: Optics in coherent media. *Rev. Mod. Phys.*, 77:633–673, Jul 2005.
- [2] S. E. Harris, J. E. Field, and A. Imamoglu. Nonlinear optical processes using electromagnetically induced transparency. *Phys. Rev. Lett.*, 64:1107–1110, Mar 1990.
- [3] M. Fleischhauer, C. H. Keitel, M. O. Scully, Chang Su, B. T. Ulrich, and Shi-Yao Zhu. Resonantly enhanced refractive index without absorption via atomic coherence. *Phys. Rev. A*, 46:1468–1487, Aug 1992.
- [4] A. S. Zibrov, M. D. Lukin, D. E. Nikonov, L. Hollberg, M. O. Scully, V. L. Velichansky, and H. G. Robinson. Experimental demonstration of laser oscillation without population inversion via quantum interference in rb. *Phys. Rev. Lett.*, 75:1499–1502, Aug 1995.
- [5] Stephen E. Harris. Electromagnetically induced transparency. *Physics Today*, 50:36, 1997.
- [6] M. Fleischhauer and M. D. Lukin. Dark-state polaritons in electromagnetically induced transparency. *Phys. Rev. Lett.*, 84:5094–5097, May 2000.
- [7] Hai Wang, David Goorskey, and Min Xiao. Enhanced kerr nonlinearity via atomic coherence in a three-level atomic system. *Phys. Rev. Lett.*, 87:073601, Jul 2001.
- [8] Mostafa Sahrai, Habib Tajalli, Kishore T. Kapale, and M. Suhail Zubairy. Tunable phase control for subluminal to superluminal light propagation. *Phys. Rev. A*, 70:023813, Aug 2004.
- [9] Habib Tajalli and Mostafa Sahrai. Switching from normal to anomalous dispersion via coherent field. *J. Opt. B: Quantum Semiclass. Opt.*, 7:168, 2005.
- [10] Rong Yu, Jiahua Li, Pei Huang, Anshou Zheng, and Xiaoxue Yang. Dynamic control of light propagation and optical switching through an rf-driven cascade-type atomic medium. *Physics Letters A*, 373:2992–3000, 2009.
- [11] Sajid Qamar, Shi-Yao Zhu, and M. Suhail Zubairy. Atom localization via resonance fluorescence. *Phys. Rev. A*, 61:063806, May 2000.
- [12] J. Ruseckas, A. Mekys, and G. Juzeliūnas. Slow polaritons with orbital angular momentum in atomic gases. *Phys. Rev. A*, 83:023812, Feb 2011.

- [13] Jiteng Sheng, Xihua Yang, Haibin Wu, and Min Xiao. Modified self-kerr-nonlinearity in a four-level N-type atomic system. *Phys. Rev. A*, 84:053820, Nov 2011.
- [14] Hai Wang, David Goorskey, and Min Xiao. Dependence of enhanced kerr nonlinearity on coupling power in a three-level atomic system. *Optics Letters*, 27:258–260, 2002.
- [15] Michael Fleischhauer and Gediminas Juzeliūnas. *Slow, Stored and Stationary Light*, pages 359–383. Springer International Publishing, Cham, 2016.
- [16] Julius Ruseckas, Gediminas Juzeliūnas, Patrik Öhberg, and Stephen M. Barnett. Polarization rotation of slow light with orbital angular momentum in ultracold atomic gases. *Phys. Rev. A*, 76:053822, Nov 2007.
- [17] H. Schmidt and A. Imamoglu. Giant kerr nonlinearities obtained by electromagnetically induced transparency. *Opt. Lett.*, 21:1936–1938, 1996.
- [18] Chao Hang and Guoxiang Huang. Weak-light ultraslow vector solitons via electromagnetically induced transparency. *Phys. Rev. A*, 77:033830, Mar 2008.
- [19] W. Harshawardhan and G. S. Agarwal. Controlling optical bistability using electromagnetic-field-induced transparency and quantum interferences. *Phys. Rev. A*, 53:1812–1817, Mar 1996.
- [20] A. Imamoglu, H. Schmidt, G. Woods, and M. Deutsch. Strongly interacting photons in a nonlinear cavity. *Phys. Rev. Lett.*, 79:1467–1470, Aug 1997.
- [21] Yifu Zhu. Lasing without inversion in a closed three-level system. *Phys. Rev. A*, 45:R6149–R6152, May 1992.
- [22] Dinh Xuan Khoa, Le Van Doai, Doan Hoai Son, and Nguyen Huy Bang. Enhancement of self-kerr nonlinearity via electromagnetically induced transparency in a five-level cascade system: an analytical approach. *Journal of the Optical Society of America B*, 31:1330–1334, 2014.
- [23] Yueping Niu, Shangqing Gong, Ruxin Li, Zhizhan Xu, , and Xiaoyan Liang. Giant kerr nonlinearity induced by interacting dark resonances. *Optics Letters*, 30:3371–3373, 2005.
- [24] E Paspalakis and P L Knight. Transparency, slow light and enhanced nonlinear optics in a four-levelscheme. *Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics*, 4:S372, 2002.
- [25] Stefan Beck and Igor E. Mazets. Propagation of coupled dark-state polaritons and storage of light in a tripod medium. *Phys. Rev. A*, 95:013818, Jan 2017.

- [26] Julius Ruseckas, Via česlav Kudriašov, Ite A. Yu, and Gediminas Juzeliūnas. Transfer of orbital angular momentum of light using two-component slow light. *Phys. Rev. A*, 87:053840, May 2013.
- [27] Meng-Jung Lee, Julius Ruseckas, Chin-Yuan Lee, Viaceslav Kudriasov, Kao-Fang Chang, Hung-Wen Cho, Gediminas Juzeliūnas, and Ite A. Yu. Experimental demonstration of spinor slow light. *Nat. Commun.*, 5:5542, 2014.
- [28] L. V. Hau, S. E. Harris, Z. Dutton, and C. H. Behroozi. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas. *Nature*, 397:594–598, 1999.
- [29] Michael M. Kash, Vladimir A. Sautenkov, Alexander S. Zibrov, L. Hollberg, George R. Welch, Mikhail D. Lukin, Yuri Rostovtsev, Edward S. Fry, and Marlan O. Scully. Ultraslow group velocity and enhanced nonlinear optical effects in a coherently driven hot atomic gas. *Phys. Rev. Lett.*, 82:5229–5232, Jun 1999.
- [30] Ying Wu and Xiaoxue Yang. Electromagnetically induced transparency in v -, Λ -, and cascade-type schemes beyond steady-state analysis. *Phys. Rev. A*, 71:053806, May 2005.
- [31] M. Bajcsy, S. Hofferberth, V. Balic, T. Peyronel, M. Hafezi, A. S. Zibrov, V. Vuletic, and M. D. Lukin. Efficient all-optical switching using slow light within a hollow fiber. *Phys. Rev. Lett.*, 102:203902, May 2009.
- [32] Nobuyuki Matsuda, Ryosuke Shimizu, Yasuyoshi Mitsumori, Hideo Kosaka, and Keiichi Edamatsu. Observation of optical-fibre kerr nonlinearity at the single-photon level. *Nature Photonics*, 3:95 – 98, 2009.
- [33] Mark N. Kobrak and Stuart A. Rice. Selective photochemistry via adiabatic passage: An extension of stimulated raman adiabatic passage for degenerate final states. *Phys. Rev. A*, 57:2885–2894, Apr 1998.
- [34] K. Bergmann, H. Theuer, and B. W. Shore. Coherent population transfer among quantum states of atoms and molecules. *Rev. Mod. Phys.*, 70:1003–1025, Jul 1998.
- [35] Frank Vewinger, Bruce W. Shoreb, and Klaas Bergmann. Superpositions of degenerate quantum states:preparation and detection in atomic beams. *Adv. At., Mol., Opt. Phys.*, 58:113–172, 2010.
- [36] J. Gong and S. A. Rice. Measurement-assisted coherent control. *J. Chem. Phys*, 120:9984, 2004.
- [37] M. Sugawara. Measurement-assisted quantum dynamics control of 5-level system using intense cw-laser fields. *Chem. Phys. Lett.*, 428:457–460, 2006.

- [38] M. Mahmoudi, M. Sahrai, and M. A. Allahyari. Amplitude and phase control of absorption and dispersion in a kobra-k-rice 5-level quantum system. *Prog. Electromagn. Res. B*, 24:333, 2010.
- [39] L. Ebrahimi Zohravi, R. Doostkam, S. M. Mousavi, and M. Mahmoudi. Controlling the optical bistability in a kobra-k-rice 5-level quantum system. *Prog. Electromagn. Res. B*, 25:1–11, 2012.
- [40] H. R. Hamedi and G. Juzeliūnas. Phase-sensitive kerr nonlinearity for closed-loop quantum systems. *Phys. Rev. A*, 91:053823, May 2015.
- [41] Mostafa Sahrai, Habib Tajalli, Kishore T. Kapale, and M. Suhail Zubairy. Subwavelength atom localization via amplitude and phase control of the absorption spectrum. *Phys. Rev. A*, 72:013820, Jul 2005.
- [42] Kishore T. Kapale and M. Suhail Zubairy. Subwavelength atom localization via amplitude and phase control of the absorption spectrum. ii. *Phys. Rev. A*, 73:023813, Feb 2006.
- [43] G. S. Agarwal and K. K. T. Kapale. Subwavelength atom localization via coherent population trapping. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 39:3437, 2006.
- [44] Fam Le Kien, G. Rempe, W. P. Schleich, and M. S. Zubairy. Atom localization via ramsey interferometry: A coherent cavity field provides a better resolution. *Phys. Rev. A*, 56:2972–2977, Oct 1997.
- [45] Fazal Ghafoor, Sajid Qamar, and M. Suhail Zubairy. Atom localization via phase and amplitude control of the driving field. *Phys. Rev. A*, 65:043819, Apr 2002.
- [46] M. Holland, S. Marksteiner, P. Marte, and P. Zoller. Measurement induced localization from spontaneous decay. *Phys. Rev. Lett.*, 76:3683–3686, May 1996.
- [47] Sajid Qamar, Shi-Yao Zhu, and M. Suhail Zubairy. Precision localization of single atom using Autler-Townes microscopy. *Optics Communications*, 176:409–416, 2000.
- [48] Sajid Qamar, Shi-Yao Zhu, and M. Suhail Zubairy. Atom localization via resonance fluorescence. *Phys. Rev. A*, 61:063806, May 2000.
- [49] Mostafa Sahrai and Habib Tajalli. Sub-half-wavelength atom localization of a v-type three-level atom via relative phase. *Journal of the Optical Society of America B*, 30:512–517, 2013.
- [50] Xiao-Bing Xu, Shu-Long Gu, and Zhi-Ping Wang. 1d atom localization via probe absorption spectrum in a four-level cascade-type atomic system. *Optical and Quantum Electronics*, 45:1157–1165, 2013.

- [51] Jun Xu, Qian Li, Wen chao Yan, Xiang dong Chen, and Xiang ming Hu. Sub-half-wavelength localization of a two-level atom via trichromatic phase manipulation. *Physics Letters A*, 372:6032–6036, 2008.
- [52] Chunling Ding, Jiahua Li, Zhiming Zhan, and Xiaoxue Yang. Two-dimensional atom localization via spontaneous emission in a coherently driven five-level m-type atomic system. *Phys. Rev. A*, 83:063834, Jun 2011.
- [53] Vladimir Ivanov and Yuri Rozhdestvensky. Two-dimensional atom localization in a four-level tripod system in laser fields. *Phys. Rev. A*, 81:033809, Mar 2010.
- [54] Chunling Ding, Jiahua Li, Xiaoxue Yang, Duo Zhang, and Hao Xiong. Proposal for efficient two-dimensional atom localization using probe absorption in a microwave-driven four-level atomic system. *Phys. Rev. A*, 84:043840, Oct 2011.
- [55] Ren-Gang Wan, Tong-Yi Zhang, and Jun Kou. Two-dimensional sub-half-wavelength atom localization via phase control of absorption and gain. *Phys. Rev. A*, 87:043816, Apr 2013.
- [56] Yihong Qi, Fengxue Zhou, Ting Huang, Yueping Niu, and Shangqing Gong. Three-dimensional atom localization in a five-level m-type atomic system. *Journal of Modern Optics*, 59:1092–1099, 2012.
- [57] Vladimir S. Ivanov, Yuri V. Rozhdestvensky, and Kalle-Antti Suominen. Three-dimensional atom localization by laser fields in a four-level tripod system. *Phys. Rev. A*, 90:063802, Dec 2014.
- [58] Zhonghu Zhu, Wen-Xing Yang, Xiao-Tao Xie, Shasha Liu, Shaopeng Liu, and Ray-Kuang Lee. Three-dimensional atom localization from spatial interference in a double two-level atomic system. *Phys. Rev. A*, 94:013826, Jul 2016.
- [59] H. R. Hamed and Gediminas Juzeliūnas. Phase-sensitive atom localization for closed-loop quantum systems. *Phys. Rev. A*, 94:013842, Jul 2016.
- [60] H. R. Hamed and M. R. Mehmannaavaz. Phase control of three-dimensional atom localization in a four-level atomic system in lambda configuration. *Journal of the Optical Society of America B*, 33:41–45, 2016.
- [61] Ali Raheli, iM. Sahrai, and H. R. Hamed. Atom position measurement in a four-level lambda-shaped scheme with twofold lower-levels. *Optical and Quantum Electronics*, 47:3221–3236, 2015.
- [62] H. R. Hamed. Optical switching, bistability and pulse propagation in five-level quantum schemes. *Laser Phys.*, 27:066002, 2017.
- [63] H. R. Hamed, Ali Hamrah Gharamaleki, and Mostafa Sahrai. Colossal kerr nonlinearity based on electromagnetically induced transparency in a five-level double-ladder atomic system. *Appl. Opt.*, 55:5892–5899, 2016.