



RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Dmitrii Redka

NEIZKLIEDES STĀVOKĻU DINAMIKAS NOVĒRTĒJUMS NANOFOTONIKĀ

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultāte
Fotonikas, elektronikas un elektronisko sakaru institūts

Dmitrii Redka

Doktora studiju programmas "Telekomunikācijas" doktorants

NEIZKLIEDĒS STĀVOKĻU DINAMIKAS NOVĒRTĒJUMS NANOFOTONIKĀ

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
profesors *Dr. sc. ing.* VJAČESLAVS BOBROVS

RTU Izdevniecība
Rīga 2024

Redka D. Neizkļiedes stāvokļu dinamikas novērtējums nanofotonikā. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2024. – 45 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-08” 2024. gada 24. maija lēmumu, protokols Nr. 32.

Promocijas darbs tapis ar Eiropas Sociālais fonda darbības programmas “Izaugsme un nodarbinātība” 8.2.2. specifiskā atbalsta mērķa “Stiprināt augstākās izglītības iestāžu akadēmisko personālu stratēģiskās specializācijas jomās” projekta Nr. 8.2.2.0/20/I/008 “Rīgas Tehniskās universitātes un Banku augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla kvalifikācijas celšana stratēģiskās specializācijas jomās” atbalstu.

Pētījumu atbalstīja Rīgas Tehniskās universitātes doktorantūras grantu programma.

NACIONĀLAIS
ATTĪSTĪBAS
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA

Eiropas Savienības
struktūrfondi un
Kohēzijas fonds

I E G U L D Ī J U M S T A V Ā N Ā K O T N Ē

<https://doi.org/10.7250/9789934370991>

ISBN 978-9934-37-099-1 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2024. gada 30. augustā Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultātē, Āzenes ielā 12, 201. auditorijā.

OFICIĀLIE REZENZENTI

Pētniece *Ph. D.* Inga Brice,
Latvijas Universitāte, Latvija

Profesors *Ph. D.* Lei Gao,
Soochow Universitāte, Ķīna

Profesors *Dr. sc. ing.* Jurgis Poriņš
Rīgas Tehniskā universitāte

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Dmitrii Redka (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir sagatavots kā tematiski vienota zinātnisko publikāciju kopa. Tas ietver 11 zinātniskos rakstus un publikācijas konferenču rakstu krājumos (kopumā autoram ir 39 publikācijas), kas indeksēti *SCOPUS*, *WoS* un *IEEE* datubāzēs. Publikācijas uzrakstītas angļu valodā un publicētas *SCOPUS*, *WoS*, *IEEE* datubāzēs, to kopējais apjoms ir 105 lappuses.

LIETOTIE SAĪSINĀJUMI

BICs – *Bound States In The Continuum* – nepārtrauktībā saistītie stāvokļi

CW – *Continuous Wave* – nepārtraukts starojums

EDA – *Electric Dipole Anapole* – elektriskā dipola anapole

HA – *Hybrid Anapoles* – hibrīdanapols

HM – *Hyperbolic Modes* – hiperboliskie režīmi

LOCP – *Lab-On-A-Chip Platforms* – laboratorijas uz mikroshēmu platformām

LTIE – *Low-Temperature Ion Exchange* – zemas temperatūras jonu apmaiņa

MOCT – *Magnetic Octupole* – magnētiskā oktupole

MSAD – *Mean-Squared Angular Displacements* – vidējā kvadrāta leņķiskie pārvietojumi

OAM – *Orbital Angular Momentum* – orbitālais leņķiskais moments

QNM – *Quasi-Normal Modes* – kvazinormālais režīms

SIT – *Self-induced Transparency* – pašinducētā caurredzamība

SAM – *Spin Angular Momentum* – spin leņķiskais moments

SMR FBARs – *Solid Mounted Film Bulk Acoustic Resonators* – cieti montēti plēves lielapjoma akustiskie rezonatori

SOC – *Spin-Orbit Couplings* – spin-orbītas savienojumi

SPP – *Surface Plasmon-Polariton* – virsmas plazmons-polaritons

WGM – *Whispering Gallery Mode* – čukstu galerijas režīms

SATURS

1. PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĪGS RAKSTUROJUMS.....	6
1.1. Ievads.....	6
1.2. Promocijas darba mērķis un tēzes	7
1.3. Promocijas darba galvenie uzdevumi.....	8
1.4. Pētījuma metodes	9
1.5. Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti.....	9
1.6. Promocijas darba praktiskā vērtība	10
1.7. Promocijas darba struktūra.....	10
1.8. Publikācijas un promocijas darba aprobācija.....	11
2. JAUNU OPTISKO EFEKTU IZPĒTE UN MODELĒŠANA NANOSTRUKTURĒTĀS VIDĒS.	13
2.1. Hibrīdanapulu novērošana un daudzpolu analīze	13
2.2. Nanodaļiņu dinamika optiskajā nanovirpulī un tās pielietojumi laboratorijās uz mikroshēmu platformām	16
2.3. Ultraīsu impulsu izplatīšanās kontrole nesakārtotā slāņainā vidē.....	19
2.4. Difūzijas izraisītas emisijas dinamikas analīze nanostrukturētās vidēs.....	22
2.5. Optiskās saites efekta modelēšana hiperboliskajos metamateriālos.....	24
2.6. Superizkliedes efekta modelēšana, kas izriet no saistīto stāvokļu fizikas nepārtrauktības.....	26
2.7. Magnētiskā oktupola optiskās īpašības silīcija kvadrumeros.....	30
3. REĀLI PIELIETOJUMI UN EKSPERIMENTĀLIE REZULTĀTI.....	32
3.1. Makroporaino fonisko kristālu struktūras izmantošanai FBAR	32
3.2. Mikrosfēru modelēšana un raksturojums ar sudraba molekulārajām kopām sensoru pielietojumiem	34
SECINĀJUMI	38
LITERATŪRAS SARAKSTS.....	39

1. PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĪGS RAKSTUROJUMS

1.1. Ievads

Pēdējā desmitgadē pakāpeniski pieaug interese par augsta indeksa pusvadītāju nanodaļiņu ar zemiem zudumiem (piemēram, Si, TiO₂) struktūru optiskajām īpašībām [1]. To reakcija nepārtrauktās apstarošanas režīmā tika detalizēti pētīta, un tika iegūti daudzi jauni optiskie efekti, kas galvenokārt radās pateicoties spējai ierosināt gan elektriskos, gan magnētiskos daudzpolu momentus šādās daļiņās un gandrīz pilnīgi absorbcijas neesamībai [2], [3]. Pamatojoties uz atklātajām parādībām, tika izstrādātas vairākas ultraplānas optiskās sistēmas (apmēram vairākus desmitus nanometrus biezas) [4–6]. Šīs sistēmas nodrošina funkcionalitāti, kas nav sasniedzama ar tradicionālajām sistēmām. Neskatoties uz lielo zinātnieku grupu skaitu pasaulē, kas nodarbojas ar šāda veida pētījumiem, šī joma joprojām nebūt nav izsmelta un regulāri tiek papildināta ar jauniem atklājumiem.

Visinteresantāk šķiet aplūkot to stāvokļu laika dinamiku, kas stacionārā režīmā ir neizkļiedējoši (tumšie režīmi), un attiecīgi šādu daļiņu metavirsmas ir gandrīz pilnībā caurspīdīgas. Šajā promocijas darbā nanodaļiņas un metavirsmas anapola un hibridānapola stāvokļos (nesen atklātais stāvoklis ir aizsargāts līdzsvara stāvoklī gan no vides, gan substrāta, kura femtosekundes reakcija savukārt ir ļoti atkarīga no vides un substrāta [7]) tiks pētītas teorētiski un eksperimentāli. Šie stāvokļi, līdzīgi kā stacionārajā režīmā, ir ar pilnīgi atšķirīgiem režīmu sastāviem un ļaus realizēt dažādu laika dinamiku un efektus. Pilnīgi atšķirīgu īpašību kombinācija nepārtrauktos un impulsa režīmos ļaus nākotnē izstrādāt jaunus optiskos elementus ar dubultu funkcionalitāti (piemēram, jauni ultraplāni atkārtošāns ātruma reizinātāji, gaismas filtri, modulatori, polarizatori u. c.), kas patlaban neeksistē.

Promocijas darbs attiecas uz jauno un ārkārtīgi strauji attīstošo nanofotonikas jomu [8–10]. Piemēram, saskaņā ar *Scopus* datubāzi ik gadu šajā jomā tiek publicēti vairāk nekā 1500 rakstu. Dielektriskās nanofotonikas lietojums ir ļoti daudzveidīgs, piemēram, viļņvadi [11], [12], modulatori [13], virziena starojuma avoti un nanoantenas [14], detektori [15], maskēšanās un neredzamības ierīces [16], fāzes metavirsmas [17], [18] u. c. Dielektriskās nanofotonikas attīstība jau ir devusi iespēju izveidot dažādas metavirsmas, materiālus un metaierīces, kas realizē optisko staru vadību gandrīz bez zudumiem [19].

Tomēr mūsdienās ir nepieciešami jauni ultraplāni fotoniskie elementi, kas spēj efektīvi vadīt ultraīsus lāzera impulsus, ko iepriekš minētās nanofotoniskās ierīces ar dažiem izņēmumiem nepieļauj [20].

Promocijas darbs ir visaptverošs un ietver pilnu darba ciklu, sākot ar definēto problēmu teorētisku (analītisku un skaitlisku) izpēti, kas veikta ciešā sadarbībā ar eksperimentālu pārbaudi un kas ļāvusi pārbaudīt teorijas pareizību, vajadzības gadījumā veicot korekcijas, un beidzot ar prototipu testēšanu, kas vispilnīgāk demonstrē jaunās parādības, kurām veltīts šis pētījums. Konkrētāk, promocijas darbā teorētiski un eksperimentāli pētīti jauni efekti, kas saistīti ar ultraīsiem lāzera impulsiem uz pusvadītāju nanodaļiņām ar augstu indeksu (piemēram, Si, Ge) ar zemu absorbciju redzamajā diapazonā. Patlaban šī joma vēl nav pietiekami izpētīta. Īpašu interesi izraisa pārejošas dinamikas izpēte mijiedarbības laikā ar

impulsiem nanodaļiņu stāvokļos, kas neizkļiedē relatīvi nepārtrauktu starojumu, ko raksturo netriviāla režīma struktūra tuvajā laukā. Proti, pētījums ir veltīts anapolu un hibrīdanapolu stāvokļu laika dinamikas izpētei, kā arī šādu nanodaļiņu metavirsmu mijiedarbībai ar femtosekunžu impulsiem. Jāatzīmē, ka pirmo reizi tika konstatēts, ka stabilā stāvoklī minētais jaunais hibrīdanapols var atbilst anapola stāvokļu realizācijai vienādā frekvencē vienlaikus visiem iesaistītajiem multipoliem. Tādējādi apstarotās daļiņas parādās pilnīgi nedispersā stāvoklī (parastais anapola stāvoklis ļauj nodzēst tikai vienu, parasti elektriskā dipola, režīma starojumu).

Jāatzīmē, ka hibrīdanapola stāvokli pavada spēcīga elektromagnētiskā lauka koncentrācija tuvajā zonā un liela rezonanses un nerezonanses pašuzbudināšana ar dažādiem q faktoriem. Tas, pakļaujot to īsam (femtosekunžu) lāzera impulsam, var izraisīt spēcīgu un netriviālu tā apvalka modulāciju. Apstarojot šādu nanodaļiņu un/vai atbilstošu metavirsmu masīvu, modulācija bija atkarīga arī no metavirsmu simetrijas, kā arī no substrāta ģeometriskajām un optiskajām īpašībām. Jāņem vērā, ka, apstarojot ar CW , optiskā reakcija hibrīdanapola stāvoklī nav atkarīga no vides un substrāta. Tāpēc no šādām nanodaļiņām izgatavotām metavirsmām, saglabājot pilnīgu caurspīdīgumu pret CW (bet kontrolējot tā fāzi!), būtu spēcīgi jāmodulē femtosekunžu impulsi. Šīs īpašības pētījumā tiek izmantotas, lai realizētu dažādas optiskās sistēmas un ierīces ar divējādām īpašībām, kuru reakcija uz femtosekunžu un gariem lāzera impulsiem kvalitatīvi atšķirsies.

Galvenā uzmanība tiek pievērsta jaunu optisko efektu pētījumiem tik sarežģītā jomā kā ultraātrā zema viļņa garuma optika. Tomēr konkrētā apakšnozare, proti, bez izkļiedes režīmu pārejoša optika, ir plaša darbības joma, kas pagaidām ir maz attīstīta. Promocijas darba mērķis ir fundamentāli pētījumi jaunajā jomā un jaunu ierīču fundamentālu modeļu realizācija, pamatojoties uz iegūtajiem rezultātiem. Promocijas darbā izstrādāti modeļi un realizēti prototipi jauniem ultraplāniem planāriem fotoniskiem elementiem, piemēram, ultraplāniem atkārtosšanās ātruma reizinātājiem, gaismas filtriem, staru kūļa modulatoriem utt. Šie elementi ir paredzēti femtosekunžu optikai, un tiem ir divu veidu lietojumi – gan īsiem impulsiem, gan nepārtrauktai apstarošanai.

1.2. Promocijas darba mērķis un tēzes

Apkopojot iepriekš minētos faktus par pusvadītāju nanostruktūru attīstības virzieniem un to lietojumu fotoniskās ierīcēs un optiskajās sakaru sistēmās, tika izvirzīts šāds promocijas darba mērķis: izpētīt jaunus optiskos efektus, kas rodas, pusvadītāju nanodaļiņām mijiedarbojoties ar metavirsmām, kad tās tiek apstarotas ar femtosekunžu lāzera impulsiem. Jaunu nanostrukturētu elementu modeļu izstrāde un to lietojuma novērtējums mūsdienu telekomunikāciju sistēmās un fotonikā.

Lai sasniegtu šo mērķi, tika definētas vairākas tēzes.

1. Pašreizējā hibrīdanapolu stāvokļu teorija liecina, ka ir iespējams panākt efektīvu substrāta mediēto pārejošo procesu telpiski temporālo kontroli, vienlaikus saglabājot nenozīmīgi mazu izkļiedi līdzsvara režīmā.

2. Augstas k masas režīmi var nodrošināt papildu kanālu daļiņu un substrāta mijiedarbībai, tādējādi ievērojami paplašinot optomehānisko manipulāciju shēmu iespējas. Daļēji bezgalīgām (vai pietiekami biežām) metamateriāla plātnes hiperboliskos režīmos, lai gan izkļiedē dominē, praktiski neveicina optisko sasaisti gandrīz neesošās atgriezeniskās saites dēļ. Hiperboliskie režīmi, ko ierosina viena daļiņa, nemijiedarbojas ar otru daļiņu. Turpretī plānas metamateriālu plātnes nodrošina daudzkārtējus atstarojumus no robežām, veidojot ļoti lokalizētu karsto punktu kopumu ar ievērojamiem intensitātes gradientiem, kas virza nanodaļiņu kustību nanomērogā.

3. Laika atkarīgā *Purcell* efekta dinamiku fosforescējošo molekulu šķīdumā, kas mijiedarbojas ar rezonanses nanoantenu, var izmantot bezkontakta visoptiskiem temperatūru un difūzijas mērījumiem. Ir parādīts, ka fosforescējošu molekulu ar ilgu dzīves ciklu sabrukšanas dinamika ir ļoti atkarīga no Brauna kustības rezonatora tuvumā. Šo konkrēto mijiedarbību apraksta apkārtējā šķidrums temperatūra un difūzijas koeficients. Difūzijas molekulu izstaroto tālo lauku starojumu pēc tam analizē, izmantojot apgriezto Laplasa transformāciju, un izmanto, lai rekonstruētu šķidrās vides vietējās īpašības.

4. Rezonanses magnētisko oktopolu (*MOCT*) reakciju var iegūt, sadalot viendabīgu taisnstūra formas silīcija bloku kvadrātveida struktūrā, ieviešot šauras spraugas starp četriem nanokubiem. *MOCT* rezonanses spektrālo pozīciju kontrolē un regulē, mainot attālumu starp nanokubiem.

5. Nepārtrauktībā saistītie stāvokļi (*BIC*) nodrošina unikālas īpašības, pielāgojot gaismas un vielas mijiedarbību nanomērogā. Šie bezstarojuma lokalizētie stāvokļi mūsdienu nanofotonikā nodrošina teorētiski bezgalīgus labuma faktorus un dzīves ilgumu, paverot iespējas dažādiem jauniem lietojumiem.

1.3. Promocijas darba galvenie uzdevumi

Lai sasniegtu promocijas darba mērķi un pierādītu izvirzītās tēzes, tika definēti vairāki galvenie uzdevumi.

1. Teorētiski prognozēt un eksperimentāli apstiprināt hibrīdanapoli, līdz šim nepamanītu neizkļiedējošu režīmu pastāvēšanu, kam pepeciešama vienlaicīga elektrisko un magnētisko karteizisko multipolu destruktīva interference ar to toroidālajiem analogiem. Izveidot padziļinātu priekšstatu par hibrīdanapoli, salīdzinot to ar tā vienkāršāko analogu – elektrisko dipoli anapoli, un apstiprināt alternatīvu tradicionālo anapoli stāvokļu aprakstu, kas balstīts Fano reakcijas atdalīšanā rezonansē un nerezonansē.

2. Veikt teorētisku pētījumu par dinamisko no laika atkarīgo *Purcell* efektu fosforescējošu molekulu šķīdumā, kas saskaras ar rezonanses nanoantenu.

3. Izpētīt ultraīso impulsu izplatīšanos rezonanses daudzslāņu vidē ar sākotnējo populācijas starpību, kas nejausi mainās izplatīšanās virzienā. Apskatīt trīs iespējamus traucējumu modeļus un atklāt to lietojumu elastīgai vidēja optisko reakcijas kontrolei.

4. Analizēt nosacījumus maksimālai krītošās gaismas griešanās leņķiskā momenta konversijai uz izkļiedētās gaismas orbitālo leņķisko momentu, izmantojot īpaši konstruētu šķērsvirzienā izkļiedējošu silīcija nanokubu.

1.4. Pētījuma metodes

Lai veiktu promocijas darba uzdevumus un analizētu problēmas, tika izmantoti matemātiskie aprēķini, skaitliskās simulācijas un eksperimentālie mērījumi. Skaitliskās simulācijas tika īstenotas *Matlab*, *Origin*, *Comsol Multiphysics*, *CST MICROWAVE STUDIO*, *Ansoft Academic Research HF*.

Promocijas darbā aprakstītie zinātniskie eksperimenti un to rezultāti tika veikti Rīgas Tehniskās universitātes (RTU) Fotonikas, elektronikas un elektronisko sakaru institūta (FEESI) Nanofotonikas pētījumu laboratorijā (*NANO-Photon Lab*), Sanktpēterburgas Elektrotehniskajā universitātē (ETU “LETI”, Krievija), Informācijas tehnoloģiju, mehānikas un optikas universitātē (ITMO, Krievija), Grācas Universitātē (Austrija).

1.5. Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti

1. Teorētiski prognozēta un eksperimentāli apstiprināta hibrīdanopu pastāvēšana iepriekš nepamanītā neizkliedētā režīmā, kas prasa vienlaicīgu elektrisko un magnētisko karteizisko multipolu destruktīvu interferenci ar to toroidālajiem analogiem. Pārejas posmā iegūtie rezultāti ļāva izstrādāt hibrīdanopu apstākļu sabrukumu, lai iegūtu ultraātru izkliedētās jaudas modulāciju. Tāpēc atklājumu apvienošana ar mūsdienīgām modulācijas metodēm ir ļoti daudzsoļa nākotnes lietojumiem ultraātrās dinamiskās nanofotonikas jomā.

2. Pirmo reizi tika parādīts, ka augstākas kārtas toroidālie momenti (kvadrupoles momenti) veicina izolētas augsta indeksa nanodaļiņas izkliedes reakcijas būtiskās īpašības. Rezultāti tika apstiprināti, izgatavojot virkni individuālu silīcija nanocilindru, kas atbalsta *HA*, un eksperimentāli tika apstiprināta tās pastāvēšana, veicot tumšā lauka spektroskopijas mērījumus.

3. Izpētīta ultraīsu impulsu izplatīšanās rezonanse daudzslāņu vidē ar nejaušu sākotnējās populācijas starpības variāciju izplatīšanās virzienā. Rezultātā tika aplūkoti trīs iespējamie traucējumu modeļi, atklājot divas pārejas un trīs dažādus režīmus, pieaugot traucējumiem. Pārejas notika no pašinducētas caurredzamības (*SIT*) režīma uz lokalizācijas režīmu un pēc tam uz pastiprināšanas režīmu. Pastiprināšanas režīms parādījās tikai tad, kad bija iespējamas negatīvas populāciju atšķirības un traucējumi bija pietiekami lieli. Šie efekti paver iespēju elastīgi kontrolēt vides optisko reakciju, ļaujot ar traucējuma parametru kontrolēt atstarošanas un pārraides attiecību un impulsu izplatīšanās ātrumu.

4. Izstrādāta jauna koncepcija bezkontakta temperatūras un difūzijas mērījumiem, izmantojot *Purcell* efektu fosforescējošās molekulās, kas atrodas nanoantenas tuvumā. Analizējot izstaroto starojumu, varēja iegūt apkārtējā šķidrums vietējās īpašības, kas ļāva veikt efektīvus augstas izšķirtspējas mērījumus plašā temperatūras diapazonā. Šo metodi var izmantot laboratorijās uz mikroshēmām un mikrofluidikā.

5. Demonstrēti jauni superizkliedes režīmi, izmantojot subviļņu garuma nesfērisko rezonatorus un spēcīgu divu rezonanšu sasaisti. Rezultāti demonstrē superizkliedi, kas rodas no elektriskā superdipola momenta, gandrīz divas reizes pārsniedzot patlaban noteikto robežu. Kvazi-*BIC* stāvokļa laušana rezonatoros bez sfēriskās simetrijas, pielāgojot parametrus, enerģijas apmaiņa starp izkliedes kanāliem ļauj manipulēt ar *Q* faktoriem un multipola saturu,

vienlaikus saglabājot augstu izkliedes šķērsriezumu. Supermultipolārā rezonanse uzrāda pastiprinātu pretestību pret omiskiem zudumiem, salīdzinot ar parastajiem analogiem. Šiem rezultātiem ir nozīme biosensoros, enerģijas iegūšanā, mikroshēmās un optiskās manipulācijās.

1.6. Promocijas darba praktiskā vērtība

1. Iegūts jauns rentabls materiāls, kas piemērots izmantošanai bezmarķējuma sensoros ar aktīviem *WGM* rezonatoriem. Eksperiments parādīja, ka stikla paraugiem, kas pakļauti zemas temperatūras jonu apmaiņai (*LTIE*), piemīt izteiktas absorbcijas īpašības, jo īpaši raksturīgo absorbcijas maksimumu neesamība, kas izskaidrojama ar sudraba molekulāro klasteru $Ag_{2...5}$ veidošanos. Saskaņā ar modeļēšanas rezultātiem atšķirība starp rezonanses viļņu garumiem vidēm ar dažādiem refrakcijas indeksiem bija 0,26 nm. Tas ļauj materiālu izmantot mikrosfēru sensoru izveidei bez tieša fizikā savienojuma. Iegūtie rezultāti liecina, ka nātrija-silikāta stikls ar sudraba molekulārajiem klasteriem ir daudzsološs materiāls *WGM* sensoriem.

2. Tika apstiprināts, ka *MOCT* rezonanse ierosina kontrolētus magnētiskos punktus un rezonanses absorbciju nanostrukturā. Kvadrumeru kā metaplašu veidojošo bloku izmantošana sola sasniegt vēl lielāku magnētiskā lauka pastiprinājumu, pateicoties potenciālajai slazdēšanas režīmu uzbudināšanai. Turklāt pēc palielināšanas līdz mikroviļņu apgabalam aplūkotā struktūra var izrādīties ļoti daudzsološa magnētiskās rezonanses tomogrāfijas lietojumiem. Rezonanses magnētisko oktupolu reakciju var plaši izmantot arī spektroskopijā, sensoru noteikšanā, mazu kvantu objektu atklāšanā un citos potenciālos lietojumos.

3. Tika demonstrēti teorētisko pētījumu rezultāti, kuru mērķis bija izpētīt tehnoloģiski konkurētspējīgus risinājumus fononu struktūru izveidei *FBAR* ierīču vajadzībām. Sniegti skaitļošanas rezultāti kvadrātveida, trīsstūrveida un šūnveida izkārtojumiem, demonstrējot sasniedzamās enerģētiskās joslas reakcijas. Konstatēts, ka joslas platuma raksturlielumu ziņā vizizdevīgākā ir šūnveida struktūra, kas ļautu *FBAR* struktūrām darboties plašā frekvenču diapazonā.

Promocijas darbā iegūtie rezultāti tika izmantoti:

1) Jaunas nehermitiāniskās singularitātes visdielektriskās nanostrukturās (*NEO-NATE*) (01.01.2023–31.12.2025).

2) Rīgas Tehniskās universitātes un Banku augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās (01.08.2021–30.11.2023);

3) *Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, Vācijas Pētniecības fonds) PhoenixD* izcilības klastera ietvaros (EXC 2122, projekta ID 390833453).

1.7. Promocijas darba struktūra

Promocijas darbs ir sagatavots kā tematiski vienota publikāciju kopa par kvantu efektu izstrādi un novērtēšanu nanostrukturās, ko var izmantot nākotnē efektīvās hibridās optiskās sakaru sistēmās un to elementos.

Promocijas darba pirmajā nodaļā raksturota pētījuma aktualitāte, definēts mērķis, aprakstīti galvenie uzdevumi, pētījuma metodoloģija, darba struktūra un galvenie rezultāti.

Darba otrajā nodaļā aprakstīti teorētisko un skaitlisko pētījumu rezultāti un jaunu optisko efektu modelēšana nanostrukturētās vidēs. Aprakstīti galvenie darba posmi:

- 1) hibridanapolu daudzpolu analīze (promocijas darba autora 1. publikācija);
- 2) nanodaļiņu dinamikas izpēte (2. un 9. publikācija);
- 3) ultraīsu impulsu izplatīšanās izpēte nanostrukturētās vidēs (8. publikācija);
- 4) optisko efektu modelēšana nanostrukturētās vidēs (3., 4., 6., 9. un 10. publikācija).

Trešā nodaļa veltīta optisko sensoru eksperimentāliem pētījumiem, kā arī jaunu nanomateriālu izpētei (7. un 11. publikācija).

Nobeigumā aplūkoti teorētiskie un eksperimentālie rezultāti un sniegtas atbildes uz uzdotajiem jautājumiem.

1.8. Publikācijas un promocijas darba aprobācija

Promocijas darba rezultāti ir atspoguļoti 11 zinātniskajos rakstos un publikācijās konferenču materiālos, kas indeksēti *SCOPUS*, *WoS* un *IEEE* datubāzēs. Kopumā autoram ir 39 publikācijas.

1. publikācija. Canós Valero A., Gurvitz E.A., Benimetskiy F. A., Pidgayko D. A., Samusev A., Evlyukhin A. B., Bobrovs V., Redka D., Tribelsky M. I., Rahmani M., Kamali K. Z., Pavlov A. A., Miroshnichenko A. E., Shalin A. S., “Theory, Observation, and Ultrafast Response of the Hybrid Anapole Regime in Light Scattering”, (2021) *Laser and Photonics Reviews*, 15 (10), art. no. 2100114, DOI: 10.1002/lpor.202100114.

2. publikācija. Canós Valero A., Kislov D., Gurvitz E. A., Shamkhi H. K., Pavlov A. A., Redka D., Yankin S., Zemánek P., Shalin A. S., “Nanovortex-Driven All-Dielectric Optical Diffusion Boosting and Sorting Concept for Lab-on-a-Chip Platforms”, (2020) *Advanced Science*, 7 (11), art. no. 1903049, DOI: 10.1002/advs.201903049.

3. publikācija. Novitsky D. V., Shalin A. S., Redka D., Bobrovs V., Novitsky A. V., “Quasibound states in the continuum induced by PT symmetry breaking”, (2021) *Physical Review B*, 104 (8), art. no. 085126, DOI: 10.1103/PhysRevB.104.085126.

4. publikācija. Terekhov P. D., Evlyukhin A. B., Redka D., Volkov V. S., Shalin A. S., Karabchevsky A., “Magnetic Octupole Response of Dielectric Quadrumers”, (2020) *Laser and Photonics Reviews*, 14 (4), art. no. 1900331, DOI: 10.1002/lpor.201900331.

5. publikācija. Novitsky D. V., Lyakhov D., Michels D., Redka D., Pavlov A. A., Shalin A. S., “Controlling wave fronts with tunable disordered non-Hermitian multilayers”, (2021) *Scientific Reports*, 11 (1), art. no. 4790, DOI: 10.1038/s41598-021-84271-0.

6. publikācija. Kostina N. A., Kislov D. A., Ivinskaya A. N., Proskurin A., Redka D. N., Novitsky A., Ginzburg P., Shalin A. S., “Nanoscale Tunable Optical Binding Mediated by Hyperbolic Metamaterials”, (2020) *ACS Photonics*, 7 (2), pp. 425–433, DOI: 10.1021/acsp Photonics.9b01378.

7. publikācija. Oseev A., Mukhin N. V., Lucklum R., Zubtsov M., Schmidt M.-P., Redka D., Kozyrev A., Hirsch S., “Towards macroporous phononic crystal based structures for FBAR

applications. Theoretical investigation of technologically competitive solutions”, (2018) *Microsystem Technologies*, 24 (5), pp. 2389–2399, DOI: 10.1007/s00542-017-3616-1.

8. publikācija. Novitsky D. V., Redka D., Shalin A. S., “Different Regimes of Ultrashort Pulse Propagation in Disordered Layered Media with Resonant Loss and Gain”, (2019) *Annalen der Physik*, 531 (9), art. no. 1900080, DOI: 10.1002/andp.201900080.

9. publikācija. Kislov D., Novitsky D., Kadochkin A., Redka D., Shalin A. S., Ginzburg P. “Diffusion-inspired time-varying phosphorescent decay in a nanostructured environment”, (2020) *Physical Review B*, 101 (3), art. no. 035420, DOI: 10.1103/PhysRevB.101.035420.

10. publikācija. Canós Valero A., Shamkhi H. K., Kupriianov A. S., Weiss T., Pavlov A. A., Redka D., Bobrovs V., Kivshar Y., Shalin A. S., “Superscattering emerging from the physics of bound states in the continuum”, (2023) *Nature Communications*, 14 (1), art. no. 4689, DOI: 10.1038/s41467-023-40382-y.

11. publikācija. Mikharev, E.; Lunev, A.; Sidorov, A.; Redka, D. “Modeling and Characterization of Microspheres with Silver Molecular Clusters for Sensor Applications”. (2023) *Eng. Proc.*, 58,95. DOI: 10.3390/ ecsa-10-16196.

2. JAUNU OPTISKO EFEKTU IZPĒTE UN MODELĒŠANA NANOSTRUKTURĒTĀS VIDĒS

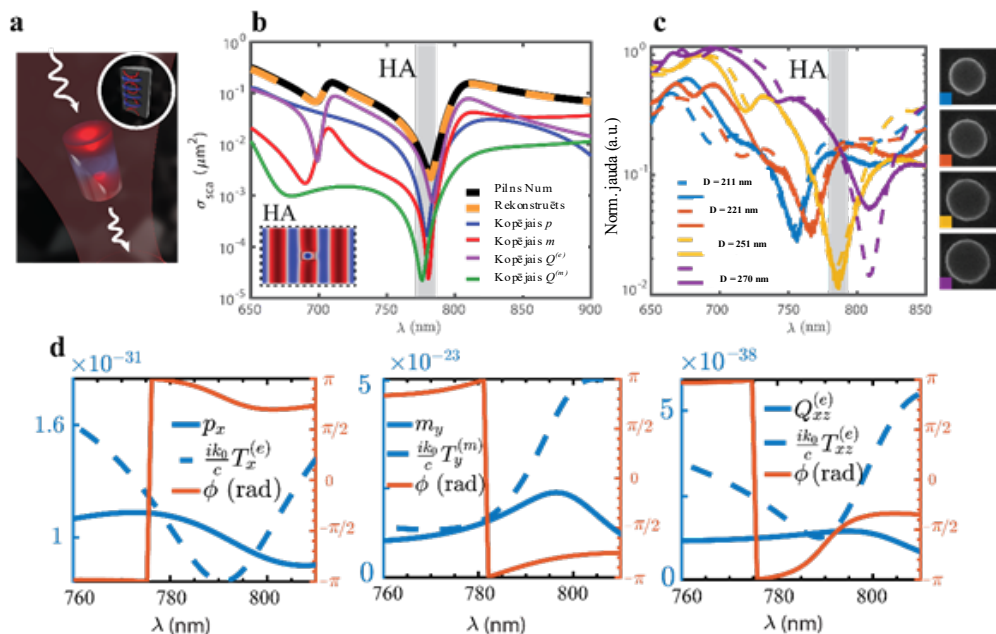
2.1. Hibrīdanapolu novērošana un daudzpolu analīze

Pilnīgi dielektriskā nanofotonika, kas ir nozīmīga pētniecības joma nanooptikā [21], [22], piedāvā plazmonisko struktūru omisko zudumu problēmas risinājumu, izmantojot tādus zema zuduma pusvadītāju vai dielektriskus materiālus kā Si, TiO₂, Ge un GaAs [23], [24]. Šie materiāli ļauj manipulēt ar gaismas elektriskajām un magnētiskajām komponentēm nanomērogā, kas ļauj tos izmantot zemo zudumu viļņvados [25], [26], virziena avotos [27], [28], harmonikas ģenerēšanā [29], gaismas savākšanā un pretatstarojošos pārklājumos [30–32]. Pie sasniegumiem pieder arī pilnībā dielektriskas metapvirsmas [33–36], staru deflektori [37] un zemviļņu garuma šķidrumu sajaukšana [19]. Lai kontrolētu gaismu nanomērogā, ir ļoti svarīgi precīzi aprakstīt elektromagnētisko izkliedi. To panāk, izmantojot elektromagnētiskās daudzpolu izvēršanas [38–42] un Dekarta sadalījuma lādiņos un strāvās [38–40] metodes, kas ļauj identificēt toroidālo momentu optiskajās īpašībās [41–44].

Elektriskā dipola anapola (*EDA*) pārejoša uzvedība joprojām ir lielā mērā neizpētīta, neraugoties uz tā potenciālu jauniem lietojumiem ultraātras dinamiskās rezonanses parādībās. Lielākā daļa pētījumu ir koncentrējušies tikai uz noturības režīma reakciju un elektriskā dipola [47–50]. Tomēr magnētisko anapolu pastāvēšana var uzlabot starojuma slāpēšanu un līdz šim nebijušu elektromagnētiskās enerģijas saglabāšanu, paverot jaunas iespējas gaismas un matērijas mijiedarbībai, kā arī tā saukto hibrīdanapolu (*HA*) radīšanai. Nesenie teorētiskie sasniegumi [40–46] ir ļāvuši izpētīt augstākas kārtas elektriskos un magnētiskos anapolus patvaļīgi veidotos izkliedētājos, paverot ceļu turpmākajiem pētījumiem šajā jomā.

Šī nodaļa ir veltīta hibrīdanapolu konfigurāciju izstrādei un eksperimentāli demonstrē to pastāvēšanu. Deemonstrēju anapolu rašanos, kas rodas no mainīgas elektriskās un magnētiskās dabas multipoliem, kas savienoti kopā izkliedētājos ar pārrautu sfērisko simetriju. Šāda metavirsmas apvieno pilnīgu caurspīdīgumu stacionārā režīmā un augsti noskaņojamu telpiski temporālu reakciju pārejas režīmā.

Projektēšanas metodoloģija ir balstīta šādos principos. Kopējā (galvenā kopā ar toroidālo ieguldījumu), elektriskā dipola un magnētiskā kvadrupola anapola spektrālās pozīcijas galvenokārt ir atkarīgas no cilindra rādiusa, turpretī pilnā magnētiskā dipola un elektriskā kvadrupola anapola viļņu garumi mainās atkarībā no cilindra augstuma un rādiusa. Tādējādi šo divu ģeometrisku brīvības pakāpju rūpīga noregulēšana ļauj visu vadošos anapolus novietot galīgi tuvu viens otram (1. b att.), nodrošinot spēcīgu izkļedes minimumu (1. b att.). Izmērītie izkļedes spektri uzrāda izteiktu kritumu (1. c att.), kas mainās, palielinoties nanocilindra diametram, kas atbilst teorētiskajām prognozēm. Visizteiktākais hibrīdanapola režīms parādās pie 251 nm diametra, kas izraisa būtisku izkļedes efektivitātes samazināšanos.

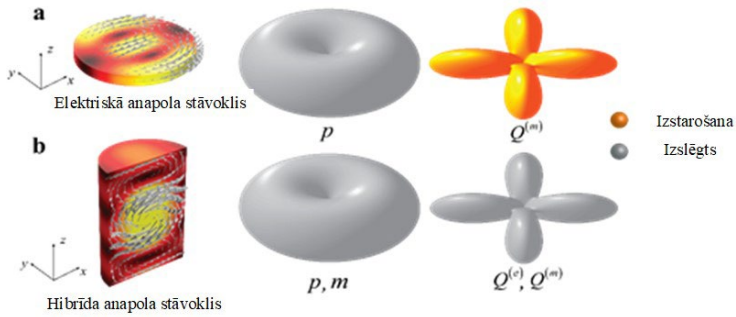


1. att. Hibrīdanapoles analīze.

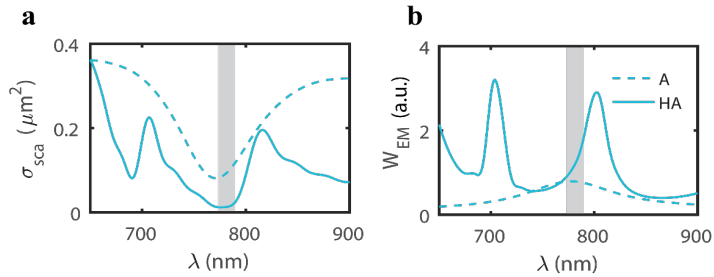
a) Jaunā efekta māksliniecisks attēlojums. b) Cilindriskas amorfās silīcija nanodaļiņas skaitliski iegūtā izkliedes šķērsriezuma daudzpolu rekonstrukcija. c) Krāsainie apgabali kreisajā grafikā norāda: izmērīti (nepārtrauktas līnijas) un simulēti (punktētas līnijas) atsevišķu izolētu nanocilindru ar dažādu diametru izkliedes spektri D. Hibrīdu anapolu spektrālās pozīcijas. Pa labi no grafika attēlots atbilstošo nanocilindru paraugu SEM mikrogrāfi. Krāsainās malas katrā mikrogrāfijā ir saistītas ar mērījumu lēģendas ierakstiem. d) Amplitūdas un fāzu atšķirības starp daudzpoliem un to toroidālajiem ekvivalentiem. Paneli attiecīgi no kreisās uz labo: pamata elektriskie un elektriskie toroidālie dipoli, pamata magnētiskie un magnētiskie toroidālie dipoli un pamata elektriskie un elektriskie toroidālie kvadrupoli. Amplitūdas atbilst kreisajai ordinātu asij, un fāzu atšķirības tiek nolasītas no labās ordinātu ass.

Gan *HAs*, gan *EDA* slāpē tāla lauka starojumu un pastiprina tuva lauka starojumu. Tomēr *HAs* ir priekšrocības, salīdzinot ar *EDA* nanofotoniskiem lietojumiem. 2. attēlā redzams, ka *EDA* piemīt poloidālam līdzīgs lauka sadalījums un ievērojams magnētiskā kvadrupola devums izstarošanā. Tas ir būtisks *EDA* ierobežojums, jo rezonatoru režīmi ar inversijas simetriju vienmēr izstaros kā daudzpolu kombinācijas ar pāra vai nepāra paritāti [47–48]. No otras puses, *VA* nav šī ierobežojuma, un tos var konstruēt tā, lai tie emitētu tikai elektrisko dipolu, padarot tos ideāli piemērotus nanofotoniskiem lietojumiem.

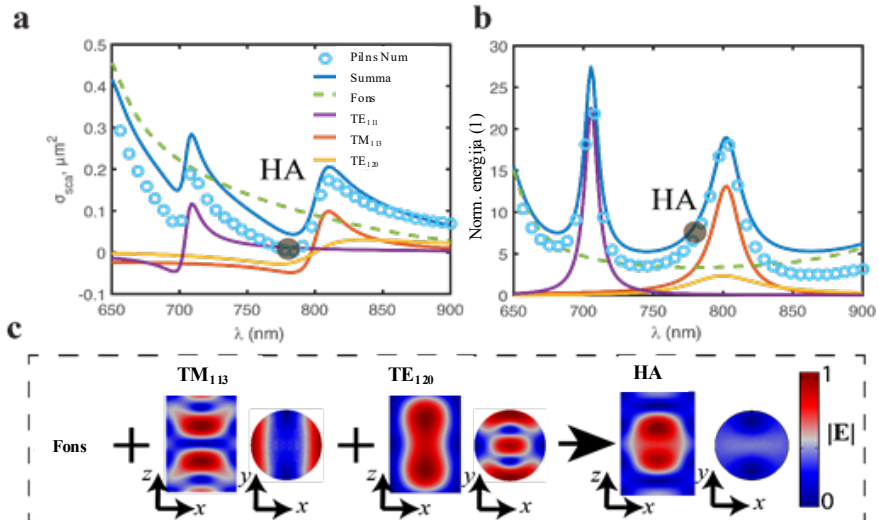
HA kompleksie daudzpolu momenti rada unikālu iekšējā lauka sadalījumu, atšķirībā no *EDAs* (2. b att.). Tas izraisa elektrisko un magnētisko dipolu un kvadrupolu nomāksanu, ievērojami samazinot izkliedi, vienlaikus saglabājot augstu lokālo optisko stāvokļu blīvumu (*LDOS*), ko apstiprina abās struktūrās uzkrātās kopējās elektromagnētiskās enerģijas aprēķini (3. b att.). *HA* uzkrātā enerģija ir ievērojami lielāka nekā *EDA*, kas liecina par pastiprinātu gaismas un vielas mijiedarbību un nelineārajiem efektiem. Turklāt *HA* režīmiem ir augstāki labuma faktori.



2. att. Elektriskā un hibrīdanapoles tuvā un tālā lauka raksturlielumi.



3. att. Kopējās elektromagnētiskās enerģijas aprēķini: izstarotā jauda (a) un uzkrātā elektromagnētiskā enerģija (b) pie elektriskā anapola (apzīmēts A) un hibrīdanapola (apzīmēts HA).



4. att. QNM paplašināšanas metodes lietojums. a) Alternatīva izkliedes šķērsgriezuma izvēršana. Krāsainās līnijas ir fizikālo QNM individuālie ieguldījumi. b) Elektromagnētiskā lauka cilindra iekšpusē un uzbudināto režīmu vidējie enerģijas spektri. c) Iekšējā elektriskā lauka normalizētie sadalījumi.

Ir svarīgi uzsvērt hibrīdanapola neparasto iezīmi: divus rezonanses QNM , kas dominē spektros, vienlaikus negatīvi nomāc fona traucējumi. Rezonatorā parādās pavisam cita aina. 4. b attēls ilustrē cilindrā uzkrātās iekšējās enerģijas modālo sadalīšanos pie punkta HA. Šis ir viens no galvenajiem apakšnodaļas rezultātiem. Pretēji daudzpolu paplašināšanai QNM sadalīšana ļauj skaidri atšķirt pašu režīmu ieguldījumu iekšējos laukos. Pirmkārt, var novērot ievērojamu elektromagnētiskās enerģijas uzlabošanas (apmēram deviņas reizes), salīdzinot ar krītošo plaknes viļni. Otrkārt, ir skaidri redzams, ka hibrīdanapolā uzkrāto enerģiju galvenokārt nosaka TM_{113} režīms, jo tā labuma faktors ir augstāks un tā rezonanses viļņa garums ir tuvu hibrīdanapola viļņa garumam un mazākā mērā TE_{120} un fona ieguldījumu summa. Kopumā QNM analīze (4. att.) parāda, ka gan neredzamības efektu (ārpus cilindra), gan iekšējās enerģijas palielināšanos HA veicina vienlaicīga TM_{113} un TE_{120} režīmu rezonanses reakcija. No otras puses, fona režīmiem, lai gan tie var tieši nenoteikt nopelnu figūru spektrālās iezīmes, arī ir izšķiroša nozīme. To iejaukšanās rezonanses režīmos izraisa neredzamības efektu. Šī interpretācija atbilst agrīnajiem pētījumiem [49] par Fano līniju formu veidošanos sfērisko rezonatoru izkliedes šķērsriezumā.

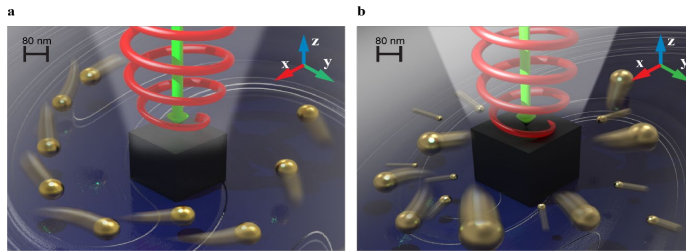
QNM teorētiskā sistēma ir ļoti piemērota nanorezonatora dinamikas kvantitatīviem pētījumiem ultrašos impulsos. Šī visaptverošā hibrīdanapola pētījuma rezultātā tika apstiprināta to esamība stacionārā režīmā, kur destruktīvi traucējumi starp elektriskajiem un magnētiskajiem multipoliem rada neizkļiedējošas zonas. Eksperimentāli apstiprināti kvadrupolu anapoli un magnētiskie anapoli subviļņu garuma nanodaļiņās, kas piedāvā uzlabotu nelinearitāti bez izkliedes. Turklāt tika izstrādāts fizisks modelis, lai izprastu pamatā esošos īpatņos režīmus, kas ietekmē rezonatora reakciju. Šī metavirsma ir daudzsološa izmantošanai ultraātrā dinamiskā nanofotonikā, tostarp femtosekundes lāzera impulsu laika un spektrālā veidošanā.

2.2. Nanodaļiņu dinamika optiskajā nanovirpulī un tās lietojumi laboratorijās uz mikroshēmu platformām

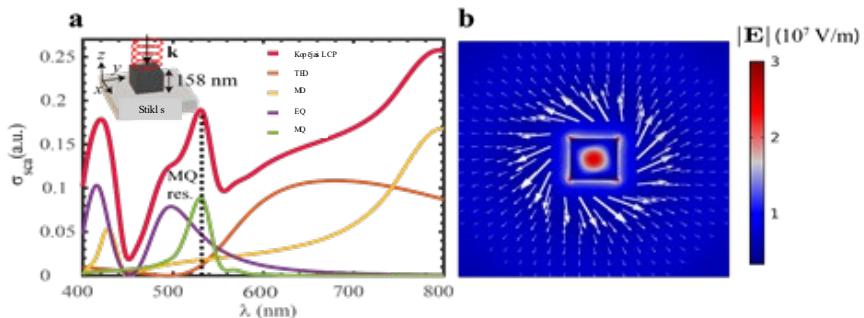
Nanofotoniskās pieejas var uzlabot mikrokameru un mikroreaktoru iespējas, kas ir būtiski, lai kontrolētu šķidrums plūsmas mazos mērogos mikrofluidikas jomā. Šajā apakšnodaļā galvenā uzmanība pievērsta koncepcijai, kas ietver uzlabotu optiski vadītu difūziju un nanodaļiņu šķirošanu, izmantojot augsta indeksa dielektriskās nanoantenas. Griezes orbītas leņķiskā impulsa pārvešana un starojuma spiediens rada apakšviļņa garuma optiskos nanovirpuļus, ļaujot bez kustīgām daļām nanosajaukt un precīzi šķirot zelta nanodaļiņas. Šī daudzpusīgā platforma nodrošina miniaturizētas, optiski vadītas mikrofluidiskās mikroshēmas ķīmiskai analīzei, emulsijas sagatavošanai un nanodaļiņu, vīrusu vai biomolekulu navigācijai ar gaismu.

5. attēlā redzama piedāvātā nanosajaukšanas shēma – silīcija nanokubs ar laušanas koeficientu $n = 4$, kas iegremdēts ūdens šķīdumā, apgaismots ar cirkulāri polarizētu lāzera staru no augšas. Izkļiedētais lauks nes *Pointing* vektora tangenciālo komponentu, kas nav nulle xy plaknē, kas inducē orbitālo leņķisko impulsu, kas nav nulle negatīvā z virzienā. Tas pats efekts izraisa zelta nanodaļiņu spirālveida kustību ap nanokubu. Viskoajā berze starp kustīgajām

nanodaļiņām un šķidrums izraisa konvektīvu šķidrums kustību, uzlabojot šķidrums sajaukšanos. Dažāda izmēra nanodaļiņas ar pretējām polarizējamības reālās daļas pazīmēm radiāli tiek pārvietotas pretējos virzienos – mazākās virzās uz nanokubu, lielākās attālinās no tā (5. b att.). Tā kā nanostrukturai ir nenozīmīgi zudumi, kopējais krītošās un izkliedētās gaismas leņķiskais impulss tiek saglabāts. Šis kopējā leņķiskā impulsa saglabāšanas likums nozīmē, ka daļa no incidenta *SAM* pārnesta gan uz izkliedētā lauka *SAM*, gan *OAM*, izraisot spin-orbītas savienojuma parādības.

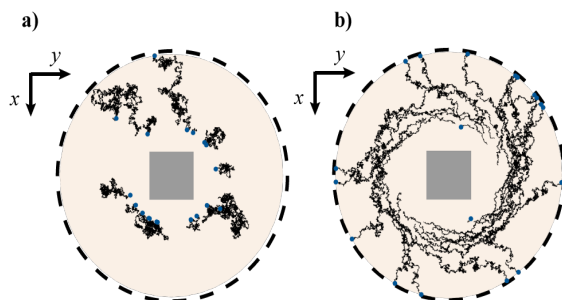


5. att. Piedāvātās aktīvās nanosajaukšanas shēmas (a) un nanodaļiņu radiālās atdalīšanas (b) mākslinieciskais skats.

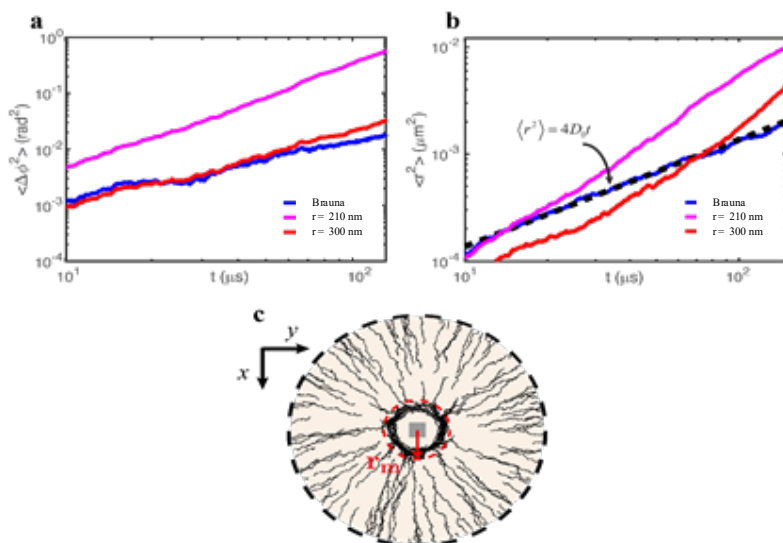


6. att. Daudzpolu dekompozīcija nanokuba izkļiedes šķērsgrizumam. a) Ģeometrija ir attēlota augšējā ielaidumā, un apkārtējā vide ir ūdens. Pārtrauktā melnā līnija norāda rezonanses *MQ* režīma pozīciju (zaļais lāzers, 532 nm). b) Krāsu diagramma apzīmē kopējā elektriskā lauka normu pie 532 nm viļņa garuma šķērsvirziena *xy* plaknē pie $z = 70$ nm.

Lai raksturotu nanodaļiņu trajektorijas virpuļi un to difūzijas kustības pastiprināšanos, tika aprēķināta to vidējā kvadrātiskā leņķiskā novirze (*MSAD*, $\langle \Delta\phi^2 \rangle$, 8. a att.) attiecībā pret nanokuba centru.



7. att. Au nanodaļiņu ar rādiusu 40 nm trajektorijas 1 ms simulācijas laikā. a) uz daļiņām nav gadījuma apgaismojuma, tikai Brauna kustības un pretestības spēki; b) nanokubs ir izgaismots ar cirkulāri polarizētu gaismu, un optiskais spēks to būtiski ietekmē.



8. att. *MSAD* un *MSD log-log* diagrammas, kas raksturo Au nanodaļiņu difūzijas kustību optisko tuvu lauku ietekmē. a) Aprēķinātais *MSAD* ir vidēji 100 Au nanodaļiņām ar 40 nm rādiusu, kad kubs nav izgaismots (zils) un *LCP* apgaismojumā attālumā no nanokuba centra, kas ir daudz zemāks par r_m (parādīts c)) – violeta un pie r_m – sarkana. b) Vidējais *MSD* tādos pašos apstākļos kā a) apakšpunktā. Pārtrauktā līnija atbilst saderībai ar Einšteina attiecību. (c) 40 nm rādiusa Au nanodaļiņu trajektorijas nanovirpuļu apgabalā un ārpus tā, ko ierobežo r_m .

Rādiuss r_m sasniedz apmēram pusi no krītošā viļņa garuma ūdenī, tāpēc optisko virpuļu mehāniskā ietekme uz nanodaļiņu notiek apakšviļņa garuma reģionā. Šādu samazinātu mērogu nevar sasniegt, izmantojot fokusētus tālā lauka starus, piemēram, radiālos un Besela starus [50–52]. Cik zināms, šis ir pirmais priekšlikums nodrošināt optiskos nanovirpuļus, kas izveidoti vienkāršā, īstenojamā iestatījumā, izvairoties no zudumiem plazmoniskām nanoantennām [53–54], īsviļņu garuma vadītiem režīmiem [55] vai sarežģītām hirālām struktūrām [56]. Šādi optiskie nanovirpuļi ir daudzsološs komponents mikroshēmas orbitālā leņķiskā impulsa (*OAM*)

apmaiņai, virzot gaismas vielu mijiedarbību, piemēram, kontrolētu gaismas emisiju no kvantu punktiem [57], superizšķirtspēju [58], [59] un manipulācijām ar nanoobjektiem [60].

Šie efekti ļauj demonstrēt jaunu, dinamisku, bezkontakta izmēra šķirošanas metodi zelta nanodaļiņām šķidrošā šķīdumos, risinot vienu no vissarežģītākajiem parastās mikrofluidikas mērķiem ar dielektriskās nanofotonikas palīdzību. Tas parāda, ka jaunā platforma var darboties kā zelta nanodaļiņu šķirošanas ierīce, izmantojot to kustību uz iekšu vai ārū virzienā uz nanokubu, pamatojoties uz to izmēriem. Precīza zelta nanodaļiņu izmēra kontrole *in-situ* ir būtisks solis daudzos lietojumos, piemēram, bioloģisko šūnu uzņemšanas ātruma [61], [62], toksicitātes [63] un Ramana signāla intensitātes [64] noteikšanā.

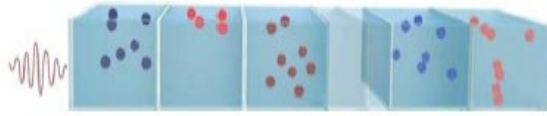
2.3. Ultraīsu impulsu izplatīšanās kontrole nesakārtotā slāņainā vidē

Optiskās nanostruktūrām ar zudumu un pastiprināšanas komponentiem pievērsta uzmanība kā daudzpusīgi materiāli nanofotoniskajam lietojumam. Šajā nodaļā pētīta viendimensionāla slāņu struktūra ar rezonanses zudumu un pastiprinājumu. Tika pārveidots tipisko zaudējumu pieauguma iestatījums, sistēmā ieviešot citu mainīgo – traucējumus. Nesen tika atklāts, ka nesakārtoti metamateriāli rada lielu interesi ne tikai Andersona lokalizācijas dēļ [65], [66], bet arī topoloģisko stāvokļu pāreju novērošanai [67], pārraides uzlabošanai [68] un viļņu frontu veidošanai [69]. Vēl viena iezīme, autoraprāt, ir uzsvars uz īsa impulsa izplatīšanās dinamiku. Tāpēc rezultāti attiecas ne tikai uz aktīvās un nesakārtotās fotonikas jomām, bet arī turpina garo pētījumu ķēdi, kas veltīta koherenta impulsa izplatībai rezonanses vidē [70]. Precīzāk, analīze ir dabiski saistīta ar pētījumiem par pašinducētu caurredzamību (*SIT*) [71], [72] un ar to saistītām saskaņotām sekām, piemēram, populācijas blīvuma režģu veidošanos [73], [74] un sadursmēm starp solitoniskajiem impulsiem [75–77]. Šajā gadījumā autoram bija interese par sistēmām ar nekārtību rezonanses daļas parametru, kamēr fons paliek viendabīgs.

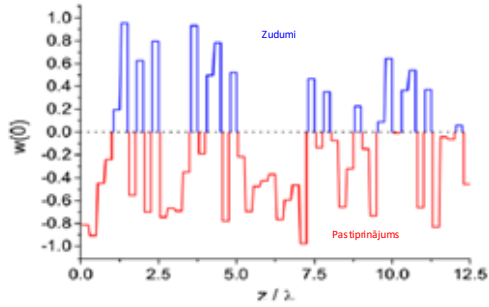
Šajā nodaļā aplūkotā sistēma sastāv no fona dielektriķa ar aktīviem (divu līmeņu) atomiem (9. att.). Gaismas izplatīšanos šajā barotnē pusklasiskā tuvinājumā var raksturot ar pazīstamiem Maksvela-Bloka vienādojumiem. Promocijas darbā aplūkots traucējumu modelis nozīmē, ka sākotnējā populāciju starpība j slānī, kas atbilst attālumam $(j - 1)\delta L < z \leq j\delta L$, ir noteikta ar:

$$w^{(j)}_0 = 1 - 2\xi_j r, \quad (1)$$

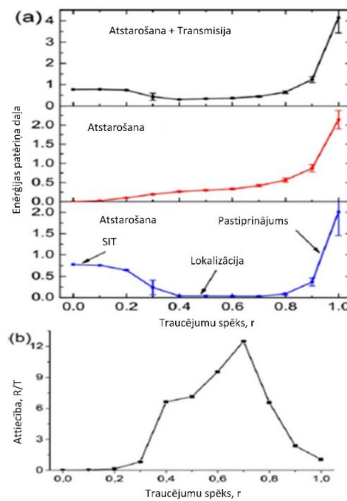
kur ξ_j – nejausšs skaitlis, kas vienmērīgi sadalīts diapazonā $[0; 1]$; r – traucējumu stipruma parametrs. Kad $r = 0$, tas ir triviāls gadījums – tīri absorbējoša (*lossy*) vide (visas $w^{(j)}_0 = 1$). Turpretī $r = 1$ atbilst maksimālajam traucējumam, kad zuduma un pastiprinājuma iespējamība ir vienāda. Citiem vārdiem sakot, sistēmu var uzskatīt par daudzslāņu (kopējo biezumu L), kas sastāv no plātnēm (biezums δL) ar atšķirīgām sākotnējām populācijas atšķirībām, tas ir, dažādās barotnes daļās notiek atšķirīga sūkņēšana. Ja $r > 0,5$, ir iespējami pastiprinājuma slāņi ar $w^{(j)}_0 < 0$. Tādējādi parametrs r ne tikai regulē novirzi no sakārtotā tīrā zudumu gadījuma, bet arī uzņemas sūkņēšanas stipruma lomu, kā rezultātā rodas pastiprinājums. - Regulēta sadalījuma piemērs redzams 10. attēlā attiecībā uz nejausšu blīvuma izmaiņu periodu $\delta L = \lambda/4$ un maksimālo traucējumu $r = 1$.



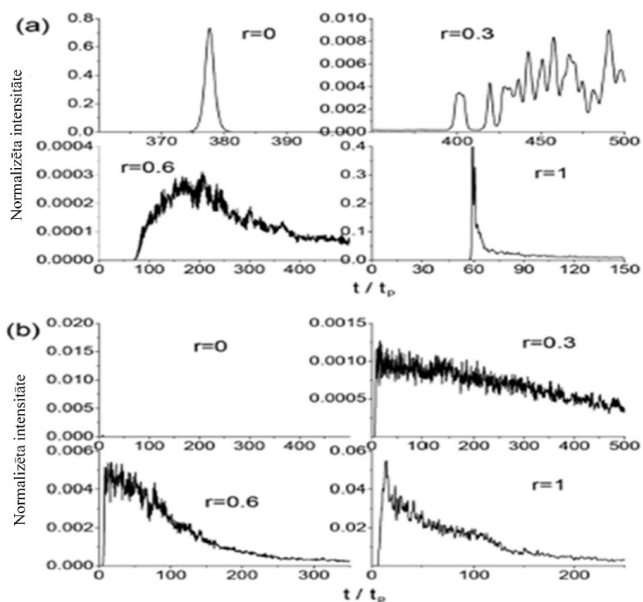
9. att. Aplūkojamās sistēmas shematiskais attēlojums. Dažādi zilās un sarkanās krāsas toņi apzīmē attiecīgi dažādus zudumu un pastiprinājuma līmeņus.



10. att. Sākotnējās populācijas starpības w_0 piemēri, kas sadalīti pa vidu traucējumu modelim.



11. att. Pārraidē un atstarošanas aprēķins dažādiem traucējumu līmeņiem. a) Pārraidītās (apakšā) un atstarotās (vidū) gaismas vidējā izejas enerģija, kā arī to summa (augšā) kā traucējumu funkcija. Enerģija, kas vidēji aprēķināta 100 realizācijām, tika aprēķināta laika intervālam 500 tp un normalizēta pēc ieejas enerģijas. Slāņa biezums ir $\delta L = \lambda/4$. Kļūdas joslas norādītas objektīvās standartnovirzes attiecīgajām vidējām vērtībām. b) Atstarošanas un caurlaidības vidējo vērtību attiecība kā funkcija no r .



12. att. Pārraidītās (a) un atstarotās (b) intensitātes profili dažādām traucējumu vērtībām. Profili ir vidēji 100 realizācijām, slāņa biezums ir $\delta L = \lambda/4$.

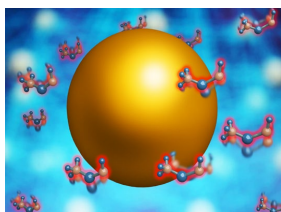
11. a attēlā redzamas vidējās caurlaides un atstarošanas vērtības dažādiem traucējumu līmeņiem, kas aprēķinātas modelētajā sistēmā. Pie zema traucējuma ($r \leq 0,2$) ir *SIT* režīms ar augstu caurlaidību, un iegūtais impulss atbilst *SIT* solitonam. Rezultātā var novērot konkrētas formas solitona impulsu, kas izplatās vidē ar zemu vājinājumu. Tieši tas redzams 12. a attēlā. Attiecībā uz $r > 0,2$ pāreja uz lokalizāciju notiek ar pakāpenisku pārraides samazināšanos un atstarošanas un absorbcijas palielināšanos. Šajā scenārijā aizturēšana notiek tuvāk ieejai, jo palielinās traucējums. Tā rezultātā palēninās *SIT* impulsi un novērojama gandrīz pastāvīga populācijas inversija realizācijai ar $r = 0,4$.

Kopumā izpētīta ultraīsu impulsu izplatīšanās rezonanses daudzslāņainā vidē ar nejausi mainīgām sākotnējām populāciju atšķirībām izplatīšanās virzienā. Galvenā uzmanība tika pievērsta aktīvai sistēmai ar nesakārtotu zudumu un ieguvumu sadalījumu un vienmērīgu fonu. Rezultātā tika aplūkoti trīs potenciālie nekārtības modeļi, atklājot divus pārejas un trīs atšķirīgus režīmus, palielinoties nekārtībai. Pārejas bija no pašinducētas caurredzamības (*SIT*) režīma uz lokalizācijas režīmu un pēc tam uz pastiprināšanas režīmu. Pastiprināšanas režīms parādījās tikai tad, kad bija iespējamas negatīvas populāciju atšķirības un traucējumi bija pietiekami lieli. Šie efekti paver iespējas elastīgi kontrolēt nesēja optisko reakciju, ļaujot pielāgot atstarošanas un pārraides attiecību un impulsu izplatīšanās ātrumu, izmantojot traucējumu parametru.

2.4. Difūzijas izraisītas emisijas dinamikas analīze nanostrukturētās vidēs

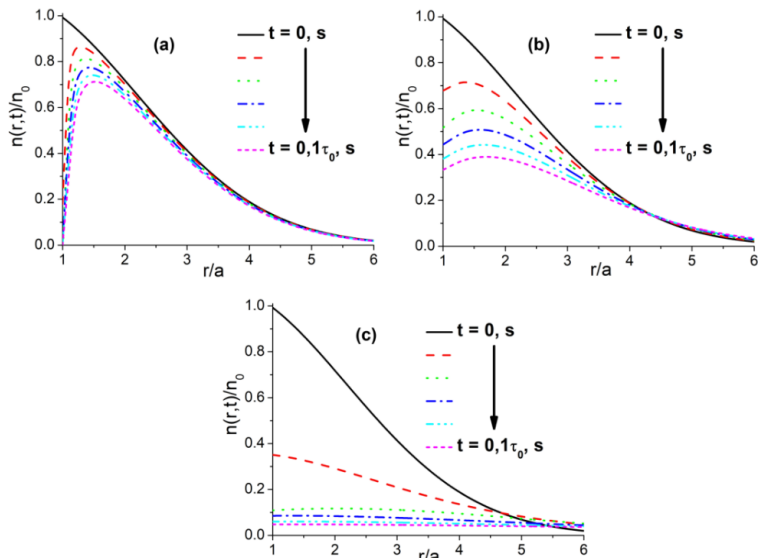
Pētot gaismas un vielas mijiedarbību, strukturētā vide kontrolē dinamiku, mainot elektromagnētisko stāvokļu lokālo blīvumu. Kamēr ātrie fluorescējošie procesi var nepamanīt mehāniskās izmaiņas, lēni noārdītie fosforescējošie kompleksi var noteikt mikro- un milisekundes ilgus kustības, ko izraisa tuvā lauka mijiedarbība. Izpētot mijiedarbību starp laikā mainīgo Purcella pastiprinājumu un molekulāro kustību, tika analizētas kolektīvās sabrukšanas parādības, izmantojot modificētu difūzijas vienādojumu. Šķidruma īpašību attiecināšana uz fosforescējošās gaismas dzīves ilguma sadalījumu ļauj veikt bezkontakta visoptisko termometriju un difūzijas mērījumus. Šai fotoniskajai platformai ir potenciāls lietojums nanoflūīdu procesos un laboratorijās uz mikroshēmu (*LOCP*) platformām, nodrošinot ieskatu, ko ir grūti iegūt, izmantojot citas optiskās metodes.

Autors piedāvā teorētisku sistēmu, lai analizētu lēni izzūdošu fosforescējošu savienojumu difūzijas procesus rezonanses optisko antenu šķīdumā (13. att.). Šķīdumā, kas sajaukts ar metāliskām nanodaļiņām, izšķīdinātu izstarotāju masīvu sūkņē ar ārēju apgaismojumu. Lēni noārdītās krāsvielas difundē rezonējošo nanodaļiņu tuvumā, kas maina to emisiju laika skalā, kas ir salīdzināma ar spontāno noārdīšanos. Šīs mijiedarbības rezultātā fotonu statistikā tiek iegūta informācija par šķīduma dinamiku.



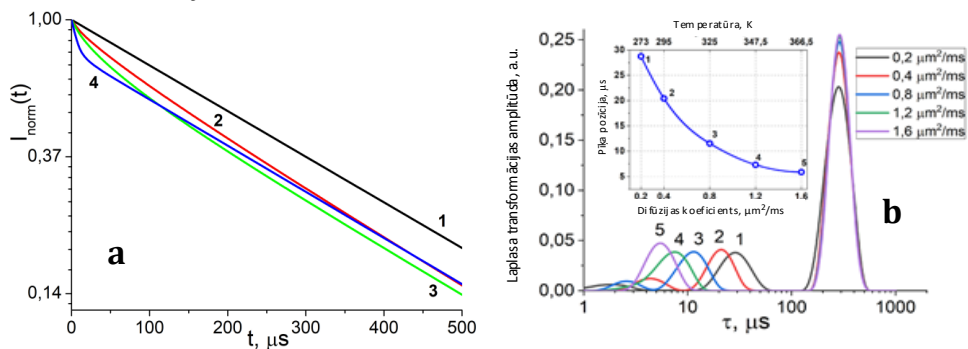
13. att. Sistēmas shēma – lēni izplūstošu fosforescējošu krāsu difūzija blakus rezonējošai nanoantennai.

Ir jānošķir starojuma un starojuma nepalielināšanas pastiprināšana, jo tās atšķirīgi ietekmē gaismas mijiedarbību ar matēriju. Kopējais starojuma dzīves ilgums nosaka sabrukšanas dinamiku, savukārt starojuma devums ir atbildīgs par tālākajā laukā konstatēto fotonu skaitu. Starpība starp starojuma un kopējo laiku ir daļiņā radušos zudumu rezultāts. Lai gan lielākajā daļā optoelektronisko lietojumu tikai starojuma ieguvums ir maksimizācijas faktors, izstrādātajam difūzijas modelim nepieciešamas zināšanas par kopējo sabrukšanas ātrumu. Tomēr informāciju par šķīduma vietējām īpašībām var analizēt, savācot izstarotos fotonus. Tika izmantoti šādi tipiski parametri: sfēriskās daļiņas rādiuss – 50 nm, zelta optiskās īpašības tika ņemtas no [95], fosforescējošās emisijas centrālais viļņa garums – 690 nm.



14. att. Ierosināto krāsvielu molekulu radiālais sadalījums daļiņas tuvumā dažādos laika momentos dažādām difūzijas koeficienta vērtībām: a) 0; b) 0,2; c) 1,6.

14. attēlā redzams, ka tad, ja difūzijas koeficients ir ļoti mazs, uzбудināto krāsvielu populācija daļiņas tuvumā strauji samazinās un Brauna kustības uz to nenotiek. No otras puses, ja difūzija ir efektīva, lēni noārdītās molekulas (ko neietekmē *Purcell* pastiprinājums) ieplūst un sāk uztvert antenas klātbūtni. Rezultātā tās sadalās ātrāk. Šī dinamiskā uzvedība ir skaidri redzama, salīdzinot a, b un c paneli. Bojāšanās kinētika tieši ietekmē dzīves ilguma sadalījumu, ko var izmērīt tālajā laukā.



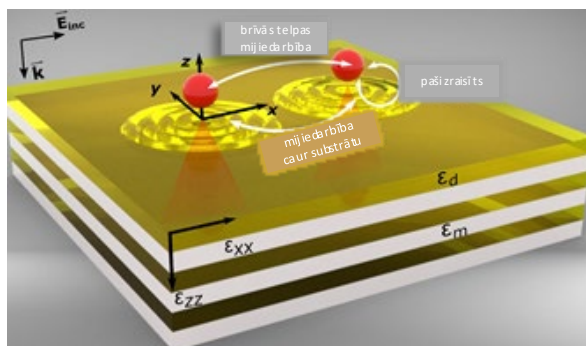
15. att. a) Krāsvielas molekulu normalizēta intensitāte (logaritmisks mērogs) sadalīšanās daļiņu tuvumā dažādām difūzijas koeficienta vērtībām; b) savāktā luminiscences signāla dzīves cikla sadalījuma analīze.

15. a attēlā redzama intensitātes vājināšanās kā laika funkcija dažādām difūzijas konstantes vērtībām. Ja molekulas pārvietojas nejausi ap antenu, varbūtība, ka tās nonāks tās tuvumā, ir lielāka, un tas palielina *Purcell* pastiprinājumu. Šo rezultātu ilustrē 15. b attēls, kur skaidri redzama sistēmas neeksponenciālā reakcija. Labais galējais maksimums atbilst molekulu

relaksācijas laikam brīvā telpā. Sekundārais maksimums kreisajā pusē ir saistīts ar *Purcell* efektu un ietver informāciju par difūzijas raksturlielumiem. Patiešām, difūzijas koeficienta palielināšanās rada šī sekundārā pīķa tālāku nobīdi uz īsākiem dzīves laikiem. Šī nobīde notiek tāpēc, ka palielinās varbūtība, ka molekulas pietuvosies metāliskajai nanodaļiņai. Šī pīķa stāvoklis kā difūzijas koeficienta un līdz ar to arī temperatūras funkcija ir parādīta iedarbībā. Tādējādi ar ierosināto fotonisko bezkontakta konstrukciju ir iespējams mērīt temperatūru un difūzijas koeficientu šķīdumā. Fosforescējošo molekulu optiskā paraksta izteiktā atkarība no apkārtējās vides var būt ļoti noderīga dažādos lietojumos, piemēram, mikrofluidikā un ķīmijā, kas balstīta mikrokamerās, attālinātā pilnībā optiskā temperatūras kontrolē, mikrobioloģijā un biomedicinā.

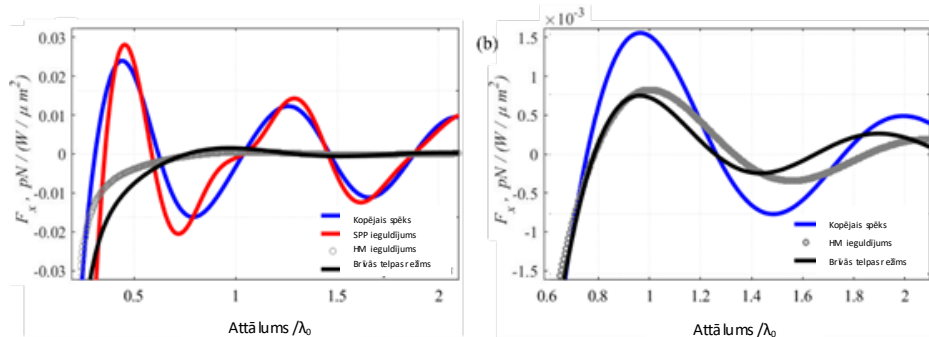
2.5. Optiskās saites efekta modelēšana hiperboliskajos metamateriālos

Šajā nodaļā tiek aplūkots hiperbolisko metamateriālu substrātu potenciāls optiskās sasaistes lietojumiem. Tipisks scenārijs redzams 16. attēlā, kur mazu daļiņu pāri saista optiskais lauks, ko rada strukturēta virsma.



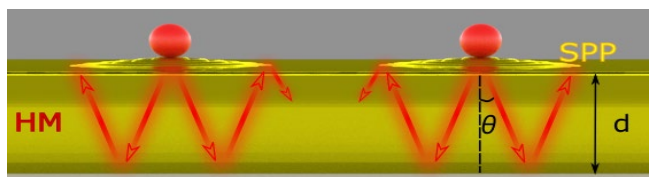
16. att. Vispārīgs optiskās saites jēdziens virs metamateriāla plāksnes. Izteikti ierobežoti optiskie režīmi slāņainajā hiperboliskajā metamateriālā rada papildu mijiedarbības kanālus, ļaujot veidoties dimeriem un ķēdēm, kuru atdalīšanas attālumi ir mazāki par difrakcijas robežu.

17. attēlā redzami iegūtie optiskie spēki, kas atbilst *SPP* un hiperbolisko režīmu dominējošajam ieguldījumam. Pirmajā gadījumā optiskos spēkus galvenokārt ietekmē spēcīga virsmas plazmonpolaritonu ietekme, un šie virsmas viļņi pilnībā virza spēkus, savukārt citu režīmu devums ir nepietiekams. Otrajā gadījumā, kur dominējoša ietekme ir hiperboliskajām modām, optiskajai saistībai nav gandrīz nekā īpaša, salīdzinot ar brīvās telpas scenāriju. Šeit *HM* devums palielina spēku gandrīz divas reizes (kas joprojām ir par divām kārtām mazāks nekā *SPP* devums) un nedaudz maina līdzsvara stāvokļus, gandrīz neietekmējot L_{bind} . Tādējādi hiperboliskās modes, ko ierosina pirmā daļiņa, simetriski izplatās tilpumā, neiedarbojoties ar otro daļiņu, un otrādi. Tomēr joprojām pastāvošo nenulles *HM* devumu var izskaidrot ar iepriekšminētajiem savstarpējiem nosacījumiem. Šajā scenārijā vienas daļiņas ierosinātas modes izkļiedē otra daļiņa, kā rezultātā rodas papildu *HM* ar izjaukto simetriju. Tie savukārt veicina optiskā spēka nobīdi [96].

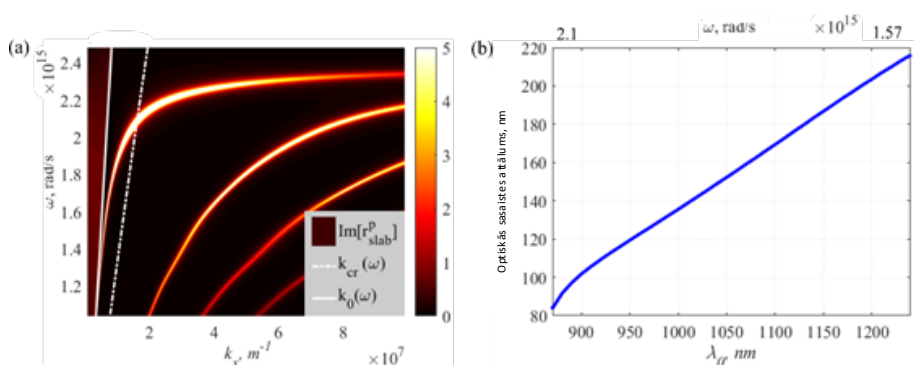


17. att. Optiskā saistošā spēka atkarība no attāluma starp daļiņām. a) SPPs, b) hiperboliskie režīmi.

Tādējādi tas pierāda, ka hiperboliskie režīmi, lai arī dominē mijiedarbībā ar pusbezgalīgo metamateriālu, šajā gadījumā nesniedz pietiekamu ieguldījumu saistīšanās. Galvenais iemesls vājajai HM ietekmei uz saistīšanos ir atgriezeniskās saites trūkums no tilpuma režīmiem, kas izplatās prom no daļiņām līdz bezgalībai. Tomēr spēcīgu optisko saistīšanu var panākt, izmantojot anizotropu galīga biezuma plātņi, jo no robežām notiek hiperbolisko režīmu atstarošanās. Aplūkojamā struktūra redzama 18. attēlā.



18. att. Optiskās saistīšanas shēma pie anizotropo hiperbolisko metamateriālu (HM) plātnes. Atstarojumi no plātnes robežām veido augstas intensitātes reģionus un rada optisku sasaisti ar atdalīšanas attālumiem L_{bind} zem difrakcijas robežas.



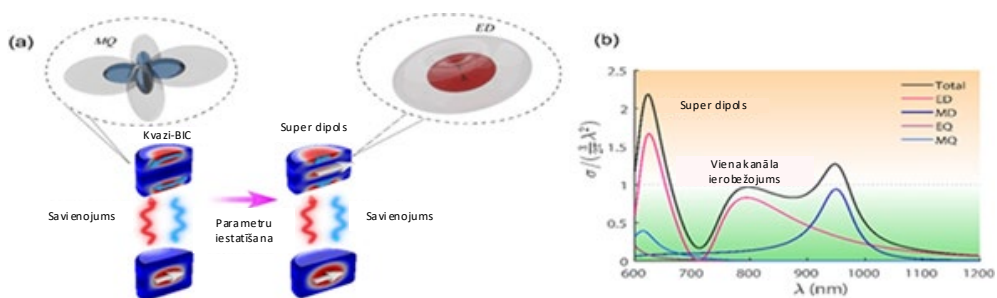
19. att. Hromatiskā saskaņošanas sudraba un TA_2O_5 slāņu daudzslāņu struktūrai ar plātnes biezumu 115 nm un uzpildes koeficientu 0,133. a) Iedomāta atstarošanas koeficienta daļa (dispersijas diagramma). b) Optiskais saites periods frekvencē.

Turklāt var apsvērt vēl vienu svarīgu brīvības pakāpi – metamateriāla optiskās saites hromatisko noskaņošanu. 19. a attēlā redzama atstarošanas koeficienta atkarība no krītošā viļņa frekvences 115 nm biežai plātnei. Redzams, ka *HM* maksimumu skaits, ko kontrolē atstarojumi (līdzīgi kā Fabri-Perota rezonanses hiperboliskām modēm) un kas veicina optisko saistīšanu, pieaug ar zemāku frekvenci, tāpēc optiskā spēka atkarība kļūst sarežģītāka. Attālums starp saistītajām daļiņām (19. b att.) tagad mainās atkarībā no frekvences, uzsverot materiāla dispersijas būtisko lomu šajā kontekstā. Saistīšanās periods ir proporcionāls plātnes biezuma un krītošā viļņa garuma attiecībai. Šajā gadījumā caurlaidības ir monotoni atkarīgas no frekvences, tādējādi optiskās saites attāluma atkarība ir vairāk vai mazāk monotona. Tomēr citu viļņu garuma apgabalos papildu smagie metāli (*HM*) un nemonotona optisko konstantu dispersiju varētu izkustināt stabilās līdzsvara pozīcijas un mainīt 19. b attēlā redzamo sakarību. Šī papildu brīvības pakāpe paver plašas iespējas “neinvazīvā” veidā noregulēt optisko sasaisti un izgatavot jaunus nanostrukturū dizainus un arhitektūras uz metamateriālu substrātiem, pielāgojot optiski inducētos spēkus ar hiperboliskiem režīmiem.

2.6. Superizkliedes efekta modelēšana, kas izriet no saistīto stāvokļu fizikas nepārtrauktības

Šajā nodaļā pētīta *Mie-like* izkliede no atvērta subviļņu garuma rezonatora, kas izgatavots no augsta indeksa dielektriska materiāla, kad tā parametri ir noregulēti interferējošu rezonansu režīmā. Tika atklāts jauns supersatricināšanas mehānisms, kas ir cieši saistīts ar spēcīgu rezonanses režīmu sasaisti [99] un ko apraksta saistīto stāvokļu fizikas nepārtrauktā vidē (*BIC*). Tika pierādīts, ka pastiprināta izkļiedēšana notiek konstruktīvās interferences dēļ, ko apraksta Frīdriha-Vintgena interferējošo rezonanču mehānisms [100], kas ļauj daudzpolu rezonanses izkliedes šķērsgrizumam pārsniegt patlaban noteikto robežu. Tika izstrādāts visaptverošs nehermitiāniskais modelis, lai aprakstītu kvazinormālo režīmu rezonanses interferenci.

20. a attēlā redzama ierosinātā koncepcija ar supersatricēšanas efektu, ko iedvesmo *BIC* izolētā rezonatorā. Modeļu savienošana izraisa jaudas pārdali divos starojuma kanālos, kas ļauj pārvarēt viena kanāla izkliedes robežu. Šis process ļauj kontrolēt ne tikai *Q* faktoru, bet arī pastiprināt daudzpolu (piemēram, elektriskā dipola) izkļiedētās jaudas pārsniegšanu, kā redzams 20. b attēlā.

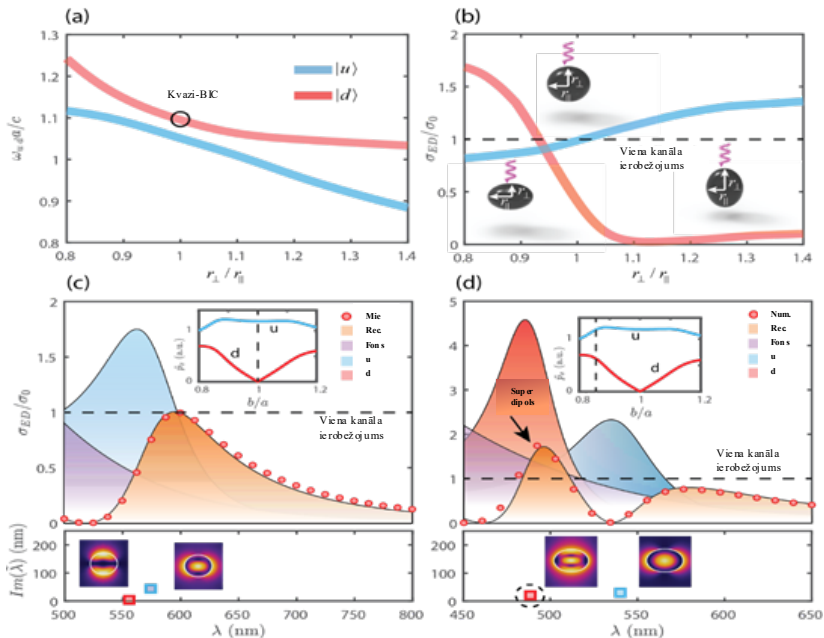


20. att. (a) *BIC* iedvesmotas supersatricēšanas koncepcija izolētā rezonatorā. (b) Superdipolu rezonanse, kas rodas izkliedes šķērsgrizumā dielektriskā cilindrā ar refrakcijas koeficientu $n = 3,8$, rādiuss 130 nm, augstums 180 nm.

Elektriskā dipola kanāla izkļiedes šķērsgrīzums ievērojami pārsniedz viena kanāla robežu. Tas ir pretstatā parastajai supersatricināšanai, kur ir jāpārklājas vairākiem multipoliem rezonansēm.

Lai izstrādātu superizkļiedētāju, vairāku kvazinormālo režīmu (QNM) rezonanses frekvences, kas saistītas ar dažādiem multipolāriem kanāliem, ir jāsavieno, izmantojot īpašu daļiņu ģeometrijas konstrukciju. Šīs konstrukcijas mērķis ir nodrošināt, lai kopējais izkļiedes šķērsgrīzums, kas ir to ieguldījumu summa, pārsniegtu robežu. Turklāt atkarībā no objekta simetrijas viena multipola izkļiedes šķērsgrīzums var saņemt ieguldījumus no citiem multipoliem. Tas liecina, ka daudzpolu stiprumu teorētiski var palielināt, pārsniedzot tradicionāli pieņemto robežu.

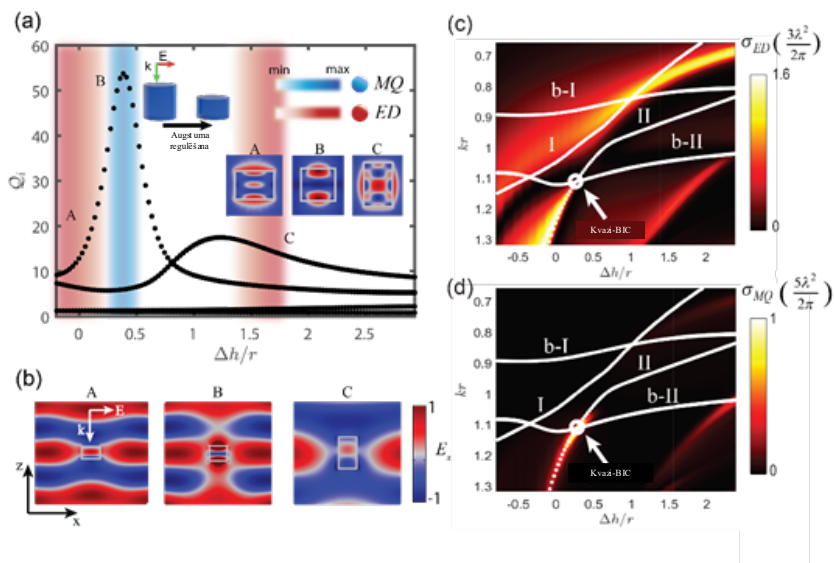
Lai ilustrētu supermultipolus, kas rodas no kvazi-BIC, tika paplašināts $TCMT$ modelis, attiecinot to uz struktūru, kas atbalsta divus QNM , no kuriem katrs ir saderīgs ar vienu izkļiedes kanālu. Lai modelētu subviļņu garuma nanorezonatoru, jāaplūko silīcija nanosfēra gaisā, ko izstaro normāli krītošs, lineāri polarizēts plakans vilnis ar 100 nm rādiusu. Redzamajā diapazonā ir divi kvazinormālie režīmi (QNM), kas atbilst attiecīgi elektriskā dipola (ED) un magnētiskā kvadrupola (MQ) kanāliem. Elektriskā lauka sadalījumi redzami 21. c attēla apakšējā panelī. Izvēlētais izkļiedētājs ir ievērojami zem viļņa garuma, un tā rādiuss ir vismaz piecas reizes mazāks par krītošā viļņa garumu.



21. att. (a) Silīcija nanosfēras (100 nm rādiuss) ED un MQ režīmu rezonanses frekvenču attīstība, ja tiek pārtraukta rotācijas simetrija gar vienu no tās asīm. (b) ED kanāla izkļiedes šķērsgrīzums pie abiem rezonanses maksimumiem kā elipticitātes funkcija, normāli krītoša, lineāri polarizēta plakana viļņa izgaismojumā, kad impulss orientēts gar asi ar pārrautu rotācijas simetriju. (c, d) QNM ietekme uz ED kanāla izkļiedes šķērsgrīzumu sfērā un traucētā sfērā.

Lai savienotu abas QNM , ir nepieciešams kaut kādā veidā pārraut sfērisko simetriju. Vienkāršs veids, kā to izdarīt, ir samazināt rotācijas simetriju plaknē, kas paralēla izplatīšanās virzienam (21. b att.). Šādā gadījumā var savienoties daudzpolārie režīmi ar vienādu paritāti (kā izvēlēto QNM gadījumā) [101]. Tiek gūts ieskats mehānismā, novērtējot katra QNM ietekmi uz ED izkliedes šķērsgriezumu (21. c–d att.). Rekonstrukcija lieliski saskan ar *Mie* teorijas precīzajiem analītiskajiem rezultātiem attiecībā uz lodi (21. c att.) un pilno viļņu skaitlisko simulāciju attiecībā uz elipsoīdu (21. d att.). Svarīgi atzīmēt, ka katra QNM “tiešais” šķērsgriezums pats par sevi nav ierobežots.

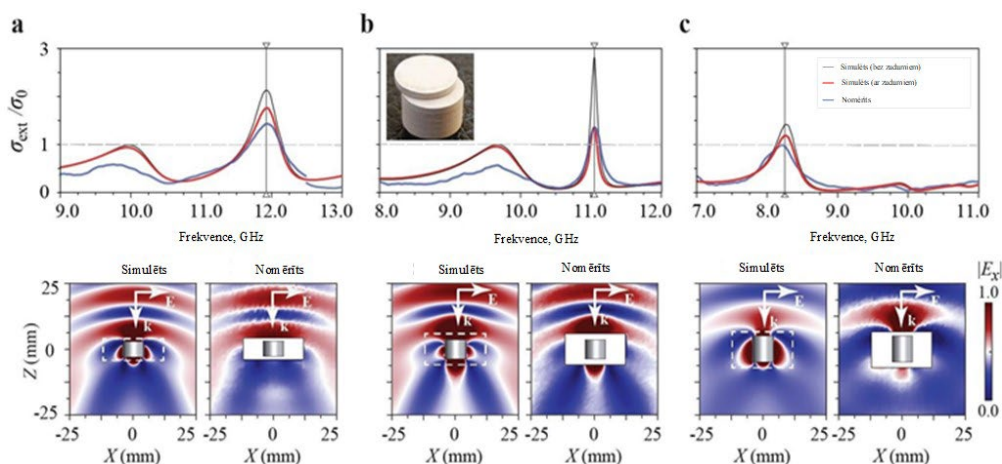
Šis piemērs ilustrē superdipola veidošanos simetriju laužošu traucējumu rezultātā. Tomēr nanoizmēra sferoīdus parasti nav viegli izgatavot. Tā vietā šo režīmu var panākt arī silīcija nanožetonā normāli krītošā apgaismojumā (22. a att.), jo arī tam piemīt cilindriska simetrija. Lai to izdarītu, tika perturbēts rezonatora augstums par Δh , sākot no augstuma $h_0 = 180$ nm, kuram divi režīmi, kas izstaro kā ED un MQ , ir spektrāli tuvi. Sferoīdā tika novērots divu saistītas rezonanses kvazinormālais režīms (QNM) sistēmu ar relatīvi augstu Q koeficientu.



22. att. Superdipola režīma konstrukcija Si nanožetonā. (a) Kvalitāte koeficienti un QNM daudzpolārais izstarojums kā perturbācijas funkcija no cilindra augstuma Δh , normalizēta pēc rādiusa $r = 130$ nm. (b) EX komponente kopējā lauka komponente a) punktā norādītajos superskrituma punktos A–C saskaņā ar a) punktā norādīto x-polarizētu plakano viļņu apgaismojumā (patvaļīgās vienībās). (c)–(d) 2D kartes ar ED un MQ izkliedes šķērsgriezumu kartes kā kr un $\Delta h/r$ funkcija.

Pēc tam tika veikts koncepcijas pārbaudes eksperiments, mikroviļņu diapazonā mērot diska formas rezonatoru izkliedes šķērsgriezumu un izkliedes modeļus. Atkārtototot stieņa ģeometriskos parametrus, izmantojot keramikas rezonatoru komplektu ar fiksētu 4,0 mm rādiusu un permititāti $\epsilon = 22$ ar zuduma tangenci 0,001. Kā redzams 23. b attēlā, trīs paraugi tika samontēti no vairākiem diskām, lai iegūtu vēlamās proporcijas rezonatoriem. Gan kopējā izkliedes šķērsgriezuma, gan elektriskā tuvā lauka modeļu mērījumu rezultāti redzami

23. attēlā. Spektri ir normalizēti, pamatojoties uz ED viena kanāla robežu. Eksperimentālie mērījumi ir samērā labi saskaņoti ar skaitliskajām simulācijām, lai gan rezonanses šķiet apslāpētas materiāla zudumu dēļ keramikā. Tā kā rezonanses sarkanā nobīde mainās palielinoties izmēram, novērojumi tika veikti plašā frekvenču diapazonā. Izceltajās frekvencēs 23. a un c attēlā tika novērotas plašas rezonanses ar lielām ekstinkcijas vērtībām, kas raksturīgas ierosinātajiem superdipola režīmiem. Patiešām plakanais vilnis ir stipri izkropļots tuvajā laukā. Turklāt skaitliskie aprēķini apstiprina, ka ED pārsniedz savu robežu, pat ja ņem vērā zudumus. Kvazi- BIC parādās pie sagaidāmās vērtības $\Delta h/r = 0,48$, kas izpaužas kā ass maksimums spektros (23. b att.). Iegūtie rezultāti ir eksperimentāls pierādījums tam, ka ir iespējams kontrolēt gan Q koeficientu, gan izkliedēto jaudu starp divām rezonansēm, lai sasniegtu supersatricēšanas režīmu tikai ar vienu režīmu.

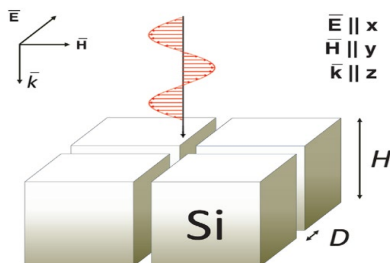


23. att. Modelētie un izmērītie kopējās ekstinkcijas šķērs griezumi un izkliedētā elektriskā tuvā lauka modeļi. Visi šķērs griezumi ir normalizēti pēc ED viena kanāla robežas. Ielaidumos parādīts eksperimentālā rezonatora un elektriskā lauka normas piemērs rezonanses x - z plaknē, kas augšējos grafikos norādītas ar vertikālām līnijām. Baltie reģioni tuvā lauka diagrammās atbilst fiziski nepieejamām zonām, kurās rezonanses mērījumiem. Disku malu attiecība ir šāda: (a) $\Delta h/r = 0,25$; (b) $\Delta h/r = 0,475$; (c) $\Delta h/r = 1,25$.

Tika demonstrēti jauni superizkliedes režīmi, izmantojot zemviļņa garumu, nesfēriskus rezonatorus un divu rezonansu spēcīgo sasaisti. Rezultāti liecina par superizkliedi, ko rada elektriskais superdipola moments, kas gandrīz divas reizes pārsniedz patlaban noteikto robežu. Pārkāpjot kvazi- BIC nosacījumu rezonatoros bez sfēriskās simetrijas, mainot parametrus, enerģijas apmaiņa starp izkliedes kanāliem ļauj manipulēt ar Q faktoru un daudzpolu saturu, vienlaikus saglabājot lielu izkliedes šķērs griezumu. Supermultipolārās rezonanses uzrāda uzlabotu izturību pret omiskiem zudumiem, salīdzinot ar parastajiem analogiem. Šiem rezultātiem ir nozīme biosensoros [102], [103], enerģijas savākšanā [104–106], mikroshēmās [107] un optiskā manipulācijā [108–109].

2.7. Magnētiskā oktopola optiskās īpašības silīcija kvadrumeros

Mūsdienu nanofotonikā izšķiroša nozīme ir jaunu pieeju izstrādei vienkāršu visu dielektrisko nanostruktūru rezonanses magnētiskās reakcijas regulēšanai. Šajā nodaļā autors parāda, ka rezonanses magnētiskā oktopola (*MOCT*) reakciju var panākt, sadalot cietu taisnstūrveida silīcija bloku kvadrumera struktūrā, ieviešot šauras spraugas starp četriem nanokubiem, kā arī izmanto vadāmu rezonanses *MOCT* ierosmi, lai pielāgotu magnētiskos karstos punktus un rezonanses enerģijas absorbciju.

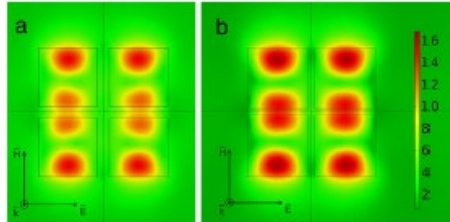


24. att. Silīcija kubu kvadrumera mākslinieciskais attēlojums.

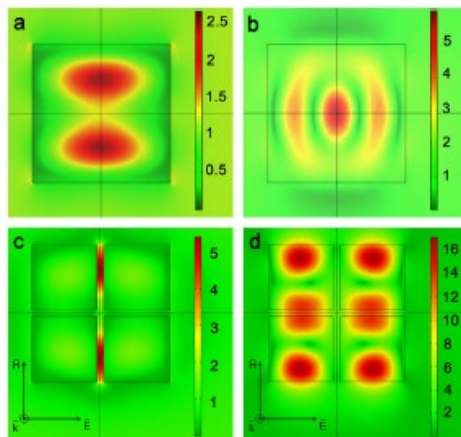
Aplūkojamās sistēmas ietver silīcija bloku, kura izmēri ir $500 \text{ nm} \times 500 \text{ nm} \times 250 \text{ nm}$, kas attēlo nulles attālumu starp silīcija kubiem (24. att.) un silīcija kvadrumeru, kas sastāv no četriem Si kubiem ($250 \text{ nm} \times 250 \text{ nm} \times 250 \text{ nm}$) ar attālumiem starp tiem $D = 25 \text{ nm}, 50 \text{ nm}$ un 100 nm . Materiālu dati par silīciju ir ņemti no [110]. Lai izpētītu spektrālās rezonanses izkliedes šķērsriezumus, tika izmantots daudzpolu dekompozīcijas paņēmieni, kas demonstrē labu sniegumu visos aplūkotajos gadījumos (25.–27. att.).

Šo efektu ir iespējams izmantot, lai izstrādātu magnētiskos komutatorus nanomērogā. Svarīgi detalizēti iedziļināties pārdomātā procesa fizikā. 26. a, c attēlā redzama elektriskā lauka x komponenta absolūtā vērtība (ex) attiecīgi cietajā blokā un kvadrumerā. Pēc Maksvela vienādojumiem oligomēra struktūrā elektriskā lauka pastiprinājums parādās šķēļumos gar incidenta viļņa polarizāciju normālās komponentes pārtraukuma dēļ. Savukārt 26. b un d attēlā redzama magnētiskā lauka y komponenta (Hy) absolūtā vērtībā un magnētiskā lauka izšķirošā pārdale strukturēšanas dēļ. Tas rada sešas dažādas lauka koncentrācijas zonas kvadrumera struktūrā, veidojot magnētisko oktopola tuvējā lauka shēmu. Magnētiskajam laukam nav pārtraukumu spraugās gar Hy ($\mu = 1$ abos datu nesējos), tāpēc magnētiskie karstie punkti notiek arī starp kubiem. Papildus magnētiskā lauka pastiprināšanai *MOCT* rezonanse var nodrošināt spēcīgu elektromagnētisko absorbciju kvadrumerā. 26. a attēlā redzams absorbētās jaudas salīdzinājums λ starp 850 nm un 900 nm cietā silīcija blokam un kvadrumeram ar attālumu $D = 25 \text{ nm}$ starp kubiem. 26. b attēlā redzams pierādījums, ka atklātais enerģijas absorbcijas maksimums spektrāli atbilst *MOCT* rezonansei. Vērts atzīmēt, ka šajā spektrālajā diapazonā dabiskā gaisma absorbcija ar silīciju ir neliela. Tāpēc gaisma spraugas kvadrumera struktūrā izraisa spēcīgu silīcija absorbciju, neskatoties uz tā ļoti mazo IM ($n \approx 0,08$). 26. c redzams salīdzinājums elektrisko lauku silīcija bloka iekšpusē un kvadrumera struktūrā. Skaidrs, ka rezonējošā magnētiskā oktopola reakcija rada spēcīgas elektriskā lauka koncentrācijas un līdz

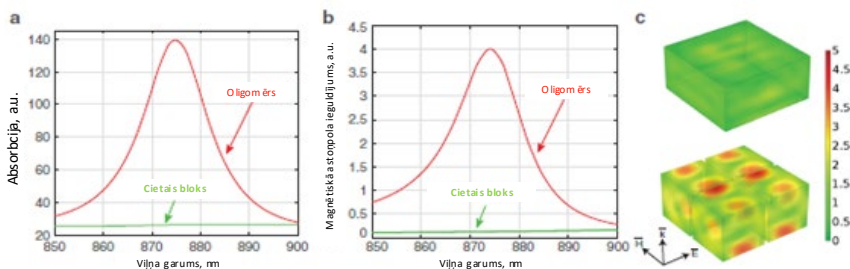
ar to rezonējošo absorbciju silīcija kvadrumerā. *MOCT* rezonanses spektrālo pozīciju un līdz ar to absorbcijas maksimuma pozīciju var mainīt, mainot attālumu starp kubiem. Šādu regulējamu absorbciju var plaši izmantot, lai kontrolētu enerģijas koncentrāciju ar dielektriskām konstrukcijām un projektētu modernas optiskās ierīces.



25. att. Normalizētā magnētiskā lauka sadalījums silīcija kvadrumera plaknē (xy) ($z = 0$) ar a) $D = 50$ nm, $\lambda = 863$ nm; b) $D = 25$ nm, $\lambda = 874$ nm. Krāsu josla abiem attēliem ir vienāda.



26. att. A, c) H_x ; b, d) H_y absolūtā vērtība; a, b) cietā silīcija blokā; c, d) silīcija kvadrumerā ar $D = 25$ nm pie $\lambda = 874$ nm.



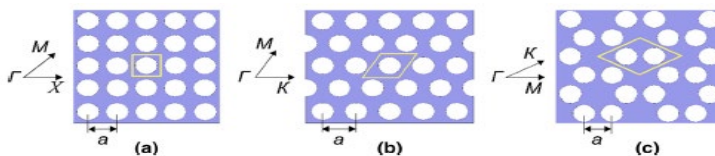
27. att. A) Absorbcijas jaudas; b) *MOCT* ieguldījuma izkliedes šķērs griezumā spektri, kas aprēķināti vienam silīcija blokam ar augstumu $H = 250$ nm un pamatnes malu 500 nm (zaļās līnijas) un silīcija kubu kvadrumeram ar attālumu starp kubiem $D = 25$ nm (sarkanās līnijas). Absorbcijas maksimums strukturā nepārprotami atbilst *MOCT* momenta rezonanses ierosmei. c) Normalizēts elektriskais lauks cietā bloka iekšpusē (augšpusē) un kvadrumerā (apakšā) pie $\lambda = 874$ nm. Var redzēt, ka rezonanses *MOCT* reakcija nodrošina spēcīgu elektriskā lauka koncentrāciju, kas rada rezonanses absorbciju silīcija kvadrumerā.

3. REĀLI LIETOJUMI UN EKSPERIMENTĀLIE REZULTĀTI

3.1. Makroporaino fonisko kristālu struktūras izmantošanai *FBAR*

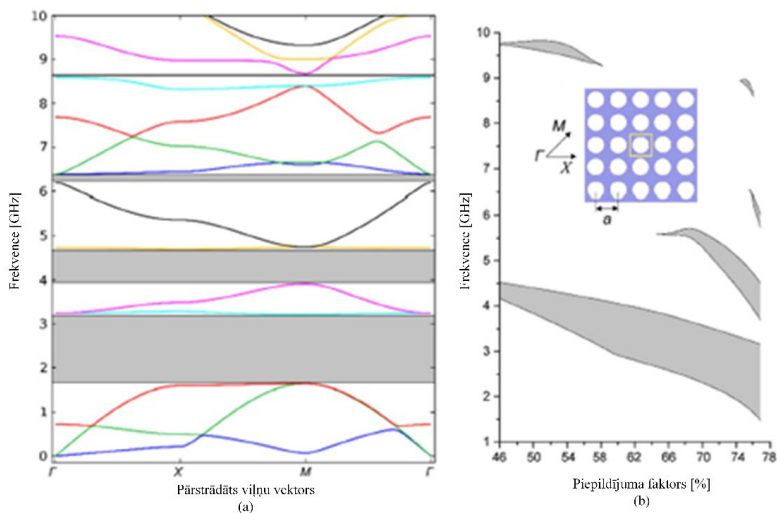
Šajā nodaļā apskatīti optimālākie periodisko konstrukciju projektēšanas risinājumi, ņemot vērā konstrukciju izgatavošanas tehnoloģiskos aspektus. Pētījums veikts ar galīgo elementu metodes palīdzību, izmantojot programmatūru *COMSOL Multiphysics FEM*. Galvenā prasība ir tāda, ka periodiskajai struktūrai ir jābūt joslas spraugām vairākos pārslēdzamā *FBAR* frekvenču reģionos. Darbs ir vērsts uz periodisku konstrukciju projektu apsvēršanu, kas ir tehnoloģiski sasniedzami submikrometru izmēriem, izmantojot standarta mikrofabrikas pieejas. Tāpēc tiek piedāvāta makroporainu struktūru izmantošana. Makroporainu silīcija konstrukciju var izgatavot, izmantojot standarta maskētu elektroķīmisko kodināšanu ar struktūras dizainu, ko iepriekš nosaka fotolitogrāfija.

Darba gaitā autors atradis optimālus risinājumus dažādas simetrijas poru izkārtojumiem, kas tiek pabeigti kā ar gaisu piepildītu cilindrisku ieslēgumu masīvi silīcija pamatmateriālā. Šim pētījumam tika izmantoti 2D kvadrātveida, trīsstūrveida un šūnveida caurumu izkārtojumi, kā redzams 28. attēlā.



28. att. Kvadrātveida (a), trīsstūrveida (b) un šūnveida (c) cilindrisku caurumu izvietojums silīcija pamatmateriālā un izplatīšanās virzieni 2D fononiskajiem kristāliem.

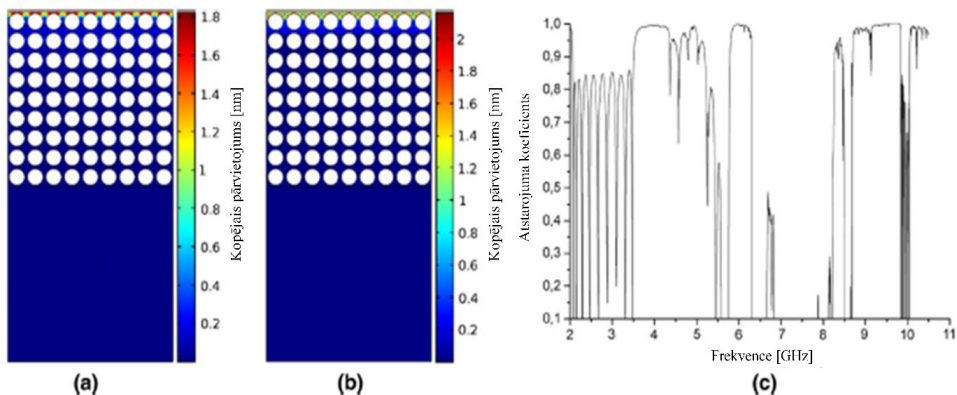
Uz silīcija bāzes veidotās porainās mākslīgās periodiskās struktūras tika modelētas kā ar gaisu pildītu cilindru bloki trīs dažādiem simetrijas gadījumiem. Šāds izkārtojums tiek iegūts, pārvēršot vienības šūnas katram gadījumam, kā redzams 28. attēlā. Tiek pieņemts, ka cilindri ir paralēli z asij; tādējādi šajā pētījumā tiek ņemti vērā tikai elastīgie viļņi, kas izplatās x - y plaknē. Kvadrātveida 2D struktūrām nesamazināmā Briljuina zona aptver no C līdz X līdz M un atpakaļ līdz C . Joslu diagrammas aprēķina rezultāti bezgalīgam periodiskam izvietojumam ar režģa konstanti $0,94 \mu\text{m}$, kvadrātveida simetriju un caurumu aizpildīšanas koeficientu 76% redzami 29. a attēlā. Aizpildījuma koeficients ir definēts kā caurumu laukuma procentuālā attiecība uz šūnas kvadrāta vienību. Absolūto joslas spraugas robežu atkarība no aizpildījuma koeficienta redzama 29. b attēlā.



29. att. Joslu diagramma poru silīcija bezgalīgā kvadrātveida izkārtojumam, piepildījuma koeficients 76 % (a) un absolūto joslu atstarpju platuma atkarība no piepildījuma koeficienta (b) fiksētai režģa konstantes vērtībai 0,94 μm .

Kā redzams 29. b attēlā, skaitļošanas rezultāti parāda frekvenču joslu atšķirības atkarībā no aizpildījuma faktora. Rezultāti liecina, ka caurumu diametra palielināšana vienai un tai pašai režģa konstantei rada zemfrekvences joslas spraugas paplašināšanos un augstākas frekvences apturēšanas joslu rašanos. Tajā pašā laikā ir redzams, ka salīdzinoši šaura augstfrekvences joslas sprauga, kas ir sastopama zemiem aizpildīšanas faktoriem, pilnībā izzūd, palielinoties caurumu diametram. Jāpiemin, ka pie salīdzinoši augsta aizpildījuma koeficienta kvadrātveida simetrijas izkārtojumam ir plaša pilnīga joslas sprauga zemākā frekvenču diapazonā un šaurāka joslas sprauga augstākās frekvencēs, kas ir izdevīgi pārslēdzamām *FBAR* lietojumprogrammām. Nobīdes bīdes komponentes strukturālās atstarošanas nobīdes sadalījums un frekvences atkarības analīze redzama 30. attēlā. Salīdzinot ar pilnu *FBAR* struktūru, simulācijas modelis ir jāpaplašina, iekļaujot augšējos un apakšējos elektrodus ar pjezoelektrisko plēvi. Tomēr, lai vienkāršotu aprēķinus un iegūtu rezultātus, kas nosaka periodiskās struktūras uzvedību atsevišķi no pjezoelektriskās plēves, modelis tika samazināts līdz noteiktajai bīdes nobīdei pie paredzamā *FBAR* reflektora robežas. Atšķirībā no vienkāršotā modeļa ierobežotā *FBAR* struktūra tiks paplašināta, iekļaujot tajā pjezoelektrisko slāni un noteiktu izmēru elektrodus.

Trīsstūrveida izkārtojuma skaitļošanas rezultāti parāda iespēju sasniegt vairākas relatīvi šauras joslas spraugas ar augstu aizpildīšanas koeficientu. No praktiskā viedokļa šis izkārtojums nav optimāls, jo sasniedzamās joslas spraugas ir salīdzinoši šauras lietojumprogrammām, kurām nepieciešamas vairākas darbības joslas un kas atbalsta frekvenču pārslēgšanu ļoti ierobežotos reģionos.



30. att. Ar gaisu pildītu cilindru kvadrātveida izvietojuma simulācijas rezultāti silīcija matricā (pildījuma koeficients 54 %). Struktūras nobīdes sadalījums, kas ierosināts ar bīdes nobīdi, kas piemērota struktūras augšējai robežai ar frekvenci 4 GHz (a) un 9,5 GHz (b), un struktūras atstarošanas koeficients.

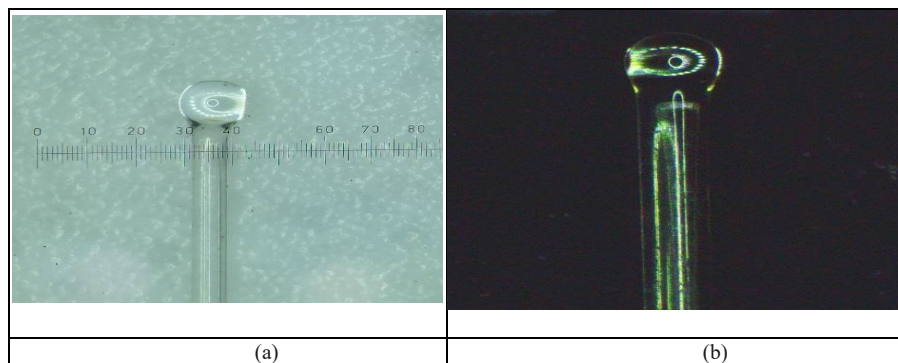
Iegūtie rezultāti liecina, ka, palielinot struktūras viļņa garumu, joslas spraugas tiek novirzītas uz zemākas frekvences reģioniem, kā paredzēts. Šajā darbā autors prezentē teorētisko pētījumu rezultātus, kas vērsti uz fononisko struktūru tehnoloģiski konkurētspējīgu risinājumu izpēti *FBAR* ierīču veiktspējas uzlabošanai un piedāvā apsvērt izveidoto tehnoloģisko platformu makroporainu struktūru izgatavošanai kā pieeju, kas ļauj realizēt fononiskus akustiskos reflektorus *FBAR SMR* ierīcēm un pētīt atbilstošus periodisko struktūru risinājumus, izmantojot skaitliskās metodes. Tika konstatēts, ka šūnveida izkārtojums ir visizdevīgākais frekvenču diapazona veiktspējas ziņā, kam vajadzētu ļaut *FBAR* struktūrām darboties plašā frekvenču diapazonā. Pabeigtais darbs ir pirmais solis ceļā uz fotonisku kristālu bāzes *FBAR* ierīču izgatavošanu.

3.2. Mikrosfēru modelēšana un raksturojums ar sudraba molekulārajām kopām sensoru lietojumiem

Šajā apakšnodaļā apskatītas sudraba molekulu kopas saturošas mikrosfēras uzlabotiem sensoriem. Šīs mikrosfēras tiek sintezētas jonu apmaiņas procesā ar sudraba nitrātu un nātrija nitrātu, radot unikālas optiskās īpašības. Simulācija parāda pastiprinātu starojuma mijiedarbību paplašinātā pamata režīma izplatīšanās dēļ. Šis pētījums pēta luminiscenci redzamajā diapazonā (400–600 nm), kad to ierosina gara viļņa garuma UV gaisma (360–410 nm), piedāvājot sensoru lietojumu potenciālu. Šīs mikrosfēras tiek izmantotas vides noteikšanai (piesārņojošo vielu noteikšana), biomedicinā (zāļu piegāde, bioattēlveidošana) un rūpniecisko procesu uzraudzībā.

Lai izveidotu silikāta stikla mikrosfēras, tika izmantots stikls. Ražošanas process ietvēra vairākus posmus. Sākotnēji tika izveidota plāna šķiedra, pēc tam – veidotas mikrosfēras, izkausējot šķiedras galu, izmantojot propāna liesmu. Pēc tam mikrosfēras tika pakļautas zemas temperatūras jonu apmaiņas (*LTIE*) procesam.

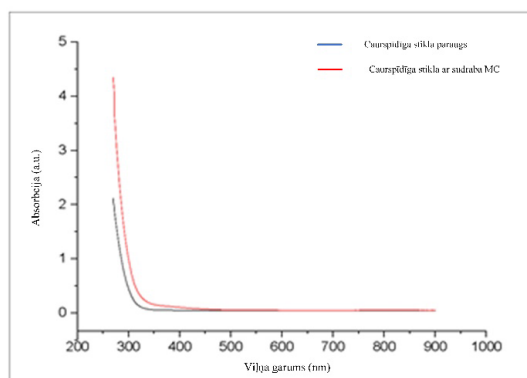
31. attēlā redzamas iegūto paraugu fotogrāfijas. Proti, mazākā parauga diametrs, ko var iegūt, izmantojot aprakstīto metodi, bija 200 mikroni.



31. att. Iegūtie mikrosfēras paraugi: (a) mikrosfēra ar diametru 380 μm ; b) mikrosfēra ar diametru 200 μm .

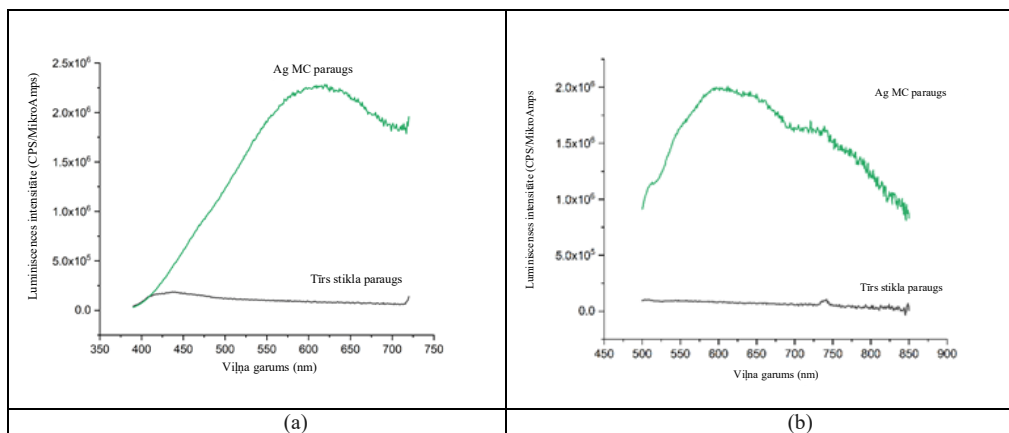
Comsol Multiphysics tika izmantots, lai noteiktu rezonatora rezonanses frekvences un pamata režīmus. Ar *LTIE* metodi sintezētu silikātstikla sudraba molekulāro klasteru īpašību izpēte ietvēra gan absorbcijas mērījumus, gan luminiscences spektru mērījumus. Absorbcijas mērījumi tika veikti liecinieku paraugiem, izmantojot UV-VIS spektrofotometru (*PB 2201*). Luminiscences spektra iegūšanas mērījumi tika veikti, izmantojot *Fluorolog®-3* instrumentu ar *FluorEssence™* (ražotājs: *HORIBA Jobin Yvon SAS*, Francija). Visiem luminiscences mērījumiem integrācijas laiks bija 0,1 s.

Tika veikts eksperiments, lai izmērītu to stikla paraugu absorbciju, kuriem tika veikta zemas temperatūras jonu apmaiņa (*LTIE*), kā arī caurspīdīgiem stikla paraugiem, kas netika pakļauti *LTIE* apstrādei. Iegūtais spektrs redzams 32. attēlā. Konkrēti, paraugu absorbcijas spektram pēc *LTIE* procesa trūkst raksturīgu absorbcijas maksimumu. Šis trūkums ir saistīts ar faktu, ka pie tiem pašiem procesa parametriem, ko izmanto apstrādē, pārsvarā veidojas sudraba molekulārās kopas, piemēram, $\text{Ag}_2\text{...}_5$ [111].



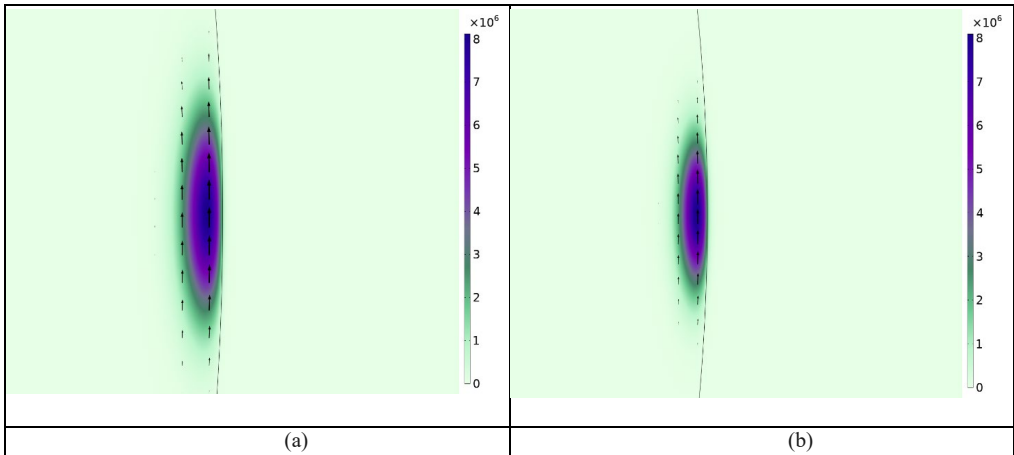
32. att. Stikla paraugu izmērītie absorbcijas spektri.

33. attēlā redzami luminiscences intensitātes mērīšanas rezultāti. Ierosinot 370 nm un 390 nm viļņu garumu, visu sintezēto stiklu luminiscences spektros redzamajā spektrā ir plaša luminiscences josla. Šī platjoslas luminiscence, kas aptver no 500 nm līdz 900 nm, atbilst emisijai, kas rodas no neliela daudzuma sudraba mikrokristālu, kas veidojas tieši *LTIE* procesa laikā [112]. Lai radītu molekulāros klasterus (*MC*), ir obligāti jāsamazina sudraba joni līdz to atomu stāvoklim. Šī transformācija *LTIE* procesa laikā rada noteikta daudzuma sudraba mikrokristālu veidošanos, tādējādi radot vāju luminiscenci visā redzamajā diapazonā.



33. att. Luminiscences intensitāte: a) pirmais paraugs, λ_{exc} 370 nm; b) otrais paraugs, λ_{exc} 390 nm.

Simulētajām mikrosfērām bija 100 μm rādiuss. *LTIE* procesa laikā ar sudrabu stikls maina laušanas koeficientu no 1,585 virspusē uz 1,515. Simulētajai mikrosfērai bija gradienta refrakcijas indekss no malas līdz centram. Lai izpētītu šī materiāla potenciālu, tika veiktas mikrosfēru simulācijas gaisā un ūdenī. 34. attēlā redzams elektromagnētiskā lauka sadalījums mikrodobuma šķērsriegzumā gaisā (a) un ūdenī (b). Tika noteikts rezonanses viļņa garums mikrorezonatora pamatrežimam pie luminiscences maksimuma. Mikrosfērai gaisā pamata *TE* režīma rezonanses viļņa garums ar azimuta skaitli 1608 bija 600,988 nm. Mikrosfērai ūdenī pamata *TE* režīma rezonanses viļņa garums ar azimuta skaitli 1608 bija 601,294 nm. Atšķirība starp rezonanses viļņu garumiem bija 0,25 nm.



34. att. Fundamentālā režīma lokalizācija: (a) mikrosfēra gaisā; b) mikrosfēra ūdenī.

Šī pētījuma rezultātā tika iegūts jauns materiāls, kas ir piemērots lietošanai bez etiķetes sensoros ar aktīviem *WGM* rezonatoriem. Šo materiālu ir ļoti vienkārši iegūt, un tas ir ekonomiski izdevīgs. Eksperiments parādīja, ka stikla paraugiem, kas pakļauti zemas temperatūras jonu apmaiņai (*LTIE*), ir atšķirīgas absorbcijas īpašības, īpaši raksturīgu absorbcijas maksimumu trūkums, kas tika attiecināts uz sudraba $\text{Ag}_{2...5}$ molekulāro kopu veidošanos. Luminiscences mērījumi parādīja plašu emisijas joslu redzamajā spektrā, īpaši 500–900 nm diapazonā, apstiprinot sudraba mikrokristālu veidošanos *LTIE* procesa laikā. Saskaņā ar simulācijas rezultātiem rezonanses viļņu garumu atšķirība starp vidēm ar dažādiem refrakcijas rādītājiem bija 0,26 nm. Tas ļauj materiālu izmantot mikrosfēras sensoriem, neprasot tiešu fizisku savienojumu. Iegūtie rezultāti parāda nātrija-kaļķa silikāta stikla ar molekulāro sudraba klasteriem potenciālu kā materiālu čukstu galerijas režīma (*WGM*) sensoriem.

SECINĀJUMI

Šajā promocijas darbā ir sniegti teorētiski paredzējumi un praktiski apstiprinājumi iepriekš neizpētītiem nesatricinošiem režīmiem, jo īpaši hibrīdanapoliem. Šiem režīmiem nepieciešama vienlaicīga elektrisko un magnētisko multipolu interference. Iegūtie rezultāti paver ceļu no substrāta neatkarīgu metavirsmu ar dubulto funkcionalitāti izstrādei, kā arī pieejai ultraātrai modulācijai. Turklāt pētījums par spin-orbitālo leņķiskā impulsa pārveidošanu ir pavēris jaunas un aizraujošas iespējas šķidrums virziena navigācijai mikroshēmā un nanomēroga šķidrums manipulācijām. Kontrolētas šķidrums plūsmas un izmēru atdalīšana mikrofluidiskās sistēmās ir iespējama, izmantojot dielektrisko nanoantenu optiskās īpašības un krītošās gaismas izraisīto dinamiku. Turklāt, pētot impulsu izplatīšanos rezonanses daudzslāņu barotnēs ar traucējumu sadalījumu, ir atklāti pārejoši procesi un režīmi, kas nodrošina elastīgu barotnes optiskās reakcijas kontroli.

Šie rezultāti ir potenciāli izmantojami, ja ir ļoti svarīgi kontrolēt ultraātro impulsu atstarošanas, pārraides un izplatīšanās attiecību nanomateriālos. Turklāt tika demonstrēta jauna metode bezkontakta temperatūras un difūzijas mērījumiem, izmantojot *Purcell* efektu fosforescējošās molekulās pie nanoantennām. Šī metode ir potenciāli izmantojama mikrofluidikā un laboratorijās uz mikroshēmas. Subviļņu garuma nesfēriskie rezonatori tiek izmantoti, lai pētītu superizkliedes režīmus, uzsverot multipolāro rezonāncu pastiprināšanu, kam ir plašs lietojuma potenciāls, sākot no biosensoriem līdz enerģijas savākšanai, mikroshēmām un optiskām manipulācijām. Izpratne par šķērsvirziena optisko sasaisti ap hiperboliskiem metamateriāliem sniedz vērtīgu ieskatu progresīvās optomehāniskajās manipulācijas metodēs, ko virza augstas kvantitātes tilpuma režīmi. Daudzkārtējus atstarojumus no robežām veicina plānas metamateriāla plātnes, kā rezultātā rodas ļoti lokalizēti karstie punkti ar ievērojamiem intensitātes gradientiem.

Kopumā šī pētījuma rezultāti veicina nanofotonikas attīstību, atklājot jaunas optiskās parādības, vienkāršojot radošu sistēmu un ierīču projektēšanu un paverot iespējas plašam lietojumam dažādās jomās. Šie rezultāti nodrošina stabilu pamatu turpmākajiem pētījumiem un attīstībai ultraātras zemviļņu garuma optikas un ar to saistītās jomās, jo šī disciplīna attīstās.

LITERATŪRAS SARAKSTS

1. S. M. Kamali, E. Arbabi, A. Arbabi, and A. Faraon “A review of dielectric optical metasurfaces for wavefront control” *Nanophotonics*, vol. 7, no. 6, 2018, pp. 1041–1068, DOI: <https://doi.org/10.1515/nanoph-2017-0129>.
2. L. Khriachtchev, (2016). *Silicon Nanophotonics: Basic Principles, Present Status, and Perspectives*, Second Edition, Jenny Stanford Publishing, DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315364797>.
3. S. Jahani, Z. Jacob, “All-dielectric metamaterials,” *Nature Nanotech* 11, 23–36 (2016), DOI: <https://doi.org/10.1038/nnano.2015.304>.
4. P. Rufangura, T. Folland, A. Agrawal, J. Caldwell, F. Lacopi “Towards low-loss on-chip nanophotonics with coupled graphene and silicon carbide: a review,” *Journal of Physics: Materials* 3, 2020, DOI: 10.1088/2515 7639/ab9d10.
5. R. S. Savelev, D. S. Filonov, M. I. Petrov, A. E. Krasnok, P. A. Belov, Y. S. Kivshar, “Resonant transmission of light in chains of high-index dielectric particles,” *Physical Review B*, 2015, 92 (15), pp. 1–5, 2015, DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.92.155415>.
6. R. Savelev, D. Filonov, P. Kapitanova, A. Krasnok, A. Miroshnichenko, P. Belov, Y. S. Kivshar, “Bending of electromagnetic waves in all-dielectric particle array waveguides,” *Applied Physics Letters*. 105., (2014), DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4901264>.
7. O. Limon, L. Businaro, A. Gerardino, O. Bitton, A. Frydman, Z. Zalevsky, “Fabrication of electro optical nano modulator on silicon chip,” *Microelectronic Engineering* 86, 1099–1102, (2009), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mee.2009.01.007>.
8. A. E. Krasnok, A.E. Miroshnichenko, P. A. Belov, Y. S. Kivshar, “All-dielectric optical nanoantennas,” *Opt. Express* 20, 20599–20604 (2012).
9. J. Henry, J. Livingstone, “Thin-Film Amorphous Silicon Position-Sensitive Detectors,” *Advanced Materials* 13, (2001), 1022–1026, DOI: [https://doi.org/10.1002/1521-4095\(200107\)13:12<1330::CO;2-I](https://doi.org/10.1002/1521-4095(200107)13:12<1330::CO;2-I).
10. A. M., Miroshnichenko, A. E., Shadrivov, I. V. Shadrivov, Y. S. Kivshar, “All-Dielectric Multilayer Cylindrical Structures for Invisibility Cloaking,” *Sci Rep* 5, (2015), DOI: <https://doi.org/10.1038/srep09574>.
11. W. T. Chen, A.Y. Zhu, F. Capasso, “Flat optics with dispersion-engineered metasurfaces,” *Nat Rev Mater* 5, 604–620, (2020), DOI: <https://doi.org/10.1038/s41578-020-0203-3>.
12. D. Lin, P. Fan, E. Hasman, M. L. Brongersma, “Dielectric gradient metasurface optical elements,” *Science*, 2014 Jul 18; 345(6194):298-302, DOI: 10.1126/science.1253213.
13. E. Nazemosadat, M. Mazur, S. Kruk, I. Kravchenko, J. Carpenter, J. Schröder, P. Andrekson, M. Karlsson, Y. S. Kivshar, “Dielectric Broadband Metasurfaces for Fiber Mode-Multiplexed Communications,” *Advanced Optical Materials*. 7, (2019), DOI: <https://doi.org/10.1002/adom.201801679>.
14. J. Yan, J., Liu, X., Ma, C., Huang, Y., Yang, G., “All-dielectric materials and related nanophotonic applications”, (2020) *Materials Science and Engineering R: Reports*, 141, art. no. 100563.

15. Kamali, S.M., Arbabi, E., Arbabi, A., Faraon, A., “A review of dielectric optical metasurfaces for wavefront control”, (2018) *Nanophotonics*, 7 (6), pp. 1041-1068.
16. M. L. Brongersma, “The road to atomically thin metasurface optics”, *Nanophotonics* 10, 643–654 (2020).
17. D. G. Baranov, D. A. Zuev, S. I. Lepeshov, O. V. Kotov, A. E. Krasnok, A. B. Evlyukhin, and B. N. Chichkov, “All-dielectric nanophotonics: the quest for better materials and fabrication techniques” *Optica* 4, 814-825 (2017).
18. S. Liu, M. B. Sinclair, S. Saravi, G. A. Keeler, Y. Yang, J. Reno, G. M. Peake, F. Setzpfandt, I. Staude, T. Pertsch, and I. Brener, “Resonantly enhanced second-harmonic generation using III-V semiconductor all-dielectric metasurfaces”, *Nano Lett.* 16, 5426–5432 (2016).
19. R. S. Savelev, D. S. Filonov, P. V. Kapitanova, A. E. Krasnok, A. E. Miroshnichenko, P. A. Belov, and Y. S. Kivshar, “Bending of electromagnetic waves in all-dielectric particle array waveguides”, *Appl. Phys. Lett.* 105, (2014).
20. R. M. Bakker, Y. F. Yu, R. Paniagua-Domínguez, B. Luk’yanchuk, and A. I. Kuznetsov, “Resonant light guiding along a chain of silicon nanoparticles”, *Nano Lett.* 17, 3458–3464 (2017).
21. Y. H. Fu, A. I. Kuznetsov, A. E. Miroshnichenko, Y. F. Yu, and B. Luk’yanchuk, “Directional visible light scattering by silicon nanoparticles”, *Nat. Commun.* 4, 1527 (2013).
22. K. Chen, Y. Feng, F. Monticone, J. Zhao, B. Zhu, T. Jiang, L. Zhang, Y. Kim, X. Ding, S. Zhang, A. Alù, and C. W. Qiu, “A Reconfigurable Active Huygens' Metalen”, *Adv. Mater.* 29, 1–7 (2017).
23. K. Koshelev, S. Kruk, E. Melik-Gaykazyan, J. H. Choi, A. Bogdanov, H. G. Park, and Y. Kivshar, “Subwavelength dielectric resonators for nonlinear nanophotonics”, *Science* (80-.). 367, 288–292 (2020).
24. A. S. Shalin, “Microscopic theory of optical properties of composite media with chaotically distributed nanoparticles”, *Quantum Electron.* 40, 1004–1011 (2010).
25. P. M. Voroshilov, C. R. Simovski, P. A. Belov, and A. S. Shalin, “Light-trapping and antireflective coatings for amorphous Si-based thin film solar cells”, *J. Appl. Phys.* 117, (2015).
26. Y. Cui, D. van Dam, S. A. Mann, N. J. J. van Hoof, P. J. van Veldhoven, E. C. Garnett, E. P. A. M. Bakkers, and J. E. M. Haverkort, “Boosting solar cell photovoltage via nanophotonic engineering”, *Nano Lett.* 16, 6467–6471 (2016).
27. P. D. Terekhov, K. V. Baryshnikova, Y. Greenberg, Y. H. Fu, A. B. Evlyukhin, A. S. Shalin, and A. Karabchevsky, “Enhanced absorption in all-dielectric metasurfaces due to magnetic dipole excitation”, *Sci. Rep.* 9, 3438 (2019).
28. J. Algorri, D. Zografopoulos, A. Ferraro, B. García-Cámara, R. Vergaz, R. Beccherelli, and J. Sánchez-Pena, “Anapole modes in hollow nanocuboid dielectric metasurfaces for refractometric sensing”, *Nanomaterials* 9, 30 (2018).
29. S. Jahani, and Z. Jacob, “All-dielectric metamaterials”, *Nat. Nanotechnol.* 11, 23–36 (2016).
30. H. K. Shamkhi, K. V. Baryshnikova, A. Sayanskiy, P. Kapitanova, P. D. Terekhov, P. Belov, A. Karabchevsky, A. B. Evlyukhin, Y. Kivshar, and A. S. Shalin, “Transverse Scattering

and Generalized Kerker Effects in All-Dielectric Mie-Resonant Metaoptics”, *Phys. Rev. Lett.* 122, 193905 (2019).

31. D. Wang, Q. Fan, J. Wang, Z. Zhang, Y. Liang, and T. Xu, “All-dielectric metasurface beam deflector at the visible frequencies”, *Guangdian Gongcheng/Opto-Electronic Eng.* 44, 103–107 (2017).

32. P. Grahn, A. Shevchenko, and M. Kaivola, “Electromagnetic multipole theory for optical nanomaterials”, *New J. Phys.* 14, (2012).

33. R. Alaee, C. Rockstuhl, and I. Fernandez-Corbaton, “An electromagnetic multipole expansion beyond the long-wavelength approximation”, *Opt. Commun.* 407, 17–21 (2018).

34. A. B. Evlyukhin, T. Fischer, C. Reinhardt, and B. N. Chichkov, “Optical theorem and multipole scattering of light by arbitrarily shaped nanoparticles”, *Phys. Rev. B* 94, 1–7 (2016).

35. R. E. Raab, and O. L. Lange, *Multipole Theory in Electromagnetism* (Oxford Science Publications, New York, n. d.).

36. J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3rd ed. (New York, {NY}, 1999).

37. N. Papasimakis, V. A. Fedotov, V. Savinov, T. A. Raybould, and N. I. Zheludev, “Electromagnetic toroidal excitations in matter and free space”, *Nat. Mater.* 15, 263–271 (2016).

38. V. M. Dubovik, and V. V. Tugushev, “Toroid Moments in Electrodynamics and Solid-State Physics”, *Phys. Rep.* 187, 145–202 (1990).

39. A. T. Góngora, and E. Ley-Koo, “Complete electromagnetic multipole expansion including toroidal moments”, *Rev. Mex. Fis. E* 52, 188–197 (2006).

40. V. A. Fedotov, A. V. Rogacheva, V. Savinov, D. P. Tsai, and N. I. Zheludev, “Resonant Transparency and Non-Trivial Non-Radiating Excitations in Toroidal Metamaterials”, *Sci. Rep.* 3, 1–5 (2013).

41. W. Liu, B. Lei, J. Shi, H. Hu, and A. E. Miroshnichenko, “Elusive Pure Anapole Excitation in Homogenous Spherical Nanoparticles with Radial Anisotropy”, *J. Nanomater.* 2015, 382 (2015).

42. W. Liu, J. Zhang, B. Lei, H. Hu, and A. E. Miroshnichenko, “Invisible nanowires with interfering electric and toroidal dipoles”, *Opt. Lett.* 40, 2293 (2015).

43. J. Tian, H. Luo, Y. Yang, F. Ding, Y. Qu, D. Zhao, M. Qiu, and S. I. Bozhevolnyi, “Active control of anapole states by structuring the phase-change alloy $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ ”, *Nat. Commun.* 10, 1–9 (2019).

44. A. K. Ospanova, I. V. Stenishchev, and A. A. Basharin, “Anapole mode sustaining silicon metamaterials in visible spectral range”, *Laser Photon. Rev.* 12, 1800005 (2018).

45. N. A. Nemkov, A. A. Basharin, and V. A. Fedotov, “Electromagnetic sources beyond common multipoles”, *Phys. Rev. A* 98, 1–9 (2018).

46. E. A. Gurvitz, K. S. Ladutenko, P. A. Dergachev, A. B. Evlyukhin, A. E. Miroshnichenko, and A. S. Shalin, “The high-order toroidal moments and anapole states in all-dielectric photonics”, *Laser Photon. Rev.* 13, 1800266 (2019).

47. S. Gladyshev, K. Frizyuk, and A. Bogdanov, “Symmetry analysis and multipole classification of eigenmodes in electromagnetic resonators for engineering their optical properties”, *Phys. Rev. B* 102, 075103 (2020).

48. E. Takou, A. C. Tasolamprou, O. Tsilipakos, and E. N. Economou, “Dynamic anapole in metasurfaces made of sculptured cylinders”, *Phys. Rev. B* 100, 085431 (2019).
49. G. Grinblat, Y. Li, M. P. Nielsen, R. F. Oulton, and S. A. Maier, “Enhanced Third Harmonic Generation in Single Germanium Nanodisks Excited at the Anapole Mode”, *Nano Lett.* 16, 4635–4640 (2016).
50. T. Shibanuma, G. Grinblat, P. Albella, and S. A. Maier, “Efficient Third Harmonic Generation from Metal–Dielectric Hybrid Nanoantennas”, *Nano Lett.* 17, 2647–2651 (2017).
51. S. V. Makarov, M. I. Petrov, U. Zywiets, V. Milichko, D. Zuev, N. Lopanitsyna, A. Kuksin, I. Mukhin, G. Zograf, E. Ubyivovk, D. A. Smirnova, S. Starikov, B. N. Chichkov, and Y. S. Kivshar, “Efficient Second-Harmonic Generation in Nanocrystalline Silicon Nanoparticle”, *Nano Lett.* 17, 3047–3053 (2017).
52. A. Kaldun, A. Blättermann, V. Stooß, S. Donsa, H. Wei, R. Pazourek, S. Nagele, C. Ott, C. D. Lin, J. Burgdörfer, and T. Pfeifer, “Observing the ultrafast buildup of a Fano resonance in the time domain”, *Science* 354, 738–741 (2016).
53. S. Lepeshov, and A. Krasnok, “Virtual Optical Pulling Force”, *Optica* 7, 1024-1030 (2020).
54. S. A. Maier, M. P. Nielsen, G. Grinblat, Y. Li, and R. F. Oulton, “Efficient third harmonic generation and nonlinear subwavelength imaging at a higher-order anapole mode in a single germanium nanodisk”, *ACS Nano* 11, 953–960 (2016).
55. Z.-J. Yang, Y.-H. Deng, Y. Yu, and J. He, “Magnetic toroidal dipole response in individual all-dielectric nanodisk clusters”, *Nanoscale* 12, 10639–10646 (2020).
56. B. Luk’yanchuk, R. Paniagua-Domínguez, A. I. Kuznetsov, A. E. Miroshnichenko, and Y. S. Kivshar, “Hybrid anapole modes of high-index dielectric nanoparticles”, *Phys. Rev. A* 95, 1–8 (2017).
57. A. K. Ospanova, A. Basharin, A. E. Miroshnichenko, and B. Luk’yanchuk, “Generalized hybrid anapole modes in all-dielectric ellipsoid particles”, *Opt. Mater. Express* 11, 23-34 (2021).
58. E. A. Gurvitz, K. S. Ladutenko, P. A. Dergachev, A. B. Evlyukhin, A. E. Miroshnichenko, and A. S. Shalin, “The high-order toroidal moments and anapole states in all-dielectric photonics”, *Laser Photonics Rev.* 13, 1800266 (2019).
59. W. Yan, R. Faggiani, and P. Lalanne, “Rigorous modal analysis of plasmonic nanoresonators”, *Phys. Rev. B* 97, 205422 (2018).
60. P. Lalanne, W. Yan, K. Vynck, C. Sauvan, and J. P. Hugonin, “Light interaction with photonic and plasmonic resonances”, *Laser Photonics Rev.* 12, 1–38 (2018).
61. M. I. Tribelsky, and A. E. Miroshnichenko, *Phys. Rev. A* 100, 1–5 (2019).
62. O. Ávalos-Ovando, L. V. Besteiro, Z. Wang, and A. O. Govorov, “Temporal plasmonics: Fano and Rabi regimes in the time domain in metal nanostructures”, *ArXiv* 9, 3587–3595 (2020).
63. M. I. Tribelsky, and A. E. Miroshnichenko, “Giant in-particle field concentration and Fano resonances at light scattering by high-refractive-index particles”, *Phys. Rev. A* 93, 053837 (2016).
64. L. Wei, Z. Xi, N. Bhattacharya, and H. P. Urbach, “Excitation of the radiationless

anapole mode”, *Optica* 3, 799-802 (2016).

65. J. A. Parker, H. Sugimoto, B. Coe, D. Eggena, M. Fujii, N. F. Scherer, S. K. Gray, and U. Manna, “Excitation of nonradiating anapoles in dielectric nanospheres”, *Phys. Rev. Lett.* (2020).

66. V. A. Zenin, S. M. Novikov, Y. Yang, B. N. Chichkov, S. I. Bozhevolnyi, A. B. Evlyukhin, R. Malureanu, and A. V. Lavrinenko, “Direct amplitude-phase near-field observation of higher-order anapole states”, *Nano Lett.* 17, 7152–7159 (2017).

67. M. I. Tribelsky, and A. E. Miroshnichenko, *Phys. Rev. A* 93, 053837 (2016).

68. Garcés-Chávez, V., Volke-Sepulveda, K., Chávez-Cerda, S., Sibbett, W. & Dholakia, K. Transfer of orbital angular momentum to an optically trapped low-index particle. *Phys. Rev. A – At. Mol. Opt. Phys.* 66, 8 (2002).

69. Sokolovskii, G. S. et al. Bessel beams from semiconductor light sources. *Prog. Quantum Electron.* 38, 157–188 (2014).

70. Shamkhi, H. K. et al. Transverse scattering and generalized kerker effects in all-dielectric mie-resonant metaoptics. *Phys. Rev. Lett.* 122, 1–22 (2019).

71. Donner, J. S., Baffou, G., McCloskey, D. & Quidant, R. Plasmon-assisted optofluidics. *ACS Nano* 5, 5457–5462 (2011).

72. Huang, C., Chen, X., Oladipo, A. O., Panoiu, N. C. & Ye, F. Generation of Subwavelength Plasmonic Nanovortices via Helically Corrugated Metallic Nanowires. *Sci. Rep.* 5, 1–10 (2015).

73. David, A., Gjonaj, B. & Bartal, G. Two-dimensional optical nanovortices at visible light. *Phys. Rev. B* 93, 1–5 (2016).

74. Young, A. B. et al. Polarization Engineering in Photonic Crystal Waveguides for Spin-Photon Entanglers. *Phys. Rev. Lett.* 115, 1–5 (2015).

75. David, A., Gjonaj, B., Blau, Y., Dolev, S. & Bartal, G. Nanoscale shaping and focusing of visible light in planar metal–oxide–silicon waveguides. *Optica* 2, 1045 (2015).

76. Willig, K. I. et al. Nanoscale resolution in GFP-based microscopy. *Nat. Methods* 3, 721–723 (2006).

77. Chithrani, B. D., Ghazani, A. A. & Chan, W. C. W. Determining the size and shape dependence of gold nanoparticle uptake into mammalian cells. *Nano Lett.* 6, 662–668 (2006).

78. Chithrani, B. D. & Chan, W. C. W. Elucidating the mechanism of cellular uptake and removal of protein-co.

79. Pan, Y. et al. Size-dependent cytotoxicity of gold nanoparticles. *Small* 3, 1941–1949 (2007).

80. Kern, A. M. & Martin, O. J. F. Excitation and reemission of molecules near realistic plasmonic nanostructures. *Nano Lett.* 11, 482–487 (2011).

81. S. A. Gredeskul, Yu. S. Kivshar, A. A. Asatryan, K. Y. Bliokh, Yu. P. Bliokh, V. D. Freilikher, I. V. Shadrivov, “Anderson localization in metamaterials and other complex media”, *Low Temp. Phys.* 2012, 38, 570-602.

82. H. H. Scheinflux, Y. Lumer, G. Ankonina, A. Z. Genack, G. Bartal, M. Segev, “Observation of Anderson localization in disordered nanophotonic structures”, *Science* 2017, 356, 953-956.

83. C. Liu, W. Gao, B. Yang, S. Zhang, “Disorder-induced topological state transition in photonic metamaterials”, *Phys. Rev. Lett.* 2017, 119, 183901.
84. H. H. Scheinflux, I. Kaminer, A. Z. Genack, M. Segev, “Interplay between evanescence and disorder in deep subwavelength photonic structures”, *Nat. Commun.* 2016, 7, 12927.
85. M. Jang, Y. Horie, A. Shibukawa, J. Brake, Y. Liu, S. M. Kamali, A. Arbabi, H. Ruan, A. Faraon, C. Yang, “Wavefront shaping with disorder-engineered metasurfaces”, *Nat. Photon.* 2018, 12, 84-90.
86. L. Allen, J. H. Eberly, *Optical Resonance and Two-Level Atoms*, Wiley, New York 1975.
87. S. L. McCall, E. L. Hahn, “Self-Induced Transparency”, *Phys. Rev.* 1969, 183, 457.
88. I. A. Poluektov, Yu. M. Popov, V. S. Roitberg, “Self-induced transparency effect”, *Sov. Phys. Usp.* 1975, 17, 673.
89. R. M. Arkhipov, M. V. Arkhipov, I. Babushkin, A. Demircan, U. Morgner, N. N. Rosanov, “Ultrafast creation and control of population density gratings via ultraslow polarization waves”, *Opt. Lett.* 2016, 41, 4983.
90. R. M. Arkhipov, A. V. Pakhomov, M. V. Arkhipov, I. Babushkin, A. Demircan, U. Morgner, N. N. Rosanov, “Population density gratings induced by few-cycle optical pulses in a resonant medium”, *Sci. Rep.* 2017, 7, 12467.
91. A. A. Afanas'ev, V. M. Volkov, V. V. Dritz, B. A. Samson “Interaction of counter-propagating self-induced transparency solitons”, *J. Mod. Opt.* 1990, 37, 165.
92. M. J. Shaw, B. W. Shore, “Collisions of counterpropagating optical solitons”, *J. Opt. Soc. Am. B* 1991, 8, 1127.
93. D. V. Novitsky, “Femtosecond pulses in a dense two-level medium: Spectral transformations, transient processes, and collisional dynamics”, *Phys. Rev. A* 2011, 84, 013817.
94. D. V. Guzatov, S. V. Vaschenko, V. V. Stankevich, A. Y. Lunevich, Y. F. Glukhov, and S. V. Gaponenko, “Plasmonic enhancement of molecular fluorescence near silver nanoparticles: theory, modeling, and experiment”, *J. Phys. Chem. C* 116, 10723 (2012).
95. A. N. Poddubny, P. Ginzburg, P. A. Belov, A. V. Zayats, and Y. S. Kivshar, “Tailoring and enhancing spontaneous two-photon emission using resonant plasmonic nanostructures”, *Phys. Rev. A At. Mol. Opt. Phys.* 86, 033826 (2012).
96. Ivinskaya, A.; Kostina, N.; Proskurin, A.; Petrov, M. I.; Bogdanov, A. A.; Sukhov, S.; Krasavin, A. V.; Karabchevsky, A.; Shalin, A. S.; Ginzburg, P. *Optomechanical Manipulation with Hyperbolic Metasurfaces.* *ACS Photonics* 2018, 5 (11), 4371–4377.
97. Johnson, P. B.; Christy, R. W. *Optical Constants of the Noble Metals.* *Phys. Rev. B* 1972, 6 (12), 4370–4379.
98. Rodríguez-de Marcos, L. V.; Larruquert, J. I.; Mendez, J. A.; Aznarez, J. A. *Self-Consistent Optical Constants of SiO₂ and Ta₂O₅ Films.* *Opt. Mater. Express* 2016, 6 (11), 3622.
99. Rybin, M. V. et al. *High-Q supercavity modes in subwavelength dielectric resonators.* *Phys. Rev. Lett.* 119, 1–5 (2017).
100. Friedrich, H. *Interfering resonances and BIC.* *Phys. Rev. A* 32, 3231–3242 (1985).
101. Gladyshev, S., Frizyuk, K. & Bogdanov, A. *Symmetry analysis and multipole*

classification of eigenmodes in electromagnetic resonators for engineering their optical properties. *Phys. Rev. B* 102,075103 (2020).

102. Kostina, N. et al. Optical binding via surface plasmon polariton interference. *Phys. Rev. B* 99, 125416 (2017).

103. Barhom, H. et al. Biological Kerker effect boosts light collection efficiency in plants. *Nano Lett* 19, 7062–7071 (2019).

104. Terekhov, P. D. et al. Broadband forward scattering from dielectric cubic nanoantenna in lossless media. *Opt. Express* 27, 10924 (2019).

105. Terekhov, P. D. et al. Enhanced absorption in all-dielectric metasurfaces due to magnetic dipole excitation. *Sci. Rep.* 9, 3438 (2019).

106. Kozlov, V., Filonov, D., Shalin, A. S., Steinberg, B. Z. & Ginzburg, P. Asymmetric backscattering from the hybrid magneto-electric metaparticle. *Appl. Phys. Lett.* 109, 203503 (2016).

107. Guo, R. et al. High-bit rate ultra-compact light routing with mode-selective on-chip nanoantennas. *Sci. Adv.* 3, e1700007 (2017).

108. Wang, S. B. & Chan, C. T. Lateral optical force on chiral particles near a surface. *Nat. Commun.* 5, 1–8 (2014).

109. Kislov, D. A. et al. Multipole engineering of attractive–repulsive and bending optical forces. *Adv. Photonics Res.* 2, 2100082 (2021).

110. E. D. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solids: Handbook of Thermo-Optic Coefficients of Optical Materials with Applications*, Elsevier, New York 1997.

111. Sheng, J.; Li, J.; Yu, J. The development of silver nanoclusters in ion-exchanged soda-lime silicate glasses. *Int. J. Hydrog. Energy* 2007, 32, 2598–2601.

112. Simo, A.; Polte, J.; Pfander, N.; Vainio, U.; Emmerling, F.; Rademann, K. Formation Mechanism of Silver Nanoparticles Stabilized in Glassy Matrices. *J. Am. Chem. Soc.* 2012, 134, 18824–18833.



Dmitrii Redka dzimis 1989. gadā Vācijā. Sanktpēterburgas Valsts elektrotehniskajā universitātē (Krievija) ieguvis maģistra grādu kvantu un optiskajā elektronikā (2010). Patlaban ir Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultātes Fotonikas, elektronikas un elektronisko sakaru institūta pētnieks.