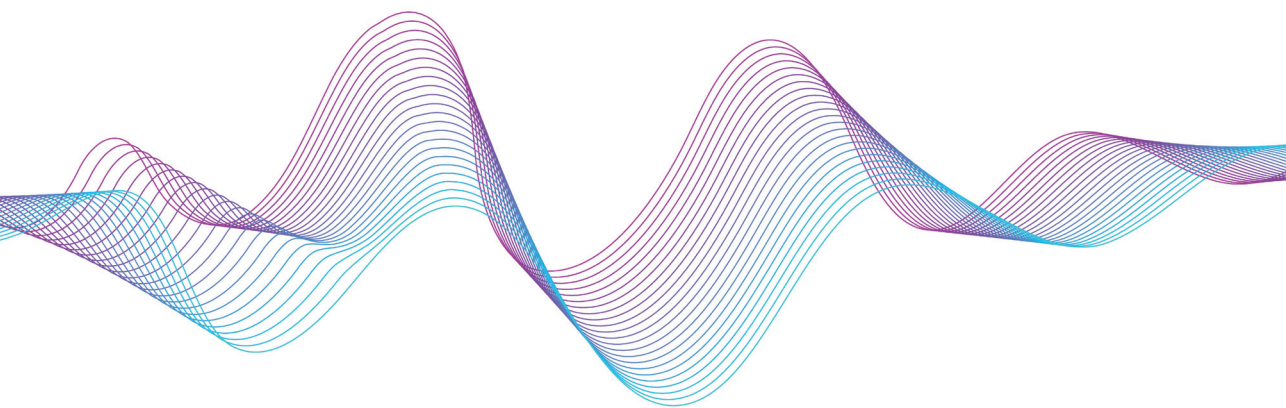


**Aleksei Kuznetsov**

# **HIBRĪDA ANAPOLU STĀVOKĻI KĀ PLATFORMA JAUNĀM OPTISKĀM IERĪCĒM**

Promocijas darba kopsavilkums



# RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

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

**Aleksei Kuznetsov**

Doktora studiju programmas "Telekomunikācijas" doktorants

## HIBRĪDA ANAPOLU STĀVOKĻI KĀ PLATFORMA JAUNĀM OPTISKĀM IERĪCĒM

Promocijas darba kopsavilkums

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

RTU Izdevniecība  
Rīga 2024

Kuznetsov, A. Hibrīda anapolu stāvokļi kā platforma jaunām optiskām ierīcēm. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2024. – 35 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-08”  
2024. gada 24. maija lēmumu, protokols Nr. 31.

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

Pētījumu atbalstīja Rīgas Tehniskās universitātes doktorantūras grantu programma.

**NATIONAL  
DEVELOPMENT  
PLAN 2020**



**EUROPEAN UNION**  
European Social  
Fund

---

INVESTING IN YOUR FUTURE

<https://doi.org/10.7250/9789934371035>  
ISBN 978-9934-37-103-5 (pdf)

# PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2024. gada 6. septembrī Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultātē, Āzenes ielā 12, 201. auditorijā.

## OFICIĀLIE REZENZENTI

Profesors *Ph. D. Andrey Miroshnichenko*,  
*UNSW Kanbera*, Austrālija

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

Profesors *Dr. sc. ing. Sandis Spolītis*,  
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.

Aleksei Kuznetsov ..... (paraksts)

Datums: .....

Promocijas darba sagatavots kā tematiski vienota zinātnisko publikāciju kopa. Tajā iekļauti 12 zinātniskie raksti un publikācijas zinātnisko konferenču krājumos, kas indeksēti *SCOPUS* un *WoS* datubāzēs. Publikācijas ir uzrakstītas angļu valodā, to kopējais apjoms ir 95 lappuses.

## SATURS

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS .....	5
SIMBOLU SARAKSTS .....	6
1. PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS .....	8
1.1. Ievads .....	8
1.2. Pamatojums .....	8
1.3. Promocijas darba mērķis un tēzes .....	10
1.4. Promocijas darba uzdevumi .....	10
1.5. Pētniecības metodes .....	11
1.6. Publikācijas un promocijas darba aprobācija .....	11
1.7. Promocijas darba struktūra .....	14
2. METODOLOĢIJA .....	15
3. GALVENIE REZULTĀTI .....	19
4. NOBEIGUMS .....	24
4.1. Promocijas darba galvenie sasniegumi .....	24
4.2. Galvenie secinājumi .....	27
4.3. Nākotnes perspektīvas .....	28
PATEICĪBA .....	29
LITERATŪRA .....	30

## SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

### A

a-Si – *Hydrogenated Amorphous Silicon* – hidrogēns amorfs silīcijs

### C

CMOS – *Complementary Metal–Oxide–Semiconductor* – papildu metāla oksīda pusvadītājs

### D

DM – *Dipolar Channel Scattering Maxima* – dipolārais kanāls, kas izkļiedē *Maxima*

### E

ED – *Electric Dipole* – elektriskais dipols

EQ – *Electric Quadrupole* – elektriskais kvadrāpols

### F

FDTD – *Finite Difference Time Domain Method* – galīgās diferences laika domēna metode

FEM – *Finite Element Method* – galīgo elementu metode

### H

HA – *Hybrid Anapole* – hibrīdanapole

### M

MD – *Magnetic Dipole* – magnētiskais dipols

MQ – *Magnetic Quadrupole* – magnētiskais kvadrāpols

### P

PD – *Positional Disorder* – stāvokļa traucējumi

PML – *Perfectly Matched Layer* – perfekti atbilstošs slānis

### Q

QNM – *Quasinormal Mode* – kvazinormālais režīms

Quasi-BIC – *Quasi-Bound States in Continuum* – kvazisaistīti stāvokļi nepārtrauktībā

### S

SCS – *Scattering Cross-Section* – izkliedes šķērs griezumums

SEM – *Scanning Electron Microscope* – skenējošais elektronu mikroskops

## SIMBOLU SARAKSTS

- $\delta$  – *Kronecker* delta  
 $n$  – vienības vektors  
 $r$  – pozīcija, m  
 $i$  – iedomātā vienība  
 $\lambda$  – viļņa garums, m  
 $c$  – gaismas ātrums vakuumā, m/s  
 $k_0$  – viļņa numurs, 1/m  
 $k_d$  – viļņa numurs vidē, 1/m  
 $j_n$  –  $n$  kārtas sfēriskā Besela funkcija  
 $p$  – elektriskā dipola moments, C/m<sup>2</sup>  
 $m$  – magnētiskā dipola moments, A · m<sup>2</sup>  
 $Q^e$  – elektriskā kvadrāpola moments, C · m<sup>2</sup>  
 $Q^m$  – magnētiskā kvadrāpola moments, A · m<sup>3</sup>  
 $\sigma_{sca}$  – izkliedes šķērsriezums, m<sup>2</sup>  
 $\sigma_{eff}$  – efektīvais izkliedes šķērsriezums, m<sup>2</sup>  
 $C_{sca}^p$  – elektriskā dipola izkliedētais šķērsriezums, m<sup>2</sup>  
 $C_{sca}^m$  – magnētiskā dipola izkliedes šķērsriezums, m<sup>2</sup>  
 $C_{sca}^{Qe}$  – elektriskā kvadrāpola izkliedētais šķērsriezums, m<sup>2</sup>  
 $C_{sca}^{Qm}$  – magnētiskā kvadrāpola izkliedētais šķērsriezums, m<sup>2</sup>  
 $n(\lambda)$  – refrakcijas indeksa reālā daļa  
 $k(\lambda)$  – refrakcijas indeksa iedomātā daļa  
 $n_{env}$  – vides refrakcijas indekss  
 $n_{sub}$  – substrāta refrakcijas indekss  
 $\epsilon_0$  – vakuuma dielektriskā konstante  
 $\epsilon_d$  – vides dielektriskā konstante  
 $S_L$  – režģa vienības šūnas laukums, m<sup>2</sup>  
 $D$  – režģa konstante, m  
 $s$  – attālums starp metaatomu sienām, m  
 $J_\omega$  – inducētās elektriskās strāvas blīvums A/m<sup>2</sup>  
 $E_{inc}$  – incidenta viļņa elektriskā lauka amplitūda, V/m  
 $E_0$  – normāli krītoša plakana viļņa elektriskais lauks, V/m  
 $H$  – balona/konusa augstums, m  
 $R_{cyl}$  – cilindra rādiuss, m  
 $R_{top}$  – konusa augšējais rādiuss, m  
 $R_{bottom}$  – konusa apakšējais rādiuss, m  
 $T$  – pārraides koeficients  
 $t$  – elektriskā lauka pārraides koeficients  
 $R$  – atstarošanas koeficients  
 $r$  – elektriskā lauka atstarošanas koeficients  
 $A$  – absorbcijas koeficients

$I_{\text{noise}}$  – jauda (troksnis), ko iegūst spektrometrs bez krītošās gaismas,  $\text{W}/\text{m}^2$

$I_{\text{substrate}}$  – jauda, ko spektrometrs iegūst, kad gaisma krīt uz substrāta,  $\text{W}/\text{m}^2$

$I_{\text{metasurface}}$  – jauda, ko spektrometrs iegūst, kad uz metavirsmas atstaro gaisma ar substrātu,  $\text{W}/\text{m}^2$



# 1. PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

## 1.1. Ievads

Pēdējos gados strauji [1]–[6] sākusi attīstīties pilnīga dielektriskā nanofotonika. Augsta refrakcijas indeksa subviļņu garuma struktūru pētījumu popularitāte skaidrojama ar spēju kontrolēt gaismu nanomērogā bez termiskiem zudumiem atšķirībā no plazmas struktūrām [7]–[9]. Rūpīgi noregulējot nanoizkļiedētāju ģeometriju un materiālu izkļiedi, iespējams ierosināt gan elektriskās, gan magnētiskās rezonanses [9]–[12]. Piemēram, izmantojot rezonanses kombināciju, var iegūt Kerkeru efektus [13]–[19]. Šādas atsevišķas daļiņas sauc par metaatomiem, to struktūru sauc par metavirsmu [20]–[22]. Ar šādu struktūru palīdzību ir iespējams iegūt efektus, kas iepriekš nebija pieejami, izmantojot “parastos” materiālus, piemēram, mākslīgo magnētismu [23]–[25], neizstarojošus avotus [26]–[28], superslodzes režīmus un saistītos stāvokļus nepārtrauktībā (*BIC*) [29]–[32], efektīvas otrās un trešās harmonikas paaudzes [33]–[35], sensorus [36], [37] vai centrmezglu orbītu transformācija [38], [39].

Intriģējošs virziens dielektriskā nanofotonikā ir kļuvis tā sauktā neradiatīvā anapola režīma eksistence, kas pirmo reizi tika parādīta [40]. **Anapola stāvoklis** rodas elektrisko un toroidālo dipola momentu destruktīvas interferences dēļ, un tā rezultātā daļiņas anapola režīmā kļūst “neredzamas”, bet vienlaikus netriviālas lauka iekšienē [18], [41]–[47]. Pamatojoties uz anapolu, jau ir ierosināts iegūt uzlabotu otrās un trešās harmonikas [34], [35], milzu fototermālo nelinearitātes [48] un “tumšo” lāzeru [49] paaudzi. Pavisam nesen ierosināts nākamais solis anapola elektrodinamikā – **hibrīdanapola (HA)** režīms. Šis režīms ir visu dominējošo daudzpolu momentu vienlaikus destruktīva interference ar to toroidālajiem analogiem līdz pat magnētiskajam kvadrāpolu momentam. Hibrīdanapols pirmo reizi tika apspriesti [50], un tikai nesen hibrīdanapoli parādījās dielektriskos nanocilindros, kas teorētiski ir parādīti un eksperimentāli pierādīti [51]. Tika parādīts, ka hibrīdanapola stāvokļi ir pārāki par parastajiem anapoliem gan izkļiedes slāpēšanā, gan elektromagnētiskās enerģijas uzkrāšanā. Mūsdienās hibrīdanapols iegūst popularitāti un kļūst par daudzsološu jomu pētniecībai [52]–[55].

Promocijas darbā apskatītas iepriekš nepēfītas metavirsmas, kas sastāv no silīcija daļiņām hibrīdanapola stāvoklī. Analītiski un skaitliski parādīts, ka ultravāja mijiedarbība ar apkārtējo vidi dabiski izraisa vienības caurlaidību bez optiskās fāzes maiņas. Darbā pētītas arī šo konstrukciju optiskās īpašības, tostarp to mijiedarbība ar apkārtējo vidi, kā var pielāgot metavirsmas parametrus, lai saglabātu tās optiskās īpašības, demonstrējot optiskā signāla kontroles metodi, kas šķērso šādu struktūru. Pirmo reizi anapola stāvoklis iegūts daļiņām nošķelta konusa formā un pētīta anapola stāvokļa atkarība no koniskuma. Šis atklājums būtiski vienkāršo un samazina jaunās paaudzes fotonisko struktūru ražošanas izmaksas.

## 1.2. Pamatojums

Virziena Heigensa avoti ir vislielākā interese par metavirsmu ar spēju kontrolēt gaismu nanomērogā. Ņemot vērā to, ka pastāv iespēja vienlaikus pārklāties elektriskajai un

magnētiskajai rezonansei ar dažādām paritātēm, kļūst iespējams mainīt pārraidītā starojuma optisko fāzi ar vienības caurlaidību [21], [56]–[58]. Pētījumu rezultātā jau ir ierosināti vairāki lietojumi, piemēram, ultraplānas metāllēcas [59]–[61], dinamiska pārraides kontrole [62], anomāla refrakcija [56], [63], [64], staru kūļa vadīšana [65], hologrammas [66]–[70] un platjoslas Heigensa elementi [71].

Heigensa metavirsmām ir jāpārvar fundamentālie ierobežojumi, ko parasti raksturo strukturālo elementu savienošana [56], [72], lai panāktu pilnīgu kontroli pār gaismas manipulācijām. Metaatomi masīvā mijiedarbojas cits ar citu pat viļņa garuma attālumā. Tas būtiski apgrūtina projektēšanas procesu, tostarp atsevišķu konstrukcijas elementu optisko fāžu izmaiņu projektēšanu. Vairāki darbi metaoptikā palīdz atrisināt šo problēmu, piemēram, rūpīgi optimizējot superšūnu [73]. Tas ļauj situāciju uzlabot, bet jautājums par optisko fāžu kartēšanu atsevišķiem metaatomiem paliek atklāts. Visi metavirsmu elementi ir rūpīgi jāpielāgo to novietojumam konstrukcijā, lai samazinātu mijiedarbību. Konstrukcijās īpaša uzmanība jāpievērš režģa periodam, pamatnes materiāliem, ražošanas kļūdām – tās visas ir brīvības pakāpes, kas traucē konstrukciju izgatavošanu. Iepriekš minēto iemeslu dēļ šādu ierīču efektivitāte var būt būtiski ierobežota [72].

Aprakstītajām struktūrām kā metaatomi parasti tiek izmantotas ļoti simetriskas daļiņas ar vienkāršu ģeometriju, piemēram, sfēras, kubi vai cilindri, un katrs no tiem atbalsta ierobežotu daudzpolu mijiedarbības kopumu atkarībā no izmēra, materiāla un proporcijas, tāpēc bieži vien daudzpolu kompozīcijas konfigurācijas palīgelementi izmanto sarežģītumus, piemēram, daudzslāņu struktūras [74]–[78].

Diemžēl mūsdienu dielektrisko metavirsmu ražošanas metodēm ir vairāki trūkumi. Ir grūti iegūt metavirsmu ar ideāliem cilindriem; lielākajai daļai cilindru ir neliels sānu slīpums [79]–[81], kas izraisa ievērojamas īpašību novirzes.

Promocijas darbā piedāvāta jauna koncepcija, lai izveidotu caurspīdīgas metavirsmas, izmantojot silīcija metavirsmas hibrīdanapola stāvoklī. Detalizēti tika pētītas metavirsmu īpašības, kuru pamatā ir hibrīdanapols. Hibrīdanapola daudzrezonanses raksturs ļauj mainīt pārraidīto optisko fāzi plašā spektrālā un ģeometriskā diapazonā. Vissvarīgākais ir tas, ka atšķirībā no Heigensa avotiem savienojums starp daļiņām praktiski ir niecīgs. Tādējādi hibrīdanapola daļiņa tuvojas “īstā” metaatoma ideālam. Šī iespēja ir pierādīta, ir izstrādāti ultrakompakti silīcija bloki ar daļiņu sienīņu atstatumu, kas vienāds ar  $1/8$  no krītošā viļņa garuma redzamajā diapazonā, un ir pētītas nesakārtotas metavirsmas, kuru uzvedība ir identiska to periodiskajiem analogiem. Tika pētīta substrāta ietekme, un tika demonstrēta pārraides loga saglabāšana, kad metavirsmas tika uzklātas uz dažādiem dielektriskiem materiāliem, atvieglojot to integrāciju mikroshēmā. Konceptuāli tika parādīts, ka ir iespējams modulēt ultraātra Gausa impulsa optisko fāzi, kas pārraidīta ar vienības efektivitāti caur ļoti nesakārtotu metavirsmu, kas izklāta uz stikla pamatnes, pamatojoties tikai uz periodiskā masīva optisko reakciju. Visbeidzot tika parādīta koniskuma ietekme uz hibrīdanapola īpašībām, un pirmo reizi silīcija metaatomos ir iegūts hibrīdanapola stāvoklis nošķeltu konusu veidā, kas ievērojami atvieglo, vienkāršo un samazina šādu konstrukciju izgatavošanas izmaksas.

### 1.3. Promocijas darba mērķis un tēzes

Apkopojot iepriekš minētos faktus par jaunu optisko ierīču izstrādes virzieniem visdažādākajiem lietojumiem, kas balstīti nanostrukturētos elementos, **tika definēts promocijas darba mērķis** – izpētīt jaunus optiskos efektus, ko izraisa augsta indeksa vāji absorbējošu nanodaļiņu un metavirsmu mijiedarbība hibrīdanapola stāvoklī ar gaismu, izstrādāt nanostrukturālo elementu modeļus turpmākai kvalitatīvi jaunu fotonisko ierīču radīšanai.

**Lai sasniegtu promocijas darba mērķi, tika definētas vairākas tēzes.**

1. Hibrīdanapola stāvoklis ļauj projektēt ultrablīvas silīcija metavirsmas bez stingras nanodaļiņu izvietojuma secības ievērošanas uz dažādiem substrātiem, panākot gandrīz perfektu pārraidi un nulles optiskās fāzes nobīdi.

2. Silīcija metavirsmas hibrīdanapola stāvoklī var kontrolēt optisko signālu fāzi, kas tiek pārraidīta caur struktūru nepārtrauktas un ultraātras femtosekundes impulsa apstarošanas režīmos.

3. Hibrīdanapola stāvokli var sasniegt silīcija nošķelta konusa nanoizkļiedētājiem ar simetrijas pārrāvumu gar galveno asi.

### 1.4. Promocijas darba uzdevumi

Lai sasniegtu promocijas darba mērķi un pierādītu definētās tēzes, nepieciešams veikt vairākus **uzdevumus**.

1. Demonstrēt gandrīz perfektu caurlaidību un nulles optiskās fāzes nobīdi starojumam, kas iet caur silīcija metavirsmām, kas sastāv no cilindriskiem metaatomiem hibrīdanapola stāvoklī, izmantojot skaitliskās metodes līdztekus eksperimentāliem mērījumiem.
2. Izpētīt mijiedarbību starp silīcija metavirsmām hibrīdanapola stāvoklī un dažādiem substrātiem, kam raksturīgi dažādi refrakcijas rādītāji, un parādīt mijiedarbības neesamību ar apkārtējo vidi šādām metavirsmām.
3. Izpētīt attāluma starp daļiņām hibrīdanapola stāvoklī ietekmi uz metavirsmas optiskajām īpašībām un demonstrēt metaatomu mijiedarbības neesamību ultrablīvu metavirsmu projektēšanas laikā.
4. Izpētīt metavirsmas elementu nesakārtotības ietekmi uz struktūras optiskās īpašības hibrīdanapola stāvoklī un parādīt iespēju saglabāt struktūras caurspīdīgumu bez stingras nanodaļiņu izkārtojuma uz pamatnes ievērošanas.
5. Izstrādāt metodi optiskā starojuma fāzes kontrolei, kas iet caur silīcija metavirsmām, kas sastāv no cilindriskiem metaatomiem hibrīdanapola stāvoklī, mainot metaatomu ģeometriskos parametrus nepārtrauktā apstarošanas režīmā.
6. Parādīt modulācijas iespēju ultraātriem femtosekundes impulsiem, kas iet caur metavirsmu hibrīdanapola stāvoklī, mainot nanoizkļiedētāju ģeometriskos parametrus ar metaatomu haotiskas izkārtošanās iespēju.
7. Izpētīt silīcija nanodaļiņu koniskuma ietekmi uz iegūtajām nanoizkļiedētāju optiskajām īpašībām hibrīdanapola stāvoklī.

## 1.5. Pētniecības metodes

Lai veiktu promocijas darba uzdevumus un analizētu problēmas, tika izmantoti matemātiskie aprēķini, skaitliskās simulācijas un eksperimentālie mērījumi. Skaitliskās simulācijas tika veiktas *COMSOL Multiphysics*, *Ansys Lumerical*, *MATLAB*, *Wolfram Mathematica*.

Promocijas darbā aprakstītie zinātniskie eksperimenti un to rezultāti tika veikti:

- Rīgas Tehniskās universitātes (RTU) Fotonikas, elektronikas un elektronisko sakaru institūta (FEESI) Nanofotonikas pētniecības laboratorijā (*NANO-Photon Lab.*), Rīgā, Latvijā;
- Nanostruktūru dinamikas laboratorijā Telavivas Universitātē (TAU), Telavivā, Izraēlā;
- Attīstītā optikas un fotonikas laboratorijā (*Advanced Optics and Photonics Laboratory*), Notingemas Trentas universitātē, Notingemā, Apvienotajā Karalistē;
- Optikas un fotonikas skolā, Pekinas Tehnoloģiju institūtā, Pekinā, Ķīnā;
- Kvazilaboratorijā, *ITMO* Universitātē, Sanktpēterburgā, Krievijā;
- Grācas Universitātē, Grācā, Austrijā.

## 1.6. Publikācijas un promocijas darba aprobācija

Autora promocijas darba rezultāti atspoguļoti **12 zinātniskajos rakstos un konferenču rakstos**, kas indeksēti *SCOPUS* un *WoS* datubāzēs.

1. **Kuznetsov, A. V.**, Canós Valero, A., Tarkhov, M., Bobrovs, V., Redka, D. and Shalin, A.S., “*Transparent hybrid anapole metasurfaces with negligible electromagnetic coupling for phase engineering*,” *Nanophotonics*, Vol. 10, no. 17, pp. 4385–4398, 18 October **2021**.
2. **Kuznetsov, A. V.**, Canós Valero, A., Shamkhi, H. K., Terekhov P., Ni X., Bobrovs V., Rybin M. V., Shalin A. S., “*Special scattering regimes for conical all-dielectric nanoparticles*,” *Scientific Reports*, Vol. 12, p. 21904, 30 November **2022**.
3. **Kuznetsov, A. V.**, Canos Valero, A., Shalin, A. S. “*Optical properties of a metasurface based on silicon nanocylinders in a hybrid anapole state*,” *Proceedings of the 5th International conference on metamaterials and nanophotonics “METANANO 2020”*, Vol. 2300, No. 1, p. 020075, online, December **2020**.
4. **Kuznetsov, A. V.**, Canos Valero, A., “*Non-Huygens transparent metasurfaces based on the novel Hybrid anapole state*,” *Proceedings of the 6th International conference on metamaterials and nanophotonics “METANANO 2021”*, Vol. 2015, No. 1, p. 012079, online, November **2021**.
5. **Kuznetsov, A. V.**, Canos Valero, A., Terekhov, P. D., Shamkhi, H. K., “*Various multipole combinations for conical Si particles*,” *Proceedings of the 6th International conference on metamaterials and nanophotonics “METANANO 2021”*, Vol. 2015, No. 1, p. 012080, online, November **2021**.

6. Shalin, A. S., **Kuznetsov, A. V.**, Bobrovs, V., Valero, A. C., “*Novel Hybrid anapole state and non-Huygens' transparent metasurfaces,*” Proceedings of the 4th International Smart NanoMaterials Conference 2021: Advances, Innovation and Applications “SNAIA 2021”, Vol. 2172, No. 1, p. 012001, Paris, France, February **2022**.
7. Terekhov, P. D., **Kuznetsov, A. V.**, Canos Valero, A., Shamkhi, H. K., Ni X., Bobrovs V., Rybin M. V., Shalin A. S., “*Various Scattering Regimes of Truncated Cone Particles,*” Proceedings of the CLEO: Applications and Technology 2023, San Jose, USA, 7–12 May **2023**.
8. **Kuznetsov, A. V.**, Bobrovs, V., “*Existence of the Hybrid Anapole for Si Conical Nanoparticles,*” Proceedings of 12th International Conference on Computer Science Online Conference “CSOC 2023”, Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 772, pp. 397–401, online, 3–5 April **2023**.
9. **Kuznetsov, A. V.**, Bobrovs, V., “*Superscattering Regime for Si Conical Nanoparticles for the Different Directions of Excitation,*” Proceedings of 12th International Conference on Computer Science Online Conference “CSOC 2023”, Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 723, pp. 254–258, online, 3–5 April **2023**.
10. Babich N., **Kuznetsov, A.**, Bobrovs V., Kislov D., “*Optomechanical Manipulation of Nanoparticles in Hybrid Anapole State,*” Proceedings of 12th International Conference on Computer Science Online Conference “CSOC 2023”, Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 723, pp. 237–243, online, 3–5 April **2023**.
11. **Kuznetsov, A. V.**, Bobrovs, V., “*Transverse Kerker Effects in All-Dielectric Conical Nanoparticles,*” Proceedings of the 7th Computational Methods in Systems and Software 2023 (CoMeSySo2023) conference, Vol. 909, pp. 278–281, online, **2024**.
12. **Kuznetsov, A.V.**, Bobrovs, V., “*Generalized Kerker Effects in All-Dielectric Conical Nanoparticles,*” Proceedings of the 7th Computational Methods in Systems and Software 2023 (CoMeSySo2023) conference, Vol. 909, pp. 283–287, online, **2024**.

Promocijas darba rezultāti prezentēti **15 starptautiskajās konferencēs.**

1. **Kuznetsov, A. V.**, Canos Valero, A., Shalin, A. S. “*Investigation of the optical properties of a metasurface based on silicon nanocylinders in a hybrid anapole state,*” 3th School on Advanced Light-Emitting and Optical Materials “SLALOM 2020”, Saint Petersburg, Russia, 29–30 June **2020**.
2. **Kuznetsov, A. V.**, Canos Valero, A., Shalin, A. S. “*Optical properties of a metasurface based on silicon nanocylinders in a hybrid anapole state,*” 5th International conference on metamaterials and nanophotonics “METANANO 2020”, online, December **2020**.
3. **Kuznetsov, A. V.**, Canos Valero, Terekhov, P. D., A., Shalin, A. S. “*Study of the optical properties of a metasurface based on silicon nanocylinders in a hybrid anapole state,*” International scientific conference of students, graduate students and young scientists “Lomonosov-2020”, online, 10–27 November **2020**.

4. **Kuznetsov, A. V.**, Canos Valero, A., Terekhov, P. D., Shamkhi H. K., Shalin, A. S., “*Investigation of various multipole combinations of silicone conical nano-scatterers*,” 4th School on Advanced Light-Emitting and Optical Materials “SLALOM 2021”, online, 28–30 June **2021**.
5. **Kuznetsov, A. V.**, Canos Valero, A., Terekhov, P. D., Shamkhi H. K., Shalin, A. S., “*Investigation of various multipole combinations of silicone conical nano-scatterers*,” Summer School on Photonics of 2D materials “METANANO SCHOOL 2021”, Saint Petersburg, Russia, 19–23 July **2021**.
6. **Kuznetsov, A. V.**, Canos Valero, A., “*Non-Huygens transparent metasurfaces based on the novel Hybrid anapole state*,” 6th International conference on metamaterials and nanophotonics “METANANO 2021”, online, November **2021**.
7. **Kuznetsov, A. V.**, Canos Valero, A., Terekhov, P. D., Shamkhi, H. K., “*Various multipole combinations for conical Si particles*,” 6th International conference on metamaterials and nanophotonics “METANANO 2021”, online, November **2021**.
8. Shalin, A. S., **Kuznetsov, A. V.**, Bobrovs, V., Valero, A. C., “*Novel Hybrid anapole state and non-Huygens' transparent metasurfaces*,” 4th International Smart NanoMaterials Conference 2021: Advances, Innovation and Applications “SNAIA 2021”, Paris, France, February **2022**.
9. Terekhov, P. D., **Kuznetsov, A. V.**, Canos Valero, A., Shamkhi, H. K., Ni X., Bobrovs V., Rybin M. V., Shalin A. S., “*Various Scattering Regimes of Truncated Cone Particles*,” CLEO: Applications and Technology 2023, San Jose, USA, 7–12 May **2023**.
10. **Kuznetsov, A. V.**, Bobrovs, V., Shalin, A. S., “*Quasi-BIC on a Hybrid anapole regime in silicon metasurfaces*,” The 9th International Conference on Antennas and Electromagnetic Systems “AES 2023”, Torremolinos, Spain, 5–8 June **2023**.
11. **Kuznetsov, A. V.**, Bobrovs, V., “*Existence of the Hybrid Anapole for Si Conical Nanoparticles*,” 12th International Conference on Computer Science Online Conference “CSOC 2023”, Lecture Notes in Networks and Systems, online, 3–5 April **2023**.
12. **Kuznetsov, A. V.**, Bobrovs, V., “*Superscattering Regime for Si Conical Nanoparticles for the Different Directions of Excitation*,” 12th International Conference on Computer Science Online Conference “CSOC 2023”, online, 3–5 April **2023**.
13. Babich N., **Kuznetsov, A.**, Bobrovs V., Kislov D., “*Optomechanical Manipulation of Nanoparticles in Hybrid Anapole State*,” 12th International Conference on Computer Science Online Conference “CSOC 2023”, online, 3–5 April **2023**.
14. **Kuznetsov, A. V.**, Bobrovs, V., “*Transverse Kerker Effects in All-Dielectric Conical Nanoparticles*,” 7th Computational Methods in Systems and Software 2023 (CoMeSySo2023) conference, online, **2024**.
15. **Kuznetsov, A. V.**, Bobrovs, V., “*Generalized Kerker Effects in All-Dielectric Conical Nanoparticles*,” 7th Computational Methods in Systems and Software 2023 (CoMeSySo2023) conference, online, **2024**.

## 1.7. Promocijas darba struktūra

Promocijas darbs ir sagatavots kā tematiski vienota zinātnisko publikāciju kopa, kuras pamatā ir izstrādāti teorētiskie modeļi jaunām optiskām ierīcēm, kas paredzētas plašam lietojumam.

**1. NODAĻA. PĀRSKATS.** Nodaļā aprakstīta promocijas darba darbības joma, formulētas galvenās pētījuma hipotēzes un pētījuma novitātes nozīme saistībā ar silīcija metavirsmu hibrīdanapolē. Nodaļā sniegts arī īss promocijas darba struktūras apraksts, dots publikāciju un starptautisko konferenču rakstu saraksts.

**2. NODAĻA. METODOLOĢIJA.** Nodaļā aprakstītas pamatmetodes un rīki, kas izmantoti, lai modelētu un izskaidrotu efektus, kas rodas starojuma mijiedarbības laikā ar metavirsmām hibrīdanapola stāvoklī, izklāstot trīs galvenos posmus.

**3. NODAĻA. GALVENIE REZULTĀTI.** Nodaļā atspoguļotas publikācijas, kurās sniegti galvenie rezultāti, kas iegūti, pētot un izmantojot metavirsmu optiskās īpašības hibrīdanapola stāvoklī. Promocijas darba rezultāti publicēti **12** publikācijās, kas indeksētas *Scopus* un *WoS* datubāzēs, tostarp **divi** raksti publicēti augsti novērtētos starptautiskos zinātniskajos žurnālos; kopējais *Impact Factor* ir **13,3** (5 gadu žurnālu *Impact Factor*) ar kopskaitā **43** (13/03/2024) citātiem *Scopus* indeksētos žurnālos.

**4. NODAĻA. NOBEIGUMS.** Nodaļā izklāstīti galvenie secinājumi, izaicinājumi un to risinājumi attiecībā uz teorētiskajiem un praktiskajiem lietojumiem, kas saistīti ar hibrīdanapola stāvoklī esošām metavirsmām.

## 2. METODOLOĢIJA

Nodaļā sniegtas galvenās metodes, ar kuru palīdzību pētītas promocijas darbā aprakstīto struktūru optiskās īpašības.

Patlaban galvenais instruments nanostruktūru optisko īpašību izpētei ir skaitliskās metodes (piemēram, galīgo elementu metodes, diskrētā dipola aproksimācija, galīgo diferencu metodes utt.). Šīs metodes galvenokārt ietver *Maxwell* daļējo diferenciālienojumu [82] risināšanu, kā arī elektrisko un magnētisko lauku aprēķināšanu katrā sistēmas punktā. Tajās tiek ņemtas vērā visas aplūkojamās struktūras ģeometriskās un materiālās īpašības, piemēram, daļiņu forma, to izmērs, telpiskais novietojums, krītošā staru kūļa struktūra utt. Šīs metodes ir ieviestas komerciālās zinātniskās programmatūras produktos (*COMSOL Multiphysics*, *Ansys Lumerical*, *CST* u. c.), un tās ir pārbaudītas pasaules zinātnieku aprindās. To piemērošanas rezultāti ir plaši izklāstīti literatūrā.

Tomēr, lai gan skaitliskās metodes ir lieliski sevi pierādījušas inženiertehniskajos aprēķinos, tās nevar konkurēt ar analītiskajām metodēm, kad ir nepieciešams izprast fizikas parādības un, kas ir vissvarīgāk, noteikt parametru diapazonu, kurā var novērot neparastas jaunas parādības. Tāpēc papildus iepriekš minētajām skaitliskajām metodēm šajā promocijas darbā tiek izmantota daudzpolu dekompozīcija, kas ir ērta dažādu kārtu anapolu stāvokļu pētīšanai [83].

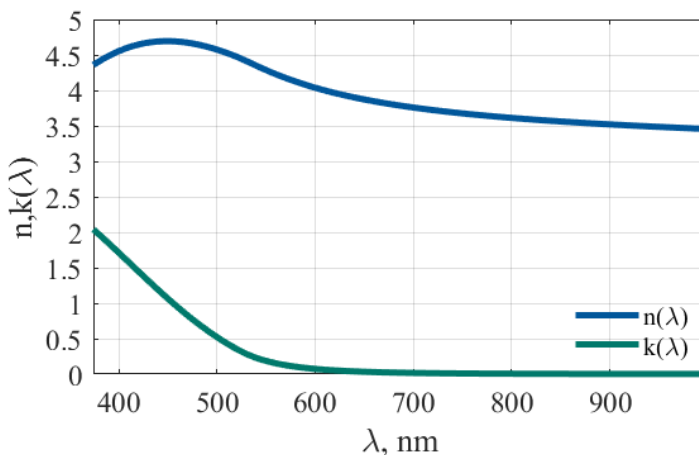
Tika izmantota arī metavirsmas atstarošanas un caurlaidības koeficientu daudzpolu dekompozīcijas metode, kas ļāva kvalitatīvi analizēt sistēmas optisko reakciju [10].

Papildus daudzpolu analīzei tika lietota arī īpašreizīga meklēšanas metode *COMSOL Multiphysics* optiskā modulī. Šīs metodes pamatā ir Maksvela vienādojumu risināšana elektromagnētiskajiem laukiem struktūrās. Tas ietver viļņu vienādojuma un robežnosacījumu izmantošanu, lai noteiktu elektromagnētisko viļņu izplatīšanos optiskajās sistēmās. Metode balstās visu Maksvela vienādojumu skaitliskajā risinājumā, tostarp elektriskajiem un magnētiskajiem laukiem. Lai atrastu īpašreizīgus, ir jāatrisina īpašvērtību problēma, kas ir atkarīga no struktūras tipa. Šo vienādojumu atrisināšana ļāva noteikt īpašreizīgu raksturlielumus, piemēram, biežumu un lauka sadalījumu.

Tādējādi metode ietver fizikālos viļņu optikas principus un matemātiskās metodes Maksvela vienādojumu skaitliskajam risinājumam, ļaujot pētīt un optimizēt elektromagnētiskos laukus optiskajās struktūrās.

Primārais materiāls nanoizkļiedētājiem bija laušanas koeficienta dispersija, kas tika mērīta eksperimentāli un promocijas darbā izvēlēta kā augsta indeksa dielektriskais materiāls daļiņām un metavirsmām (ja nav norādīts citādi) (2.1. att.).



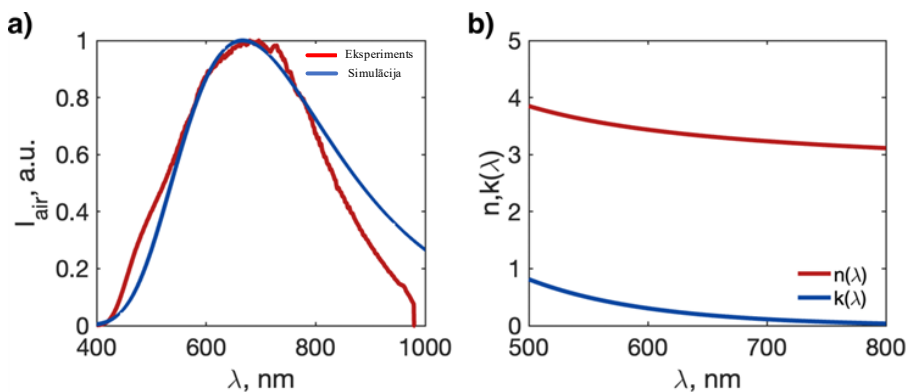


2.1. att. Hidrogenētā amorfā silīcija (a-Si) eksperimentāli izmērītā refrakcijas indeksa reālās ( $n$ ) un iedomātās ( $k$ ) daļas atkarībā no viļņa garuma.

Promocijas darbā tika izmantoti divi paraugu komplekti. Pirmais paraugu komplekts tika izgatavots Notingemas Trentas universitātes *Advanced Optics and Photonics Laboratory*, Notingemā, Apvienotajā Karalistē, ko pārstāvēja profesors Mohsens Rahmani. Otrais paraugu komplekts tika izgatavots Pekinas Tehnoloģiju institūta Optikas un fotonikas skolā, Pekinā, Ķīnā, ko pārstāvēja profesors Huang Linglings.

Diemžēl patlaban vēl nav publicēti tie materiāli, kas tika mērīti, tāpēc šajā apakšsadaļā aprakstīti iegūtie rezultāti.

Lai pārbaudītu iegūtos skaitliskos rezultātus, tika izmantoti eksperimentāli metavirsmu paraugi ar dažādiem režģa parametriem un dažādiem metaatomu rādiusiem. Hidrogenēta amorfa silīcija eksperimentāli izmērītā refrakcijas indeksa dispersija tika izmantota kā materiāls skaitliskiem aprēķiniem (2.2. att.).



2.2. att. a) krītošā starojuma intensitāte brīvā telpā pret viļņa garumu; (b) hidrogenētā amorfā silīcija (a-Si) eksperimentāli izmērītā refrakcijas indeksa reālās ( $n$ ) un iedomātās ( $k$ ) daļas atkarība no viļņa garuma.

Efektīvās izkliedes šķērsgriezums šajā promocijas darbā tika aprēķināts, izmantojot 2.1. vienādojumu.

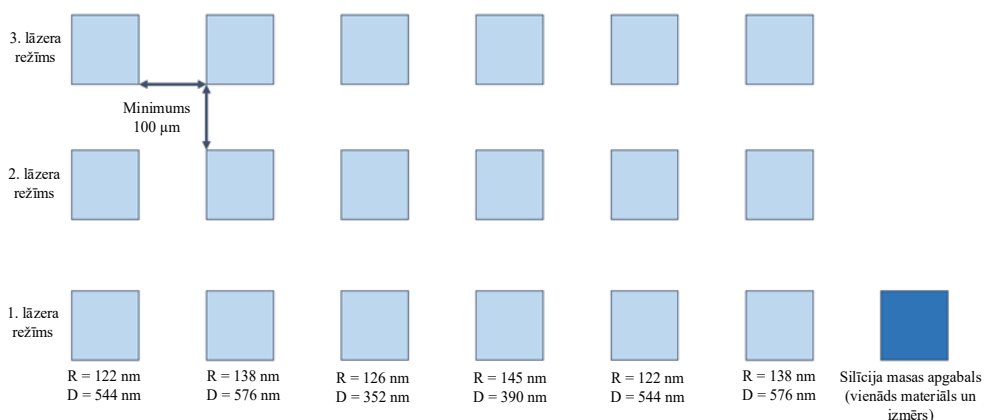
$$\sigma_{\text{eff}} = \frac{\sigma_{\text{sca}}}{\pi R_{\text{cyl}}^2}, \quad (2.1.)$$

kur  $\sigma_{\text{eff}}$  – efektīvais izkliedes šķērsgriezums,  $\text{m}^2$ ;

$\sigma_{\text{sca}}$  – izkliedes šķērsgriezums,  $\text{m}^2$ ;

$R_{\text{cyl}}$  – cilindra rādiuss, m.

Metavirsmas paraugu izvietojums redzams 2.3. attēlā. Sērija tika ražota atsevišķi, tā ietvēra 18 metavirsmas (sešas dažādas ģeometriskās konfigurācijas trīs dažādos ražošanas režīmos) ar atlasītiem detalizētākiem parametriem, kas bija atbilstoši teorētiskajiem aprēķiniem, un vienu papildu paraugu, uz kura bija uzklāta plāna silīcija plēve ar tādu pašu augstumu kā metaatomu augstums.



2.3. att. Parauga piemērs. Paraugu izkārtojums ar dažādiem metaatomu ģeometriskiem parametriem, periodiem un dažādiem ražošanas režīmiem.

Ģeometriskie parametri ar metavirsmu paraugu skaitu apkopoti 2.1. tabulā.

2.1. tabula

Metavirsmu parametri

Paraugu skaits	Cilindra rādiuss, nm	Metavirsmas periods, nm
1	138	576
2	122	544
3	145	390
4	126	352
5	138	576
6	122	549

Šo metavirsmu pārraides spektri tika mērīti diapazonā no 400 μm līdz 1000 μm, gaismas avots bija halogēna lampa, detektors – *OceanInsight QEpro* spektrometrs. Gaisma tika fokusēta uz metavirsmu un savākta pēc tās, izmantojot identiskas 40× lēcas. Fokusēšanas laukuma diametrs bija aptuveni 15 μm; spektrs tika ņemts no struktūras centra. Gaismas kritums ir normāls, gaisma ir nepolarizēta. Metavirsmas eksperimentālā pārraide tiek aprēķināta ar spektrometra programmatūru, izmantojot 2.2. vienādojumu.

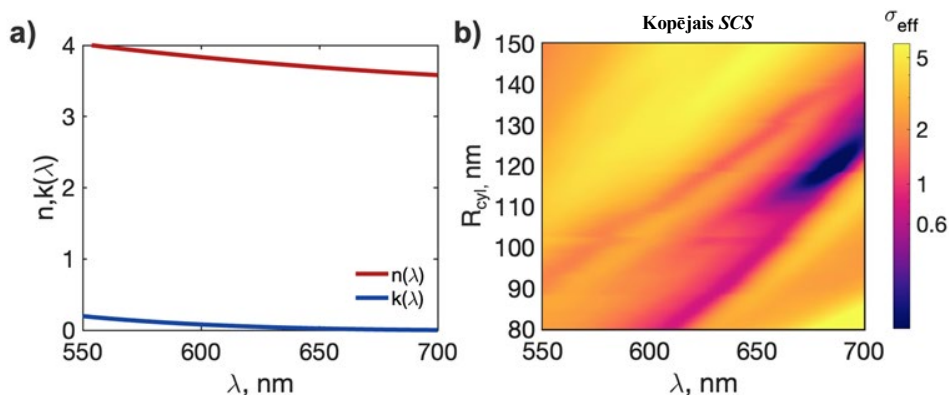
$$T = \frac{I_{\text{metasurface}} - I_{\text{noise}}}{I_{\text{substrate}} - I_{\text{noise}}}, \quad (2.2.)$$

kur  $I_{\text{noise}}$  – jauda (troksnis), ko iegūst spektrometrs bez krītošās gaismas,  $\text{W/m}^2$ ;

$I_{\text{substrate}}$  – jauda, ko spektrometrs iegūst, kad gaisma krīt uz substrāta,  $\text{W/m}^2$ ;

$I_{\text{metasurface}}$  – jauda, ko spektrometrs iegūst, kad uz metavirsmas atstaro gaisma ar substrātu,  $\text{W/m}^2$ .

Eksperimentāli izmērītā hidrogenēta amorfa silīcija (a-Si) otrā paraugu kopuma refrakcijas indeksa dispersija tika izmantota kā materiāls skaitliskajiem aprēķiniem (2.4. att.).



2.4. att. a) hidrogenētā amorfā silīcija (a-Si) eksperimentāli izmērītā refrakcijas indeksa reālās (n) un iedomātās (k) daļas atkarībā no viļņa garuma; b) skaitliski aprēķinātā hibrīda anapola evolūcija vienai nanodaļīnai atkarībā no rādiusa un viļņa garuma.

Tāpat kā iepriekšējā parauga komplektā, 2.4. b) attēlā redzams atšķirīga hibrīdanapola izkliedes kritums vienai cilindriskai daļīnai ar dažādiem rādiusiem.

### 3. GALVENIE REZULTĀTI

Promocijas darbs piedāvā jaunu koncepciju, lai izveidotu caurspīdīgas metavirsmas, izmantojot silīcija metavirsmas hibrīdanapola stāvoklī. Detalizēti tika pētītas metavirsmu īpašības, kuru pamatā ir hibrīdanapole. Hibrīdanapola multirezonanses raksturs ļauj mainīt pārraidīto optisko fāzi plašā spektrālā un ģeometriskā diapazonā. Svarīgi, ka – atšķirībā no Heigensa avotiem – savienojums starp daļiņām praktiski ir necīgs. Tādējādi hibrīdanapola daļiņa tuvojas “īstā” metaatoma ideālam. Šī spēja ir pierādīta, izstrādājot ultrakompaktus silīcija blokus ar daļiņu sienīņu atstatumu, kas vienāds ar  $1/8$  no krītošā viļņa garuma redzamajā spektrā, un ir pētītas nesakārtotas metavirsmas, kuru uzvedība ir identiska to periodisko kolēģu uzvedībai. Tika pētīta substrāta ietekme un demonstrēta pārraides loga saglabāšana, kad metavirsmas tika uzklātas uz plaša dielektrisko materiālu klāsta, kas, iespējams, atvieglo to integrāciju mikroshēmās. Kā koncepcijas pierādījums tika demonstrēts, ka, pamatojoties tikai uz periodiskā masīva optisko reakciju, ir iespējams modulēt optisko fāzi ultraātram Gausa impulsam, kas ar vienības efektivitāti pārraidīts caur ļoti nesakārtotu metavirsmu, kas uzklāta uz stikla substrāta. Visbeidzot, parādīta konusu ietekme uz hibrīdanapola īpašībām, un pirmo reizi silīcija metaatomos ir iegūts hibrīdanapola stāvoklis nošķeltu konusu veidā, ievērojami atvieglojot, vienkāršojot un samazinot šādu struktūru izveides izmaksas.

Rezultāti detalizēti izklāstīti autora 1., 3., 4., 6., 8. un 10. zinātniskajā publikācijā.

**Šo zinātnisko rakstu galvenais rezultāts** ir silīcija metavirsmu, kas sastāv no cilindriem hibrīdanapola stāvoklī, optisko īpašību teorētiskais apraksts, skaitliskā simulācija un eksperimentālais apstiprinājums.

Šajā promocijas darbā tika atklāts, ka nesen identificēto nesatricinošo hibrīdanapolu režīmu var panākt ne tikai eliptiskās un cilindriskās nanodaļiņās, bet arī konusveida nanodaļiņās. Ir parādīts, kā, pielāgojot ģeometriskos parametrus, iespējams manipulēt ar anapolu režīmiem dažādiem daudzpoliem, tādējādi panākot hibrīdanapolu režīmu. Promocijas darbs ir solis uz priekšu nanofotonikā, kas ļauj izpētīt sarežģītākas formas un precīzāk noregulēt efektus, ko iespējams sasniegt ar atsevišķiem nanoizkļiedētājiem. Pētījums ievērojami samazina fotonisko ierīču izstrādes izmaksas un paver jaunas iespējas praktiskiem lietojumiem nākamās paaudzes fotonikā. Šajā promocijas darbā iegūtie rezultāti ir izmantojami dažādās pētniecības jomās, piemēram, radot daudzveidīgas dielektriskās nanoantenas rezonatoru ķēžu veidā, salīdzinot ar sfēru vai cilindru ķēdēm. Tie arī paver ceļu metavirsmām, ar kurām iespējams panākt līdz šim nesasniedzamus optiskos efektus.

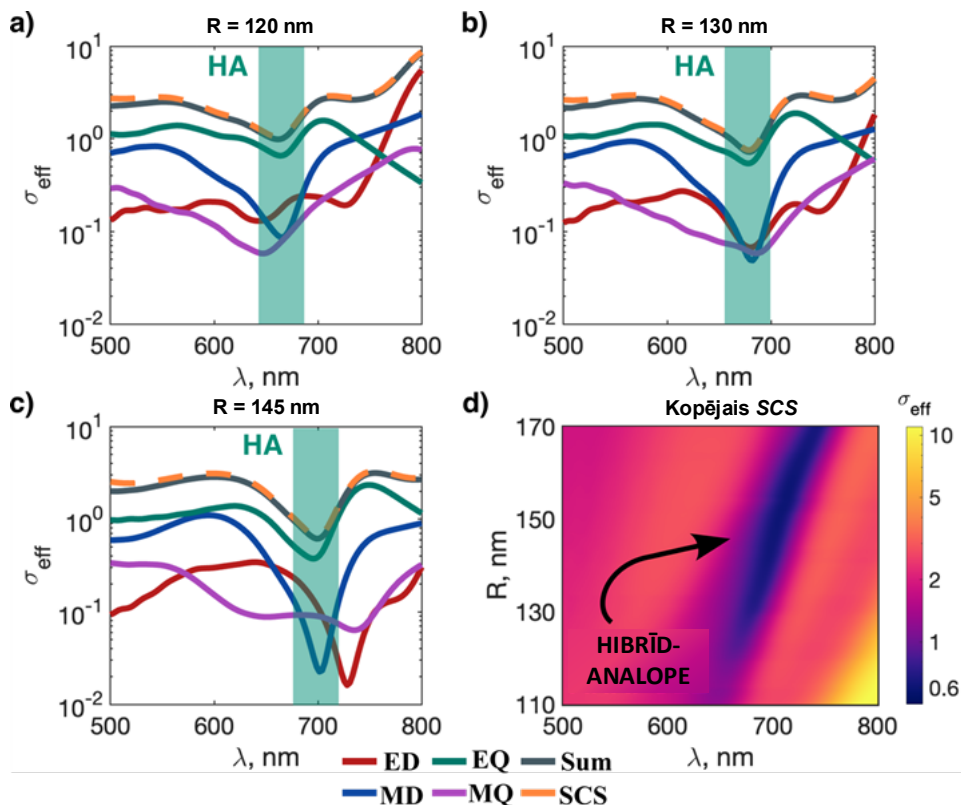
Rezultāti detalizēti izklāstīti autora 2., 5., 7., 9., 11. un 12. zinātniskajā publikācijā.

**Galvenais šī promocijas darba ieguvums** ir hibrīdanapola stāvokļa teorētiskais apraksts un skaitliskā simulācija nošķeltos silīcija nanokonusus.

Diemžēl patlaban vēl nav publicēti tie materiāli, kas tika mērīti, tāpēc apakšnodaļā izklāstīti iegūtie rezultāti.

Pirmkārt, bija nepieciešams demonstrēt hibrīdanapola režīma esamību atsevišķās silīcija nanodaļiņās eksperimentāli izmērītai refrakcijas indeksa dispersijai, kas redzama 2.2. attēlā.

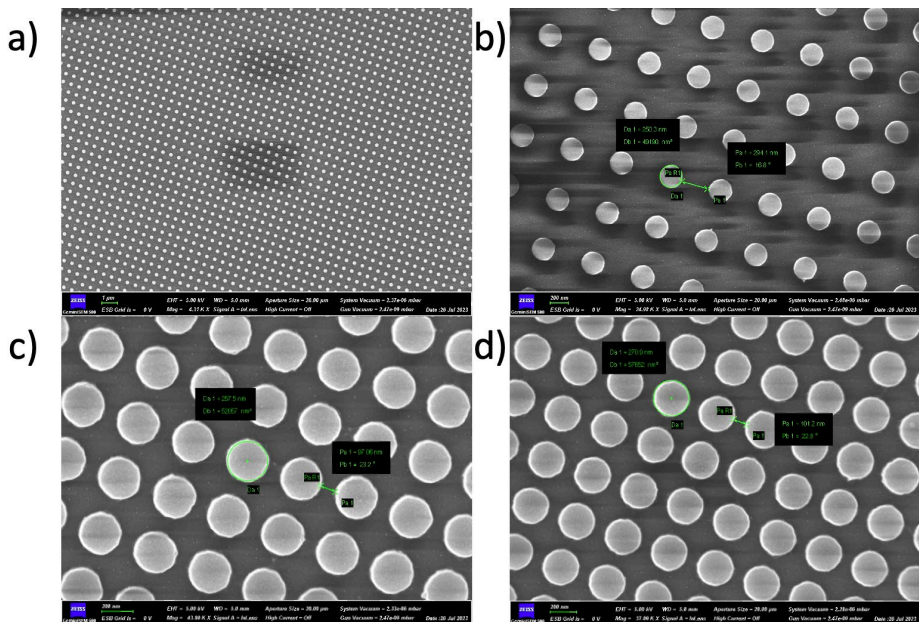
3.1. attēlā parādīti skaitliskās simulācijas rezultāti.



3.1. att. Skaitliski aprēķinātā hibrīdanapola evolūcija vienai nanodaļiņai kā rādiusa un viļņa garuma funkcija. (a–c): *SCS* daudzpolu dekompozīcijas (puslogaritmiskā skala) izvēlētajam rādiusam  $R_{\text{cyl}}$ . Visos aprēķinos nanodaļiņas augstums tika saglabāts nemainīgs ( $H = 370$  nm). (d) Kopējais *SCS* kā rādiusa un viļņa garuma funkcija.

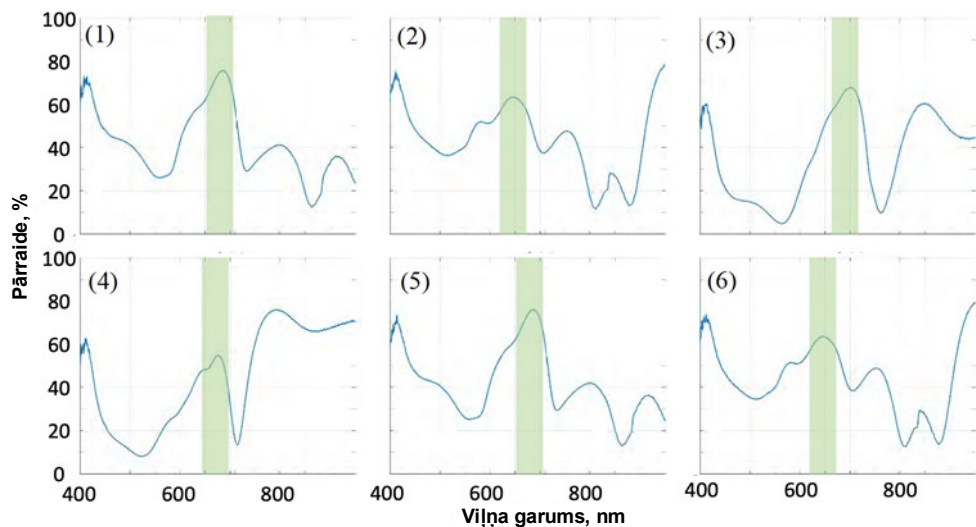
3.1. a–c attēlā redzama viena cilindra formas nanoizkļiedētāja skaitliski aprēķinātā daudzpolu sadalīšanās dažādiem rādiusiem eksperimentāli izmērītajam refrakcijas koeficientam. Hibrīdanapola izkļiedes kritums mainās ar dažādiem ģeometriskiem parametriem, bet joprojām pastāv parādītajiem parametriem. 3.1. d attēlā redzams, pie kādiem ģeometriskiem parametriem šādā silīcija daļiņā notiks anapola kritums.

Iegūto cilindru augstums bija  $H = 370$  nm. 3.2. attēlā redzami metavirsma skenējošā elektronu mikroskopa (SEM) attēli.



3.2. att. Metasvirsmas SEM attēla piemēri. (a) Vispārējs skats uz metavirsmu ar attālumu starp metaatomu sienām  $s = 300$  nm; (b) metasvirsmā ar attālumu starp metaatomiem  $s = 300$  nm un rādiusu  $R_{\text{cyl}} = 125$  nm; (c)  $s = 100$  nm un  $R_{\text{cyl}} = 130$  nm; (d)  $s = 100$  nm un  $R_{\text{cyl}} = 135$  nm.

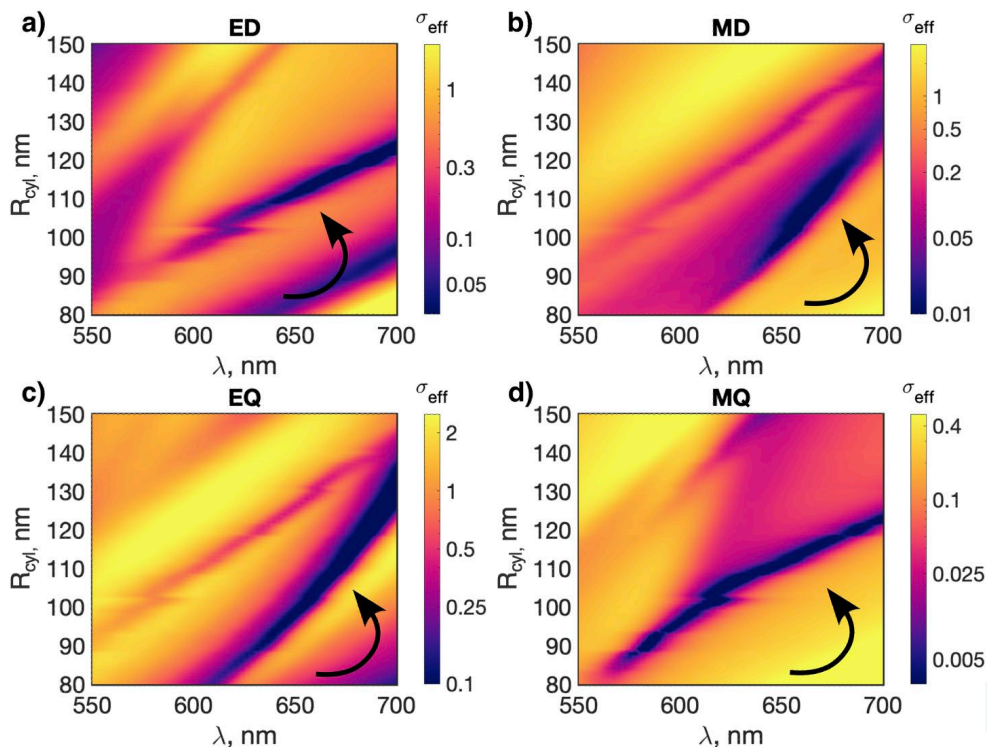
Šo metavirsmu pārraides spektri tika mērīti diapazonā no 400  $\mu\text{m}$  līdz 1000  $\mu\text{m}$  (3.3. att.).



3.3. att. Izmēritie caurlaidības spektri silīcija metavirsmām hibrīdanapola režīmā metavirsmām ar dažādiem periodiem  $s$  un rādiusiem  $R_{\text{cyl}}$ . Numerācija attēlā atbilst numerācijai 2.1. tabulā.

Spektrālajā raksturlīknē ir redzama iezīme diapazonā no 650 nm līdz 700 nm, kas atbilst hibrīdanapola stāvoklim (maksimālā caurlaidība, kas atbilst minimālajai izkliedei). Salīdzinot parastās metavirsma un superblīvās, redzams, ka hibrīdanapola caurlaides maksimums gandrīz nemaina savu spektrālo stāvokli.

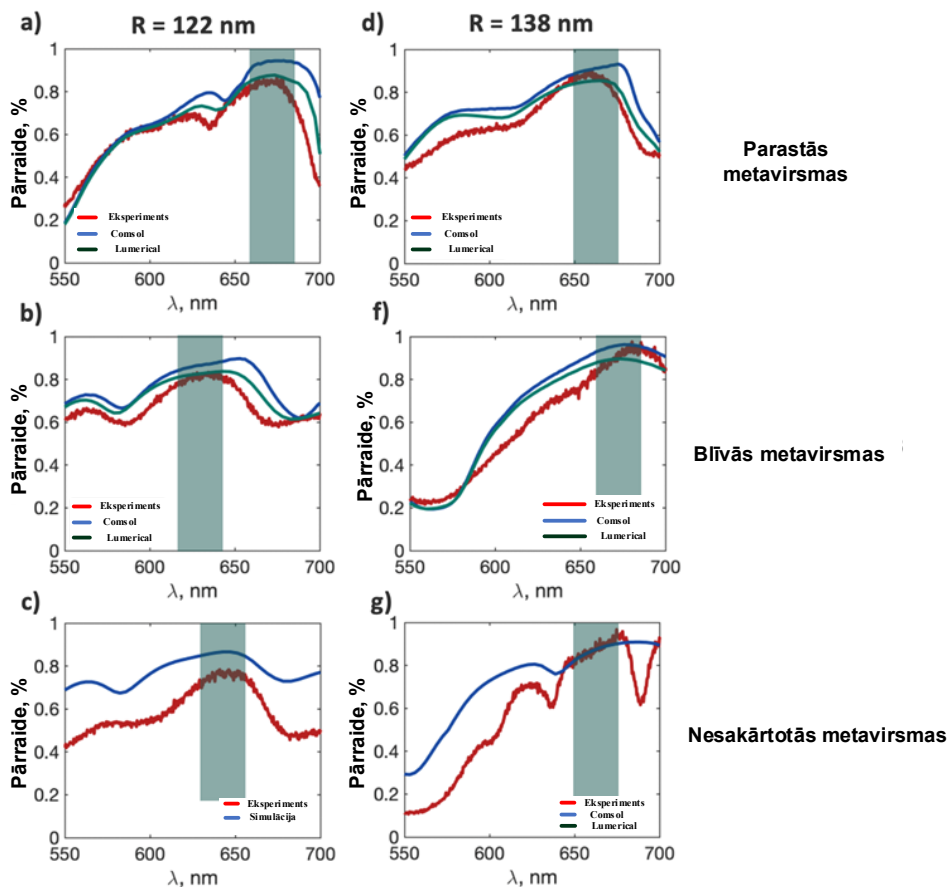
Lai pierādītu, ka tas patiešām ir hibrīdanapola stāvoklis, izveidots 3.4. attēls, kurā parādīta daudzpolu sadalīšanās.



3.4. att. Katra daudzpola *SCS* evolūcija (logaritmiskā skalā) (a) ED, (b) MD, (c) EQ, (d) MQ, kā funkcija no viļņa garuma un rādiusiem. Bultiņa norāda katra daudzpola anapola stāvokli.

3.4. attēlā redzamas anapola līnijas, kas krustojas parametru telpā noteiktā reģionā, ko sauc par hibrīdanapola stāvokli.

Izmantojot šādas daļiņas, eksperimentāli tika iegūtas metavirsma ar diviem dažādiem rādiusiem un trīs dažādām konfigurācijām – parasto, blīvo un nesakārtoto (3.5. att.).



3.5. att. Izmērītie caurlaidības spektri silīcija metavirsmām hibrīdanapola režīmā metavirsmām ar dažādiem periodiem s un struktūra bez stingras nanodaļiņu izkārtojuma secības ievērošanas rādiusam (a–c)  $R_{\text{cyl}} = 122$  nm; (d–g)  $R_{\text{cyl}} = 138$  nm.

### Šis promocijas darba daļas galvenais rezultāts

Eksperimentālie rezultāti tika salīdzināti ar metavirsmu skaitliskām simulācijām refrakcijas koeficientam un rādiusiem. Skaitliskās un eksperimentālās līknes ir diezgan līdzīgas. Pārraidei ir maksimums, kas liecina par hibrīdanapola stāvokli šajās metavirsmās.

### Promocijas darbā iegūtie rezultāti tika izmantoti šādos projektos:

- LZP projekts “*Neizkļiedējošo stāvokļu dinamika nanofotonikā (DNSSN)*” Nr. [lzp-2021/1-0048](#);
- LZP projekts “*Jaunas ne-Ermitiskās singularitātes pilnīgi dielektriskās nanostrukturās (NEO-NATE)*” Nr. [lzp-2022/1-0553](#).



## 4. NOBEIGUMS

Šīs nodaļas **4.1. apakšnodaļā** apskatīti promocijas darba galvenie sasniegumi, **4.2. apakšnodaļā** sniegti galvenie secinājumi, **4.3. apakšnodaļā** dota perspektīva nākotnes pētījumiem.

### 4.1. Promocijas darba galvenie sasniegumi

1. Izstrādāts metavirsmas modelis, kas satur silīcija cilindriskus metaatomus, kas noteiktā viļņa garumā uztur hibrīdanapola stāvokli. Pierādīts, ka šāda metavirsmas ir caurspīdīga un nemaina starojuma optisko fāzi, kas iet caur to anapola viļņa garumā.
2. Metavirsmu praktiskai ieviešanai neizbēgami ir nepieciešama substrāta klātbūtne. Tam var būt svarīga loma optiskajā reakcijā, un tas ievieš magnetoelektrisko savienojumu. Pretstatā parastajām rezonansēm hibrīdanapols ir ārkārtīgi stabils, ja tiek uzklāts uz substrāta. Pētītajā nanocilindrā ar hibrīdanapola stāvokli (atšķirībā no parastajiem anopoliem vai Heigensa avotiem) pilnīga pārraide tika panākta, pateicoties tam, ka pārklājas rezonanses *Mie* un Fabri-Perota režīmi. Pirmos var saistīt ar stāvviļņiem, kas rodas starp rezonatora dobuma sānu sienām, un pēdējos galvenokārt veido stāvviļņi starp augšējo un apakšējo sienu. Līdz ar to substrāta atstarošanas atšķirības galvenokārt ietekmē Fabri-Perota režīmu amplitūda, savukārt *Mie* režīmi paliek gandrīz nemainīgi. Tomēr, ja starp daļiņu un substrātu ir ievērojams kontrasts, hibrīdanapola stāvoklis mainās nenozīmīgi. Substrāta refrakcijas indeksam tuvojoties nanodaļiņas refrakcijas indeksam (kontrasta izžušana un attiecīgi Fabri-Perota režīma noplūde substrātā), hibrīdanapola stāvoklis pakāpeniski pārvēršas par parasto elektrisko dipola anopoli, joprojām saglabājot spēcīgu izkliedes samazināšanos.

Lai pētītu šo parādību, tika iegūta pārraide, atstarošana un absorbcija hibrīdanapola stāvoklī metavirsmas, kas nogulsnēta uz virknes hipotētisku substrātu ar refrakcijas rādītājiem diapazonā no 1 līdz 2. Skaitliskajām simulācijām tika izmantota eksperimentāli iegūta amorfā silīcija refrakcijas indeksa dispersija.

Tika konstatēta pakāpeniska joslas platuma sašaurināšanās galvenokārt augstas pakāpes *Bloch* režīmu sarkanās nobīdes dēļ. Ir svarīgi atzīmēt, ka pašas metavirsmas kopējā caurlaidība hibrīdanapola viļņa garuma tuvumā saglabājas tuvu 100 %, pat ja refrakcijas koeficients ir 2.

Atšķirībā no vienas daļiņas gadījuma metavirsmas gadījumā *Mie* un Fabri-Perota režīmi ir savienoti. Kā minēts iepriekš, kad kontrasts samazinās, Fabri-Perota režīms noplūst substrātā un hibrīdanapols deģenerējas par parastu anopoli. Ievērojama kontrasta klātbūtnē hibrīdanapola stāvokļa izraisītā caurlaides josla ir ļoti izturīga pret substrāta refrakcijas indeksa izmaiņām. Šie rezultāti skaidri parāda, ka metavirsmu var tieši uzklāt uz parastā stikla ( $\text{SiO}_2$ ) vai cita substrāta bez papildu projektēšanas darbībām un nodrošināt pilnīgu caurlaidību, kā arī optisko fāzes vadību.

Rezultātā tika saglabāts kontrasts starp metavirsmas un substrāta elementu refrakcijas rādītājiem, hibrīdanapola metavirsmas ir nejutīga pret dažādiem substrāta materiāliem, kas ievērojami vienkāršo piedāvāto konstrukciju eksperimentālo realizāciju.

Promocijas darbā pēfīto hibrīdanapola metavirsmu unikālā priekšrocība, salīdzinot ar tradicionālajām Heigensa metavirsmām, ir to īpašību stabilitāte pret daļiņu izvietojuma izmaiņām, jo hibrīdanapola stāvoklī atsevišķi hibrīdanapola metavirsmas elementi (metaatomi) praktiski savstarpēji nemijiedarbojas. Šajā gadījumā efektīvie metaatomu daudzpoli uz substrāta ir gandrīz identiski izolētas daļiņas daudzpoliem. Tas nozīmē, ka pat ļoti mazos attālumos tos neietekmē izkliedētie kaimiņu lauki atšķirībā no parastās nanoantenas, piemēram, Kerkerā efekta, kura optiskā reakcija ir ļoti atkarīga no kaimiņu klātbūtnes un atrašanās vietas.

3. Tika pierādīts, ka hibrīdanapols saglabā savas īpašības pat ļoti mazos attālumos (līdz 6 % no atsevišķu metaatomu diametra) starp metavirsmas elementiem. Tik cieši iesaiņotām metavirsmām ir panākta veiksmīga atstarošanas nomākšana. Svarīgi, ka pārraidītā lauka optiskā fāze arī praktiski nemainās. Papildus tā akadēmiskajai nozīmei šis rezultāts nosaka pamatu ultramazu pikseļu ieviešanai, salīdzinot ar līdz šim sasniegto citās platformās, kas ir ļoti svarīgi, piemēram, hologrāfiskām lietojumprogrammām.
4. Tika pierādīts, ka atšķirībā no tradicionālajām periodiskajām Heigensa metavirsmām hibrīdanapola metavirsmas praktiski nav jutīgas pret metaatomu izkliedi. Tas tika parādīts, izmantojot virkni skaitlisko aprēķinu. Tika konstatēts, ka hibrīdanapola stāvoklis uzrāda ievērojamu izturību pret būtiskām novirzēm no ideāla periodiska režģa tieši tāpēc, ka to lielā mērā neietekmē kaimiņi, padarot to izvietojumu nenozīmīgu. Turklāt ir vērts atzīmēt, ka ierosinātajā metavirsmā metaatomos ir augsta lauka koncentrācija, kas raksturīga anapola režģiem. Tāpēc nesakārtotas hibrīdanapola metavirsmas ir principiāli jauna un elastīga platforma gaismas un matērijas mijiedarbības uzlabošanai nanomērogā. Šī hibrīdanapola metavirsmu īpašība sniedz unikālu iespēju tos izmantot nelineārajā optikā, piemēram, vairāku harmoniku ģenerēšanā.

Zīmīgi, ka šādas metavirsmas var izveidot pavisam vienkārši, neizmantojot sarežģītas optimizācijas metodes vai rūpīgu metaatomu izvietojumu. Tas ir īpaši svarīgi lielu metavirsmu ražošanā, jo strikta metaatomu periodiskuma uzturēšana lielā mērogā rada ievērojamas problēmas. Sarežģītība palielinās, palielinoties metavirsmas izmēram, piemēram, uzliekot tās izmēram tehnoloģisku augšējo robežu. Turpretim hibrīdanapola metavirsmas šādi ierobežojumi nav saistoši, un tām var būt praktiski neierobežoti izmēri.

5. Lai sasniegtu 100 % pārraidi un kontrolētu pārraidītā viļņa optisko fāzi, tika ieviests jauns mehānisms, kas balstīts neizstarojoša stāvokļa fizikā – hibrīdanapolā. Ņemot vērā turpmāko praktisko ieviešanu, cilindra rādiuss tika izvēlēts kā parametrs, lai kontrolētu starojuma optisko fāzi. Šādu izvēli noteica tas, ka metaatomu rādiusa

maiņu var salīdzinoši viegli realizēt, izmantojot vispāratzītas ražošanas metodes, piemēram, elektronu staru litogrāfiju, kam seko reaktīvā jonu kodināšana.

Izmantojot skaitliskās metodes, tika izveidota karte, kas saistīja konkrēto pārnesto optisko fāzi ar metaatoma ģeometrisku parametru. Šāda karte ļauj izvēlēties metaatomu, kas rada noteiktu optisko fāzi, vienlaikus saglabājot pilnīgu metavirsmas caurspīdīgumu. Caurlaidība un optiskā fāze tika aprēķināta hibrīdanapola metavirsmas ar nelieliem attālumiem starp metaatomiem dažādiem rādiusiem un viļņu garumiem. Pateicoties kartei, hibrīdanapola caurspīdīguma logā ir iespējams iestatīt darbības viļņa garumu un novērot precīzi noteiktas optiskās fāzes izmaiņas rādus kopai.

Tika demonstrēta metode, kā, mainot metaatoma rādus, kontrolēt caur struktūru pārraidītā starojuma optisko fāzi. Izpētītajā gadījumā optiskās fāzes maiņa galvenokārt notiek elektriskā kvadrāpola momenta ieguldījuma palielināšanās dēļ, ko ievērojami samazina elektriskais kvadrāpola anapols. Ar 2D karšu palīdzību kļūst iespējams izvēlēties noteiktu optiskās fāzes aizkavi noteiktā rādiusa hibrīdanapola nanocilindriem, vienlaikus saglabājot pilnīgu struktūras caurspīdīgumu.

6. Izpētīta iespēja modulēt ultraātra Gausa impulsa optisko fāzi pārraides režīmā, izmantojot nesakārtotu hibrīdanapola masīvu uz stikla substrāta virsmas. Spēcīgi traucējumi plaknē tika izvēlēti, lai ilustrētu sistēmas neatkarību no daļiņu izvietojuma. Pēc tam tika veikta ienākošā  $x$  polarizētā Gausa impulsa ar 600 fs ilgumu laika domēna ierobežoto atšķirību laika domēna (*FDTD*) simulācija. Nanodaļiņu rādiusa vērtības svārstījās no 125 nm līdz 135 nm, lai iekļautos diapazonā, ko aptver hibrīdanapola stāvokļi.

Optiskās fāzes, ko pārnesa periodiskas un nesakārtotas metavirsmas, bija gandrīz identiskas. Pārraide saglabājās virs 85 %, ko apstiprina pilna laika profili. Alternatīvi, lai gan parasti tā ir mazāk praktiska, ierīci var kontrolēt arī ar viļņa garumu. Tika pierādīts, ka *Mie* un Fabri-Perota režīmu mijiedarbība nodrošina staru kūļa papildu optiskās fāzes modulāciju. Tika skaitliski ieviests ultraātrs optiskās fāzes modulators, kura pamatā ir nesakārtots hibrīdanapola masīvs. Rezultāti liecina par iespēju elastīgi veidot metaatomus bez nepieciešamības veikt laikietilpīgas optimizācijas darbības.

7. Izpētīta paraugu neidealitātes ietekme uz dielektrisko nanoizkļiedētāju efektiem, kā arī veikts kvantitatīvs pētījums par konusveida ( $1 - R_{top}/R_{bottom}$ ) ietekmi uz iegūtajām optiskajām īpašībām nanodobumā. Rūpīgi tika pārbaudīta konusa formas ietekme uz hibrīdanapola režīmu atsevišķās nanodaļiņās un tajās balstītajās metavirsmās. Tika konstatēts, ka hibrīdanapola stāvoklis cilindros tiek izjaukts, ja tiek veiktas formas izmaiņas daļiņu simetrijas izmaiņu dēļ. Šādos gadījumos atveras iepriekš slēgti kanāli, kas izraisa papildu mijiedarbību starp rezonatora režīmiem. Turklāt pirmo reizi tika demonstrēta iespēja sasniegt hibrīdanapola režīmu koniskās daļiņās, piedāvājot jaunas iespējas fotonisku ierīču projektēšanai ar precīzāku optisko īpašību regulēšanu, pateicoties papildu brīvības pakāpei, ko nodrošina nošķelta konusa rādus.

## 4.2. Galvenie secinājumi

1. Pierādīts, ka hibrīdanapola stāvoklī esošām metavirsmām piemīt gandrīz perfekta caurlaidība un tās neizraisa pārraidītā starojuma optiskās fāzes vai amplitūdas izmaiņas hibrīdanapola stāvoklim atbilstošā viļņa garumā.
2. Parametriskās modelēšanas rezultātā, mainot pamatnes dielektriskās īpašības (ar refrakcijas koeficientu, kas mainās robežās no 1 līdz 2), tika aprēķināti pārraides spektri un elektromagnētisko lauku telpiskā sadalījuma kartes metaatomā un ārpus tā. Pierādīts, ka, pastāvot ievērojamam refrakcijas indeksa kontrastam starp daļiņu un substrātu, hibrīdanapola stāvoklis saglabājas ļoti stabils. Tomēr, substrāta refrakcijas rādītājam tuvojoties nanoantenas refrakcijas rādītājam, tika novēroti Fabri-Perota režīma noplūde uz substrātu, izraisot hibrīdanapola pakāpenisku pāreju uz elektrisko dipola anadolu.
3. Pierādīts, ka tas pats efekts ļauj izveidot metavirsmas hibrīdanapola stāvoklī ar ļoti blīvu metaatomu iepakojumu (attālums starp sienīņām ir līdz 6 % no atsevišķu metaatomu diametra). Hibrīdanapola stāvoklī metaatomi savstarpēji neietekmē cits citu.
4. Aprēķināti metavirsmu pārraides spektri gan pilnīgi sakārtotam metaatomu izkārtojumam, gan nesakārtotām konfigurācijām. Salīdzinot iegūtos spektrus un pārraidītā lauka optiskās fāžu līknes, ir pierādīts, ka hibrīdanapolu metavirsmas ir nejutīgas pret metaatomu nesakārtotību. Metaatomus hibrīdanapola stāvoklī neietekmē to kaimiņi.
5. Izstrādāta metode, kā kontrolēt caur metavirsmu plūstošā lauka amplitūdu un optisko fāzi hibrīdanapola stāvoklī. Izmantojot parametrisku skaitlisku modelēšanu (mainot nanocilindru rādījumus), tika analizēti elektromagnētiskie lauki, kas iet caur metavirsmu hibrīdanapola stāvoklī. Pēc tam tika izveidota karte, kas saista pārraidīto optisko fāzi ar metaatomu ģeometrisku parametru. Šī karte ļauj izvēlēties ģeometrisku parametru, kas rada vēlamu optisko fāzi, vienlaikus saglabājot pilnīgu metavirsmas caurspīdīgumu.
6. Veikta ultraātras optiskās fāzes modulatora skaitliskā simulācija, izmantojot nesakārtotu masīvu hibrīdanapola stāvoklī, ar impulsa ilgumu aptuveni 600 fs. Veicot metaatomu formas izmaiņas, tika panākta kontrole pār impulsu, kas iet cauri struktūrai. Iegūtie rezultāti liecina par iespēju elastīgi projektēt metaierīces, neveicot laikietilpīgus optimizācijas soļus un panākot ārkārtīgi augstu izšķirtspēju.
7. Pierādīta koniskuma maiņas ietekme uz rezonansēm, kas ir atbildīgas par hibrīdanapola režīmu. Koniskuma maiņa efektīvi izjauc daļiņu pamatsimetriju un atver iepriekš nepieejamus kanālus, kā rezultātā rodas papildu mijiedarbība starp dobuma režīmiem. Šī efekta izpratne var izrādīties izšķiroša nākotnes lietojumos, kas izmanto hibrīdanapola unikālās īpašības, piemēram, metavirsmu inženierijā un sensoru veidošanā.

Turklāt papildus jau zināmajām cilindru un elipsoīdu konfigurācijām hibrīdanapola režīmā ir izpētīts potenciāls hibrīdanapola stāvokļa sasniegšanai nanokonusus.

Nanokonusi piedāvā vienkāršāku un vieglāk izgatavojamu platformu daudzpolu interferences efektu ieviešanai. Tika pierādīts, ka hibrīdanapola režīms nanokonusus ir noturīgs pat tad, ja augšējais rādiuss mainās līdz pat 30 %, lai gan ar nelielu rezonanses frekvences nobīdi. Līdz ar to ir paplašināta pilnīgi dielektrisko nanostruktūru bibliotēka, kas atbalsta hibrīdanapola režīmu.

### 4.3. Nākotnes perspektīvas

Hibrīdanapola stāvoklī esošās metavirsmas piedāvā daudzsološu platformu dažādiem fotoniskiem efektiem un lietojumiem, pateicoties to unikālajām īpašībām. Pašreizējos pētījumus var paplašināt vairākos virzienos.

- Jaunu fotonisko efektu izpēte, pamatojoties uz anapolu metavirsmām, piemēram, augstas kvalitātes kvazisaistītu stāvokļu iegūšana nepārtrauktībā, izmantojot hibrīdanapolus. Tas varētu kalpot kā daudzsološa platforma jaunas paaudzes ultrajūtīgu sensoru izstrādei.
- Kontrolējamas optiskās struktūras modeļa izstrāde, kas ietver silīcija metavirsmas hibrīdanapola stāvoklī, 2D materiālus un substrātus. Katrs elements mijiedarbotos ar pārējiem, ļaujot izveidot selektīvi caurspīdīgu struktūru, lai kontrolētu caur to plūstošo optisko starojumu.
- Izpētīt optiskos spēkus, kas iedarbojas uz neizkliedējošām atsevišķām silīcija daļiņām hibrīdanapola režīmā, kad tās tiek apstarotas ar dažāda veida stariem.

## PATEICĪBA

Vēlos pateikties par nenovērtējamo palīdzību šī promocijas darba tapšanā vairākiem cilvēkiem, bez kuriem es nebūtu spējis pabeigt šo pētījumu.

- Liels paldies manam zinātniskajam vadītājam profesoram Vjačeslavam Bobrovam par viņa nenovērtējamo ieguldījumu šajā darbā! Neviens no šiem darbiem nebūtu bijis iespējams bez viņa atbalsta, patiesas ieinteresētības pētniecībā un sniegtajām attīstības iespējām.
- Esmu pateicīgs savam zinātniskajam konsultantam profesoram Aleksandram Šaļinam par zinātniskajām diskusijām un viņa unikālo pieeju pētniecībai un konsultācijām.
- Pateicos savam kolēģim *Dr. Denisam Kislovam* par pacietību, zināšanām un prasmēm, ar kurām viņš dalījās ar mani!
- Esmu ļoti pateicīgs *Dr. Adria Canos Valero* par pieredzi, ko viņš man nodeva studiju laikā, par viņa pacietību un gudrību, kā arī par to, ka viņš palīdzēja man spert pirmos mazos soļus lielajā zinātnē.
- Paldies asociētajam profesoram Tomam Salgalam par draudzīgumu, atbalstu kritiskās situācijās, pieredzi, ko viņš man deva, un prasmēm, ko viņš man palīdzēja attīstīt!
- Pateicos arī kolēģiem Dmitrijam Redkam un Aleksandram Krotovam par piedzīvojumiem bagāto garu, draudzīgumu un vērtīgo padomu, ko viņi sniedza.
- Liels paldies manai ģimenei, kura mani atbalstīja visos manos centienos un palīdzēja pārvarēt visgrūtākās situācijas!
- Esmu pateicīgs visiem kolēģiem, kuri mani iedrošināja nepadoties, dalījās savā zinātniskajā pieredzē, iesaistījās diskusijās un sniedza šim darbam būtisku atbalstu un prasmes.
- Visbeidzot, liels paldies visiem dalībniekiem, kas piedalījās pētījumā un padarīja to iespējamu!

## LITERATŪRA

1. Kivshar, Y.: All-dielectric meta-optics and non-linear nanophotonics. *Natl Sci Rev.* 5, 144–158 (2018). <https://doi.org/10.1093/nsr/nwy017>.
2. Krasnok, A. E., Miroshnichenko, A. E., Belov, P. A., Kivshar, Y. S.: All-dielectric optical nanoantennas. *Opt Express.* 20, 20599 (2012). <https://doi.org/10.1364/OE.20.020599>.
3. Koshelev, K., Kivshar, Y.: Dielectric Resonant Metaphotonics. *ACS Photonics.* 8, 102–112 (2021). <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.0c01315>.
4. Krasnok, A. E., Miroshnichenko, A. E., Belov, P. A., Kivshar, Y. S.: All-dielectric optical nanoantennas. *Opt Express.* 20, 20599 (2012). <https://doi.org/10.1364/oe.20.020599>.
5. Yan, J., Liu, X., Ma, C., Huang, Y., Yang, G.: All-dielectric materials and related nanophotonic applications, (2020).
6. Yan, J., Liu, X., Ma, C., Huang, Y., Yang, G.: All-dielectric materials and related nanophotonic applications. *Materials Science and Engineering R: Reports.* 141, 100563 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.mser.2020.100563>.
7. Wang, J., Du, J.: Plasmonic and Dielectric Metasurfaces: Design, Fabrication and Applications. *Applied Sciences.* 6, 239 (2016). <https://doi.org/10.3390/app6090239>.
8. Bosio, N., Šípová-Jungová, H., Länk, N. O., Antosiewicz, T. J., Verre, R., Käll, M.: Plasmonic versus All-Dielectric Nanoantennas for Refractometric Sensing: A Direct Comparison. *ACS Photonics.* 6, 1556–1564 (2019). <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.9b00434>.
9. Lalanne, P., Yan, W., Vynck, K., Sauvan, C., Hugonin, J. P.: Light Interaction with Photonic and Plasmonic Resonances. *Laser Photon Rev.* 12, 1–38 (2018). <https://doi.org/10.1002/lpor.201700113>.
10. Terekhov, P. D., Babicheva, V. E., Baryshnikova, K. V., Shalin, A. S., Karabchevsky, A., Evlyukhin, A. B.: Multipole analysis of dielectric metasurfaces composed of nonspherical nanoparticles and lattice invisibility effect. *Phys Rev B.* 99, (2019). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.045424>.
11. Terekhov, P. D., Evlyukhin, A. B., Shalin, A. S., Karabchevsky, A.: Polarization-dependent asymmetric light scattering by silicon nanopillars and their multipoles resonances. *J Appl Phys.* 125, 173108 (2019). <https://doi.org/10.1063/1.5094162>.
12. Kivshar, Y., Miroshnichenko, A.: Meta-Optics with Mie Resonances. *Opt Photonics News.* 28, 24 (2017). <https://doi.org/10.1364/opn.28.1.000024>.
13. Shamkhi, H. K., Baryshnikova, K. V., Sayanskiy, A., Kapitanova, P., Terekhov, P. D., Belov, P., Karabchevsky, A., Evlyukhin, A. B., Kivshar, Y., Shalin, A. S.: Transverse scattering and generalized kerker effects in all-dielectric mie-resonant metaoptics. *Phys Rev Lett.* 122, 193905 (2019). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.193905>.
14. Liu, W., Kivshar, Y. S.: Generalized Kerker effects in nanophotonics and meta-optics [Invited]. *Opt Express.* 26, 13085 (2018). <https://doi.org/10.1364/OE.26.013085>.
15. Barhom, H., Machnev, A. A., Noskov, R. E., Goncharenko, A., Gurvitz, E. A., Timin, A. S., Shkoldin, V. A., Koniakhin, S. V., Koval, O. Y., Zyuzin, M. V., Shalin, A. S., Shishkin, I. I., Ginzburg, P.: Biological Kerker Effect Boosts Light Collection Efficiency in Plants. *Nano Lett.* 19, 7062–7071 (2019). <https://doi.org/10.1021/acsnanolett.9b02540>.
16. Bukharin, M. M., Pecherkin, V. Ya., Ospanova, A. K., Il'in, V. B., Vasilyak, L. M., Basharin, A. A., Luk'yanchuk, B.: Transverse Kerker effect in all-dielectric spheroidal particles. *Sci Rep.* 12, 7997 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11733-4>.
17. Alae, R., Filter, R., Lehr, D., Lederer, F., Rockstuhl, C.: A generalized Kerker condition for highly directive nanoantennas. *Opt Lett.* 40, 2645 (2015). <https://doi.org/10.1364/ol.40.002645>.

18. Sanz-Fernández, C., Molezuelas, M., Lasa-Alonso, J., de Sousa, N., Zambrana-Puyalto, X., Olmos-Trigo, J.: Multiple Kerker anapoles in dielectric microspheres. 1–5 (2020).
19. Hesari-Shermeh, M., Abbasi-Arand, B., Yazdi, M.: Generalized Kerker’s conditions under normal and oblique incidence using the polarizability tensors of nanoparticles. *Opt Express*. 29, 647 (2021). <https://doi.org/10.1364/oe.411110>.
20. Ali, A., Mitra, A., Aïssa, B.: Metamaterials and Metasurfaces: A Review from the Perspectives of Materials, Mechanisms and Advanced Metadevices. *Nanomaterials*. 12, 1027 (2022). <https://doi.org/10.3390/nano12061027>.
21. Chen, M., Kim, M., Wong, A. M. H., Eleftheriades, G. V.: Huygens’ metasurfaces from microwaves to optics: A review. *Nanophotonics*. 7, 1207–1231 (2018). <https://doi.org/10.1515/nanoph-2017-0117>.
22. Kamali, S. M., Arbabi, E., Arbabi, A., Faraon, A.: A review of dielectric optical metasurfaces for wavefront control. *Nanophotonics*. 7, 1041–1068 (2018). <https://doi.org/10.1515/nanoph-2017-0129>.
23. Terekhov, P. D., Evlyukhin, A. B., Redka, D., Volkov, V. S., Shalin, A. S., Karabchevsky, A.: Magnetic Octupole Response of Dielectric Quadrumers. *Laser Photon Rev*. 14, 1900331 (2020). <https://doi.org/10.1002/lpor.201900331>.
24. Geffrin, J. M., García-Cámara, B., Gómez-Medina, R., Albella, P., Froufe-Pérez, L. S., Eyraud, C., Litman, A., Vaillon, R., González, F., Nieto-Vesperinas, M., Sáenz, J. J., Moreno, F.: Magnetic and electric coherence in forward- and back-scattered electromagnetic waves by a single dielectric subwavelength sphere. *Nat Commun*. 3, 1171 (2012). <https://doi.org/10.1038/ncomms2167>.
25. Ginn, J. C., Brener, I., Peters, D. W., Wendt, J. R., Stevens, J. O., Hines, P. F., Basilio, L. I., Warne, L. K., Ihlefeld, J. F., Clem, P. G., Sinclair, M. B.: Realizing optical magnetism from dielectric metamaterials. *Phys Rev Lett*. 108, 1–5 (2012). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.097402>.
26. Koshelev, K., Favraud, G., Bogdanov, A., Kivshar, Y., Fratallocchi, A.: Nonradiating photonics with resonant dielectric nanostructures. *Nanophotonics*. 8, 725–745 (2019). <https://doi.org/10.1515/nanoph-2019-0024>.
27. Zanganeh, E., Song, M., Valero, A. C., Shalin, A. S., Nenasheva, E., Miroshnichenko, A., Evlyukhin, A., Kapitanova, P.: Nonradiating sources for efficient wireless power transfer. *Nanophotonics*. 10, 4399–4408 (2021). <https://doi.org/10.1515/nanoph-2021-0378>.
28. Fedotov, V. A., Rogacheva, A. V., Savinov, V., Tsai, D. P., Zheludev, N. I.: Resonant transparency and non-trivial non-radiating excitations in toroidal metamaterials. *Sci Rep*. 3, 1–5 (2013). <https://doi.org/10.1038/srep02967>.
29. Azzam, S. I., Kildishev, A. V.: Photonic Bound States in the Continuum: From Basics to Applications. *Adv Opt Mater*. 9, 16–24 (2021). <https://doi.org/10.1002/adom.202001469>.
30. Novitsky, D. V., Shalin, A. S., Redka, D., Bobrovs, V., Novitsky, A. V.: Quasibound states in the continuum induced by PT symmetry breaking. *Phys Rev B*. 104, 085126 (2021). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.104.085126>.
31. 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. *Nat Commun*. 14, 4689 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40382-y>.
32. Novitsky, D. V., Valero, A. C., Krotov, A., Salgals, T., Shalin, A. S., Novitsky, A. V.: CPA-Lasing Associated with the Quasibound States in the Continuum in Asymmetric Non-Hermitian Structures. *ACS Photonics*. 9, 3035–3042 (2022). <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.2c00790>.



33. Bonacina, L., Brevet, P.-F., Finazzi, M., Celebrano, M.: Harmonic generation at the nanoscale. *J Appl Phys.* 127, 230901 (2020). <https://doi.org/10.1063/5.0006093>.
34. Grinblat, G., Li, Y., Nielsen, M. P., Oulton, R. F., Maier, S. A.: Enhanced third harmonic generation in single germanium nanodisks excited at the anapole mode. *Nano Lett.* 16, 4635–4640 (2016). <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b01958>.
35. Xu, L., Rahmani, M., Zangeneh Kamali, K., Lamprianidis, A., Ghirardini, L., Sautter, J., Camacho-Morales, R., Chen, H., Parry, M., Staude, I., Zhang, G., Neshev, D., Miroschnichenko, A. E.: Boosting third-harmonic generation by a mirror-enhanced anapole resonator. *Light Sci Appl.* 7, 44 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41377-018-0051-8>.
36. Hong, J., Son, H., Kim, C., Mun, S.-E., Sung, J., Lee, B.: Absorptive metasurface color filters based on hyperbolic metamaterials for a CMOS image sensor. *Opt Express.* 29, 3643 (2021). <https://doi.org/10.1364/oe.415874>.
37. La Spada, L.: Metasurfaces for Advanced Sensing and Diagnostics. *Sensors.* 19, 355 (2019). <https://doi.org/10.3390/s19020355>.
38. 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. *Advanced Science.* 7, 1903049 (2020). <https://doi.org/10.1002/advs.201903049>.
39. Zhang, Y., Li, Z., Liu, W., Li, Z., Cheng, H., Chen, S., Tian, J.: Spin-Selective and Wavelength-Selective Demultiplexing Based on Waveguide-Integrated All-Dielectric Metasurfaces. *Adv Opt Mater.* 7, 1–8 (2019). <https://doi.org/10.1002/adom.201801273>.
40. Miroschnichenko, A. E., Evlyukhin, A. B., Yu, Y. F., Bakker, R. M., Chipouline, A., Kuznetsov, A. I., Luk'yanchuk, B., Chichkov, B. N., Kivshar, Y. S.: Nonradiating anapole modes in dielectric nanoparticles. *Nat Commun.* 6, 1–8 (2015). <https://doi.org/10.1038/ncomms9069>.
41. Baryshnikova, K. V., Smirnova, D. A., Luk'yanchuk, B. S., Kivshar, Y. S.: Optical Anapoles: Concepts and Applications. *Adv Opt Mater.* 7, 1–13 (2019). <https://doi.org/10.1002/adom.201801350>.
42. Nemkov, N. A., Basharin, A. A., Fedotov, V. A.: Nonradiating sources, dynamic anapole, and Aharonov-Bohm effect. *Phys Rev B.* 95, 165134 (2017). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.95.165134>.
43. Baryshnikova, K. V., Smirnova, D. A., Luk'yanchuk, B. S., Kivshar, Y. S.: Optical anapoles in nanophotonics and meta-optics. *Adv Opt Mater.* 1801350, 1–13 (2019). <https://doi.org/10.1002/adom.201801350>.
44. Yang, Y., Bozhevolnyi, S. I.: Nonradiating anapole states in nanophotonics: From fundamentals to applications. *Nanotechnology.* 30, (2019). <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab02b0>.
45. Colom, R., McPhedran, R., Stout, B., Bonod, N.: Modal analysis of anapoles, internal fields, and Fano resonances in dielectric particles. *Journal of the Optical Society of America B.* 36, 2052 (2019). <https://doi.org/10.1364/josab.36.002052>.
46. Wei, L., Xi, Z., Bhattacharya, N., Urbach, H. P.: Excitation of the radiationless anapole mode. *Optica.* 3, 799 (2016). <https://doi.org/10.1364/optica.3.000799>.
47. Gurvitz, E. A., Ladutenko, K. S., Dergachev, P. A., Evlyukhin, A. B., Miroschnichenko, A. E., Shalin, A. S.: The High-Order Toroidal Moments and Anapole States in All-Dielectric Photonics. *Laser Photon Rev.* 13, 1–13 (2019). <https://doi.org/10.1002/lpor.201800266>.
48. Zhang, T., Che, Y., Chen, K., Xu, J., Xu, Y., Wen, T., Lu, G., Liu, X., Wang, B., Xu, X., Duh, Y.-S., Tang, Y.-L., Han, J., Cao, Y., Guan, B.-O., Chu, S.-W., Li, X.: Anapole

- mediated giant photothermal nonlinearity in nanostructured silicon. *Nat Commun.* 11, 3027 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16845-x>.
49. Totero Gongora, J. S., Miroshnichenko, A. E., Kivshar, Y. S., Fratilocchi, A.: Anapole nanolasers for mode-locking and ultrafast pulse generation. *Nat Commun.* 8, 1–9 (2017). <https://doi.org/10.1038/ncomms15535>.
  50. Luk'yanchuk, B., Paniagua-Domínguez, R., Kuznetsov, A. I., Miroshnichenko, A. E., Kivshar, Y. S.: Hybrid anapole modes of high-index dielectric nanoparticles. *Phys Rev A (Coll Park)*. 95, 1–8 (2017). <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.95.063820>.
  51. 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. *Laser Photon Rev.* 15, 2100114 (2021). <https://doi.org/10.1002/lpor.202100114>.
  52. Zanganeh, E., Andrey, E., Andrey, M., Polina, K.: Magnetic and Hybrid Anapole States in Dielectric Cylindrical Particles. 368–370.
  53. Ospanova, A. K., Basharin, A., Miroshnichenko, A. E., Luk'yanchuk, B.: Generalized hybrid anapole modes in all-dielectric ellipsoid particles [Invited]. *Opt Mater Express.* 11, 23 (2021). <https://doi.org/10.1364/ome.414340>.
  54. Vennberg, F., Ravishankar, A. P., Anand, S.: Manipulating light scattering and optical confinement in vertically stacked Mie resonators. *Nanophotonics.* 11, 4755–4764 (2022). <https://doi.org/10.1515/nanoph-2022-0605>.
  55. Vennberg, F., Ravishankar, A. P., Anand, S.: Manipulating light scattering and optical confinement in vertically stacked Mie resonators. *Nanophotonics.* 11, 4755–4764 (2022). <https://doi.org/10.1515/nanoph-2022-0605>.
  56. Decker, M., Staude, I., Falkner, M., Dominguez, J., Neshev, D. N., Brener, I., Pertsch, T., Kivshar, Y. S.: High-Efficiency Dielectric Huygens' Surfaces. *Adv Opt Mater.* 3, 813–820 (2015). <https://doi.org/10.1002/adom.201400584>.
  57. Liu, W., Kivshar, Y. S.: Generalized Kerker effects in nanophotonics and meta-optics. *ArXiv.* 26, 274–284 (2017). <https://doi.org/10.1364/OE.26.013085>.
  58. Ollanik, A. J., Smith, J. A., Belue, M. J., Escarra, M. D.: High-Efficiency All-Dielectric Huygens Metasurfaces from the Ultraviolet to the Infrared. *ACS Photonics.* 5, 1351–1358 (2018). <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.7b01368>.
  59. Yoon, G., Kim, K., Huh, D., Lee, H., Rho, J.: Single-step manufacturing of hierarchical dielectric metalens in the visible. *Nat Commun.* 11, 1–10 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16136-5>.
  60. Khorasaninejad, M., Capasso, F.: Metalenses: Versatile multifunctional photonic components. *Science* (1979). 358, (2017). <https://doi.org/10.1126/science.aam8100>.
  61. Fathnan, A. A., Liu, M., Powell, D. A.: Achromatic Huygens' Metalenses with Deeply Subwavelength Thickness. *Adv Opt Mater.* 8, 1–9 (2020). <https://doi.org/10.1002/adom.202000754>.
  62. Howes, A., Wang, W., Kravchenko, I., Valentine, J.: Dynamic transmission control based on all-dielectric Huygens metasurfaces. *Optica.* 5, 787 (2018). <https://doi.org/10.1364/OPTICA.5.000787>.
  63. Pfeiffer, C., Grbic, A.: Metamaterial Huygens' surfaces: Tailoring wave fronts with reflectionless sheets. *Phys Rev Lett.* 110, 1–5 (2013). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.197401>.
  64. Asadchy, V. S., Faniayeu, I. A., Ra'di, Y., Khakhomov, S. A., Semchenko, I. V., Tretyakov, S. A.: Broadband reflectionless metasheets: Frequency-selective transmission and perfect absorption. *Phys Rev X.* 5, 1–10 (2015). <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.5.031005>.

65. Liu, W., Miroshnichenko, A. E.: Beam Steering with Dielectric Metalattices. *ACS Photonics*. 5, 1733–1741 (2018). <https://doi.org/10.1021/acsphotonics.7b01217>.
66. Overvig, A. C., Shrestha, S., Malek, S. C., Lu, M., Stein, A., Zheng, C., Yu, N.: Dielectric metasurfaces for complete and independent control of the optical amplitude and phase. *Light Sci Appl*. 8, (2019). <https://doi.org/10.1038/s41377-019-0201-7>.
67. Liu, B., Sain, B., Reineke, B., Zhao, R., Meier, C., Huang, L., Jiang, Y., Zentgraf, T.: Nonlinear Wavefront Control by Geometric-Phase Dielectric Metasurfaces: Influence of Mode Field and Rotational Symmetry. *Adv Opt Mater*. 8, (2020). <https://doi.org/10.1002/adom.201902050>.
68. Wang, B., Dong, F., Li, Q.T., Yang, D., Sun, C., Chen, J., Song, Z., Xu, L., Chu, W., Xiao, Y.F., Gong, Q., Li, Y.: Visible-Frequency Dielectric Metasurfaces for Multiwavelength Achromatic and Highly Dispersive Holograms. *Nano Lett*. 16, 5235–5240 (2016). <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b02326>.
69. Wang, L., Kruk, S., Tang, H., Li, T., Kravchenko, I., Neshev, D. N., Kivshar, Y. S.: Grayscale transparent metasurface holograms. *Optica*. 3, 1504 (2016). <https://doi.org/10.1364/OPTICA.3.001504>.
70. Jiang, Q., Cao, L., Huang, L., He, Z., Jin, G.: A complex-amplitude hologram using an ultra-thin dielectric metasurface. *Nanoscale*. 12, 24162–24168 (2020). <https://doi.org/10.1039/d0nr06461k>.
71. Vovchuk, D., Kosulnikov, S., Noskov, R. E., Ginzburg, P.: Wire resonator as a broadband Huygens superscatterer. *Phys Rev B*. 102, 94304 (2020). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.102.094304>.
72. Gigli, C., Li, Q., Chavel, P., Leo, G., Brongersma, M. L., Lalanne, P.: Fundamental Limitations of Huygens' Metasurfaces for Optical Beam Shaping. *Laser Photon Rev*. 2000448 (2021). <https://doi.org/10.1002/lpor.202000448>.
73. Chong, K. E., Staude, I., James, A., Dominguez, J., Liu, S., Campione, S., Subramania, G. S., Luk, T. S., Decker, M., Neshev, D. N., Brener, I., Kivshar, Y. S.: Polarization-Independent Silicon Metadevices for Efficient Optical Wavefront Control. *Nano Lett*. 15, 5369–5374 (2015). <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b01752>.
74. Zhang, X. L., Wang, S. B., Lin, Z., Sun, H. B., Chan, C. T.: Optical force on toroidal nanostructures: Toroidal dipole versus renormalized electric dipole. *Phys Rev A*. 92, 1–8 (2015). <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.92.043804>.
75. Feng, T., Xu, Y., Zhang, W., Miroshnichenko, A. E.: Ideal Magnetic Dipole Scattering. *Phys Rev Lett*. 118, 173901 (2017). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.173901>.
76. Baranov, D. G., Savelev, R. S., Li, S. V., Krasnok, A. E., Alù, A.: Modifying magnetic dipole spontaneous emission with nanophotonic structures. *Laser Photon Rev*. 11, (2017). <https://doi.org/10.1002/lpor.201600268>.
77. Babicheva, V. E., Evlyukhin, A. B.: Metasurfaces with Electric Quadrupole and Magnetic Dipole Resonant Coupling. *ACS Photonics*. 5, 2022–2033 (2018). <https://doi.org/10.1021/acsphotonics.7b01520>.
78. Zhang, Y., Yue, P., Liu, J.-Y., Geng, W., Bai, Y.-T., Liu, S.-D.: Ideal magnetic dipole resonances with metal-dielectric-metal hybridized nanodisks. *Opt Express*. 27, 16143 (2019). <https://doi.org/10.1364/OE.27.016143>.
79. Patoux, A., Agez, G., Girard, C., Paillard, V., Wiecha, P. R., Lecestre, A., Carcenac, F., Larrieu, G., Arbouet, A.: Challenges in nanofabrication for efficient optical metasurfaces. *Sci Rep*. 11, 1–12 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84666-z>.
80. Kim, Y., Yang, H., Oh, J. H.: Simple fabrication of highly sensitive capacitive pressure sensors using a porous dielectric layer with cone-shaped patterns. *Mater Des*. 197, 109203 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109203>.

81. Toliopoulos, D., Khoury, M., Bouabdellaoui, M., Granchi, N., Claude, J.-B., Benali, A., Berbezier, I., Hannani, D., Ronda, A., Wenger, J., Bollani, M., Gurioli, M., Sanguinetti, S., Intonti, F., Abbarchi, M.: Fabrication of spectrally sharp Si-based dielectric resonators: combining etaloning with Mie resonances. *Opt Express*. 28, 37734 (2020). <https://doi.org/10.1364/oe.409001>.
82. Arfken, G. B., Weber, H. J.: *Mathematical Methods for Physicists*. New York: Acad. Press (1995).
83. Alae, R., Rockstuhl, C., Fernandez-Corbaton, I.: An electromagnetic multipole expansion beyond the long-wavelength approximation. *Opt Commun*. 407, 17–21 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.08.064>.



---

**Aleksei Kuznetsov** dzimis 1998. gadā Irkutskā (Krievija). *ITMO* universitātē Sanktpēterburgā (Krievija) ieguvis maģistra grādu lāzerekārtās un lāzertehnoloģijās (2021). Patlaban ir Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultātes Fotonikas, elektronikas un elektronisko sakaru institūta pētnieks.