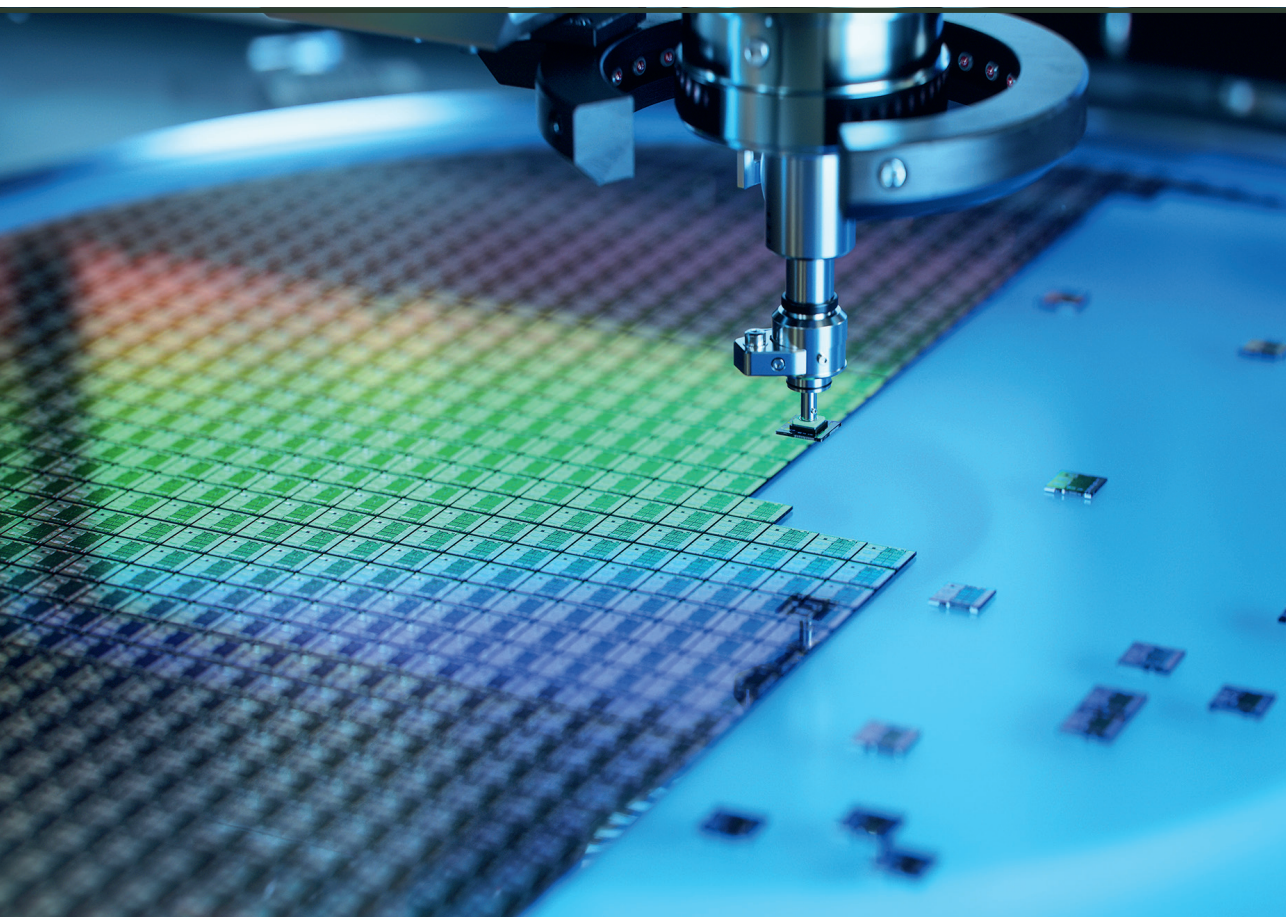


Edvīns Ļetko

ZUDUMRADOŠU MODU REZONANSE INTEGRĒTAJĀ FOTONIKAS ČIPĀ

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultāte
Tehniskās fizikas institūts

Edvīns Ļetko

Doktora studiju programmas “Ķīmija, materiālzinātne un tehnoloģijas” doktorants

ZUDUMRADOŠU MODU REZONANSE INTEGRĒTAJĀ FOTONIKAS ČIPĀ

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji

Dr. sc. ing.

GATIS MOZOĻEVSKIS

asociētā profesore *Dr. phys.*

ILZE KLINCĀRE

RTU Izdevniecība

Rīga 2025

Ļetko, E. Zudumradošu modu rezonanse integrētajā fotonikas čipā. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2025. – 31 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-02” 2024. gada 28. janvāra lēmumu, protokols Nr. 04030-9.2.2/1.

Promocijas darbs izstrādāts ar:

- Eiropas Reģionālās attīstības fonda daļēju atbalstu projektā 1.1.1.1/20/A/045 un Eiropas Savienības Horizon 2020 programmas H2020-WIDESPREAD-01-2016-2017-TeamingPhase2 (projekta Nr. 739508, CAMART2);
- Nacionālās pētījuma programmas (projekta Nr. VPPEM-FOTONIKA-2022/1-0001) atbalstu.

Vāka attēls no www.shutterstock.com.

<https://doi.org/10.7250/9789934371646>
ISBN 978-9934-37-164-6 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2025. gada 16. aprīlī 11.30 Rīgas Tehniskās universitātes Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultātē, Paula Valdena ielā 3/7, 272. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Dr. phys. Jānis Alnis,
Latvijas Universitāte, Latvija

Dr. phys. Aivars Vembris,
Latvijas Universitātes Cietvielu fizikas institūts, Latvija

Ph. D. Ignacio Matias,
Navaras Valsts universitāte, Spānija

APSTIPRINĀJUMS

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

Edvīns Ļetko (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir zinātnisko publikāciju kopa, kas ietver kopsavilkumu latviešu valodā un četras *SCI* publikācijas. Publikācijas uzrakstītas angļu valodā, un to kopējais lappušu skaits, iekļaujot elektroniski pieejamo informāciju, ir 34 lappuses. Promocijas darba kopsavilkums ietver 23 attēlus, kopējais lappušu skaits ir 32, neiekļaujot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 28 nosaukumi.

PATEICĪBAS

Paldies maniem darba vadītājiem *Dr. sc. ing.* Gatim Mozoļevskim un asociētajai profesorei *Dr. phys.* Ilzei Klincārei par viņu ieguldījumu un nozīmīgo atbalstu visa darba tapšanas laikā! Vēlos pateikties arī savam kolēģim *Dr. phys.* Artūram Bundulim par lielo atbalstu un ieguldījumu visos ar darbu saistītajos pētījumos, kā arī *Dr. phys. Ignacio Del Villar* par noderīgajiem padomiem darba laikā.

Vislielākais paldies par finansiālo atbalstu, ko visa darba izstrādes laikā nodrošināja Cietvielu fizikas institūts, *Cellboxlabs Ltd.* un *CAMART2*! Paldies arī Rīgas Tehniskajai universitātei par sniegto atbalstu!

Edvīns Ļetko

SATURS

AUTORA IEGULDĪJUMS.....	6
SAĪSINĀJUMI	7
DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	8
Ievads	8
Zudumradošo modu rezonanses principi	8
<i>LMR</i> parādības matemātiskais modelis.....	8
Galvenie lietojumi <i>LMR</i> jomā.....	10
Galvenie izaicinājumi <i>LMR</i> jomā	13
Fotonika uz polimēru bāzes	14
Promocijas darba mērķi	14
Aizstāvējamās tēzes	15
Zinātniskā novitāte.....	15
Praktiskā nozīme	15
Darba struktūra un apjoms	15
Promocijas darba zinātniskās publikācijas.....	16
PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI	17
Integrētais <i>LMR</i> sensors SU-8 viļņvados (1. publikācija)	17
Uz polimēra bāzes integrētā <i>LMR</i> sensora teorētiskā izstrāde (2. publikācija)	18
Plakanos viļņvados balstīti <i>LMR</i> sensori – teorētisks un eksperimentāls salīdzinājums (3. publikācija)	20
<i>LMR</i> fotonikas integrētajā čipā (4. publikācija).....	23
SECINĀJUMI.....	29
LITERATŪRAS SARAKSTS	30

AUTORA IEGULDĪJUMS

Promocijas darba pamatā esošie zinātniskie raksti ir komandas darba rezultāts, un visu līdzautoru zināšanas dažādās jomās ir bijis nozīmīgs ieguldījums. Promocijas darba autora ieguldījums zinātniskajos rakstos apkopots 1. tabulā. Neviens no minētajiem rakstiem citos promocijas darbos nav iekļauts.

1. tabula

Autora ieguldījums, sagatavojot katru promocijas darbā iekļauto zinātnisko rakstu

1. publikācija	Polimēru viļņvadu izgatavošana, izmantojot fotolitogrāfiju. Zudumradošo pārklājumu nogulsnešana uz integrētajiem viļņvadiem, izmantojot magnetrona putināšanu. Datu vizualizācija. Raksta sagatavošana. Autora procentuālais ieguldījums – 90 %.
2. publikācija	Ierīces simulācijas. Datu vizualizācija. Raksta sagatavošana. Autora procentuālais ieguldījums – 95 %.
3. publikācija	Zudumradošo pārklājumu nogulsnešana, izmantojot magnetrona putināšanu. Datu vizualizācija. Raksta sagatavošana. Autora procentuālais ieguldījums – 90 %.
4. publikācija	Polimēru viļņvadu izgatavošana, izmantojot fotolitogrāfiju. Zudumradošo pārklājumu nogulsnešana, izmantojot magnetrona putināšanu. Ierīces simulācijas. Datu vizualizācija. Raksta sagatavošana. Autora procentuālais ieguldījums – 85 %.

SAĪSINĀJUMI

<i>CMOS</i>	komplementārais metāla oksīda pusvadītājs
<i>DC</i>	līdzstrāva
<i>FEM</i>	galīgā elementu metode
<i>FOM</i>	labuma skaitlis
<i>FWHM</i>	pilnais platums pusminimumā
<i>HB</i>	gala cietināšana
<i>ITO</i>	indija alvas oksīds
<i>LMR</i>	zudumradošo modu rezonanse
<i>MMF</i>	daudzmodu šķiedra
<i>PAA</i>	poliakrilskābe
<i>PAH</i>	polialilamīna hidrohlorīds
<i>PEB</i>	pēc ekspozīcijas cietināšana
<i>PIC</i>	integrētās fotonikas čips
<i>POC</i>	pacienttuva
<i>PSS</i>	polinātrija stirensulfonāts
<i>PVDF</i>	polivinilidēnfluorīds
<i>Q-factor</i>	labums
<i>RFOM</i>	pieņemams labuma skaitlis
<i>RH</i>	relatīvais mitrums
<i>RIU</i>	laušanas koeficienta vienība
<i>SB</i>	pirms ekspozīcijas cietināšana
<i>SEM</i>	skenējošais elektronu mikroskops
<i>SPR</i>	virsmas plazmonu rezonanse
<i>TE</i>	šķērsvirziena elektriskā
<i>TM</i>	šķērsvirziena magnētiskā
<i>UV</i>	ultravioletais
<i>VOC</i>	gaistošs organisks savienojums
<i>WG</i>	viļņvads

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Ievads

Zudumradošo modu rezonanses principi

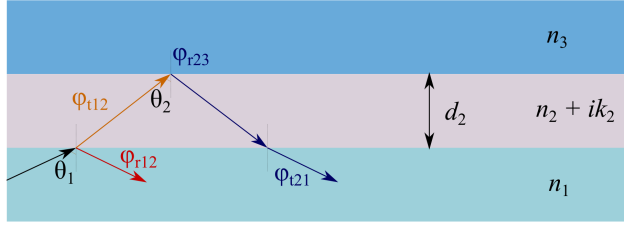
Zudumradošo modu rezonanse (*LMR*) rodas, kad gaisma izplatās caur optisko šķiedru vai viļņvadu un mijiedarbojas ar plāno kārtiņu, kuras dielektriskās caurlaidības reālā komponente ir lielāka pēc absolūtās vērtības gan par pašas kārtiņas dielektriskās caurlaidības imagināro komponenti, gan par šķiedras vai viļņvada dielektriskās caurlaidības reālo komponenti¹. Šīs plānās kārtiņas esamība pa virsu optiskai šķiedrai vai viļņvadam rada zuduma līnijas caurlaidības spektrā. Šīs zuduma līnijas parādās, pateicoties mijiedarbībai starp serdes modām viļņvadā un zuduma modām plānā kārtiņā². Šo zudumu līniju viļņa garumi ir atkarīgi no vairākiem ārējiem parametriem (piemēram, pH^3 vai mitruma⁴), tāpēc tie tiek izmantoti vairākos sensora lietojumos⁵.

LMR piedāvā vairākas priekšrocības, salīdzinot ar citām šķiedru vai viļņvadu metodēm. Atšķirībā no virsmas plazmonu rezonanses (*SPR*) un citām bieži izmantotām metodēm *LMR* ir spējīgs radīt vairākas rezonanses vienlaikus. Turklāt, salīdzinot ar *SPR*, *LMR* efekts tiek novērots gan ar šķērsvirziena elektrisku (*TE*) polarizāciju, gan ar šķērsvirziena magnētisku (*TM*) polarizāciju⁵. *LMR* var tikt sasniegts, izmantojot dažādus materiālus, piemēram, polimērus³, pusvadītājus⁶ un dielektriskus⁷, tāpēc tas piedāvā lielāku lietojuma elastību un palīdz samazināt ierīču izgatavošanas izmaksas.

LMR parādības matemātiskais modelis

Viļņvadā vadītās gaismas mijiedarbība ar plāno kārtiņu var radīt konstruktīvu vai destruktīvu interferenci, rezultātā pastiprinot gaismas absorbciju pie noteiktiem viļņa garumiem. Šīs plānās kārtiņas esamība ievieš papildu fāzes nobīdi un maina vadītās modas efektīvo laušanas koeficientu, tādējādi ietekmējot interferences apstākļus. Tas kalpo kā pamata mehānisms *LMR* parādībai viļņvados ar plānās kārtiņas perturbācijām⁸.

Kad gaisma izplatās cauri viļņvadam un krītošais leņķis θ_1 uz saskarnes robežas starp viļņvadu un plāno kārtiņu ir pietiekami liels, tad tās apkārtņē notiek pilnīgā atstarošana. Gaisma, kas izplatās, šajā gadījumā mijiedarbojas ar pārklājumu, pateicoties izdziestošajam laukam. Vienkāršotai parādības analīzei un raksturošanai tiek izmantota divu staru interferences aproksimācija (1. att.)⁸.



1. att. *LMR* parādības viļņvadā fizikālais modelis⁸.

Izmantojot Freneļa vienādojumus un daudzstaru interferenču teoriju, var atvasināt vienādojumus, kas ar labu precizitāti apraksta *LMR* parādību. Situācijās, kad $\theta_1 \approx 90^\circ$, kā tas parasti notiek viļņvadu un optisko šķiedru gadījumos, rezonanses viļņa garumu, pie kura notiek destruktīvā interference, var izteikt ar 1. vienādojumu⁸:

$$\lambda_{\text{LMR}} = \frac{2\pi d_2 \sqrt{n_2^2 - n_1^2}}{m\pi + \arctan\left(\left(\frac{n_2^2}{n_3^2}\right)^s \frac{\sqrt{n_1^2 - n_3^2}}{\sqrt{n_2^2 - n_1^2}}\right)}, \quad (1)$$

kur λ_{LMR} – *LMR* viļņa garums, d_2 – pārklājuma biezums, m – interferenču kārtā, n_1, n_2 un n_3 – attiecīgi viļņvada, pārklājuma un apkārtējās vides laušanas koeficienti. Parametrs s 1. vienādojumā tiek definēts ar 2. vienādojumu⁸ un ir atkarīgs no gaismas polarizācijas:

$$s = \begin{cases} 1 & \text{for TM mode} \\ 0 & \text{for TE mode} \end{cases}. \quad (2)$$

LMR_{TE} un LMR_{TM} demonstrē līdzīgas īpašības, izņemot atšķirīgus rezonanses viļņa garumus un jutību pret apkārtējās vides izmaiņām⁸, līdz ar to turpmākā analīze koncentrēsies tikai uz *TM* polarizāciju. Jutību S pie tā paša krītošā leņķa θ_1 var izteikt ar 3. vienādojumu⁸:

$$S = \frac{2\pi n_2^2 d_2 \left(\frac{1}{n_3 \sqrt{n_1^2 - n_3^2}} + \frac{2\sqrt{n_1^2 - n_3^2}}{n_3^2} \right)}{\arctan^2 \left(\frac{\sqrt{n_1^2 - n_3^2}}{\sqrt{n_2^2 - n_1^2}} \right) \left(1 + \frac{n_2^4 (n_1^2 - n_3^2)}{n_3^4 (n_2^2 - n_1^2)} \right)}. \quad (3)$$

LMR parādības kontekstā tādi parametri kā pusminimuma platums (*FWHM*) un pīķa dziļums ir gandrīz tikpat būtiski kā rezonanses viļņa garums un jutība. *LMR* pīķa *FWHM* var noteikt, izmantojot 4. vienādojumu⁸.

$$FWHM = \frac{4\pi d_2 \left(n_2^2 - n_1^2 + \lambda_{\text{LMR}} \left(n_1 \frac{\partial n_1}{\partial \lambda} \Big|_{\lambda=\lambda_{\text{LMR}}} - n_2 \frac{\partial n_2}{\partial \lambda} \Big|_{\lambda=\lambda_{\text{LMR}}} \right) \right)}{\lambda_{\text{LMR}}^2 \sqrt{n_2^2 - n_1^2}} \quad (4)$$

LMR pīķa dziļumu D var noteikt, izmantojot 5. vienādojumu⁸.

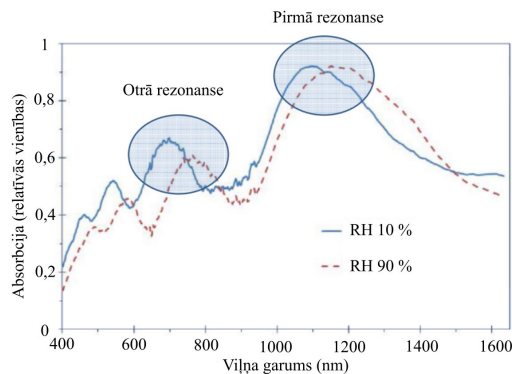
$$D = \frac{4\sqrt{R_{12}R_{23}}(1 - R_{12})(1 - R_{23})}{(1 - R_{12}R_{23})^2}, \quad (5)$$

kur R_{12} un R_{23} – atstarošanās spējas attiecīgi uz viļņvada un pārklājuma saskarnes robežvirsmas un pārklājuma un vides saskarnes robežvirsmas.

Galvenie lietojumi LMR jomā

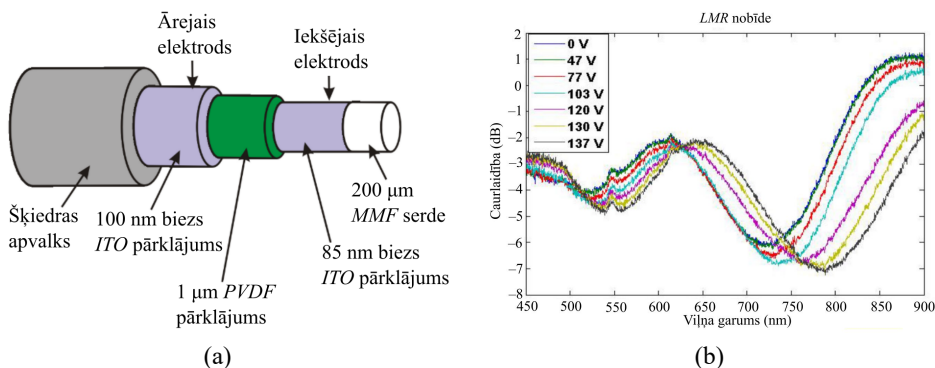
Optisko šķiedru sensori, kuru pamatā ir LMR parādība, tiek plaši izmantoti fizikālo, ķīmisko un bioloģisko parametru mērīšanai. Šos sensorus izmanto pārtikas kvalitātes novērtēšanā, medicīniskajā diagnostikā un vides uzraudzībā. Turklāt LMR ierīces ir perspektīva platforma dažāda veida sensoru realizācijā, īpaši biosensoru jomā⁹.

LMR parādības spēja noteikt relatīvo mitrumu (RH) ir pētīta literatūrā. Pētījumā¹⁰ optiskās šķiedras, kas tika pārklātas ar TiO_2/PSS , tika izmantotas kā efektīvās ierīces RH noteikšanai. Paaugstināta mitruma klātbūtne izraisa ūdens plānās kārtiņas veidošanos kondensācijas rezultātā, kas savukārt ļauj noteikt RH līmeni gaisā. Rezonanses viļņa garuma nobīde gadījumā, kad RH mainās no 20 % līdz 90 %, redzama 2. attēlā.



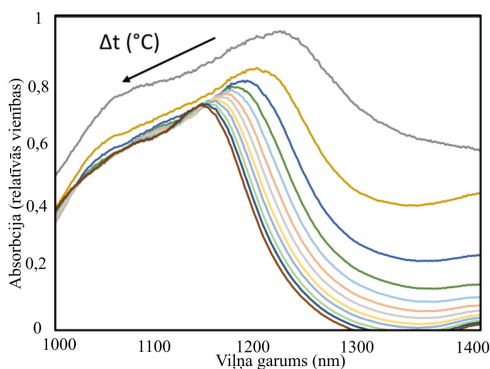
2. att. Ierīces spektrālā atbilde vidēs ar dažādiem RH^{10} .

Pētījumā¹¹ parādīta LMR efekta lietojamība sprieguma mērīšanā. Tas tika realizēts, izmantojot trīsslāņu struktūru uz optiskās šķiedras, kas sastāvēja no divām indijas alvas oksīda (ITO) kārtiņām un polivinilidēnfluorīda (PVDF) pārklājuma starp ITO kārtiņām. Iekšējā struktūras kārtiņa kalpoja gan kā LMR pārklājums, gan kā pirmais elektrods. PVDF šajā gadījumā pildīja elektrooptiskā materiāla funkciju, mainot savu laušanas koeficientu atkarībā no ārējā elektriskā lauka. Struktūras ārējā ITO plānā kārtiņa veidoja otro elektrodu. Ierīces uzbūve un mērītie caurlaidības spektri pie dažādiem pieliktiem spriegumiem redzami 3. attēlā.



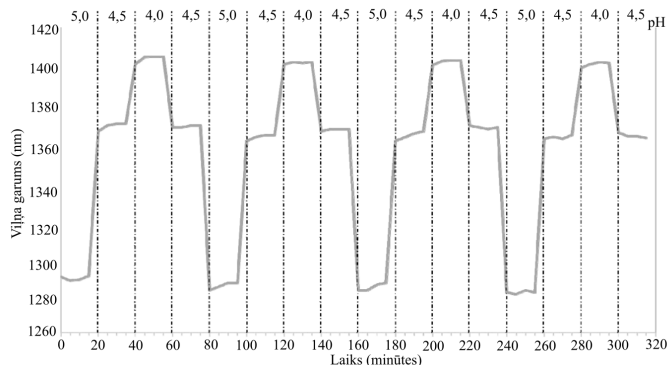
3. att. Sprieguma mērītājs: (a) shematiska ierīces reprezentācija; (b) *LMR* pīķu nobīde pie pieliktiem ārējiem spriegumiem¹¹.

Plāno kārtiņu laušanas koeficienta izmaiņas atkarībā no temperatūras ir plaši izplatīta parādība. Pētījumā¹² optiskās šķiedras temperatūras sensors uz *LMR* parādības bāzes tika nodemonstrēts ar SnO_2 plāno kārtiņu. Rezonanses viļņa garuma nobīde otrai *LMR* kārtai atkarībā no sintētiskās smērēļļas temperatūras redzama 4. attēlā. Izstrādātā ierīce sasniedza jutību ap $2,2 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ temperatūru diapazonā no 45°C līdz 75°C .



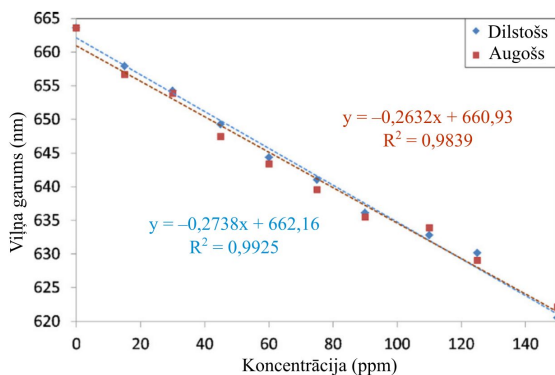
4. att. *LMR* spektri ierīcei ar SnO_2 pārklājumu, kad smērēļļas temperatūra mainās robežās no 45°C līdz 75°C ¹².

PAH/PAA (polialilamīna hidrochlorīds/poliakrilskābe) polimēru plēves uzbriest un piepūšas, mainoties šķīduma pH līmenim¹³. Tas rada PAH/PAA polimēru plēvju laušanas koeficienta izmaiņas, kas savukārt izraisa *LMR* viļņa garuma nobīdi. Novērojumi (5. att.) parāda, ka pH izmaiņas PAH/PAA plēvēs rada *LMR* viļņa garuma nobīdi, parādot augstu jutību pret pH izmaiņām.



5. att. Sensora *LMR* viļņa garums, iegremdējot to šķīdumos ar dažādu pH¹³.

LMR parādībā balstīti optisko šķiedru sensori sniedz iespēju noteikt gaistošos organiskos savienojumus (*VOCs*). Optiskās šķiedras, kas ir pārklātas ar PAH/PAA, ir spējīgas detektēt dažādas *VOC* gāzes, nodrošinot dažādus *LMR* viļņa garumus dažādām specifiskām *VOC* gāzēm, padarot to par selektīvu sensoru¹⁴. Rezonanses viļņa garums *LMR* sensoram ar PAH/PAA polimēru plēvē ir demonstrējis lineāru atkarību no etanola, metanola un isopropanola koncentrācijām. Sensora veikspēja tika novērtēta gan koncentrāciju palielinot, gan samazinot, demonstrējot minimālu histerēzi (6. att.).

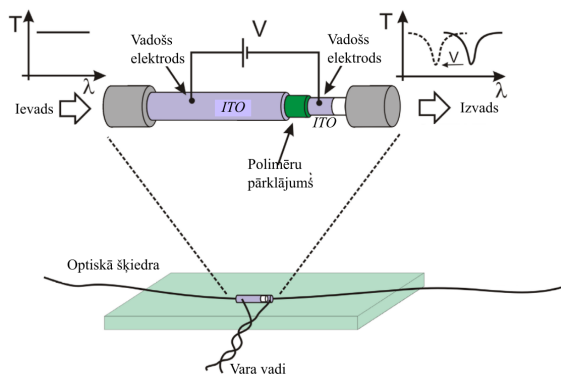


6. att. *LMR* viļņa garuma lineāra atkarība no etanola tvaika koncentrācijas¹⁴.

Optiskās šķiedras biosensori, kas balstās *LMR* parādībās, nodrošina bezmarķiera noteikšanas platformu. Šajos biosensoros bioloģiskās reakcijas izraisa efektīvā laušanas koeficienta izmaiņas pārklājumā, kas rezultātā rada *LMR* pīķu viļņa garuma nobīdes. Kopīgs izaicinājums visiem biosensoriem ir specifisko molekulu noteikšana lielāku molekulu grupās. Optiskās šķiedras sensori, kas darbojas pēc *LMR* principa, piedāvā risinājumu šai problēmai, izmantojot jutīgā pārklājuma funkcionalizāciju, piemēram, ar aptamēriem¹⁵. Literatūrā ir aprakstīti vairāki

biosensori, kuru pamatā ir *LMR* parādība, piemēram, antigliadīna antivielu biosensori, C reaktīvā proteīna biosensori, imūnglobulīna G biosensori, trombīna biosensori, siekalu kortizola biosensori un citi².

LMR radītās rezonanses var izmantot, lai selektīvi atļautu vai aizliegtu noteikto gaismas viļņu garumu pārraidi, veicinot optisko filtrēšanas ierīču attīstību sakaru nolūkiem¹⁶. Pētījumā¹⁷ aprakstīts optiskās šķiedras regulējams filtrs, kas balstās *LMR* parādībā. Šajā filtrā pirmais slānis (*ITO*) kalpo gan kā ierīces elektrods, gan kā *LMR* parādības ģenerators. Otrais slānis (PVDF) tiek izmantots filtra regulēšanai, savukārt ārējais slānis (*ITO*) darbojas kā otrs elektrods. Eksperimentālie rezultāti liecina, ka izgatavotais filtrs ir ļoti jutīgs pret pielikto ārējo spriegumu, nodrošinot *LMR* viļņa garuma izmaiņu par 0,4 nm/V. Aprakstītais optiskais filtrs shematiski attēlots 7. attēlā.



7. att. Elektrooptiskais viļņa garuma filtrs uz *LMR* parādības bāzes¹⁷.

Galvenie izaicinājumi *LMR* jomā

Saskaņā ar avotā⁸ sniegtajiem atklājumiem tika konstatēts, ka plānāki zuduma pārklājumi un lielāka laušanas koeficienta atšķirība starp viļņvada serdi un apkārtējo vidi rada mazāku *FWHM*. Tomēr šī pieeja izraisa arī ierīces jutības samazināšanos⁸. Šī nesakritība var būt viens no galvenajiem izaicinājumiem, lai izstrādātu sensoru uz *LMR* parādības bāzes, kam vienlaikus ir gan augsta jutība, gan šaurs *FWHM*.

Publikācijā⁸ ir konstatēts, ka teorētiski *LMR* jutīgums var sasniegt bezgalību. Tomēr pastāv arī daži praktiski ierobežojumi, kas jāņem vērā. Pirmkārt, jutība ir proporcionāla rezonanses viļņa garumam, un, lai sasniegtu augstu jutību, bieži vien ir nepieciešams darboties pēc iespējas garāku viļņu garuma diapazonā, kas ir tuvu komerciāli pieejamo optisko spektrometru robežai. Lai gan pastāv daži specializēti instrumenti, kas spēj mērīt garākus viļņu garumus, tiem parasti ir zemāka izšķirtspēja, kā arī to izmantošana parasti ir dārgāka. Ņemot vērā minēto, galvenais *LMR* trūkums ir augstās izmaksas, lai iegūtu jutīgu spektrometru, kas spēj uztvert nepieciešamos viļņu garumus

atbilstošām *LMR* līnijām. Otrkārt, rezonanses līnijas pie garākiem viļņu garumiem bieži vien ir platākas, kas var negatīvi ietekmēt labuma skaitli (*FOM*) un *LMR* izšķirtspēju¹⁸.

Rezonanses pīķa dziļums ir svarīgs parametrs, kas raksturo ierīces veiktspēju. Pīķa dziļums ietekmē tādu parametru kā pieņemams labuma skaitlis (*RFOM*), ko plaši izmanto integrēto sensoru salīdzināšanai. *RFOM* matemātiski definēts ar 6. vienādojumu.

$$RFOM = \frac{S \cdot D}{FWHM}. \quad (6)$$

Sasniegt pilnīgu absorbciju pie rezonanses viļņa garuma, kas atbilst 100 % rezonanses dziļumam, ir iespējams, ja abās robežvirsmās (starp viļņvadu un pārklājumu, kā arī starp pārklājumu un apkārtējo vidi) ir līdzvērtīga atstarošanās spēja. Tomēr praksē šos nosacījumus vienmēr izpildīt nav iespējams, līdz ar to zema absorbcija var sarežģīt *LMR* identifikāciju⁸.

Visbeidzot, ir svarīgi atzīmēt, ka pašreizējos *LMR* sensoru prototipos galvenokārt tiek izmantotas optiskās šķiedras⁶. Tomēr šāda atkarība no optiskajām šķiedrām rada grūtības sasniegt vieglu ražošanas mērogojamību, jo nepieciešama manuāla apstrāde. *LMR* bāzēto optisko šķiedru sensoru ražošana ir sarežģīta lielo izmaksu dēļ, kas kavē produkta komercializācijas iespējas. Turklāt šādu optisko šķiedru ierīču integrēšana ar citiem fotoniskiem elementiem uz čipa ir komplicēta, kas papildus ietekmē *LMR* parādības komercializācijas potenciālu. Šāda integrācija var radīt unikālus produktus specifiskiem lietojumiem. Tas padara lētu *LMR* sensoru ražošanu sarežģītāku un kavē to integrēšanu ar citiem fotoniskiem elementiem integrētajā fotonikas čipā (*PIC*). Promocijas darba galvenais mērķis ir piedāvāt šīs problēmas atrisinājumu.

Fotonika uz polimēru bāzes

Polimēri ir kļuvuši par perspektīviem materiāliem integrēto viļņvadu ražošanā. Salīdzinot ar neorganiskiem materiāliem, polimēri piedāvā zemākas izmaksas *PIC* ražošanā, elastību un potenciālu pielāgoties, lai iegūtu vēlamās īpašības konkrētos fotonikas lietojumos¹⁹. Turklāt integrētās polimēru fotonikas izgatavošanas pamatā ir standarta komplementārā metāla oksīda pusvadītāja (*CMOS*) metodes. Tādējādi polimēru ierīču ražošanu var veikt jebkurās *CMOS* piemērotās tīrtelpās. Polimēri ir pievilcīgi arī hibrīdās organiskās-neorganiskās sistēmās, kurās tiek izstrādātas sarežģītas un lētas optoelektroniskās komponentes²⁰. Tādējādi pāreja no silīcija integrētās fotonikas uz polimēru fotoniku ir loģisks solis integrētās fotonikas nozarē. Dažādas tehnoloģijas, piemēram, Brega režģa sensori²¹, interferometriskie sensori²² un mikrodobumu sensori²³, jau ir attīstītas polimēru fotonikā. Savukārt *LMR* parādība līdz šim bija demonstrēta tikai optiskajās šķiedrās un plakanajos viļņvados. Šajā kontekstā šo tehnoloģiju pārvešana uz polimēru fotonikas platformu sniegs būtiskas inovācijas šajā jomā.

Promocijas darba mērķi

1. Integrēt eksperimentālos rezultātus ar galīgo elementu simulācijām, lai uzlabotu fundamentālo izpratni par zudumradošās modu rezonanses parādību.

2. Izstrādāt darbplūsmu integrēto zudumradošās modu rezonanses ierīču izgatavošanai.
3. Demonstrēt zudumradošās modu rezonanses fenomenu integrētajā fotonikas čipā, sasniedzot jutību, kas ir salīdzināma ar tām, ko piedāvā alternatīvās konfigurācijas, piemēram, optiskās šķiedras un plakanie viļņvadi.

Aizstāvāmās tēzes

1. Integrētajos viļņvados, kas izgatavoti no dažādiem negatīviem fotorezistiem, ir iespējams novērot zudumradošās modu rezonanses parādību.
2. Integrētie zudumradošās modu rezonanses sensori var sasniegt 905 nm/*RIU* jutību, kas salīdzināma ar 829 nm/*RIU* jutību plaši izmantotajā plakano viļņvadu konfigurācijā.
3. Galīgo elementu metodi ir iespējams lietot, lai simulētu zudumradošās modu rezonanses parādību integrētajos polimēru viļņvados, panākot atbilstību eksperimentālajiem rezultātiem ar 1 % relatīvo kļūdu.

Zinātniskā novitāte

Promocijas darbs sniedz eksperimentālu pierādījumu koncepcijai par *LMR* parādības pāreju no optisko šķiedru un plakano viļņvadu konfigurācijām uz integrētiem čipiem. Tas demonstrē iepriekš nerasnietu progresu un potenciālu integrēt šo jauno tehnoloģiju kopā ar citiem fotoniskajiem elementiem vienā čipā. Turklāt šajā darbā tiek novērtēti dažādi polimēri, kas ir pielāgoti *LMR* lietojumiem, un tiek piedāvāta inovatīva metode šo viļņvadu izgatavošanai.

Praktiskā nozīme

Lielākā praktiskā nozīme, *LMR* parādībai pārejot no optiskajām šķiedrām un plakanajiem viļņvadiem uz fotoniskiem čipiem, ir tās mērogojamība un komercializācijas potenciāls, īpaši ņemot vērā savietojamību ar *CMOS* tehnoloģiju. Papildus tam *PIC* galvenā priekšrocība ir tās spēja integrēt dažādus elementus vienā čipā, lai nodrošinātu unikālas funkcijas. Nākamais posms integrēto *LMR* sensoru attīstībā varētu ietvert to integrāciju ar spektrometriem un gaismas avotiem uz čipa, līdz ar to ievērojami samazinot ierīču izmaksas un veidojot būtisku virzību komerciālajiem lietojumiem.

Darba struktūra un apjoms

Promocijas darbs ir zinātnisko rakstu kopā, kas ir veltīti *LMR* parādības pētījumiem fotonikas integrētajos čipos. Promocijas darbs ir izstrādāts latviešu un angļu valodā. Tā rezultāti ir publicēti četrās zinātniskajās publikācijās, kas ir indeksētas *Scopus* datubāzē. Darba kopsavilkumā ir iekļauti 23 attēli. Kopējais *CiteScore* visiem iekļautajiem rakstiem promocijas darbā ir 16,4 (*Scopus* datubāzes dati). Rezultāti tika prezentēti trīs starptautiskās zinātniskās konferencēs.

Promocijas darba zinātniskās publikācijas

Zinātniskie raksti, kuros publicēti promocijas darba rezultāti

1. **E. Letko**, A. Bundulis, G. Mozolevskis, V. Vibornijs. Integrated Lossy Mode Resonance Sensor Based on SU-8 Waveguides. *Proceedings of SPIE – The international Society for Optical Engineering*, **2022**, 11998B, 1–6 (*Q4*, *Scopus CiteScore(2022)*=0.7).
2. **E. Letko**, A. Bundulis, G. Mozolevskis. Theoretical Development of Polymer-Based Integrated Lossy-Mode Resonance Sensor for Photonic Integrated Circuits. *Photonics*, **2022**, 9 (10), 764–773 (*Q3*, *Scopus CiteScore(2022)*=2.3).
3. **E. Letko**, A. Bundulis, G. Mozolevskis. Lossy Mode Resonance Sensors Based on Planar Waveguides: Theoretical and Experimental Comparison. *IEEE Photonics Journal*, **2024**, 16 (1), 1–7 (*Q2*, *Scopus CiteScore(2023)*=4.5).
4. **E. Letko**, A. Bundulis, E. Vanags, G. Mozolevskis. Lossy Mode Resonance in Photonic Integrated Circuits. *Optics and Lasers in Engineering*, **2024**, 181, 1–11 (*Q1*, *Scopus CiteScore(2023)*=8.9).

Citi promocijas darba izstrādes laikā publicētie zinātniskie raksti

1. A. Ozols, **E. Letko**, P. Augustovs, D. Saharovs, E. Zarins, V. Kokars. Photoinduced anisotropy of IWK-2D azobenzene molecular glassy films. *Key Engineering Materials*, **2018**, 762, 233–238. (*Q4*, *Scopus CiteScore(2018)*=0.7).
2. A. Medvids, S. Varnagiris, **E. Letko**, D. Milcius, L. Grase, S. Gaidukovs, A. Mychko, A. Pludons, P. Onufrijevs, H. Mimura. Phase transformation from rutile to anatase with oxygen ion dose in the TiO₂ layer formed on a Ti substrate. *Materials Science and Semiconductor Processing*, **2020**, 106, 104776, 1–6. (*Q1*, *Scopus CiteScore(2020)*=5.9).
3. A. Ozols, G. Mozolevskis, **E. Letko**, M. Rutkis, R. Zabels, E. Linina, I. Osmanis. Sputtered SiOxNy thin films – improving optical efficiency of liquid crystal diffuser elements in multi-focal near-to-eye display architecture. *Proceedings of SPIE – The international Society for Optical Engineering*, **2021**, 118720I, 1–5. (*Q4*, *Scopus CiteScore(2021)*=0.9).

Dalība konferencēs

1. Oral presentation in international conference “Proceeding of SPIE – The International Society for Optical Engineering”: **E. Letko**, A. Bundulis, G. Mozolevskis, V. Vibornijs. Integrated Lossy Mode Resonance Sensor Based on SU-8 Waveguides. San Francisco, USA, 22–27 January 2022.
2. Poster presentation in international conference “Nordic Nanolab User Meeting 2022”: **E. Letko**, A. Bundulis, V. Vibornijs, G. Mozolevskis. Fabrication of Lossy Mode Resonance Sensor Based on SU-8 Waveguides. Gothenburg, Sweden, 5–6 May 2022.
3. Poster presentation in international conference “Deep Tech Atelier 2023”: **E. Letko**, A. Bundulis, I. Del Villar, G. Mozolevskis. Development of Integrated Lossy Mode Resonance Sensor Based on Polymer Photonics. Riga, Latvia, 20–21 April 2023.

PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI

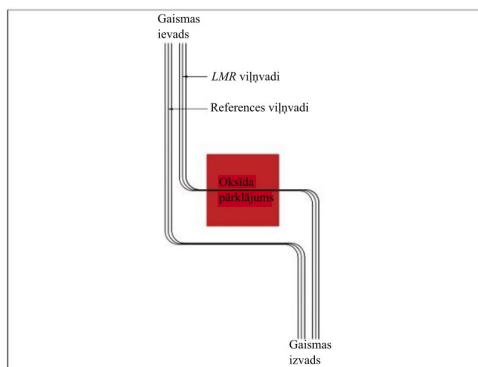
Integrētais *LMR* sensors SU-8 viļņvados (1. publikācija)

Pirmā publikācija ir pirmais mēģinājums realizēt *LMR* parādību fotonikas integrētajā čipā. Lai gan šis zinātniskais raksts deva sākotnēju ieskatu *LMR* parādībā, bija grūti novērtēt ierīces jutības veikspēju rezonanses līniju platuma dēļ. Neskatoties uz šo izaicinājumu, pētījums būtiski veicināja sapratni par galvenajām problēmām, kas saistītas ar integrēto *LMR* sensoru izstrādi, un apsprieda potenciālos turpmākos lietojumus.

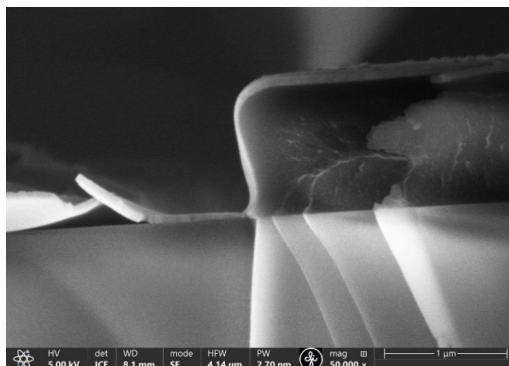
Galvenais mērķis 1. publikācijā bija veikt pirmos caurlaidības mērījumus integrētajā *LMR* ierīcē. Šim nolūkam noteiktie uzdevumi bija:

- izstrādāt mikroizgatavošanas darbplūsmu integrētai ierīcei no SU-8 viļņvadiem;
- novērtēt pārklājuma biezuma vienmērību uz SU-8 viļņvada;
- veikt caurlaidības mērījumus *LMR* viļņvados, kas pārklāti ar dažāda materiāla plānām kārtiņām.

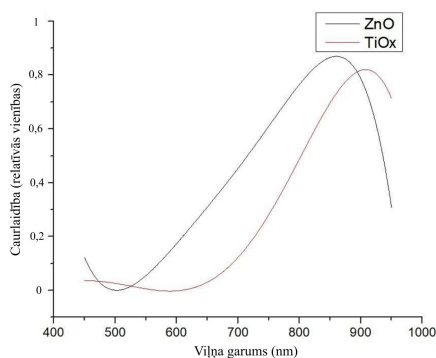
Galvenie 1. publikācijas rezultāti redzami 8.–10. attēlā.



8. att. *LMR* ierīces dizains²⁴.



9. att. Viļņvada šķērs griezums ar 65 nm biezu ZnO pārklājumu²⁴.



10. att. Caurlaidība SU-8 viļņvados, kas pārklāti ar ZnO un TiO_x plānajām kārtiņām²⁴.

1. publikācijas galvenie rezultāti un secinājumi

- Čipa dizainā tika izmantotas divas viļņvadu grupas – references viļņvadi gaismas avota spektra mērīšanai un *LMR* viļņvadi parādības novērošanai. Optimāla efektivitāte tika sasniegta, izmantojot izliektu viļņvada formu, lai mazinātu fona apgaismojumu (8. att.).
- ZnO un TiO_x materiāliem tika novērotas platas *LMR* līnijas. Novērotās *LMR* līnijas sakrita ar teorētiski paredzētajiem viļņa garumiem (10. att.).
- Magnetrona putināšana nodrošināja pilnīgu SU-8 viļņvada pārklājumu ar oksīdu (9. att.).

Uz polimēra bāzes integrētā *LMR* sensora teorētiskā izstrāde (2. publikācija)

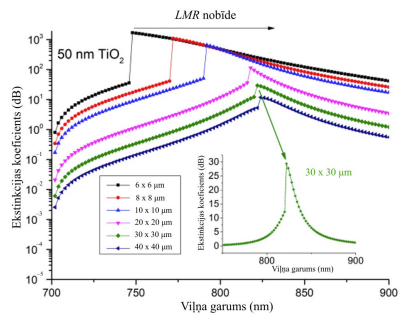
Ņemot vērā 1. publikācijā minētos izaicinājumus, kas saistīti ar integrētās *LMR* ierīces izgatavošanu, kuras jutība būtu salīdzināma ar *LMR* sensoriem alternatīvās konfigurācijās, pētījums, kas aprakstīts 2. publikācijā, tika sākts, lai izpētītu teorētiskos dizaina risinājumus

integrētajām *LMR* ierīcēm un analizētu *LMR* parādības atkarību no kritiskām dimensijām. *LMR* parādība fotonikas integrētajā čipā iepriekš nebija pētīta, tāpēc bija svarīgi veikt teorētiskos aprēķinus un simulācijas, lai racionalizētu *LMR* tehnoloģijas pārvešanu no optiskajām šķiedrām un plakanajiem viļņvadiem uz integrēto fotoniku. Līdz ar to 2. publikācijas mērķis bija teorētiski parādīt *LMR* efekta sasniegšanas potenciālu integrētā čipa līmenī un noteikt optimālo SU-8 viļņvada ģeometriju un zudumu pārklājuma biezumu, lai uzlabotu sensora jutību.

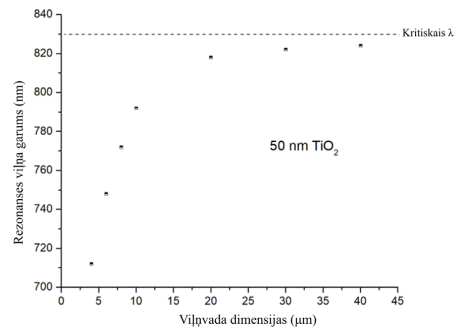
2. publikācijas mērķi:

- izpētīt *LMR* parādības atkarību no SU-8 viļņvadu šķēsgriezuma ģeometrijas;
- izpētīt *LMR* atkarību no zuduma pārklājuma biezuma;
- izpētīt *LMR* parādības uzvedību atkarībā no izplatītām modām viļņvados;
- novērtēt izstrādātās ierīces jutības veikspēju;
- izstrādātajā *LMR* čipā novērot vairākas rezonanses vienlaikus.

Galvenie 2. publikācijas rezultāti redzami 11.–13. attēlā.

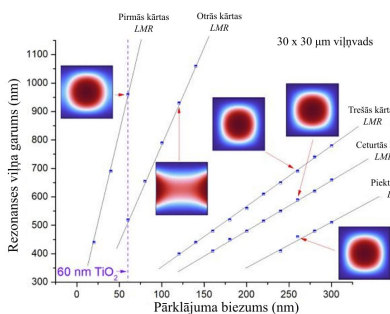


(a)

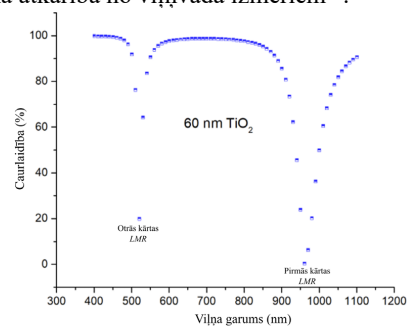


(b)

11. att. Viļņvada izmēru ietekme uz *LMR* parādību: (a) normalizēti caurlaidības spektri dažādiem viļņvada izmēriem; (b) *LMR* viļņa garuma atkarība no viļņvada izmēriem²⁵.

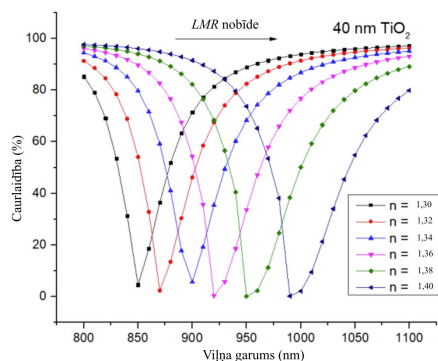


(a)



(b)

12. att. *LMR* atkarība no zuduma pārklājuma biezuma: (a) *LMR* viļņa garums kā funkcija no pārklājuma biezuma; (b) caurlaidības spektrs ierīcei ar 60 nm TiO₂ pārklājuma biezumu²⁵.



13. att. *LMR* nobīde atkarībā no vides laušanas koeficienta izmaiņām²⁵.

2. publikācijas galvenie rezultāti un secinājumi

- Teorētiskās simulācijas atklāja *LMR* parādības novērošanas iespējamību integrētajos SU-8 viļņvados, kas pārklāti ar TiO₂ zudumu pārklājumu.
- Tika konstatēts, ka *LMR* regulēšana ir iespējama, pielāgojot viļņvada ģeometriju, jo *LMR* viļņa garums reaģē uz viļņvada izmēriem ar augstu jutību (11. att.). Turklāt tika pierādīts, ka šī jutība ir izteiktāka mazākiem viļņvadiem, bet, sasniedzot noteiktus izmērus, *LMR* viļņa garums stabilizējas un novērojama minimāla nobīde (11. b att.).
- Tika nodemonstrēts, ka integrētajos SU-8 viļņvados, kas pārklāti ar TiO₂ zudumu pārklājumu, teorētiski var novērot vairākus *LMR*.
- Tika apstiprināts, ka gan *TE*, gan *TM* polarizācijai ir novērojams *LMR* efekts integrētajā ierīcē, un rezonanses viļņu garumi nedaudz atšķiras starp abām polarizācijām.
- Maksimālā jutība ap 1400 nm/*RIU* tika sasniegta ar 40 nm biezu TiO₂ pārklājumu, kas ir piemērots mērīšanai vidēs ar laušanas koeficientiem no 1,30 līdz 1,40 (13. att.).

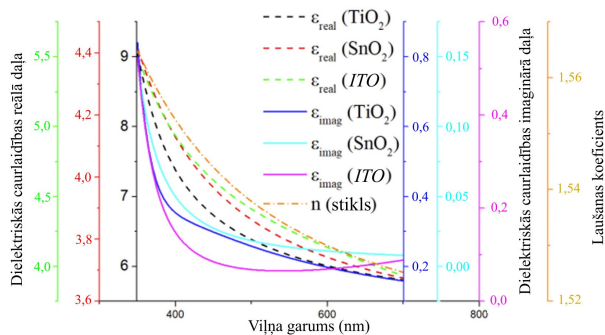
Plakanos viļņvados balstīti *LMR* sensori – teorētisks un eksperimentāls salīdzinājums (3. publikācija)

Lielākajā daļā zinātniskās literatūras *LMR* parādība galvenokārt tiek pētīta no inženiertehniskā aspekta, kā rezultātā trūkst teorētiskā pamatojuma un izpratnes par fundamentālajiem procesiem. Šajā publikācijā padziļināti pētīta *LMR* parādība plakanajos viļņvados ar zudumu pārklājumiem, kas bieži tiek izmantoti *LMR* jomā. Pie šādiem pārklājumiem pieder TiO₂, SnO₂ un *ITO*. Iegūtie eksperimentālie rezultāti tika salīdzināti ar simulācijām, kas veiktas ar *FEM* rīkiem *COMSOL* vidē. Pētījuma īpašā novitāte ir eksperimentālo atklājumu un teorētisko aprēķinu apvienojums. Turklāt no integrētā *LMR* sensora izstrādes viedokļa šis pētījums bija būtisks, jo tā mērķis bija noteikt optimālo zudumu pārklājuma materiālu turpmākiem pētījumiem un integrētās ierīces izstrādei.

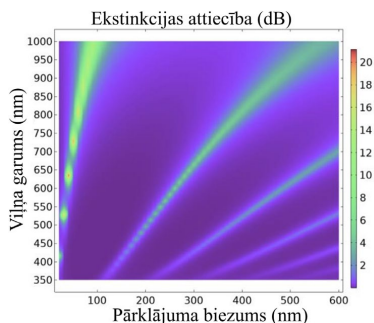
3. publikācijas mērķi:

- eksperimentāli novērot *LMR* parādību sensoru ierīcēs ar TiO_2 , SnO_2 un *ITO* pārklājumiem;
- izpētīt *LMR* parādības atkarību no dažāda biezuma zudumu pārklājumiem;
- noskaidrot nogulsnēto plāno kārtiņu elektrooptiskās īpašības, tostarp laušanas un ekstinkcijas koeficientus, lai uzlabotu simulācijas rezultātu precizitāti;
- visu izgatavoto paraugu caurlaidības spektrus salīdzināt ar teorētiski aprēķinātajiem spektriem, kas iegūti ar *FEM* simulācijas rīkiem;
- novērot *LMR*, ko izraisa gan *TE*, gan *TM* polarizācija;
- identificēt piemērotāko zudumu pārklājumu, pamatojoties uz *LMR* pīķa formu;
- novērtēt izgatavoto ierīču jutību, uzklājot šķidros analītus uz sensora jutīgās zonas;
- noteikt izgatavoto ierīču labumus, lai novērtētu to veiktspēju.

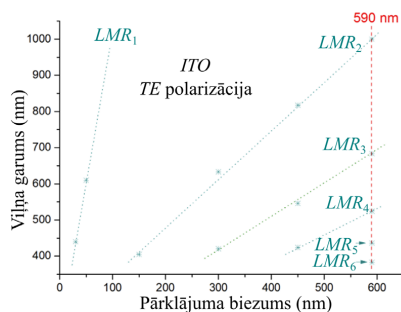
Galvenie 3. publikācijas rezultāti redzami 14.–17. attēlā.



14. att. Dispersijas līknes stikla viļņvadam, TiO_2 , SnO_2 un *ITO* plānām kārtiņām²⁶.

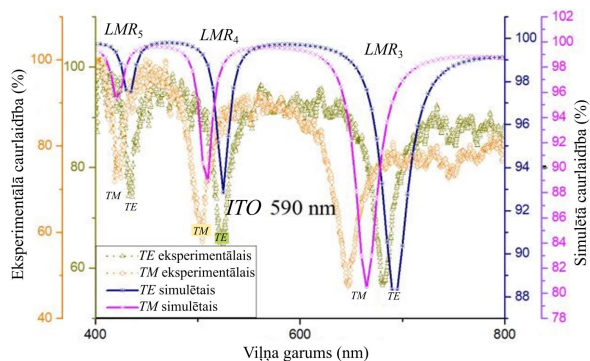


(a)

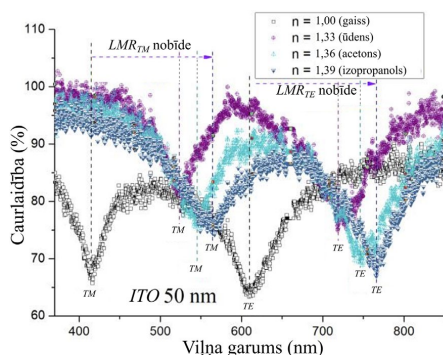


(b)

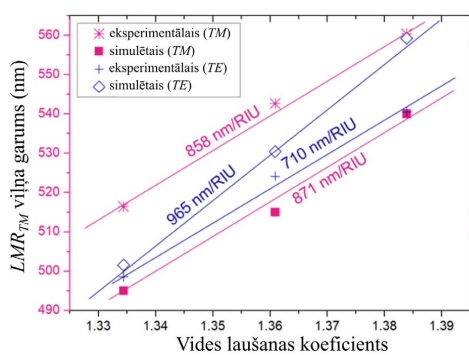
15. att. *LMR* parādības uzvedība atkarībā no viļņa garuma un *ITO* biezuma *TE* polarizētai gaismai: (a) teorētiskais aprēķins; (b) eksperimentālie rezultāti²⁶.



16. att. Caurlaidības spektri ierīcei ar 590 nm biezu ITO pārklājumu²⁶.



(a)



(b)

17. att. Jūtības veikspēja paraugam ar 50 nm ITO pārklājumu: (a) eksperimentālā jutība dažādos šķidrumos; (b) LMR viļņa garums kā funkcija no apkārtējās vides laušanas koeficienta gan TE, gan TM polarizētai gaismai²⁶.

3. publikācijas galvenie rezultāti un secinājumi

- ITO pārklājums izrādījās vispiemērotākais LMR balstītiem sensoru lietojumiem, jo tas vienīgais radīja izteiktas rezonanses visā redzamās gaismas spektrā (16. att.). Šo rezultātu varētu skaidrot ar ITO nogulsnešanas tehnoloģiju, kurā izmantota nereaktīvā magnetronu putināšana, savukārt citi oksīdi tika nogulsnēti reaktīvā procesā Ar/O₂ plazmā, veidojot kristāiskus graudus ar ierobežotu mijiedarbību ar garāka viļņa garuma gaismu. Alternatīvs skaidrojums balstās atšķirīgās ekstinkcijas koeficientu dispersijas līknēs ITO un citiem oksīda pārklājumiem.

- Salīdzinot teorētiskās simulācijas un eksperimentālos rezultātus, tika konstatēts, ka *FEM* kombinācijā ar iebūvēto modu analīzi precīzi apraksta *LMR* parādības pamatfiziku plakanajos viļņvados. Teorētiskie rezultāti rādīja pietiekamu sakritību ar eksperimentālajiem datiem visā pārklājuma biezuma diapazonā (15. att.). Dažas nelielas labumu atšķirības starp teorētiskajiem un eksperimentālajiem rezultātiem var būt saistītas ar plāno kārtiņu nevienmērību un mazāk precīzu teorētisko ievades datu pieejamību attiecībā uz vides optiskajām īpašībām un pārklājuma biezumiem.
- Mērījumu laikā izmantotais lineārais polarizators apstiprināja *LMR* parādības paredzamo polarizācijas atkarību (16.–17. att.).

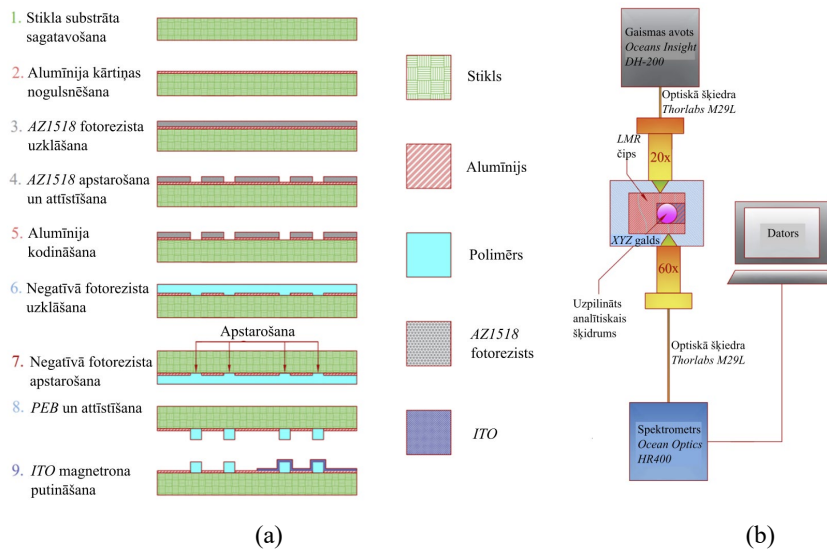
***LMR* fotonikas integrētajā čipā (4. publikācija)**

4. publikācijā aprakstīts promocijas darba noslēguma pētījums. Visi trīs iepriekšējie zinātniskie raksti (1. publikācija, 2. publikācija un 3. publikācija) sniedza ieskatu *LMR* parādībā un risināja konkrētus jautājumus par pirmā pilnībā integrētā *LMR* balstītā sensora izveidi. 1. publikācija palīdzēja izprast virzienu, kurā jādodas, lai izveidotu strādājošu prototipu. 2. publikācija sniedza ieskatu polimēru viļņvadu izmēru ierobežojumos. 3. publikācija nodrošināja pirmo reālo eksperimentālo pieredzi veiksmīgai *LMR* ģenerēšanai. 4. publikācijā pirmo reizi tika parādīts *LMR* efekts fotonikas integrētajos čipos ar jutību un *FOM* vērtību, kas ir salīdzināma ar optisko šķiedru un plakano viļņvadu konfigurācijām. Turklāt 4. publikācijā izpētīti dažādi polimēru materiāli integrēto viļņvadu izgatavošanai, tostarp *OrmoClear*, *OrmoCore* un SU-8 fotorezistus. Turklāt 4. publikācijā ieviesta jauna pieeja biezo polimēru viļņvadu izgatavošanā. Visbeidzot, šajā pētījumā eksperimentālie rezultāti tika salīdzināti ar simulācijas rezultātiem, kas iegūti, izmantojot *FEM* rīkus *COMSOL* vidē.

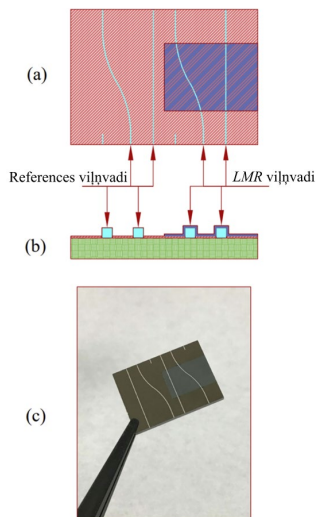
4. publikācijas mērķi:

- izstrādāt inovatīvu darbplūsmu biezo viļņvadu izgatavošanai;
- izveidot eksperimentālu mērījumu sistēmu integrēto fotonikas čipu testēšanai;
- samazināt gaismas ievadišanas zudumus integrētajos viļņvados;
- izpētīt *LMR* parādības atkarību no taisnās un izliektās viļņvadu ģeometrijas;
- fotonikas integrētajā čipā novērot vairākas *LMR* rezonanses vienlaikus;
- salīdzināt dažādu polimēru izgatavoto viļņvadu caurlaidības spējas;
- salīdzināt eksperimentāli iegūtos spektrus ar teorētiski sagaidāmiem spektriem, izmantojot *FEM* simulācijas palīdzību;
- salīdzināt *LMR* parādības uzvedību integrētajā fotonikas čipa konfigurācijā ar vispāratzītām konfigurācijām kā plakanie viļņvadi;
- novērtēt integrēto ierīču jutības spējas, uzklājot šķidros analītus uz sensora jutīgajām zonām;
- noteikt izgatavoto ierīču *FOM*, lai novērtētu to veikspēju.

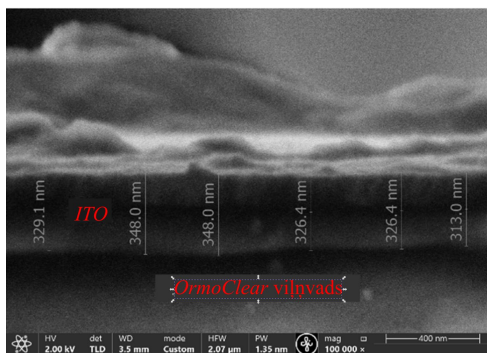
Galvenie 4. publikācijas rezultāti redzami 18.–23. attēlā.



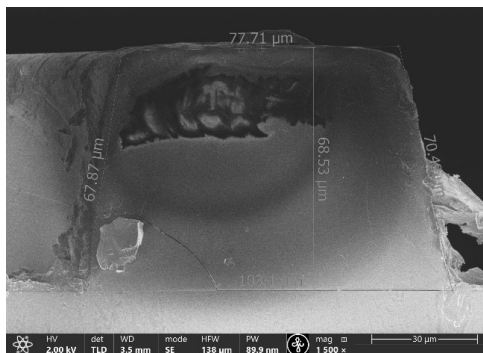
18. att. LMR čips: (a) izgatavošanas darbplūsmā; (b) testēšana²⁷.



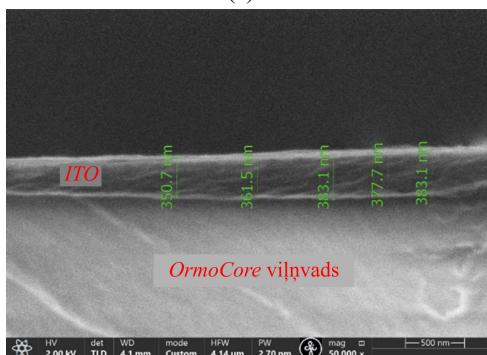
19. att. LMR čipa dizains: (a) skats no augšas; (b) šķērsgriezuma skats; (c) faktiskās ierīces fotoattēls²⁷.



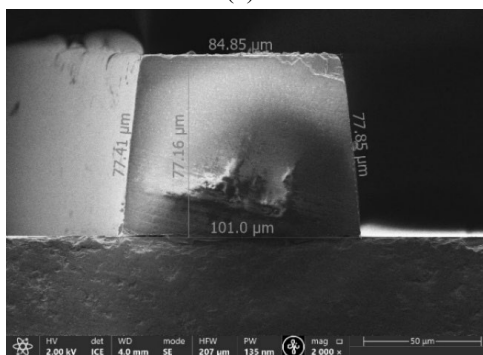
(a)



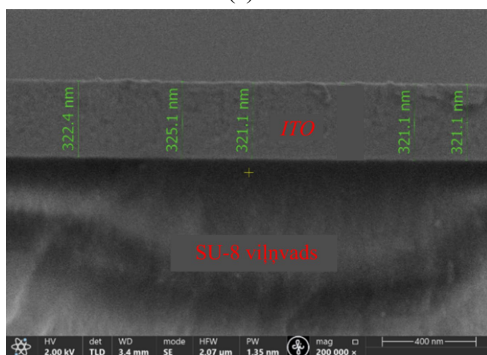
(b)



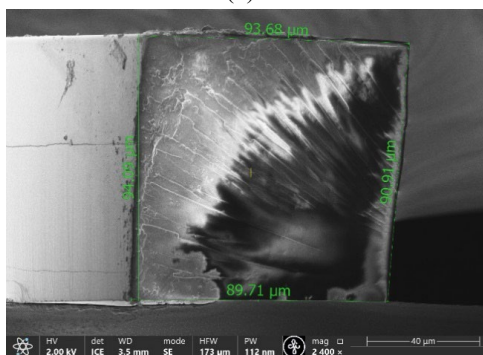
(c)



(d)

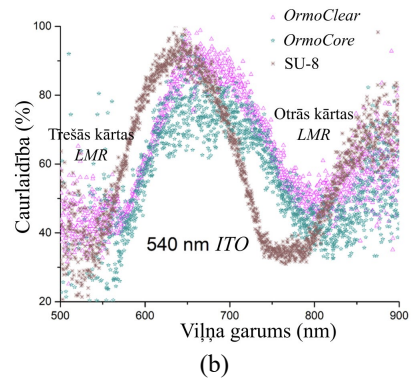
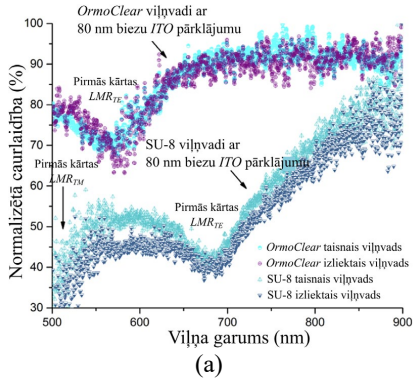


(e)

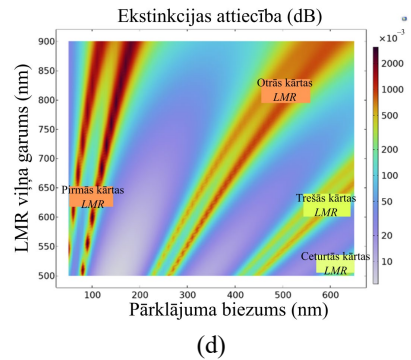
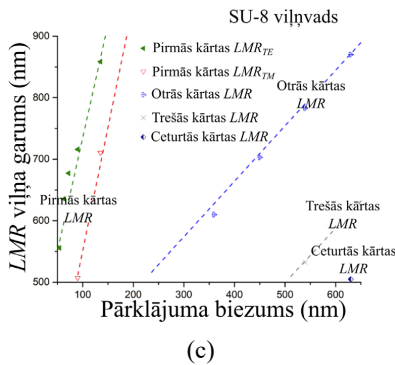
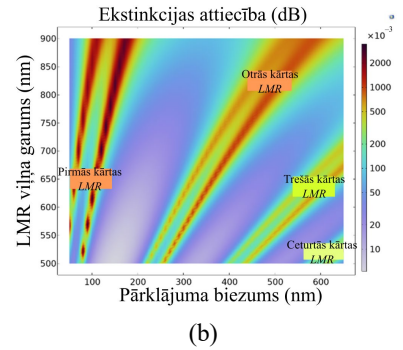
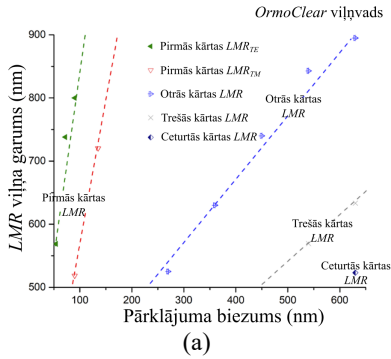


(f)

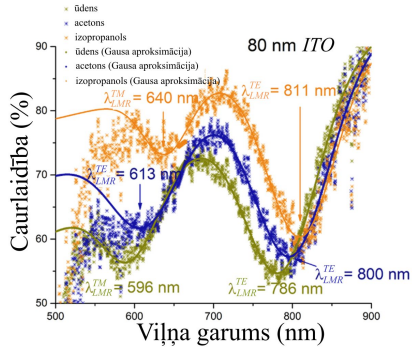
20. att. SEM analīze: (a) ITO uz OrmoClear viļņvada; (b) OrmoClear viļņvada šķēsgriezums; (c) ITO uz OrmoCore viļņvada; (d) OrmoCore viļņvada šķēsgriezums; (e) ITO uz SU-8 viļņvada; (f) SU-8 viļņvada šķēsgriezums²⁷.



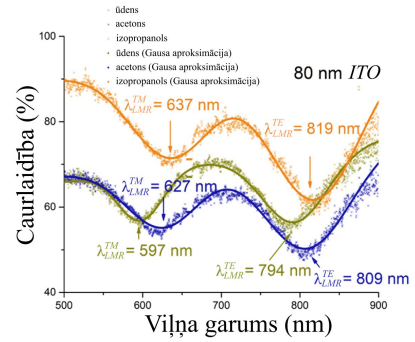
21. att. LMR parādības salīdzinājums dažāda veida viļņvados: (a) salīdzinājums taisnā un izliektā viļņvadā; (b) salīdzinājums dažādu polimēru viļņvados ²⁷.



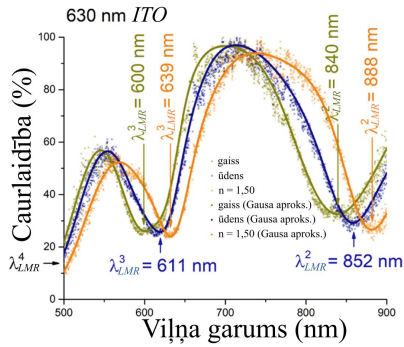
22. att. LMR parādība atkarībā no viļņa garuma un ITO biezuma: (a) eksperimentālie rezultāti OrmoClear viļņvadiem; (b) teorētiskie rezultāti OrmoClear viļņvadiem; (c) eksperimentālie rezultāti SU-8 viļņvadiem; (d) teorētiskie rezultāti SU-8 viļņvadiem ²⁷.



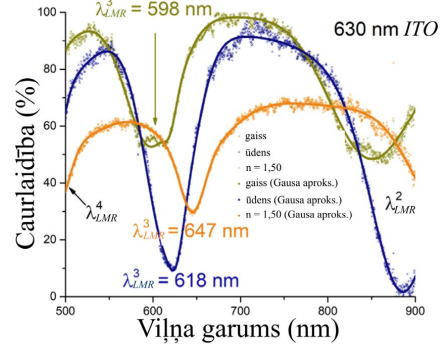
(a)



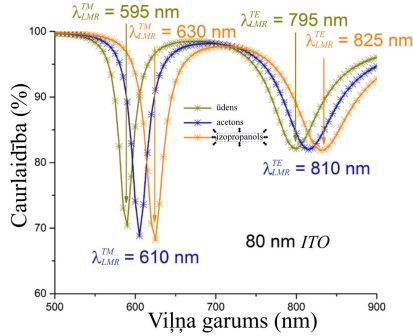
(b)



(c)



(d)



(e)

23. att. Eksperimentālā jutības atbilde dažādos šķidrumos: (a) pirmās kārtas *LMR* integrētā ierīcē, kuras pamatā ir SU-8 viļņvadi; (b) pirmās kārtas *LMR* plakanā stikla viļņvadā; (c) augstākās kārtas *LMR* integrētā ierīcē, kuras pamatā ir uz SU-8 viļņvadiem; (d) augstākās kārtas *LMR* plakanā stikla viļņvadā; (e) teorētiski aprēķināti pirmās kārtas *LMR* integrētā ierīcē, kuras pamatā ir SU-8 viļņvadi²⁷.

4. publikācijas galvenie rezultāti un secinājumi

- Lai pārbaudītu *LMR* parādību fotonikas integrētajos čipos, tika izveidota pielāgota mērīšanas sistēma, kas redzama 18. b attēlā.
- Gaismas zudumu ievadīšanas no optiskās šķiedras uz viļņvadiem samazināšanai tika izmantota ārpalpojuma zāģēšanas tehnika, kas nodrošināja gludākas un plakanākas viļņvadu malas. Gaismu ievada no šķiedras uz viļņvadi, izmantojot objektīvu (18. b att.).
- Fotonikas čipos, kas izgatavoti no visiem pārbaudītajiem polimēriem (21. b att.), tika novērotas vairākas *LMR* rezonanses.
- Šis pētījums veiksmīgi parādīja *LMR* parādības ģenerēšanu integrētajos viļņvados ar dažādu ģeometriju. Attiecīgie spektri redzami 21. a attēlā.
- Starp pārbaudītajiem polimēriem, kas izmantoti viļņvadu izgatavošanai, vislabāk piemērotais polimērs visā redzamā gaismas spektra diapazonā izrādījās SU-8, sniedzot izteiktākus *LMR* efektus, salīdzinot ar citiem polimēriem.
- Tika pierādīts, ka viļņvada ģeometrijai ir minimāla ietekme uz *LMR* parādības uzvedību, izņemot gaismas intensitātes samazināšanos, kas novērojama izliektajos viļņvados lieces dēļ (21. a att.).
- Šis pētījums iepazīstina ar inovatīvu biezo viļņvadu izgatavošanas metodi, kas ietver ekspozīciju caur stikla pamatni un alumīnija masku, kas atrodas tieši uz čipa (18. a att.). Šāda pieeja ļauj izveidot augstas kvalitātes viļņvadus, kas spēj efektīvi izplatīt gaismu, lai novērotu *LMR* parādību, kas nav sasniedzama ar citām viļņvadu izgatavošanas metodēm.
- Integrētām ierīcēm un plakaniem viļņvadiem jutība un *FOM* sasniedza līdzīgas vērtības, kas apliecināja integrēto sistēmu potenciālu *LMR* jomā (23. att.). Relatīvā kļūda starp eksperimentāli iegūtajiem *LMR* viļņu garumiem (23. a att.) un simulācijās paredzētajiem viļņu garumiem (23. e att.) ir 1 %.
- Izņemot *OrmoCore*, katrs pārbaudītais polimēru materiāls parādīja *LMR* atkarību no pārklājuma biezuma un rezonanses viļņa garuma, kas saskanēja ar teorētiskajām prognozēm, kas veiktas, izmantojot *FEM* simulācijas rīkus *COMSOL* vidē (22. att.). Galvenās atšķirības bija saistītas ar mērījumu iestatījumiem, kur netika izmantots lineārs polarizators, kas ierobežoja iespējas novērot *TM* un *TE* modas atsevišķi augstākas kārtas *LMR* rezonansēs, kā to paredz teorētiskie aprēķini. Turklāt eksperimentāli iegūtais *FOM* labi saskanēja ar simulācijās iegūtajiem rezultātiem.

SECINĀJUMI

1. Pirmo reizi *LMR* parādība tika novērota integrētajos viļņvados, kas izgatavoti no dažādiem polimēriem, piemēram, *OrmoClear*, *OrmoCore* un SU-8 fotorezistiem.
2. Integrētie *LMR* sensori var sasniegt jutību ap 905 nm/*RIU*, kas ir salīdzināma ar citām *LMR* sensoru konfigurācijām. Lai to panāktu, integrētajā fotonikas čipā jāiekļauj SU-8 viļņvadi ar $100 \times 100 \mu\text{m}$ šķērsriezuma izmēriem un 80 nm biezu *ITO* zuduma pārklājumu.
3. Pirmo reizi *FEM* simulācijas metodoloģija tika pilnībā izstrādāta, lai modelētu *LMR* parādību integrētajos polimēru viļņvados, uzrādot atbilstību eksperimentāli iegūtajiem *LMR* viļņu garumiem ar 1 % relatīvo kļūdu. Šī metode ir spējīga optimizēt arī reālu ierīču dizainu, lai sasniegtu maksimālu jutības veikspēju.

LITERATŪRAS SARAĶSTS

- (1) Del Villar, I.; Arregui, F. J.; Zamarreño, C. R.; Corres, J. M.; Barriain, C.; Goicoechea, J.; Elosua, C.; Hernaez, M.; Rivero, P. J.; Socorro, A. B.; Urrutia, A.; Sanchez, P.; Zubiate, P.; Lopez, D.; De Acha, N.; Ascorbe, J.; Matias, I. R. Optical Sensors Based on Lossy-Mode Resonances. *Sensors Actuators, B Chem.* **2017**, *240*, 174–185. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.08.126>.
- (2) Wang, Q.; Zhao, W. M. A Comprehensive Review of Lossy Mode Resonance-Based Fiber Optic Sensors. *Opt. Lasers Eng.* **2018**, *100* (July 2017), 47–60. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2017.07.009>.
- (3) Zamarreño, C. R.; Hernández, M.; Del Villar, I.; Matías, I. R.; Arregui, F. J. Optical Fiber PH Sensor Based on Lossy-Mode Resonances by Means of Thin Polymeric Coatings. *Sensors Actuators, B Chem.* **2011**, *155*(1), 290–297. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2010.12.037>.
- (4) Zamarreño, C. R.; Hernaez, M.; Del Villar, I.; Matias, I. R.; Arregui, F. J. Tunable Humidity Sensor Based on ITO-Coated Optical Fiber. *Sensors Actuators, B Chem.* **2010**, *146*(1), 414–417. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2010.02.029>.
- (5) Fuentes, O.; Goicoechea, J.; Corres, J. M.; Villar, I. Del; Ozcariz, A.; Matias, I. R. Generation of Lossy Mode Resonances with Different Nanocoatings Deposited on Coverslips. *Opt. Express* **2020**, *28*(1), 288. <https://doi.org/10.1364/oe.28.000288>.
- (6) Arregui, F. J.; Villar, I. Del; Corres, J. M.; Goicoechea, J.; Carlos, R.; Elosua, C.; Hernaez, M.; Rivero, P. J.; Socorro, A. B.; Sanchez, P.; Zubiate, P.; Lopez, D.; Acha, N. De; Matias, I. R. Fiber-Optic Lossy Mode Resonance Sensors. *Procedia Eng.* **2014**, *87*, 3–8. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.253>.
- (7) Refractometer, F.; Sudas, D. P.; Zakharov, L. Y.; Jitov, V. A.; Golant, K. M. Silicon Oxynitride Thin Film Coating to Lossy Mode Resonance. **2022**, 1–12.
- (8) Zhao, W. M.; Wang, Q. Analytical Solutions to Fundamental Questions for Lossy Mode Resonance. *Laser Photonics Rev.* **2023**, *17*(1), 1–18. <https://doi.org/10.1002/lpor.202200554>.
- (9) Razquin, L.; Zamarreno, C. R.; Munoz, F. J.; Matias, I. R.; Arregui, F. J. Thrombin Detection by Means of an Aptamer Based Sensitive Coating Fabricated onto LMR-Based Optical Fiber Refractometer. *Proc. IEEE Sensors* **2012**, 3–6. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2012.6411186>.
- (10) Zamarreño, C. R.; Hernaez, M.; Sanchez, P.; Del Villar, I.; Matias, I. R.; Arregui, F. J. Optical Fiber Humidity Sensor Based on Lossy Mode Resonances Supported by TiO₂/PSS Coatings. *Procedia Eng.* **2011**, *25*, 1385–1388. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.12.342>.
- (11) Ascorbe, J.; Corres, J. M.; Arregui, F. J.; Matias, I. R. Low voltage transducer based on the changes in the wavelength of the attenuation band. *SENSORS, 2014 IEEE*, **2014**, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2014.6985404>
- (12) Sánchez, P.; Zamarreño, C. R.; Arregui, F. J.; Matías, I. R. LMR-Based Optical Fiber Refractometers for Oil Degradation Sensing Applications in Synthetic Lubricant Oils. *J. Light. Technol.* **2016**, *34*(19), 4537–4542. <https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2562701>.
- (13) Zubiate, P.; Zamarreno, C. R.; Del Villar, I.; Matias, I. R.; Arregui, F. J. D-Shape Optical Fiber PH Sensor Based on Lossy Mode Resonances (LMRs). *2015 IEEE SENSORS* -

- Proc.* **2015**, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2015.7370421>.
- (14) Elosúa, C.; Vidondo, I.; Arregui, F. J.; Barriain, C.; Luquin, A.; Laguna, M.; Matías, I. R. Lossy Mode Resonance Optical Fiber Sensor to Detect Organic Vapors. *Sensors Actuators, B Chem.* **2013**, *187*, 65–71. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2012.09.046>.
 - (15) Zamarreño, C. R.; Ardaiz, I.; Ruete, L.; Muñoz, F. J.; Matias, I. R.; Arregui, F. J. C- Reactive Protein Aptasensor for Early Sepsis Diagnosis by Means of an Optical Fiber Device. *Proc. IEEE Sensors* **2013**, 4–7. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2013.6688222>.
 - (16) Paliwal, N.; John, J. Lossy Mode Resonance Based Fiber Optic Sensors. *Smart Sensors, Meas. Instrum.* **2017**, *21*(10), 31–50. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42625-9_2.
 - (17) Corres, J. M.; Ascorbe, J.; Arregui, F. J.; Matias, I. R. Tunable Electro-Optic Wavelength Filter Based on Lossy-Guided Mode Resonances. *Opt. Express* **2013**, *21*(25), 31668. <https://doi.org/10.1364/oe.21.031668>.
 - (18) Chiavaioli, F.; Gouveia, C. A. J.; Jorge, P. A. S.; Baldini, F. Towards a Uniform Metrological Assessment of Grating-Based Optical Fiber Sensors: From Refractometers to Biosensors. *Biosensors* **2017**, *7*(2). <https://doi.org/10.3390/bios7020023>.
 - (19) Paquet, C.; Kumacheva, E. Polymers for Photonics. **2008**, *11*(4), 48–56.
 - (20) Sciences, O. Hybrid Organic-Inorganic for Low-Cost Photonics Integration. **2007**, *00*, 234–235.
 - (21) Sherman, S.; Zappe, H. Printable Bragg Gratings for Polymer-Based Temperature Sensors. *Procedia Technol.* **2014**, *15*, 702–709. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.09.041>.
 - (22) Jiang, L.; Wu, J.; Chen, K.; Zheng, Y.; Deng, G.; Zhang, X.; Li, Z.; Chiang, K. S. Polymer Waveguide Mach-Zehnder Interferometer Coated with Dipolar Polycarbonate for on-Chip Nitroaromatics Detection. *Sensors Actuators, B Chem.* **2020**, *305* (September 2019), 127406. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.127406>.
 - (23) Wei, H.; Krishnaswamy, S. Polymer Micro-Ring Resonator Integrated with a Fiber Ring Laser for Ultrasound Detection. *Opt. Lett.* **2017**, *42*(13), 2655. <https://doi.org/10.1364/ol.42.002655>.
 - (24) Benítez, M.; Zubiate, P.; Del Villar, I.; Socorro-Lerános, A. B.; Matías, I. R. Lossy Mode Resonance Based Microfluidic Platform Developed on Planar Waveguide for Biosensing Applications. *Biosensors* **2022**, *12*(6), 403. <https://doi.org/10.3390/bios12060403>.
 - (25) Letko, E.; Bundulis, A.; Mozolevskis, G.; Vibornis, V. Integrated Lossy Mode Resonance Sensor Based on SU-8 Waveguides. **2022**, No. March 2022, 26. <https://doi.org/10.1117/12.2607716>.
 - (25) Letko, E.; Bundulis, A.; Mozolevskis, G. Theoretical Development of Polymer-Based Integrated Lossy-Mode Resonance Sensor for Photonic Integrated Circuits. *Photonics* **2022**, *9*(10). <https://doi.org/10.3390/photonics9100764>.
 - (27) Letko, E.; Bundulis, A.; Mozolevskis, G. Lossy Mode Resonance Sensors Based on Planar Waveguides: Theoretical and Experimental Comparison. *IEEE Photonics J.* **2024**, *16*(1), 1–7. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2023.3348993>.
 - (28) Letko, E.; Bundulis, A.; Vanags, E.; Mozolevskis, G. Lossy Mode Resonance in Photonic Integrated Circuits. *Opt. Lasers Eng.* **2024**, *181* (May). <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2024.108387>.



Edvīns Ļetko dzimis 1994. gadā Rīgā. Latvijas Universitātē (LU) ieguvis bakalaura grādu fizikā, Rīgas Tehniskajā universitātē – maģistra grādu materiālu nanotehnoloģijās. Kopš 2020. gada ir LU Cietvielu fizikas institūta Mikro un nanoierīču laboratorijas pētnieks. 2022. gadā līdzdibinājis jaunuzņēmumu SIA "OG Sense", kas specializējas fotonisko čipu izstrādē sensora lietojumiem. Zinātniskās intereses saistītas ar mikroierīču un nanoierīču izstrādi un šo ierīču komercializāciju.