

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
FIZIKAS, MATEMĀTIKAS UN OPTOMETRIJAS FAKULTĀTE
FIZIKAS NODAĻA

**GAISMAS IEVADĪŠANA SU-8 VIĻŅVADU
MIKROIERĪCĒM**

MAĢISTRA DARBS

Autors: **Aleksejs Bendins**

Studenta apliecības Nr.: 20066

Darba vadītājs: *Dr. sc. ing* Gatis Mozolevskis

RĪGA 2022

Anotācija

Atslēgvārdi: gaismas ievadīšana, fotonika, mikroierīces, SU-8 fotorezists, viļņvadi, optiskā šķiedra.

Polimēru fotonikas priekšrocības ir daudz funkcionalizācijas iespēju, plašs pielietojuma lauks, unikālas optiskās īpašības un to modifikācijas, vienkāršs un lēts ierīču izgatavošanas process. Polimēru fotoniskās ierīču plašu pielietošanas potenciālu ierobežo tehnoloģiskās grūtības saistītas ar gaismas ievadīšanu.

Tika izveidota eksperimentālā iekārta, ar kuru izpētīja gaismas ievadīšanu fotonisko čipu vienmodu un daudzmodu *SU-8* viļņvadus ar šķiedru pielīmēšanu. Fotoniskās mikroierīces un optiskās šķiedras tika sagatavotas gaismas ievadīšanai izmantojot un attīstot iegriešanas, laušanas, slīpēšanas un pulēšanas procedūras. Šajā darbā autors izmantojot “no malas” gaismas ievadīšanas metodi izpētīja vienmodu un daudzmodu profilu formas un signāla jaudas zudumus 1-30 μm *SU-8* polimēra viļņvadiem.

Šajā darbā izstrādātas metodes un izmantotie materiāli ļauj izpētīt polimēru fotoniskās ierīces un sagatavot to izmantošanai reālā vidē.

Atslēgvārdu skaits: gaismas ievadīšana - 165, fotonika - 9, mikroierīces - 50, *SU-8* fotorezists - 137, viļņvadi - 385, optiskā šķiedra - 345.

Abstract

Key words: light coupling, photonics, microdevices, SU-8 photoresist, waveguides, optical fiber.

Polymer photonics advantages are numerous functionalization capabilities, wide application field, unique optical properties and their tuning, simple and cheap microdevice fabrication process. The potential of polymer based photonic devices is currently limited by the light coupling technological difficulties.

An experimental equipment has been developed, built and successfully used for analysis of singlemode and multimode SU-8 waveguides bonding with optical fibers. Photonic devices and optical fiber have been prepared for light coupling after development of scribing, cleaving, grinding and polishing processes. The author of this thesis used edge coupling technique to investigate singlemode and multimode profiles and optical losses for 1-30 μm SU-8 polymer waveguides.

Methods and materials used in this work, empowers research of polymer photonic devices and enables their use beyond research.

Number of keywords: light introduction - 165, photonics - 9, microdevices - 50, SU-8 photoresist - 137, waveguides - 385, optical fiber - 345.

SATURS

| | |
|--|----|
| APZĪMĒJUMU SARAKSTS | 6 |
| IEVADS | 8 |
| 1. TEORĒTISKĀ DAĻA | 10 |
| 1.1. Viļņvadu optikas teorija | 10 |
| 1.2. Fotoniskās mikroierīces un materiāli | 13 |
| 1.3. Mikroierīču izgatavošana | 19 |
| 1.4. Gaismas ievadīšanas metodes | 29 |
| 1.5. Raksturlielumi un metodes raksturošanai | 37 |
| 2. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA | 44 |
| 2.1. Fotonisko čipu izgatavošana | 45 |
| 2.2. Fotonisko čipu sagatavošana | 49 |
| 2.3. Šķiedru izgatavošana un sagatavošana | 51 |
| 2.4. Zudumu mērīšanas metodika | 55 |
| 2.5. Gaismas ievadīšana | 57 |
| 2.6. Gaismas jaudas sadalījuma modelēšana | 66 |
| 3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA | 68 |
| 3.1. Fotonisko čipu griešana | 68 |
| 3.2. Fotonisko čipu pulēšana | 71 |
| 3.3. Šķiedru sagatavošana | 75 |
| 3.4. Gaismas jaudas sadalījuma modelēšana | 79 |
| 3.5. Modu mērījumi daudzmodu <i>SU-8</i> viļņvadam | 81 |
| 3.6. Modu mērījumi vienmodu <i>SU-8</i> viļņvadiem | 84 |
| 3.7. Gaismas ievadīšanas zudumi mikroierīcēm | 87 |
| SECINĀJUMI | 92 |
| DALĪBAS KONFERENCĒS UN PUBLIKĀCIJĀS | 93 |
| PATEICĪBAS | 94 |
| IZMANTOTĀ LITERATŪRA UN AVOTI | 95 |

| | |
|---|-----|
| PIELIKUMI | 104 |
| 1. pielikums <i>SU-8</i> fotorezista īpašības | 104 |
| 2. pielikums Gaismas ievadīšanas zudumu sakarības starp viļņvadiem ar Gausa tipa gaismas lauka sadalījumiem | 105 |
| 3. pielikums Vienmodu optiskā šķiedras <i>Thorlabs 630HP</i> specifikācijas | 106 |
| 4. pielikums Daudzmodu optiskās šķiedras <i>Thorlabs FG025LJA</i> specifikācijas | 107 |
| 5. pielikums Daudzmodu optiskās šķiedras <i>Thorlabs FG050UGA</i> specifikācijas | 108 |
| 6. pielikums NOA 61 UV-cietošas līmes specifikācijas | 109 |
| 7. pielikums AC-535-AN-F5 UV-cietošas līmes specifikācijas | 111 |
| 8. pielikums Uzbūvētā režģa statistika | 112 |
| 9. pielikums Fotonisko čipu iegriešanas un laušanas optimizācijas process | 113 |
| 10. pielikums TE amplitūdas simulācija 1 x 1 μm <i>SU-8</i> viļņvadiem uz stikla | 115 |
| 11. pielikums TE amplitūdas simulācija 10 x 1 μm <i>SU-8</i> viļņvadiem uz stikla | 116 |
| 12. pielikums TE amplitūdas simulācija 30 x 30 μm <i>SU-8</i> viļņvadiem uz stikla | 117 |

APZĪMĒJUMU SARAKSTS

- MCI – Maha-Cendera interferometrs (angl. – Mach-Zender Inteferometer)*
- LU CFI – Latvijas Universitātes Cietvielu fizikas institūts*
- PIC – fotoniskā integrēta ķēde (Photonic Integrated Curcuits)*
- NA – skaitliskā apertūra (angl. – Numerical Aperture)*
- MFD – modas laukuma diametrs (angl. – Mode Field Diameter)*
- PIC – fotoniskās integrētas ķēdes (angl. – Photonic Integrated Curcuits)*
- CMOS – (angl. – Complementary Metal–Oxide–Semiconductor)*
- SOI – silīcijs uz izolatora (angl. – Silicon On Insulator)*
- SU-8 – negatīvs fotorezists uz epoksīda bāzes*
- PMMA – polimetilmetakrilāts (angl. – Poly(methyl methacrylate))*
- PEG – Polietilēnglikols (angl. – PolyEthylene Glycol)*
- PVD – Fiziskā tvaiku pārklāšana (angl. – Physical Vapour Deposition)*
- CVD – Ķīmiskā tvaiku pārklāšana (angl. – Chemical Vapour Deposition)*
- UV – ultravioleta*
- PGMEA – 1-metoksi-2-propanola acetāts (angl. – methoxypropyl acetate)*
- CNC – ciparu datoru vadība (angl. – Computer Numerical Control)*
- UHNA – ultra-lielā skaitliskā apertūra (angl. – Ultra-High Numerical Aperture)*
- PARMS – plazmas atbalstītā reaktīvā magnetrona izputināšana (angl. – Plasma Assisted Reactive Magnetron Sputtering)*
- ALD – atomu slāņa nogulsnešanās (anlg. – Atomic Layer Deposition)*
- UV-A – ultravioleta gaisma 315-400 nm diapazonā*
- UV-B – ultravioleta gaisma 280-315 nm diapazonā*
- UV-C – ultravioleta gaisma 100-280 nm diapazonā*
- GRIN – Gradienta indeksa optika (angl. – GRadient-INdex)*
- RIE – reaktīvo jonu kodināšana (sausā kodināšana) (angl. – Reactive Ion Etching (RIE))*
- SCC – punkta-izmēra pārveidotājiem (angl. – Spot-Size Converters (SSC))*
- 2D – divas dimensijas*
- 3D – trīs dimensijas*
- XYZ – Dekarta koordinātu sistēmas koordinātu asīs*
- OGS – optiskais gāzes sensors*
- LMR – Zudumradošo modu rezonators (angl. – Lossy Mode Resonace (LMR))*
- MV – mikroviļņi*

ISO – Starptautiskā standartizācijas organizācijas standarts (angl. – International Organization for Standardization)

RH – Relatīvais mitrums (angl. – Relative Humidity (RH))

SEM – skenējošā elektronu mikroskopija

FC – šķiedru savienotājs ar “feruļu” (angl. – ferrule connector)

CAD – Datorizētā projektēšana (angl. – Computer-Aided Design)

DC – līdzstrāva (angl. – Direct Current)

AR – pret atstarošanās (angl. – Anti Reflective)

EFM - Elektromagnētiskā lauka modulis (angl. – Electromagnetic Field Module (EFM))

COMSOL – galīgo elementu simulācijas programmatūra (angl. – COMputer SOLution)

FEM – galīgo elementu metode (angl. – Finite Element Method)

TE – šķērsvirziena elektriska polarizācija (angl. – Transverse Electric)

TM – šķērsvirziena magnētiska polarizācija (angl. – Transverse Magnetic)

IEVADS

Mūsdienas zinātne un industrija turpina pētīt un attīstīties augošajā fotonisko mikroierīču jomā, meklējot jaunus risinājumus un pielietojumus fotoniskām mikroierīcēm telekomunikācijās [1], [2], sensoros [3] un biofotonikā [4], [5]. Šādu mikro ierīču funkcionalizācija balstās uz neorganiskiem un organiskiem viļņvadu elementiem kā Y-dalītāji [6], Brega režģi [7], [8], gredzenu rezonatori [4], [9], modulatori [1], [10], Maha-Cendera interferometri (MCI) [11] utt.

Polimēru fotonikas priekšrocības ir daudz funkcionalizācijas iespēju, plašs pielietojuma lauks, unikālas optiskās īpašības un to modifikācijas, vienkāršs un lēts ierīču izgatavošanas process [12], [13]. Uz *SU-8* bāzētas polimēru fotoniskās ierīces vēl netiek izmantotas industrijā. Viens no ierobežojošiem faktoriem ir to industriālo gaismas ievadīšanas un izvadīšanas tehnoloģiju trūkums. Gaismas ievadīšana ir būtisks posms fotoniskās platformas izstrādes ceļā no koncepcijas pierādījuma līdz komerciālam prototipam un mikroierīču raksturošanai, kas var būt viens no nozīmīgākajiem šķēršļiem [14].

Fundamentāli, gaismas ievadīšanai jāatrisina: modas un gaismas frontu nesakritību starp ievadīto gaismu un viļņvadu, gaismas atstarošanas interfeisu robežās, izkliedes uz virsmas defektiem, pozicionēšanas kļūdas un kā tās samazināt. Kamēr *SOI*, Si_3N_4 un III-V platformām jau eksistē tehnoloģiskie risinājumi gaismas ievadīšanai [14], līdz šim ir bijis maz pētījumu par gaismas ievadīšanu polimēru viļņvados. Tas stimulē veikt problēmas analīzi, tehnisko risinājumu meklēšanu un jauno metožu izstrādi [15]–[19].

Šai problēmai ir vairāki risinājumi, katrs ar savām priekšrocībām un trūkumiem atkarībā no pielietojuma. Šī pētījuma mērķis ir rast zināšanas un praktiskas pieredzes bāzi priekš Latvijas Universitātes Cietvielu Fizikas institūta (LU CFI) turpmākiem projektiem, kas saistīti ar citu fotonisko ierīču pētniecību un attīstīšanu.

Darba mērķis: Izpētīt efektīvas gaismas ievadīšanas metodes 1-30 μm diametra *SU-8* polimēra viļņvadiem, lai iegūtu mazus optiskā signāla intensitātes zudumus ar modas laukuma diametra kvalitātes saglabāšanu.

Darba uzdevumi:

1. Izpētīt literatūru par gaismas ievadīšanu viļņvados fotoniskām mikroierīcēm.
2. Izstrādāt gaismas ievadīšanas metodi *SU-8* viļņvadiem.
3. Izveidot eksperimentālo iekārtu, ar kuru pētīt gaismas ievadīšanu fotonisko čipu vienmodu un daudzmodu *SU-8* viļņvados.
4. Veikt secinājumus par iegūtajiem rezultātiem.

Maģistra darbs sastāv no 4 sadaļām – literatūras apskata, eksperimenta apraksta, eksperimentālajiem rezultātiem un secinājumiem. Darbā izmantoti 109 literatūras avoti – 88 publikācijas, 10 grāmatas un 11 cita veida literatūras avoti (brošūras, datu lapas, utt). Darbā iekļauti 68 attēli un 9 tabulas.

1. TEORĒTISKĀ DAĻA

1.1. Viļņvadu optikas teorija

Viļņvadu fotonika aplūko dažādas parādības, kas saistītas ar gaismas izplatīšanos, tās transformāciju un ģenerēšanu viļņvada struktūrās, kuru pamatā ir plāni (salīdzināmi ar viļņa garumu λ) dielektrisko un pusvadītāju slāņi. Pašlaik integrētās optoelektronikas λ diapazons ir no 0,1 līdz 10 μm . Daudzu fotonisko platformu pamatā ir gaismas viļņvads ar regulāru formu, ar kuru var panākt efektīvu gaismas izplatīšanos.

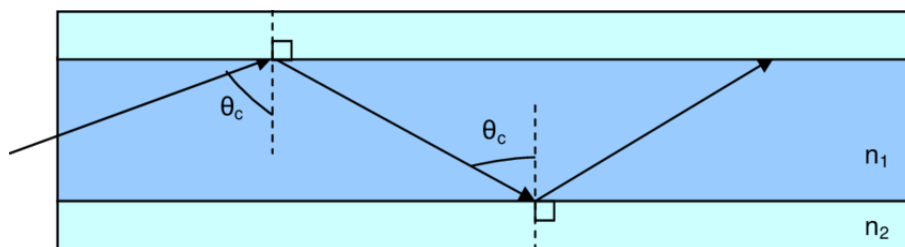
1.1.1. Staru optika

Gaismas elektriskā komponente vides molekulās inducē elektriskus dipolus, kuri oscilē ar gaismas frekvenci. Dipoli savukārt ir otras kārtas gaismas viļņu avoti. Primāras un jauna viļņa rezultējošās vilnis izplatās vidē saskaņā ar gaismas laušanas likumiem. Gaismas laušanu staru optikas teorijā nosaka Snelliusa likums:

$$\sin \theta_2 \cdot \sin \theta_1 = n_1 n_2 = v_1 v_2, \quad (1.1)$$

kur θ_1 un θ_2 ir attiecīgi gaismas krišanas un laušanas leņķi; n_1 un n_2 ir laušanas koeficienti attiecīgajās vidēs. Ja serdenim un apšuvumam ir nemainīgs refrakcijas koeficients visā šķērsriezuma laukumā, bet serdes refrakcijas koeficients atšķiras no apvalka laušanas koeficienta, tie darbojas kā optiskais viļņvads ar "pakāpju laušanas koeficientu". Gaismas izplatīšanas viļņvados ar pakāpenisko laušanas koeficientu notiek pilnīgās iekšējās atstarošanas efekta dēļ. [20] Kad gaisma izplatās n_1 vidē $n_1 > n_2$, eksistē tāds kritiskais gaismas krišanas leņķis $\theta_1 = \theta_{kr}$, pie kura gaismas laušanas leņķa θ_2 sinuss ir vienāds ar 1 un notiek pilnā iekšējā atstarošanas (sk. 1.1. att.):

$$\theta_{kr} = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right), \quad (1.2)$$



1.1. att. Pilnīgā iekšējā atstarošanas un gaismas moda plenārajā viļņvadā (θ_c ir θ_{kr}) [21]

1.1.2. Viļņu optika un moda

Elektromagnētisko viļņu izplāšanai vidē tika klasificētas divās iespējamās polarizācijās: šķērsvirziena elektriskā (TE), ja elektriskais lauks ir perpendikulārs krišanas plaknei, vai

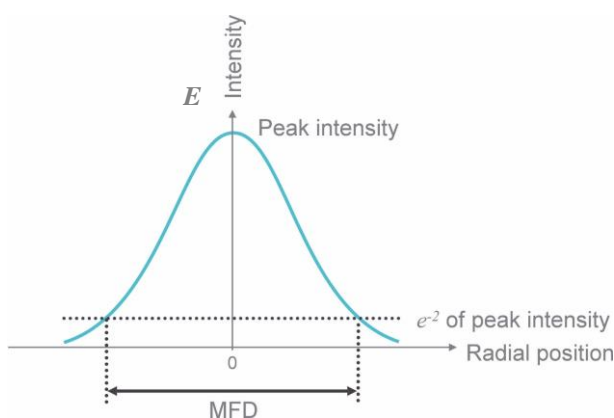
šķērsvirziena magnētiskā (*TM*), kad magnētiskais lauks ir perpendikulārs tai pašai plaknei. *TE* modas viļņu vienādojuma vispārīgais risinājums plakanajos viļņvados ir šāds:

$$\nabla^2 E = \mu_m \varepsilon_m \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (1.3)$$

ar $v = 1/\sqrt{\mu_m \varepsilon_m}$ – viļņa ātrums

$$E_x = E_c e^{-k_y y} e^{-j\beta z} e^{-j\omega t} \quad (1.4)$$

kur $e^{-j\beta z}$ – atbilst sinusoīdālā tipa laukam, bet $e^{-k_y y}$ apzīmē laukus kuri izplatās caur viļņvada apšuvumiem. Tas nozīmē, ka lauks iekļūst apšuvumos ar sabrukšanas konstanti k_y , tāpēc daļa no gaismas lauka izplatās caur apšuvumu. Attēlojot grafiski lauka sadalījumu intensitāti $|E_x(y)|^2$ – sk. 1.2. attēlu. [22]



1.2. att. E lauka sadalījums izplatīšanas šķersgriezumā un *MFD* vērtība [23]

MFD ir modas vai lāzera stara šķērsvirziena mērs. *MFD* tradicionāli tiek noteikts, izmantojot intensitātes sadalījuma Gausa aproksimāciju kas definēts kā profila līknes platumus $1/e^2$ jaudas līmenī. Režīma lauka diametrs (*MFD*) ir svarīgs, jo tas ļauj saistīt optisko elementu modu atbilstības un maksimāli palielinātu ievadīšanas efektivitāti. *MFD* nosaka šķiedras skaitliskā apertūra (*NA*) un robežviļņa garums, un tas ir saistīts ar viļņvada diametru. [22]

$$MFD = \frac{2\lambda}{\pi NA}, \quad (1.5)$$

NA ir bezdimencionāls skaitlis, kas raksturo leņķu diapazonu, kurā sistēma var pieņemt vai izstarot gaismu:

$$NA = n \sin \theta, \quad (1.6)$$

kur n – ir vides, laušanas koeficients un θ – ir maksimālais gaismas konusa pus-leņķis, kas var iekļūt viļņvadā vai iziet no tā. Efektīvs laušanas koeficients ir gaismas ātruma vakuumā attiecība pret modas ātrumu noteiktai polarizācijai izplatīšanās viļņvadā:

$$n_{eff} = \frac{\beta}{k_0}, \quad (1.7)$$

kur k_0 – izplatīšanās konstante brīvā telpā un β – viļņvada izplatīšanās konstante:

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}, \quad (1.8)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_0}. \quad (1.9)$$

1.1.3. Zudumi vienmodu viļņvados

Zudumi apraksta, cik daudz optiskās enerģijas tika zaudēts, gaismai izplatoties optiskā sistēmā. Gaismas zudumus viļņvadā nosaka vairāki efekti: absorbcija materiālā, gaismas izkliede un izstarošanas zudumi (angl. – *radiation losses*) viļņvadu pagriezienos.

Gaismas absorbciju viļņvadā nosaka viļņvada serdes un pārklājuma materiālu optiskās īpašības. Laušanas koeficients pie noteiktā viļņa garuma nosaka tādas parādības materiālā, kā atstarošana un difrakcija. Absorbcijai viļņvada materiālā ir integrāla īpašība jebkurai stara trajektorijai, tāpēc to var aprakstīt ar Lamberta–Bēra likumu:

$$I(z) = I_0 10^{-\frac{\alpha(\lambda) \cdot z}{10}}, \quad (1.10)$$

kur I_0 – sākotnējā gaismas intensitāte; $I(z)$ – gaismas intensitāte attālumā z [cm]; α – vājinājuma koeficients [dB/cm]. Vienkāršoti, zudumi viendabīgā optiskā viļņvada materiālā būs:

$$\alpha = \frac{4\pi}{\lambda}, \quad (1.11)$$

Protams, jāņem vērā ka absorbcijas koeficients viļņvadam ir serdes un apvalka absorbcijas koeficientu summa. [24]

Gaismai, pārejot no vienas vides uz otru ar atšķirīgiem laušanas koeficientiem, rodas atpakaļ atstarošana, ko sauc par Freneļa atstarošanu. Tā kā $n^2 = \epsilon\mu$, bet μ optiskiem materiāliem ir tuvu vieniniekam, ir impedances atšķirība, kas rāda atstarošanu. Atstarošanas koeficientu var aprēķināt kā:

$$\rho = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2, \quad (1.12)$$

Saistītus ar to zudumus var aprēķināt kā:

$$\alpha = 10 \cdot \log(1 - \rho), \quad (1.13)$$

Freneļa atstarošana notiek neatkarīgi no stara krišanas leņķa vērtības, tādēļ tā notiek uz viļņvada serdes robežvirsmas visā garumā, kā arī viļņvada galos. Parasti, šie zudumi ir mazāki par 4% no krītošas gaismas enerģijas kopējā apjoma. [25]

Izkliedes zudumi viļņvadiem rodas no to virsmas raupjuma, ko galvenokārt nosaka viļņvadu izgatavošanas tehnoloģija [26]. Kad gaismas stars trāpa nevienmērīgam virsmas apgabalam, lokāli krītošais leņķis var būt atšķirīgs no virsmas plaknes leņķa, tādēļ gaismas stars pamet zonu nevēlamā virzienā. Viļņvadu gadījumā, ja krītošais leņķis ir mazāks nekā kritiskais, tad stars aiziet apšuvumā, nevis paliek serdē. Izkliedes zudumus planāram viļņvadim var izteikt kā:

$$\alpha_{izkl} = \frac{\sigma^2 k_0^2 E_S^2 \Delta n^2}{\beta \int E^2 dx}, \quad (1.14)$$

kur σ – virsmas raupjums, $\frac{E_S^2}{\int E^2 dx}$ – normalizēta gaismas intensitāte serdes-apvalka robežās.

Zudumi viļņvadu pagriezienos un viļņvadu profila nevienmērīguma dēļ, rada izstarošanas zudumus. Kopējais kustīgās gaismas enerģijas lauks viļņvadā tiecās pārvietoties kā nemainīgs lauks. Kad viļņvads ir izliekts, gaismas enerģijai, kas plūst caur lielāko ārējo līkni, būs jāpārvietojas ātrāk nekā enerģijai, kas pārvietojas kodola centrā:

$$R \frac{d\theta}{dt} = \frac{\omega}{\beta_0}, \quad (1.15)$$

kur $\frac{d\theta}{dt}$ – leņķiskais ātrums. Gaisma tam dabiski pretosies, un tai būs tendence izstarot ārā no viļņvada, veidojot noplūdes modas. Enerģijas daudzums, kas parasti tiek zaudēts liela rādiusa līkumos, ir gandrīz niecīgs viļņvadiem ar mazu gaistošo gaismas lauku (angl. – *evanescent field*), kas ļauj konstruēt viļņvadus ar maziem pagrieziena rādiusiem. Kritiskais rādiuss tiek aprēķināts pēc formulas:

$$x_r = R \frac{\beta_0 - \beta_1}{\beta_1}, \quad (1.16)$$

kur β_0 – modas izplatīšanas konstante kodolā, β_1 – apvalkā un R – izliekuma rādiuss. [27]

1.2. Fotoniskās mikroierīces un materiāli

Mūsdienās, integrētās optiskās ierīces, sastāv no liela skaita elementu, kas pārvadā dažādas funkcionālās slodzes. Pasīvie elementi ir paredzēti, lai pārraidītu un pārveidotu optiskos signālus bez enerģijas patēriņa. Aktīvo elementu vadīšanai tiek izmantoti gan optiskie, gan elektriskie vadības signāli, piemēram: gaismas avoti, viļņa garuma filtri, signāla modulatori un detektori [28], [29], [12]. Fotoniskās integrētas ķēdes (angl. – *Photonic Integrated Circuits (PIC)*), risina fotonikas galvenos uzdevumus:

- Miniaturizēt optiskos elementus, ierīces un sistēmas, un samazināt to izmaksas;
- Integrēt optiskos elementus, ierīces un sistēmas uz vienas bāzes (substrāts, mikroshēma);

- izveidot īpaši ātras optiskās sistēmas (līdz pat 10 fs laikā);
- liela informācijas apjoma pārraide lielā ātrumā (vairāk nekā 1 Tbps);
- nodrošināt zemu vadības signālu enerģijas līmeni (līdz pat 1-5 fJ);
- nodrošināt optisko materiālu polifunkcionalitāti, kas ļauj realizēt dažādas ierīces uz čipa. [12]

Tipiski, aktīvie elementi ir savienoti, izmantojot plakanus vai lentveidīgus viļņvadus, bet dažādi fotoniskie čipi ir savienoti, izmantojot optiskās šķiedras. Optiskajām šķiedrām ir daudz pievilcīgu īpašību kā optiskajam viļņvadam, piemēram, zems pārraides zudums, zemas izmaksas, elastība un elektromagnētiskā imunitāte, un tāpēc tās var nodrošināt ideālu vadu starp dažādiem optiskajiem komponentiem un sistēmām, tostarp *PIC*. [30]

1.2.1. Fotonisko mikroierīču materiāli

Optisko viļņvadu integrācijas blīvums *PIC* platformā ir cieši saistīts ar laušanas koeficienta kontrastu starp serdi un apšuvuma materiāliem. Palielinot serdes materiāla laušanas koeficientu, var samazināt tā izmēru.[14] Liela mēroga augsta blīvuma *PIC* ir nepieciešami viļņvadi ar augstu laušanas koeficienta kontrastu, piemēram, III-V saliktie pusvadītāji nodrošina Δn ap 10% [31], [32], bet silīcijs [33], [34] ap 200%, kas ļauj veidot zem-mikrona izmēra viļņvadus. Visplašāk izmantots materiāls fotonikā ir silīcijs, vai precīzāk – silīcijs uz oksīda (angl. – *Silicon-On-Insulator (SOI)*), jo viņu ir viegli funkcionālizēt, izmantojot Papildu metāla oksīda pusvadītāju (angl. abreviatūra – *CMOS*) tehnoloģiju, kuru pielieto mikroelektronikas jomā. Tādēļ, procesi ir labi atstrādāti un ļauj miniaturizēt fotoniskās ierīces līdz zem-mikrona līmenim. Līdz ar to var novērot Mūra likumu silīcija fotonikā. Silīcija vai Si_3N_4 viļņvadus bieži taisa uz kvarca pamatnes, telekomunikāciju un infrasarkanam diapazonam attiecīgi. [35] Bet, silīcijam ir netiešā aizliegtā zona, lieli zudumi viļņu vadīšanai telekomunikāciju diapazonā, slikta signāla modulācija. [36]

Salīdzinot ar *SOI*, Si_3N_4 un III-V platformām, polimēru fotoniskās mikroierīces ir lētas, un tās var modificēt, veidojot gan aktīvus, gan pasīvus fotoniskus elementus ar labām optiskām īpašībām. [12] Šādi viļņvadi spēj darboties gan redzamajā, gan infrasarkanā spektra diapazonā un tiem ir raksturīgi zemi gaismas izplatīšanas zudumi (zem 1,5 dB/cm) [37], [38]. Polimērs ir organiskais materiāls, kuram makro-molekulas tiek radītas no vienkāršāku molekulu, jeb monomēru, šķērss-saistīšanas. Polimēru fizikālās pamatīpašības, piemēram, kušanas temperatūra, viskozitāte, šķīdība un stiepes izturība, galvenokārt nosaka starp molekulāro spēku stiprums, molekulārā masa, polimēra struktūra un polimēra molekulas elastība. Ir pieejami daudzi gaismjutīgi polimēri ātrai fotonisko ierīču ražošanai tieši ar

parastām fotolitogrāfijas metodēm [13]. Populārāki organiskie materiāli integrētā fotonikā ir *SU-8*, *PMMA* un PEG. [2], [39]. Viegli izgatavojama uz polimēru viļņvadiem balstīta hibrīda fotoniskā tehnoloģija ļauj integrēt lāzerus, uztvērējus, viļņu garuma sadalītājus/kombinētājus, polarizācijas apstrādes elementus un vairākas citas optiskās funkcijas. [39]–[41]

SU-8 polimērs ir izstrādāts kā pastāvīgs, ļoti šķērssaistīts epoksīda materiāls, un ir visplašāk izmantotais polimērs fotonisko ierīču veidošanai [20], [23]. Šim polimēram piemīt augsta ķīmiska un termiskā stabilitāte [42], [43], [44] (sk. 1. pielikumā). Tā stiklošanas temperatūra ir ap 145-250°C [45]. *SU-8* laušanas koeficients ir 1,5841-1,596 robežās pie 635±2 nm [37],[45] un 1,580 pie 1310 nm un 1,575 pie 1550 nm. Nav pieejami precīzi dati par *SU-8* absorbcijas koeficientu $\alpha(\lambda)$, bet ir zināms, ka tam piemīt <1 dB/cm zudumi 400-1550 nm diapazonā [46]. Var sasniegt optiskus zudumus *SU-8* viļņvadiem līdz pat 0,19±0,03 dB/cm pie 632,8 nm [37], 0,2 dB/cm pie 1090 nm, 0,5 dB/cm pie 1300 nm un 1,1dB/cm pie 1550 nm [45]. *SU-8* iespējams izmantot lai izgatavotu daudzmodu viļņvadus 500-1100 nm diapazonā [47].

Cits polimērs, *PMMA* (metil metakrilāts), ir šķīstošs anizolā un hloroformā, kas ļauj veidot dažādus šķīdumus plānu kārtiņu pagatavošanai izmantojot strūkldrukas vai rotējošā diska metodi priekš mikroierīču izgatavošanas [48]. *PMMA* laušanas koeficientu var regulēt ±0,1 jaucot ar citiem polimēriem [49]. *PMMA* laušanas koeficients pie 635±2 nm ir 1,488-1,491 [50].

Minētas *SU-8* un *PMMA* īpašības motivē izmantot šo materiālu kombināciju kā viļņvada un apvalka materiālus fotoniskās mikroierīcēs, piemēram, gāzu sensora uz Maha-Cendera interferometra principa izgatavošanai [48]. Tādam sensoram, vienmodu viļņvadi ir veidoti no *SU-8* uz stikla pamatnes. Viens no interferometra pleciem speciāli ir garāks par otro un pārklāts ar poraina *PMMA* pārklājumu, kurš absorbē gāzu molekulas un maina savu laušanas koeficientu, veido augstākas kārtas modas un palielina zudumus *SU-8* viļņvadu posmā zem tā. Tas izraisa fāzes starpības $\Delta\phi$ izmaiņas starp MCI pleciem, kas savukārt izraisa gaismas izvades intensitātes izmaiņas saskaņā ar divu staru interferences formulu, kur izejas intensitāte ir funkcija no $\cos(\Delta\phi)$ funkcija. Inducēto fāzes starpību var uzrakstīt kā:

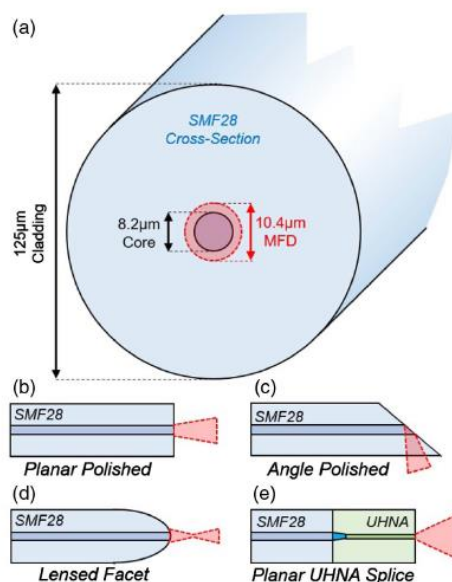
$$\Delta\phi = \frac{2\pi L}{\lambda} \Delta n_{eff}, \quad (1.17)$$

kur Δn_{eff} - ir efektīva laušanas koeficienta izmaiņas viļņvada modai, λ – gaismas viļņa garums, L – jūtīga interferometra pleca garums. Tādēļ, izejas intensitātes izmaiņas var reģistrēt atkarībā no gāzes klātbūtnes. Lai to varētu paveikt, pamatne jāgatavo tā, lai gaismu varētu ievadīt un izvadīt no fotoniskā čipa. [48]

1.2.2. Optiskā šķiedra

Gaismas ievadīšanai var izmantot dažādus savienojuma interfeisus: šķiedra-pie-čipa, čips-pie-čipa un ievadīšana no brīvas telpas [16]. Lāzera čipa savienošana ar *PIC* ir sarežģīta, jo lāzeriem ir nepieciešama dzesēšana un tie ir ļoti jutīgi pret atpakaļ atstarošanām [16]. Ievadīšana no brīvas telpas lielā mērā ir atkarīga no nemainīga refrakcijas koeficienta starp gaismas avotu un mikroshēmu. Gaismas ievadīšanai šķiedra-čips nav minēto trūkumu.

Vienkārša optiskā šķiedra sastāv no leģēta stikla serdes ar diametru no 3 līdz 1000 μm , apvalka ar mazāku laušanas koeficientu ar ārējo diametru no 10-500 μm un plastmasas apvalka materiāla (300-3000 μm). Optiskajām šķiedrām, kā optiskajam viļņvadam, ir daudz pievilcīgu īpašību, piemēram, zems pārraides zudums, zemas izmaksas, elastība un elektromagnētiskā imunitāte, un tāpēc tās var nodrošināt ideālu optisko vadu priekš dažādiem optiskajiem komponentiem un sistēmām. Bet tās cieš no modas izmēru neatbilstības, jo integrēta optiskā viļņvada diametrs ir ļoti mazs (0,5 – 6 μm), salīdzinot ar tipisko šķiedras serdi (3,5 – 10 μm) (sk. 1.3.-a att.). Tāpēc tāda tieša ievadīšana vienmēr radīs lielus ievadīšanas zudumus un sarežģītu salaišanas procedūru, bet to var uzlabot ar minētām speciālām gaismas ievadīšanas struktūrām uz čipa vai šķiedras gala. Tas nodrošinātu labu gaismas ievadīšanas efektivitāti un salīdzinoši lielu pozicionēšanas pielaidi starp viļņvadiem un optiskām šķiedrām. Specializēti savienotāji parasti ietver invazīvu substrāta inženieriju, papildu fotoniskus slāņus, kodināšanas tehnikas, sarežģītāku komponentu salaišanu, īpaša režģa izstrāde utt.[10], [12], [15], [16]



1.3. att. Optiskās šķiedras struktūras varianti gaismas ievadīšanai: (a) optiskās šķiedras SFM28 šķērsriezums (8,2 μm kodols un 10,4 μm MFD pie $\lambda=1,55\mu\text{m}$); (b) plakaniski-pulēta šķiedra; (c) leņķiski-pulēta šķiedra; (d) lecēta šķiedra; (e) taisns salaidums (metināšana) ar UHNA šķiedru [15]

Plakaniski-pulētu, lēcu un *UHNA* šķiedru (sk. 1.3.-b,d,e att.) pielieto gaismas ievadīšanai čipā viļņvadu plaknē, piemēram, no-sāna metodi (sk. 1.4. sadaļā). Plakaniski pulētai šķiedrai moda novirzās ārā no izejas ar gandrīz ideālu simetrisku Gausa 2D profilu ar noteiktu skaitlisku apertūru un Releja garumu, kurš jāņem vērā izvēloties attālumu no viļņvada.

Šķiedra ar pulētu leņķa šķautni (parasti līdz 40°) (sk. 1.3.-c att.) ļauj ievadīt gaismu čipā ārpus viļņvadu plaknes, piemēram, izmantojot režģa viļņvada struktūru (sk. 1.4 sadaļā). [15] Šādā ģeometrijas gadījumā šķiedras moda tiek veikta pilnīga iekšējā atstarošana, kur gaisma krīt uz šķiedras malas leņķī un iziet no šķiedras gandrīz ortogonāli šķiedras serdes virzienā.

Tipiska šķiedras un čipa savienošanas konfigurācija ir izmantojot šķiedras lēcu. Šķiedras priekšpusē ar pulēšanu vai ar lāzera termoablāciju var izveidot puslodes (vai konusveida) galu, kas darbojas ka lēca, fokusējot staru. Tas ir grūti mērogojama metode, jo katra šķiedra jāapstrādā atsevišķi, kontrolējot lecas rādīsimu un kvalitāti.

Ultra High NA (UHNA) šķiedra adiabātiski pārveido modu no vienmodu modas uz mazāku modu (*MFD* $\sim 3\text{-}5\mu\text{m}$) ar zudumiem $<1,5\text{dB}$. *UHNA* šķiedrai laušanas koeficientu starpība Δn starp serdi un apvalku ir daudz lielākā nekā standarta vienmodu šķiedrai. To var izmantot kā atsevišķu elementu, kuru var pielīmēt pie optiskā šķiedra uzgaļa vai piemetinātu pie standarta vienmodu šķiedras īsu *UHNA* posmu ($\sim 1\text{ cm}$). Tādā veidā var adiabātiski samazināt modu pirms ievadīšanas fotoniskā čipā. Iespējams iegūt zudumus līdz pat $0,2\text{ dB}$, izmantojot netipiski ilgu metināšanas elektriska loka laiku, lai izveidotu pietiekoši garu konusveida pāreju starp šķiedru kodoliem [22].

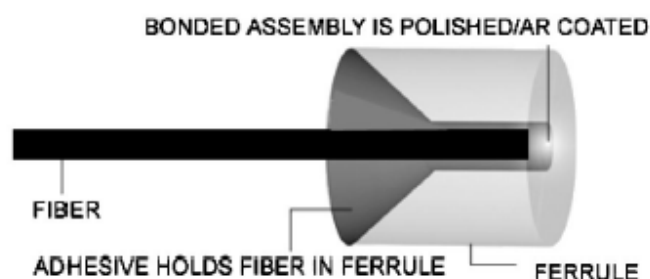
Tā kā plika šķiedra ir $<500\mu\text{m}$ diametrā, šķiedras galu grūti mehāniski apstrādāt un stabili nostiprināt pie fotoniskā čipa. Tāpēc šķiedru ielīmē metāla, plastmasas, stikla vai keramikas uzgalī, kura mērķis ir noturēt šķiedru precīzā pozīcijā, aizsargāt to no bojājumiem un nodrošināt tās novietošanu precīzā izlīdzinājumā atbilstošā savienotājā.

Stikla vai keramikas uzgaļi tiek plaši izmantoti šķiedru komponentu montāžai, jo tos var precīzi izgatavot ievērojot stingras izmēru tolerances. Optiskajai šķiedrai ar $125\mu\text{m}$ ārējo diametru ir pieejami keramiski uzgaļi ar kapilāra izmēriem $126+3/-0\mu\text{m}$. Keramiskie un stikla uzgaļi ir ķīmiski un mehāniski izturīgi, kā arī viegli pielāgojas gan UV, gan termiskas cietēšanas procesiem.

Šķiedru sagatavošanas pirmais solis ir rūpīgi notīrīt šķiedru, noņemot plastmasas apvalka materiālu, stiprības elementus un buferi utt. To var izdarīt, izmantojot stieplu noņēmējus vai līdzīgus asus instrumentus. Jāizvairās no optiskā apvalka bojājumiem, jo tie padara šķiedru trauslāku. Pliku šķiedras posmu jāattīra ar šķīdinātājiem. Tālāk, šķiedru var sadalīt, pa stikla apšuvumu iegriežot ar cieto šķelšanas instrumentu, piemēram, dimanta, safīra vai volframa

karbīda asmeni, vai speciālo šķelšanas instrumentu ar diska asmeni. Izmantojot minētus rīkus, tiek iegūta plakana, spoguļa raupjuma šķiedras gala virsma, kas ir aptuveni $\pm 3^\circ$ perpendikulāra šķiedras asij, kas ļauj ievadīt gaismu fotoniskajā čipā. [51]

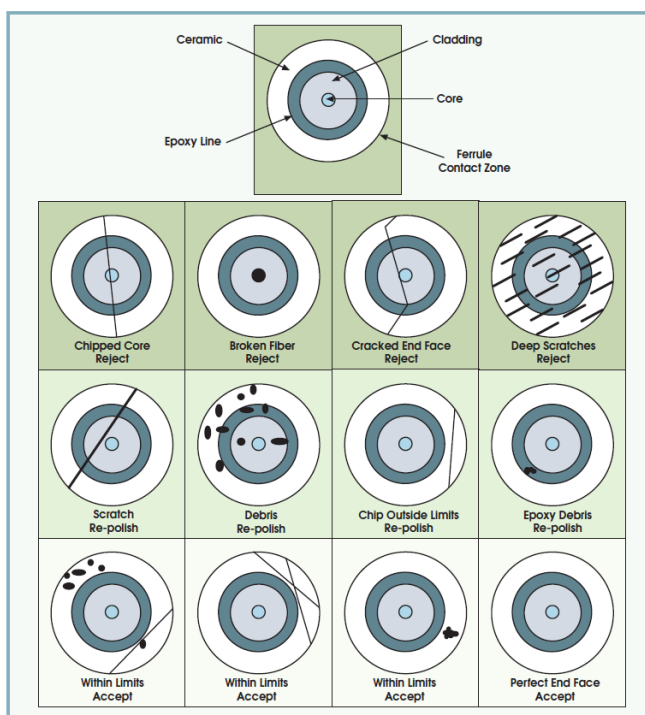
Lai uztaisītu šķiedras uzgali (angl. – *fiber pigtail*), līme tiek dozēta uzgaļa aizmugurējā galā esošajā reljefā un ar kapilāru darbību tiek pārnesta šaurajā uzgaļa caurulē. Tālāk, optisko šķiedru, no kuras ir noņemts buferis, notīra, pēc tam ieliek un nostiprina uzgalī. Līmi sacietina termiski vai ar UV starojumu, kas nodrošina dubultās priekšrocības, proti, šķiedras nostiprināšanu uzgaļa uzgalī un spriedzes mazināšanu uzgaļa aizmugurējā galā (skatīt 1.4. att.). Pēc tam šķiedras uzgaļa komplekta priekšējā virsma tiek pulēta un var tikt pārklāta ar pret atstarojošu pārklājumu. [51]



1.4. att. Šķiedras uzgaļa piemēra šķersriezums: [52]

Tālāk, uzgalis ir piestiprināts pulēšanas turētājā, ko izmanto, lai slīpēšanas procesā noturētu uzgali attiecīgā leņķī – perpendikulāri vai Brūstera leņķī. Šķiedru noslīpē ar secīgi smalkākām abrazīvām vielām, lai iegūtu pulētu virsmu vienā līmenī ar uzgaļa galu. Galējo pulēšanu veic, izmantojot abrazīvus ar daļiņas izmēriem mazākiem par $1\ \mu\text{m}$. Pulētai šķiedrai ar uzgali ar pietiekoši labu gala virsmas kvalitāti (sk. 1.5. att.) var izmantot gaismas ievadīšanai un fotonisko mikroierīču prototipēšanai. Tā kā atkarīgi no gaismas ievadīšanas metodes, šķiedras savienotājam ir savs unikāls dizains, tam var būt dažādas slīpēšanas un pulēšanas tehnikas. [51]

Dažreiz, pēc šķiedras gala pulēšanas procesa jāuzklāj pret atstarošanas pārklājums, piemēram, no HfO_2 , Ta_2O_5 , SiO_2 utt. Pārklājumi ir veidoti galvenokārt specifiskam viļņgarumam. Pārklājumus veido ar standarta elektronu staru iztvaikošanu (angl. – *E-beam evaporation*), plazmas atbalstītā reaktīvā magnetrona izputināšana (angl. – *plasma assisted reactive magnetron sputtering (PARMS)*) [54], atomu slāņa nogulsnešanās (angl. – *Atomic Layer Deposition (ALD)*) [55], utt.



1.5. att. Optisko šķiedru uzgaļu pulēšanas defektu izvertēšana [53]

1.3. Mikroierīču izgatavošana

Ievērojama interese ir pievērsta *SU-8* polimēru viļņvadiem, jo tie piedāvā tādas priekšrocības kā zemas temperatūras ražošanas process un izgatavošanas vienkāršība. Polimēru viļņvadu struktūras uz stikla, silīcija vai citas cietas pamatnes var iegūt dažu minūšu laikā, izmantojot optiskās litogrāfijas principus, neizmantojot dārgas *CMOS* procesus, kā piemēram, fizikālo tvaiku pārklāšanu (*PVD*), ķīmisko tvaiku pārklāšanu (*CVD*), epitaksiju, dopēšanu, sauso kodināšanu, utt. [12], [56]. Pēc mikroierīces struktūru izveides, jāgatavo mikroierīci un papildus optiskus elementus gaismas ievadīšanai.

1.3.1. Tīrīšana

Pirms litogrāfijas pamatne jāgatavo priekš litogrāfijas procesiem. Pamatne vispirms jātīra no organiskā piesārņojuma, jo tas var pārklāt metāla jonus un daļiņas, tādējādi kavējot tās noņemšanu. Hloroforms un acetons efektīvi noņem organiskās daļiņas, bet izopropanols palīdz noskalot iepriekš izmantotos šķīdinātājus. Tālāk var izmantot skābus un sārmains tīrīšanas līdzekļus, lai noņemt sārmu jonus un katjonus no pamatnes. Piemēram, NH_4OH (amonija hidroksīds), H_2O_2 (ūdeņraža peroksīds) [57]

Tīrīšanas līdzekļa iedarbību uzlabo paaugstināta temperatūra (40-80 °C) un ultraskaņas iedarbība (37 kHz). Ultraskaņas ģeneratora radītā elektriskā augstfrekvences enerģija pjezoelektrisko ģeneratoru sistēmās tiek pārveidota mehāniskajā enerģijā un pēc tam tiek

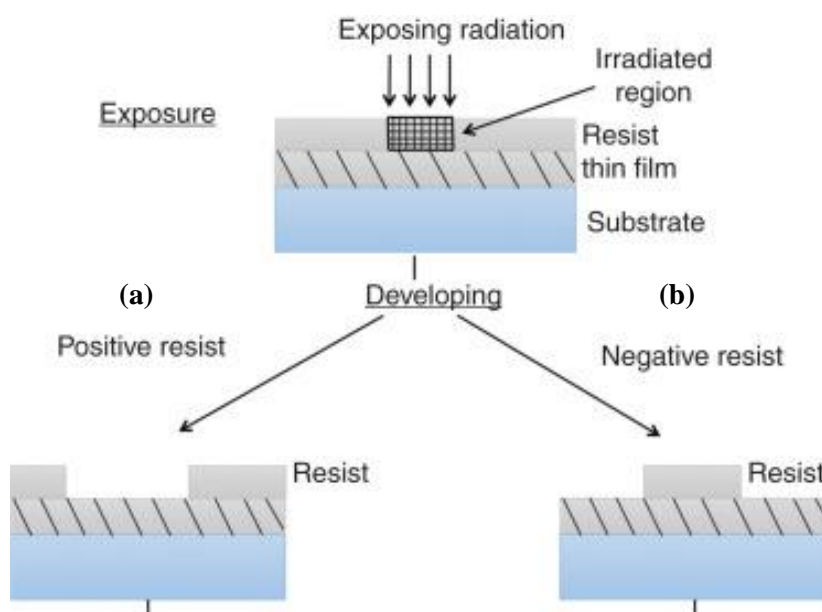
pārraidīta vannā. Šis process rada miljoniem sīku vakuuma burbuļu, kas eksplodē ultraskaņas darbības izraisīto spiediena izmaiņu dēļ. Tiek radītas ļoti enerģiskas šķidrums strūkļas, kas noņem netīrumu daļiņas no virsmām, pat no mazākajām rievām un urbumiem. [57]

Lai uzlabotu virsmas tīrību un *SU-8* fotorezista slapināšanu, tā tiek papildus tīrīta, izmantojot skābekļa plazmu. Skābekļa plazma strauji reaģē ar palikušajām organiskajām daļiņām, tādā veidā atbrīvojot no tām virsmu. Plazma bombardē virsmu ar enerģētiskiem skābekļa joniem, padarot to hidrofohāku. [58]

Šajā procesā -OH saites stiklā, kas pakļautas gaisa mitrumam, tiek pārtrauktas, kas vēl vairāk palielina hidrofohās īpašības, kuras saglabājas vairākas stundas un līdz ar to uzlabo pamatņu mitrināšanu un adhēziju. [57]

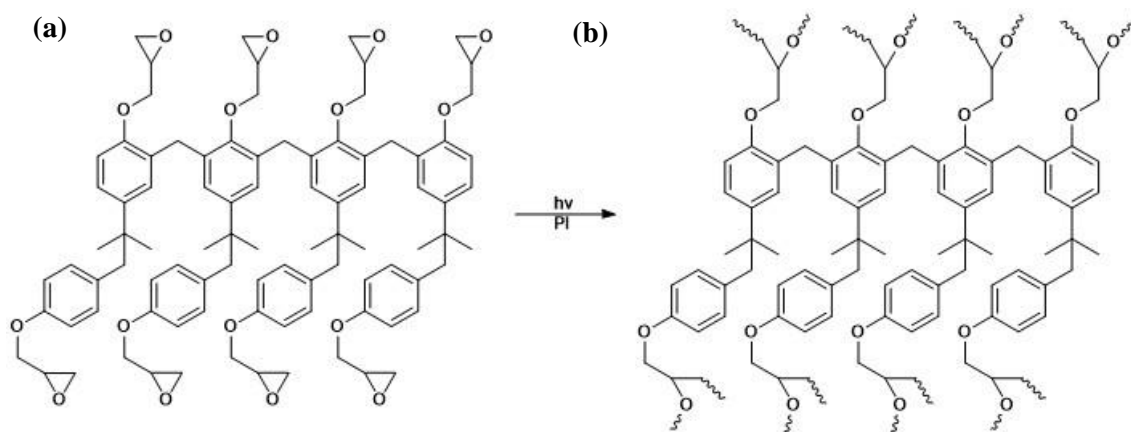
1.3.2. Fotorezists

Fotorezists ir caurspīdīgs polimērs ar gaismjutīgām īpašībām, kurš polimerizējas kad tiek apgaismots. Polimerizācija ir ķīmiskā reakcija, kuras rezultātā ķēdes augšanas rezultātā tiek savienotas monomēru molekulas un veidojas polimēri. Fotolitogrāfijā izmantotie fotorezisti ir negatīvi un pozitīvi. Negatīvajā fotorezistā gaismas iedarbības foto-ķīmisko reakciju rezultātā notiek izgaismoto laukumu polimerizācija, kas paliek pēc fotorezista izstrādes. Pozitīvā fotorezista gadījumā polimēru ķēdes tiek pārrautas apgaismotās vietās. Kad tiek attīstīts pozitīvais fotorezists, pārklājums šajās vietās tiek noņemts. Mikroelektronikas un fotonikas nozares komerciāli ražo daudz dažādu fotorezistu veidu, no kuriem katrs ir paredzēts noteiktas materiālu grupas fotolitogrāfijai.



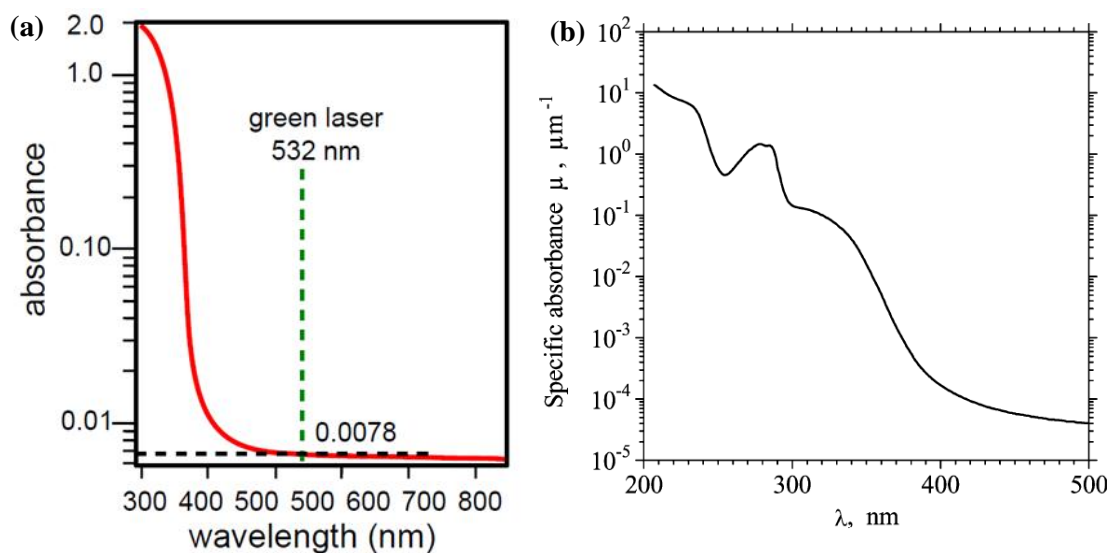
1.6. att. Optiskās litogrāfijas shēma ar a). pozitīvo un b). negatīvo rezistu [56]

Rezisti sastāv no monomēru un oligomēru maisījumiem, un tiem piemīt mazs molekulārais svars. Šķīdinātāji viegli difundē iekšā un tiek izdalīti caur oligomēru – ātri žāvē – var taisīt biezas kārtiņas līdz 2 mm. Mazmolekulāras struktūras ir trauslākas un nevienmērīgākas nekā lielmolekulārie savienojumi, bet tā kā *SU-8* ir negatīvs rezists, tas pēc UV-apstarošanas polimerizējas un rāda stabilu un stipru struktūru (sk. 1.7. attēlu).



1.7. att. *SU-8* fotoreakcija: a). pirms un b). pēc apstarošanas [59]

SU-8 ir ķīmiski pastiprināts negatīvais fotorezists uz epoksīda sveķu bāzes, kura saites tiek šķērsšūtas mijiedarbībā ar UV gaismu 313-436 nm diapazonā [44]. *SU-8* sastāv no sveķu monomēriem (*glycidyl ether derivative of bisphenol-A novolac*), organiskā šķīdinātāja (*cyclopentanone*) un foto-skābes ģeneratora (*triarylsulfonium hexafluoroantimonate* sāls) kurš aktivizējas absorbējot UV gaismu (sk. 1.8. att.) [58], [60].

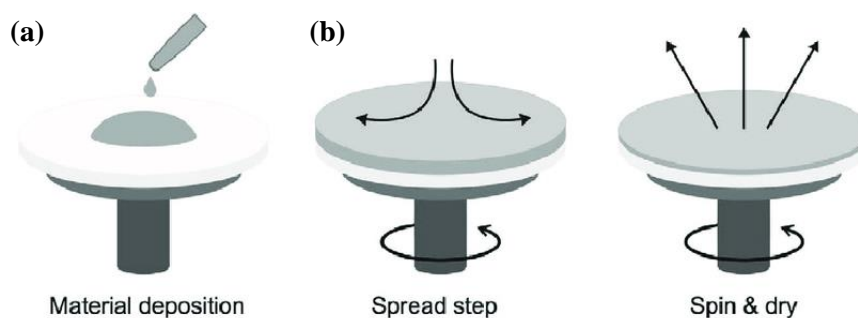


1.8. att. Nenocietināta *SU-8* fotorezista spektrālā a) absorbcija atkarībā no viļņa garuma 300-900 nm diapazonā [61] un b). īpatnējā absorbcija 200-500 nm diapazonā [60]

1.3.3. Optiskā litogrāfija

Optiskās litogrāfijas, vai fotolitogrāfijas, process ir galvenā mikroierīces strukturēšanas metode, kura bieži aizņem 50-90% no mikroierīces izgatavošanas laika. Fotolitogrāfijas pamatā ir aizsarg-masku veidošana no dažādiem materiāliem uz pamatnēm ar definētu zīmējumu. Katra maska atbilst mērķa struktūrai, kuru vajag uzbūvēt, piemēram, viļņvadam. Caur masku, notiek pamatnes apstrāde, piemēram: kodināšana, materiālu modifikācija, apstarošana, jauna materiāla pārklāšana. Šis process, bieži notiek vairākos ciklos, kas ļauj uzbūvēt mikroierīces elementus slāni pēc slāņa. Kā maskas materiālu bieži izmanto gaismas jūtīgo polimēru, jeb fotorezista. [62]

Daudzu no polimēriem izgatavotu viļņvadu konstrukciju gadījumā iegūtais reljefs pēc eksponēšanas un attīstīšanas var būt gatava fotoniskā mikroierīce. Polimēru var uzklāt uz pamatnes izmantojot rotējošās pārklāšanas tehniku (angl. – *spincoating*). Šajā metodē uz pamatnes tiek uzpilināts neliels daudzums rezista (daži μl vai ml) un pēc tam substrāts tiek pagriezts (simtiem vai tūkstošiem apgr./min). Turētājs ar pamatni griežas ar noteiktu paātrinājumu, ātrumu (Ω) un laiku režīmiem, nodrošinot centrālās spēku. Centrālās spēks ietekmē, kā rezists izplatās pa pamatni, veidojot viendabīgu rezista plāno kārtiņu. Šķīdinātāji rezistā daļēji iztvaiko, padarot plāno kārtiņu stabilu turpmākai apstrādei. Šis process parasti aizņem mazāk par minūti, un polimēra plānās kārtiņas paliek ļoti gludas. Pielāgojot rotācijas programmu un izvēloties polimēra šķīdumu ar noteiktu viskozitāti, ir iespējams uzklāt ļoti viendabīgas polimēra plānas kārtiņas ar noteiktu biezumu no desmitiem nanometru līdz simtiem mikronu. Pēc plānas kārtiņas izveidošanas veic pirms-eksponēšanas karsēšanu (angl. – *soft bake*), lai paātrinātu šķīdinātāja iztvaikošanos un novērstu spriegumu veidošanos *SU-8* plānā kārtiņā, izmantojot karsēšanas plītiņu.



1.9. att. Rotējošās pārklāšanas tehnika: a). fotorezista uzpilināšana; b). izplatīšana pa pamatni izmantojot rotāciju; c). rezista žāvēšana – šķīdinātāju iztvaice [63]

SU-8 fotorezistam izmanto dažādas litogrāfijas metodes. Tiešā ieraksta litogrāfija un kontakta litogrāfija. Tiešais ieraksts 365-435 nm diapazonā izmanto UV-lāzera diodes ar šauri

fokusēto optiku, lai apstarotu rezistu, kamēr galdiņš ar pamatni precīzi kustās atbilstoši ieprogrammētam mikroierīces dizainam. Šīs augstas izšķirtspējas (~250 – 800 nm) process aizņem vairākas stundas vai pat dienas un prasa dārgu aparatūru. [61]

Kontakta litogrāfija ir vienkāršāks process, kurā izmanto cietu foto-šablonu, kurš nonāk tuvu pamatnei vai ciešā kontaktā ar to. Lai eksponētu fotorezistu, paraugs tiek nogādāts tuvu vai ciešā saskarē ar foto-šablonu. Paraugu apstaro ar homogēnu kolimētu UV gaismu, piemēram, tieši no dzīvsudraba loka lampas (250-600 nm) vai ar i-līnijas (365 nm) un h-līnijas (404,7 nm) filtriem [64]. Šajā gadījumā, vienā momentā tiek izveidotas struktūras visas pamatnes platumā, tādēļ, šis process ir ātrs (no vairākām sekundēm līdz vairākām minūtēm) un atkārtojams. Ciešam kontaktam izmanto vakuuma vai mehānisku skavu palīdzību. Diemžēl, kontakt litogrāfijas metodei ir ierobežota izšķirtspēja ap ~0,1 – 1 μm [62], kā arī foto-šablonus periodiski jātīra. Tā kā *SU-8* kombinācijās ar stiklu, *PMMA* vai silīciju veido zema laušanas koeficienta kontrasta fotoniskās struktūras, šī izšķirtspējai ir jābūt pietiekamai. [62]

Ekspozīcijas laikā *SU-8* fotorezistā tiek aktivizēts foto-skābes ģenerators, radot spēcīgu skābi. Šī skābe katalizē reakciju, veidojot molekulāro šķērssaišu tīklu pēc turpmākas pēkšņās eksponēšanas karsēšanas (angl. – *post exposure bake*). Tālāk fotorezists tiek attīstīts, izmantojot 1-metoksi-2-propanola acetātu (angl. abreviatūra – *PGMEA*), kurā novolaki, skābes ģeneratori un amīnu komponentes fotorezistā tiek izšķīdināti neapgaismotajās vietās. [58] Rezultātā uz pamatnes virsmas veidojas reljefa maska ar zīmējumu, kas atkārtoto foto-šablonu.

Ja organiskais materiāls ir jāizmanto kā optiskā plānā kārtiņa vai gala mikroierīcēm, ir jāveic pasākumi, lai nodrošinātu, materiāla morfoloģijas nemainīgumu un kopējo mehānisko izturību. Var veikt papildus sacietināšanas karsēšanu pie >90°C (angl. - *hard-bake*). Tas noņem atlikušos šķīdinātājus un vēl vairāk nostiprina rezista saķeri ar pamatnes virsmu. *SU-8* jākarsē 150-250°C, bet vismaz 10°C virs plānotas ierīces darba temperatūras no 5 līdz 30 minūtēm. [58]

1.3.4. Griešana

Ir vairākas metodes, kā sadalīt stikla vai silīcija pamatnes ar fotoniskajiem un elektroniskajiem elementiem uz atsevišķiem mikroierīču blokiem: izmantojot stieples dimanta zāģi, dimanta diska zāģis un dimanta skrāpētāju. Visi procesi var būt gan manuāli, gan automatizēti ar *CNC* (angl. abreviatūra - *Computer numerical control*) kontrolleri.

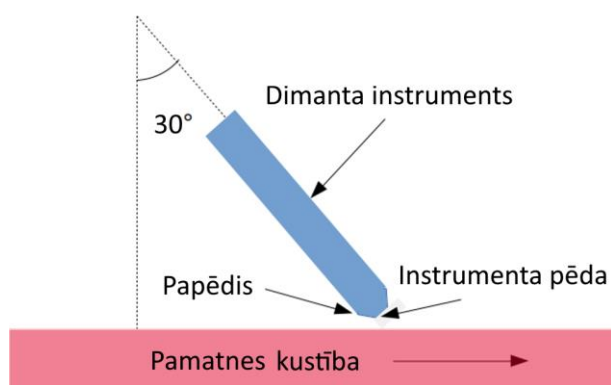
Visas iepriekš minētās metodes var būt manuālas vai automātiskas.

Diska zāģis izmanto dimanta asmeni ar diametru no 1 līdz 4 collām un biezumu no 50 mikroniem līdz 1 mm, kurš rotē ar lielu ātrumu (tūkstoši aprg./min.), lēni pārvietojoties gar

pamatni, ar noteiktu dziļumu sagriež to uz atsevišķiem blokiem, vai fotoniskajām ierīcēm. Paraugus parasti piestiprina uz līmlentes, ievieto patronā, ko pēc tam notur vakuuma XY kustīgais galds. Stikla griešanas rezultātā sānu sienā tiek izveidota regulāra raupja struktūra (skot no 0,15 μm) no griešanas diska un šķembas ap 25-175 μm izmērā. [65]

Ūdens strūklas griešanas metodē īpaši augsta spiediena (ap 4000 bar) filtrētais ūdens tiek izspiests caur nelielu (0,10-0,20 mm) safīra spraugu ar lielu ātrumu (ap 900 m/s). Tas ļauj fokusēt ūdens staru līdz smalkai strūklai, kas precīzi sagriež pamatni. Cietas pamatnes griešanai, piemēram stiklam, izmanto abrazīvu ūdens strūklas griešanu, kur abrazīvs pulveris no cietā materiāla tiek ievadīts sprauslā kopā ar ūdeni. Stikla griešanas rezultātā sānu sienā tiek izveidota regulāra raupja (sakot ar 0,2 μm) un izlieta (vismaz $W_a=0,9 \mu\text{m}$) struktūra no ūdens strūklas un šķembas ap 125-225 μm izmērā. [65]

Pamatņu skrāpēšanas un laušanas tehnika ir plaši izmantota metode pētniecības laboratorijā, bet tehnikas būtības dēļ tā nav piemērota komerciālai lietošanai. To veic, noskrāpējot līniju uz pamatnes, izmantojot augstas cietības dimanta skrāpēšanas instrumentu (sk. **1.10.** att.). Šķelšana tiek veikta, mehāniski ieviešot nelielu plaisu pie parauga malu un pēc tam paraugam pieliekot spiedienu tā, lai veidojas plaisas gar primāro kristāla plakni. [22]

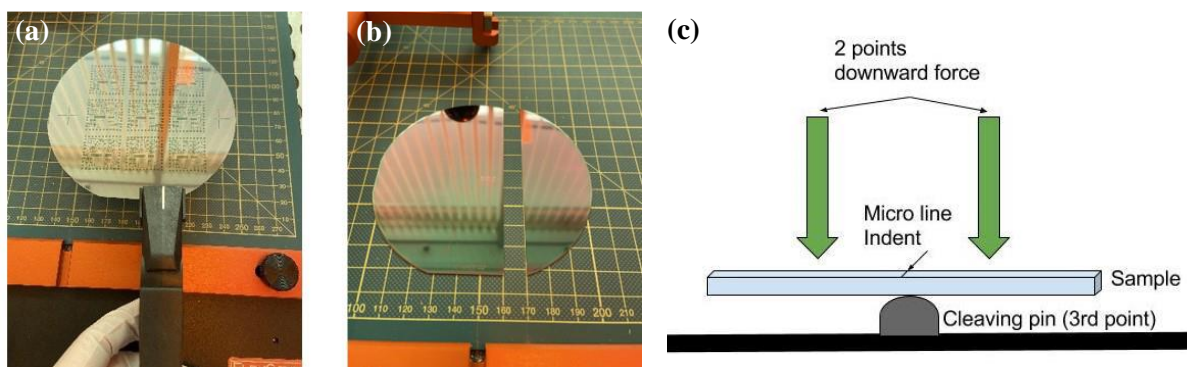


1.10. att. Skrāpēšana shēma izmantojot dimanta asmeni [66]

Skrāpēšanas procedūru var veikt manuāli skrāpējot ar dimanta zīmuli, automātiski ar dimanta skrāpēšanas iekārtu vai ar tas CNC versiju. Izmantojot skrāpēšanas zīmuli, manuāli ir grūti panākt labu skrāpēšanas atkārtojamību. Skrāpēšanas iekārtai var kontrolēt asmeņa leņķi, asmeņa dziļumu paraugiem un pielikto spēku.

Procesa būtiskie darbības parametri ir: iegriešanas instrumenta leņķis, ievilkšanas spēks, instrumenta pieskāriena punkts un pacelšanas punkts, kas ir precīzi regulējami, lai nodrošinātu optimālu laušanu un atkārtojamus rezultātus. Priekšrocības metodei ir tas mazas izmaksas, un galvenokārt, ka pamatni var sadalīt paraugos jebkurā fotoniskā čipa ražošanas un testēšanas posmā.

Pamatnes laušanu var veikt manuāli ar rokām, izmantojot laušanas instrumentus vai iekārtas. Kā laušanas instruments tiek izmantotas laušanas kņabiles (sk. 1.11.-a-b att.). Tām ir trīs izspiedumi uz to darba virsmām, ar kuriem manuāli pieliek vienmērīgu slodzi tuvu skrāpēšanas vietai pie pamatnes malas (sk. 1.11.-c att.). Speciālās laušanas iekārtas izmanto kontrolējamu un atkārtojamu slodzi, kura tiek pieliekta vienā punktā tieši uz skrāpēšanas līnijas pie pamatnes malas.



1.11. att. Laušanas princips izmantojot speciālas kņabiles ar trīs punktu metodīku: a). kņabiles novietotas pie pamatnes malas virs iegrieztās līnijas; b). sadalīta pamatne; c). laušanas shēma [67]

Stikla pamatnes laušanas rezultātā sānu sienai tiek izveidota gluda virsma struktūra (sākot no 11 nm) un ar regulārām šķembām ap 25-200 μm izmērā. Tā kā laušanas process veido nestabilu plaisu cauri plāksnes biezumam, tas var veidot nevēlamo parauga sānu virsmas leņķi un izliekumus (vismaz $W_a=5,2 \mu\text{m}$) [65]. Rezultāti var būt ļoti labi, bet mēdz būt mainīgi. Tāpēc pēc šī procesa, nepieciešams slīpēt pamatnes sānu malu, lai to izlīdzinātu. Turklāt, grūti salauzt pamatnes maza izmēra paraugos (zem 5 x 5 mm), ko pieprasa fotonisko ierīču miniaturizācijas progress industrijā.

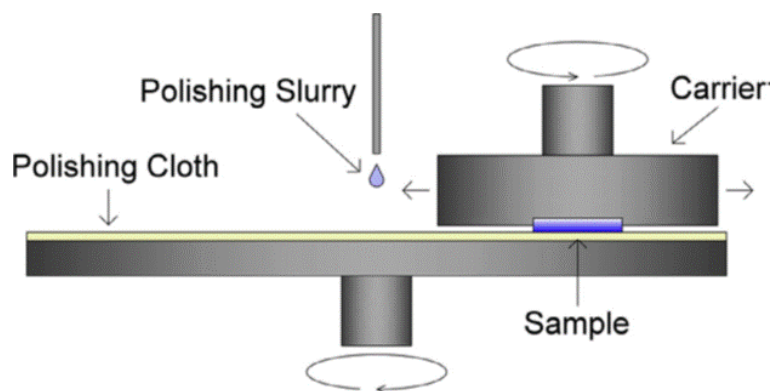
1.3.5. Pulēšana

Neatkarīgi no gaismas ievadīšanas konfigurācijām fotoniskām mikroierīcēm, ir svarīgi lai tas elementu interfeisu virsmām būtu pēc iespējas mazāki defekti un raupjums. Virsmas raupjums rada izkliedes zudumus, bet lieli defekti var ierobežot piekļuvi viļņvadam uz ierīces un pat padarīt gaismas ievadīšanu neiespējamu. Slīpēšanu izmanto priekš optiskā elementa planarizācijas un lielu defektu noņemšanas. Pulēšana novērš bojājumus, kas radušies slīpēšanas procesā un sagatavo paraugu optiskajai analīzei un gaismas ievadīšanai. [68]

Saskaņā ar literatūru [69], [70] ķīmiski-mehāniskais pulēšanas process ir piemērots *SU-8* un *PMMA* struktūru pulēšanai uz silīcija substrātiem, kur var panākt nanometru kārtas virsmas raupjumu. Tādēļ, teorētiski metodi varētu izmantot fotoniskām mikroierīcēm ar polimēru viļņvadiem. *SU-8* specifiskācijas iekļaujot mehānisko īpašību apkopojumu sk. 1. pielikums.

Ķīmiski-mehāniskā slīpēšana un pulēšana ir kļuvusi par vadošo parauga virsmas planarizācijas un raupjuma uzlabošanas paņēmieniem integrālo mikroshēmu ražošanā. [62], [68] Alternatīvā metode izmantojot lāzer-ablāciju [71] ir dārga un slikti sader ar polimēru materiāliem, kuriem ir kušanas temperatūra ap 150-200°C, salīdzinot ar CO₂ radīto temperatūru nepieciešamo optisko stiklu vai silīcija mīkstināšanai >1200°C [72].

Tipiskais plakanās slīpēšanas un pulēšanas process ir parādīts 1.12. attēlā. Speciāls paliktņis ar iebūvētu vai atsevišķi nodrošinātu abrazīvu materiālu ir nostiprināts uz rotējošas plāksnes. Paraugs piestiprināts tam paredzētā turētājā ar noteiktu leņķi pret rotējoša paliktņa un tiek piespiests pie tā. Paliktņa rotēšanas laikā parauga materiāls tiek noskrāpēts ar abrazīva materiāla kustību gar parauga malu. Turklāt, paraugs tiek nepārtraukti pārvietots uz priekšu un atpakaļ starp diska centru un malu, tādējādi nodrošinot vienmērīgu abrazīvu sadalījumu un vienmērīgu paliktņa nodilumu. Pēc katra soļa paraugs tiek pagriezts par 45 līdz 90°, lai nobrāzums nebūtu vienvirziena. Process sastāv no diviem vai vairākiem posmiem, izmantojot secīgi smalkākus abrazīvus un tiem atbilstošus paliktņus. [68]



1.12. att. Pulēšanas shēma [73]

Slīpēšanai izmanto abrazīvus materiālus, piemēram, silīcija karbīds (SiC), alumīnija oksīds (Al₂O₃), kompozītmateriālu keramika un dimants. Abrazīvs materiāls tiek savienots ar papīra, polimēru vai auduma pamatnes materiāliem. Pulēšanas paliktņis bieži sastāv no poraina, elastīga polimērmateriāla, kur tā pildviela uzdod vēlamo paliktņa cietību. Ciets pulēšanas paliktņis nodrošina lielāku noņemšanas ātrumu un labāko plakanumu. Savukārt, mīksts pulēšanas paliktņis nodrošina mazāku plakanumu, bet arī labāko vienmērīgumu. Abrazīvs materiāls pulēšanai, piemēram, piemēram, dimants varētu būt savienots ar paliktņi vai padots atsevišķi suspensijas veidā (alumīnija oksīds (Al₂O₃), cērija oksīda (Ce₂O₃), koloidālais silīcija dioksīds (SiO₂), dimants) uz poraina vai auduma paliktņi. Suspensija sastāv no abrazīva materiāla pulvera, ūdens vai eļļas, lubrikantiem un stabilizējošiem reaģentiem. Šķidrums klātbūtne nodrošina abrazīva un noņemta materiāla transportu un parauga dzesēšanu. Jāizmanto

tīrs ūdens, jo krāna ūdens un ūdens no citiem avotiem var saturēt daļiņas līdz pat 50 μm, kas varētu pasliktināt pulēšanas rezultātu. Lai novērstu savstarpēju piesārņojumu starp apstrādes posmiem, pirms un pēc katra pulēšanas cikla pulēšanas paliktņus, paraugus un apkārtējo zonu (automātiskā pulētāja iekšpusē) ir jātīra izmantojot šķīdinātājus un citus mazgāšanas līdzekļus. [74]–[76]

Virsmas kvalitāti ietekmē daudzi faktori, tādi kā: abrazīvā izmērs un veids, auduma tekstūra, procesa laiks, paraugu slodze un rotācijas virziens. Materiāla noņemšanas ātrums ir proporcionāls sagatavei pieliktajam spiedienam, un izteikts ar Prestona vienādojumu [77]:

$$R = KPV, \quad (1.18)$$

kur R – pulēšanas ātrumu, P – pielietotais lejupvērsts spiediens, V – pamatnes lineārais ātrums attiecībā pret pulēšanas paliktņi, un K ir proporcionalitātes konstante, ko sauc par Prestona koeficientu.

1.3.6. Šķiedru pielīmēšana pie fotoniskā čipa

Nav zināmi veidi kā pielodēt vai piemetināt SU-8 polimēru viļņvadus pie cita polimēru vai nepolimēru šķiedru vai viļņvadu. Tā kā lodēšanā un lāzer metināšanā izmanto temperatūru virs 250°C, tas nav piemērots polimēru fotonisko mikroshēmu savienošanai ar jebkāda veida šķiedru savienotāju. Alternatīvi, līmēšanas process notiek temperatūras diapazonā no istabas līdz 200°C.

Parasti, līme ir epoksīda viela, un tā var būt UV vai termiski cietināta atkarībā no tā, vai uzgalis ir izgatavots no stikla vai metāla. UV līmēs foto-inducētā reakcija noved pie šķidra monomēra pārvēršanas cietā polimērā. Foto-iniciatoriem gaismā cietinātajās līmēs var būt absorbcijas profils ar intensīvu maksimumu redzamajā, UV-A (315–380 nm), UV-B (280–315 nm) vai UV-C (100–280 nm) zonā. [52]

Līmju izmantošanai ir vairākas priekšrocības, kā piestiprināšanas ātrums, vienmērīga slodžu sadalījums un savienošanas interfeisa aizsardzība no ārējās vides. Tomēr līmes materiāliem var būt fizikālo īpašību nepilnības priekš precīzi pozicionētām optiskām komponentēm. It īpaši to ietekmē mezgls, kas nepareizi izlīdzināts dēļ polimerizācijas laikā notiekošās saraušanās vai nespējas nodrošināt pielīmēšanu mitros apstākļos. Parasti vēlamā metode ir līmju sacietēšana ar optisko starojumu, kas nodrošina lielu sacietēšanas ātrumu un caurlaidspēju. UV gaismai ir jāiekļūst cauri savienojuma līnijai, lai līme sacietētu, tādējādi vismaz vienam substrātam vai komponentei jābūt pietiekami caurspīdīgai UV gaismas diapazonā. [78]

Tipiski, šķiedras pielīmēšanas procesā neliels līmvielas daudzums tiek izkliedēts, lai pārklātu nelielus atsevišķus apstrādājamo priekšmetu laukumus, kurus vispirms izlīdzina un pēc tam notur pozīcijā ar mehāniskiem stiprinājumiem, pēc tam visu mezglu karsē vai eksponē ar UV gaismu, lai veiktu sacietināšanu. UV-līmes sacietināšanas laikā līmes volumetriskām izmaiņām ir jābūt minimālām, lai izvairītos no šķiedras pozīcijas nobīdes. Lai nezaudētu jaudu gaismas ievadīšanas interfeisā, optiskās līmvielas tiek izvēlētas tā, lai to laušanas indekss būtu saskaņots ar optiskās šķiedras un viļņvadu laušanas indeksu. Šobrīd pieejamas UV līmes nodrošina stipru komponentu savienojumu kopā ar augstu savienojuma optisko caurlaidības standartu pat pēc līmes novecošanas. Izturību pret skrāpējumiem var izmantot, lai noteiktu sacietēšanas pakāpi. Šādos gadījumos cietības vērtību bieži izmanto kā līmes sacietēšanas pakāpes mēru.

Līmes līmēšanas galvenie trūkumi ir, piemēram [52]:

- ierobežotāks, salīdzinājumā ar mehāniskajām metodēm, ekspluatācijas temperatūras diapazons (tipiski, no -40°C līdz $+125^{\circ}\text{C}$), kas galvenokārt saistīts ar stiklošanās temperatūru un/vai līmvielu ķīmisko noārdīšanos;
- līmes stiprība var būt ļoti atkarīga no līmējamā materiāla virsmas stāvokļa;
- līmes saķere var pasliktināties, piemēram, ūdens klātbūtnes dēļ.

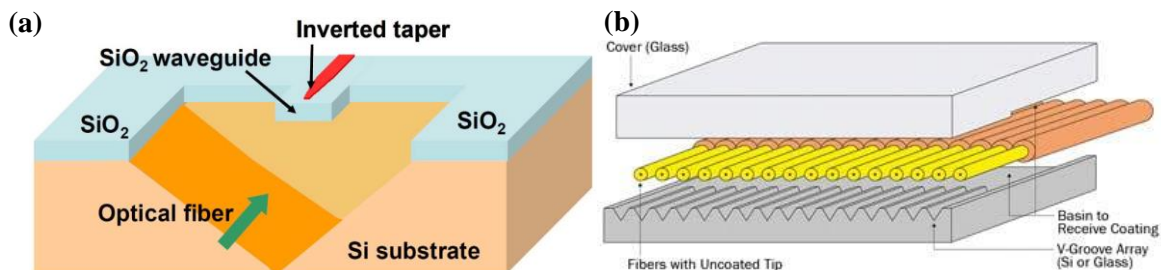
Galvenie faktori, kas nosaka līmes veikspēju savienojumam ir:

- līmes fizikālās un ķīmiskās īpašības;
- līmēšanas veidi, t.i., salīmētais materiāls;
- virsmas pirmapstrādes raksturs;
- virsmas slapināšana;
- savienojuma konstrukcijas specifika.

Optisko šķiedru aktīva pozicionēšana ir metode, kura paļaujas uz precīzas šķiedras vai/un fotoniskā čipa pozīcijas caur gaismas ievadīšanas kontroli. Pozicionējot šķiedras attālumu un leņķi priekšā viļņvadam tika meklēta pozīcija ar labāko signālu. Aktīvās izlīdzināšanas veids ir labi piemērots UV līmes lietojumiem, jo priekšrocības, ko sniedz in-situ sacietēšana. Kad ir sasniegta vēlama šķiedras pozīcija, līmi eksponē ar UV un stingri nostiprinot sastāvdaļas kopā. [79]

Pasīvai šķiedru pozicionēšanai priekšā fotoniskā čipa viļņvadiem tiek izmantota V-veida rievā uz fotoniskā čipa malas (sk. 1.13.-a att.). Tā ir izkodināta bedre ar optiskās šķiedras apvalka diametra izmēriem (62,5-125 μm vienmodu šķiedrām), kura atrodas čipa pamatnē un ved pie viļņvadu gala. Tas atisina grūtības ar šķiedras laikietilpīgo precīzu pozicionēšanas procedūru. Šīs V-veida rievas parasti tiek mehāniski izzāģētas [22] vai tiek kodinātas silīcija

vai stikla pamatnē ar mitro vai ar reaktīvo jonu kodināšanu (*RIE*) [80]. V-rievā tiek ielīmēti attīrīti un pulēti šķiedras gali, izmantojot UV-cietošas līmes. Alternatīvi, vairākas šķiedras var būt ieliktas vienā blokā ar V-veida rievu masīvu, kuru var pulēt, lai izveidotu kopīgu šķiedru masīvu (sk. 1.13.-b att.) un ļauj ievadīt gaismu vairākos viļņvados vienlaicīgi. Nav zināmi tādi risināji ar polimēru fotoniskām mikroierīcēm. [12], [15], [22]



1.13. att. Optiskā šķiedra(s) ielīmētas V-rievā(s): a) uz čipa [15]; b). masīvā kas veido uzgaļu pielīmēšanai pie čipa [81]

1.4. Gaismas ievadīšanas metodes

Ja optiskais signāls tiek ievadīts integrētajā fotoniskā ierīcē no ārpuses, piemēram, no optiskās šķiedras un izvade notiek no ierīces optiskā veidā, tad materiāliem, kuri ir izmantoti gaismas ievadīšanai un izvadīšanai, jāatbilst šādām prasībām:

- minimāli optiskie zudumi;
- minimāla gaismas izkliede un atstarošana;
- konstruktīvā, mehāniskā un optiskā iespēja savienot ar integrēto optisko ierīci;
- augsta mehāniskā izturība;
- izgatavojamība;
- papildus pielietojuma specifiskās prasības, kā ķīmiskais izturīgums vai īpašas optiskās, elektro-optiskās, nelineāras optiskās īpašības, kā arī elektriskās izolācijas īpašības. [12], [82]

Gaismas ievadīšanai var izmantot dažādus savienojuma interfeisus: šķiedra-pie-čipa, čips-pie-čipa un ievadīšana no brīvas telpas. Lāzera čipa savienošana ar fotoniskām ierīcēm ir sarežģīta, jo lāzēriem ir dzesēšanas prasības un tie ir ļoti jutīgi pret atpakaļ atstarošanu. [#] Ievadīšana no brīvas telpas lielā mērā ir atkarīga no nemainīga refrakcijas koeficienta starp gaismas avotu un mikroshēmu, bet ļauj izmantot fokusēšanas lēcu. [12], [82]

Gaismas ievadīšanai šķiedra-čips nav minētu trūkumu, bet tā cieš no modu izmēru neatbilstības, jo tipiski, optiskās šķiedras serdes diametrs ir lielāks nekā viļņvadu izmērs mikroierīcei. Tieša veidā ievadot gaismu no šķiedras radīs lielus zudumus. Ievadīšanas

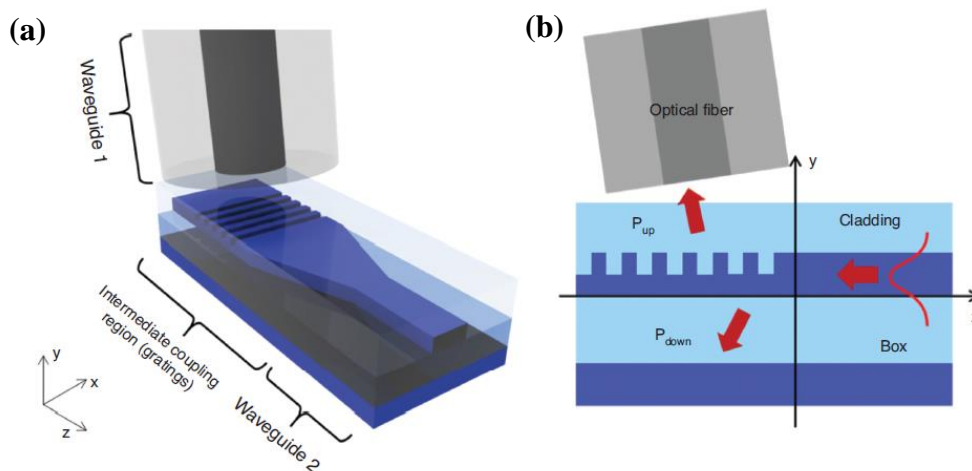
efektivitāti un pozicionēšanas pielaidi uzlabo izmantojot speciālās ievadīšanas struktūrās - savienotājus. Tas prasa invazīvu substrāta un viļņvadu inženieriju. [12], [82]

Ir dažādi veidi, kā ievadīt gaismu fotoniskās integrālās shēmas (PIC) viļņvadā atkarībā no ievadīšanas virziena attiecīgi pret planāra viļņvada plakni: plaknē un ārpus plaknes.

Vispopulārākās gaismas ievadīšanas struktūras fotoniskām mikroierīcēm ir adiabatiskie konusi un režģa savienojumi (angl. – “*tapered*” un “*grating coupling*”)[15]. Šīs pasīvas ierīces spēj pārraidīt un pārveidot modas fotoniskajos viļņvados. [12], [82]

1.4.1. Režģa savienojumi

Difrakcijas režģi (angl. – *grating coupler*) ir periodiskā struktūra kas izveidota no augsta un zema refrakcijas indeksa reģionu rievējuma, kas darbojas kā difrakcijas elementu kopa, kura, izmantojot Brega atstarošanas principu, ļauj ievadīt gaismu viļņvadā no ārpus plaknes virziena (sk. 1.14.-a att.). Brega režģi veido, izmantojot materiālus ar atšķirīgo laušanas koeficientu variāciju vai strukturāli izmantojot vienu materiālu. [83] Gaismas ievadīšanu režģī, var veikt arī plaknē izmantojot leņķa pulētas optiskās šķiedras ar gaismas atstarošanu ielaižot gaismu režģī (sk. 1.3.-c att.). Režģa savienotājam bieži seko konusa savienojums, lai pielāgotu ievadīta stara sānu izmēru līdz zem-mikrometra viļņvada platumam (sk. 1.14.-a. att.).



1.14. att. Gaismas ievadīšana ar difrakcijas režģi: (a) shēma un (b) šķērs griezumam [14]

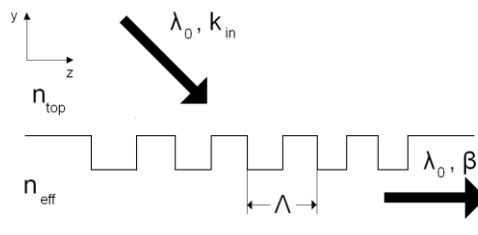
Režģa savienojumu galvenās priekšrocības:

- neprasa piekļuvi fotoniskā čipa malai, kā sānu gaismas ievadīšanas metodēm, kas ļauj izvairīties no čipa malu sagatavošanas procedūrām [16];
- režģa struktūras var izveidot pietiekoši lielus lai vienkāršāk ievadīt gaismu ar mazāku precizitāti no optiskām šķiedrām, kas ir aktuāli liela mēroga mikroierīču ražošanā vai ātrai fotonisko čipu prototipu testēšanai;

- var izgatavot kopā ar viļņvadu struktūrām izmantojot CMOS tehnoloģijas. [16], [84]

Režģa struktūra ir 3D konstrukcija, taču to var apskatīt 2D tuvinājumā (sk. 1.14.-b), jo tās platums ir daudz lielāks par viļņa garumu un viļņvada augstumu, kas padara aprēķinus daudz vienkāršākus. Gaismas stars, kas nolaižas uz līdzenas virsmas, darbosies saskaņā ar Snella likumu, kas nozīmē refrakciju divu materiālu saskarē, bet periodiska virsmas struktūra liks ienākošajai gaismai izkliedēties pēc Brega nosacījuma, kurš apraksta saistību starp krītošo un difrakcijas viļņu vektoriem.

Ja analizējam viļņu vektorus 2D plaknē (sk. 1.15. att.), kas ir paralēli optiskā viļņvada asij (z -ass), tad atšķirība starp viļņvada izplatīšanās konstanti β un k_{in} difrakcijas viļņa komponenti, kas ir paralēla viļņvada virsmai, difrakcijas viļnim (k_{in}) jāsaskaņojas ar režģa viļņu vektora veselo skaitli (m). Ja šīs fāzes atbilstības nosacījums ir izpildīts noteiktā viļņa garumā un krītošā leņķī, visi izkliedētie komponenti konstruktīvi interferē radot telpisko harmoniku kopu viļņvada virzienā un tādējādi gaisma tiek ievadīta vai izvadīta no viļņvada.



1.15. att. Režģa savienojuma principiālā 2D shēma

Režģu struktūras nodrošina gaismas ievadīšanu atsevišķām modām. Lielākajā daļā konstrukciju tiek izmantota $m = 1$ difrakcijas pakāpe, kad:

$$k_{in} \sin \theta + \frac{2\pi}{\Lambda} = \beta, \quad (1.19)$$

kur $\beta = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_{eff}$ ir galvenās modas izplatīšanās konstante, λ_0 – izmantots viļņa garums;

Fundamentālas modas efektīvais laušanas koeficients:

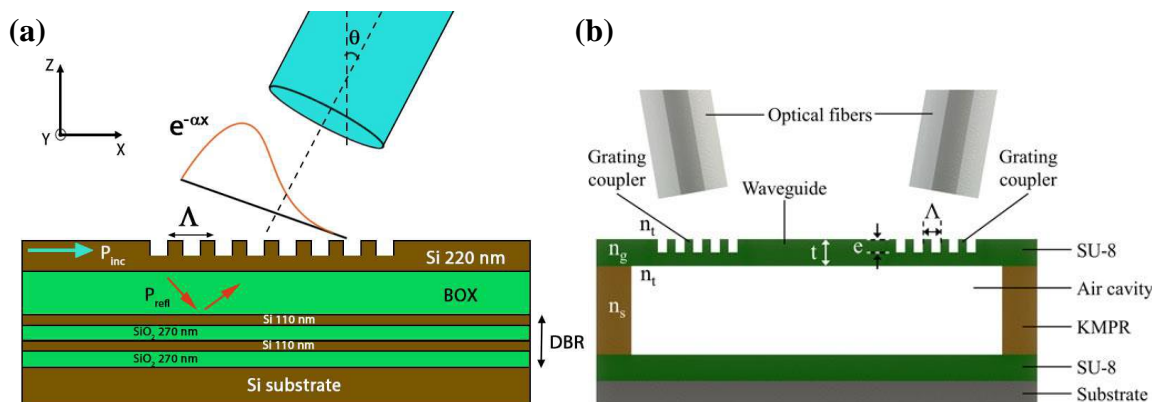
$$n_{eff} = f n_{eff1} + (1 - f) n_{eff2}, \quad (1.20)$$

kur f – ir aizpildījuma koeficients, kas nosaka režģa proporciju; n_{eff1} – izkodinātas vai aizpildītas rievas efektīvais laušanas koeficients; n_{eff2} – pamatmateriāla efektīvais laušanas koeficients. Krītošā viļņa viļņu vektors:

$$k_{in} = \frac{2\pi}{\lambda_0} = n_{top}, \quad (1.21)$$

kur n_{top} ir vides vai pārklājuma laušanas koeficients, λ_0 - gaismas viļņgarums, un Λ ir režģa periods. Sanāk, atbilstoši pielāgojot režģa ģeometriskos parametrus (Λ , f un režģa dziļumu), var pielāgot θ un λ .

Šobrīd jau eksistē silīcija un *SU-8* Brega režģi priekš telekomunikācijas diapazona (1550 nm)[85]. Silīcija režģi var sasniegt efektivitāti: līdz pat 83% (sk. 1.16.-a att.) [86]. *SU-8* Brega režģis – 16% (sk. 1.16.-b att.) [87]. Tomēr nav zināmi piemēri priekš redzamā gaismas diapazona, kuru arvien biežāk izmanto fotonikā.



1.16. att. Režģa savienojuma piemēri: a). uz silīcija un *SOI* bāzes [86]; b). uz *SU-8* bāzes [87]

Brega režģa izgatavošanas process lielākoties ir saderīgs ar *CMOS*, un tas ļauj pievienot šo gaismas savienojuma struktūru funkcionālu fotonisko struktūru veidošanai mikroshēmā. Ražošanas process ir šāds:

- *SOI* pamatne sastāv no viendabīga SiO_2 slāņa, kas ir iestiprināts starp biezu (simtiem mikronu) silīcija substrātu un plānu kristāliskā silīcija virsmas slāni.
- Optiskā, elektronu staru vai interference litogrāfija lai definētu periodiskas struktūras ar fotorezistu;
- sausā kodināšana, piemēram, reaktīva jonu kodināšana, vai fokusēta jonu staru kodināšana.

Režģa ģeometriskās īpašības var noregulēt un tādējādi pielāgot procesu:

- kodināšanas dziļums;
- aizpildījuma koeficients (ff): attiecība starp iegravēto sekciju platumiem un sekcijām bez kodināšanas;
- periodu skaits (N): pietiek, lai pārliecinātos, ka režģa virsmu pareizi apgaismo šķiedra;

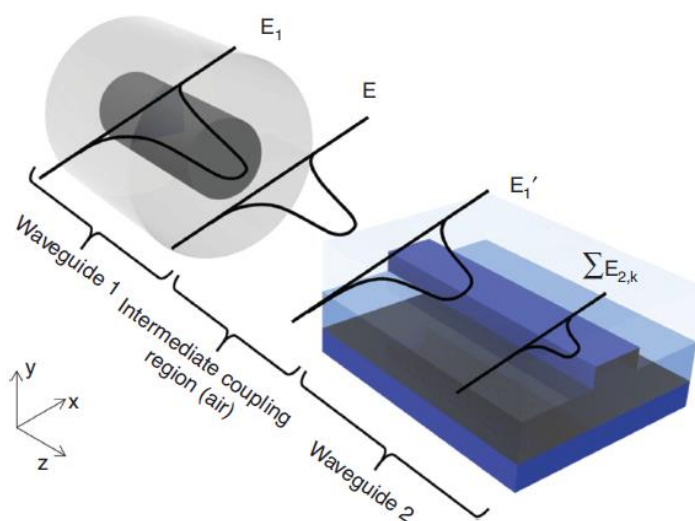
- efektīvais laušanas koeficients (n_{eff}): struktūra jāsadala divās daļās, kas atbilst iegravētajām rievām un posmos bez kodināšanas, un tad tiek atrasts vidējais efektīvā indekss;
- aizpildījuma koeficients (ff): attiecība starp iegravēto sekciju un sekciju platumiem;
- SiO₂ slāņa biezums;
- savienotās vai atvienotās gaismas krišanas leņķis.

Trūkumi režģa savienojumiem pēc sava principa ir:

- ka tie ir viļņa garuma atkarīgas (tipiski, optiskā joslas platums līdz 5 THz vai līdz 40 nm);
- no polarizācijas atkarīga struktūra un noteiktos gadījumos kalpo kā 60 dB polarizācijas filtrs [88];
- praksē gaismas ievadīšanas efektivitāte ir mazāka nekā ievadīšanai no malas (sākot no 2,5 dB, jeb <56%) [12].

1.4.2. Gaismas ievadīšana no malas

Gaismas stars ir ievadīts ar viļņvadu no sānu malām, tādējādi vienmēr izplatoties tajā pašā virzienā (sk. 1.17. att.) un potenciāli var ierosināt visas viļņvada modas. Modas pārveides rezultātu vienkārši nosaka ar modu pārklāšanās integrāli (sk. 1.5.1. sadaļā). Plaknē ievadītai gaismai ir raksturīgi: augsta ievadīšanas efektivitāte specifiskos gadījumos, plašs ievadīšanas viļņa garuma joslas platums un zema atkarība no polarizācijas.

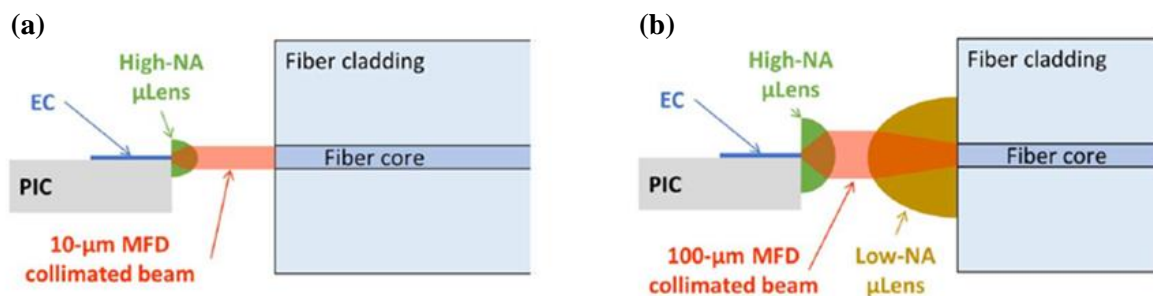


1.17. att. Shematiskā diagramma gaismas ievadīšanai no optiskās šķiedras uz viļņvadu brīvā telpā no ierīces malas (TE_{00} modas izplatīšanas šķērsvirzienā) [14]

Turklāt, šķērsvirziena savienojumam ir labi praktiskie pielietojumi, ja viļņvads tiek savienots ar pusvadītāju lāzeru vai citu viļņvadu. Viļņvada biezumu var pielāgot ar lāzera izstarojošā slāņa biezu un tādēļ efektīvi saskaņot viļņvada modu ar lāzera TE_{00} modu. Šī metode ir īpaši noderīga lāzera diodes savienošanai ar planāru viļņvadu, jo ir grūti panākt efektīvu lāzera diodes savienojumu ar planāro viļņvadu, izmantojot prizmu, režģi vai konusveida savienotāju. Iemesls tam ir tas, ka diodes lāzeram ir relatīvi nav kolimēts izejošais stars, kas novirzās pus-leņķī $10\text{--}20^\circ$.

Galvenā problēma gaismas ievadīšanā ir modu neatbilstība starp gaismas ievadīšanas komponentēm (šķiedra-viļņvads, lāzeris-viļņvads vai citi). Lielākā daļai vienmodu šķiedrām MFD ir $5\text{--}10\ \mu\text{m}$ [89], $UHNA$ $3\text{--}5\ \mu\text{m}$, savukārt PIC viļņvadiem MFD ir mazāk par $10\ \mu\text{m}$ līdz pat $0,5\ \mu\text{m}$ (īpaši vertikālajos izmēros). Lai uzlabotu ievadīšanas efektivitāti, jāveic ievadītas gaismas modas izmēru optimizācija (pielāgošana), lai tā atbilstu viļņvada modai. To var panākt izmantojot dažādas metodes, piemēram, konusu struktūru izmantošanu (angl. – couplers), mikrolēcas, lēcu šķiedru, $UHNA$ šķiedru utt.

Mikro lēcas veidotas uz viļņvada gala (sk. 1.18.-a att.) vai uz šķiedras gala (sk. 1.18.-b att.) piedāvā $MFD \sim 3\text{--}6\ \mu\text{m}$ un darba attālumu $\sim 5\text{--}20\ \mu\text{m}$, bet darbojas tikai ar gaisa spraugu. Fokusa punktā var iegūt līdz $1,5$ reizes mazāku modas izmēru, kura varētu atbilst viļņvada modai.

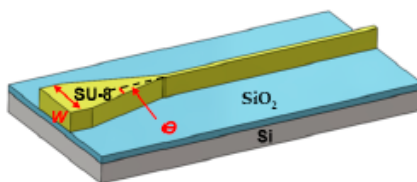


1.18. att. Shēmas ar (a) mikrolēcu uz čipa malas un (b) mikrolēce un lecētas šķiedras shēma [15]

1.4.3. Konusveida savienojumi

Konusveida savienojums (Adiabātiskā konusveida savienošana) ir sānu gaismas ievadīšanas metode, kur gaisma tiek ievadīta biezākā vai/un platākā viļņvada galā un turpmāk gaisma tiek atspoguļota šaurākajā pārnese daļā, lai samazinātu modas izmērus un tā pakāpeniski iekļūstu viļņvadā (sk. 1.19. att.). Pusvadītāju viļņvadiem ar adiabātiskiem konusiem tika sasniegta ievadīšanas efektivitāte ap $70\text{--}96\%$ [90], [91]. Joprojām nav plaša mēroga risinājumi kā izgatavot lielākas konusa struktūras, jo pastāv problēmas šādu risinājumu integrācijā planārās litogrāfijas tehnoloģijās [92]. Šobrīd jau ir izstrādāti pusvadītāju-polimēru

hibrīda konusi, ar kuriem var panākt ievadīšanas efektivitāti līdz 76%-80% [91], [93]–[95]. Ir maz literatūras par polimēru konusiem.

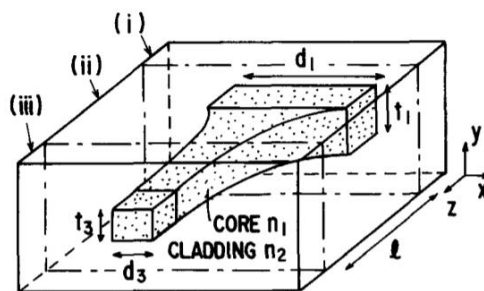


1.19. att. SU-8 viļņvads ar 2D konusu [95]

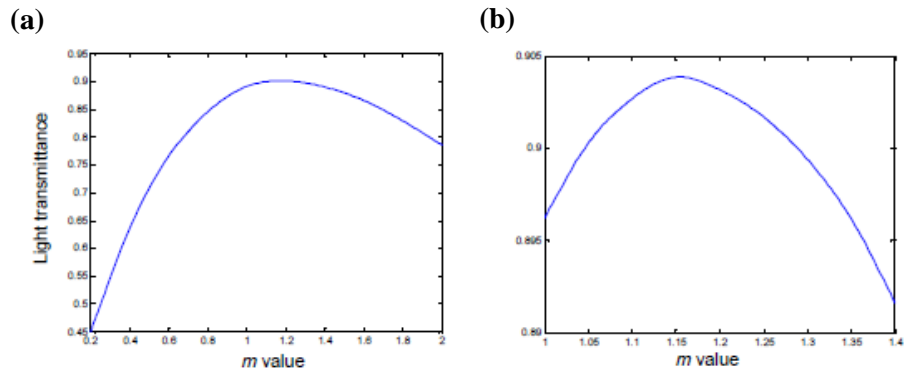
Plāns (2D – divu dimensiju) konusveida savienojumam vertikāls izmērs var būt mazāks par ievadītu modas izmēru, bet horizontāls izmērs ir daudz lielāks, vai otrādi. Konusveida platums (w) un leņķis (θ) ir divi dominējošie faktori, kas ietekmē sakabes efektivitāti un izlīdzināšanas toleranci. Konusa savienojuma ģeometrisko modeli var aprakstīt, izmantojot eksponenta funkciju, lai definētu konusa profilu:

$$\begin{cases} w(x) = \alpha(l-x)^m + w_2 \\ w(0) = w_1 \\ w(l) = w_2 \\ \alpha = (w_1 - w_2)/L^m \end{cases} \quad (1.22)$$

kur $w(x)$ ir konusa platums uz x ass un l ir kopējais konusveida garums; $w(0)$ ir konusveida platums pie ieejas ar vērtību w_1 ; $w(l)$ ir konusveida gala platums, kas šeit definēts kā w_2 ; un m ir eksponents funkcijas parametrs, kas nosaka konusveida profilu (sk. 1.20. att.). Y. Xin pētījumā [95] konusa simulācija parāda, ka transmisija diezgan būtiski mainās ar m (sk. 1.21. att.).



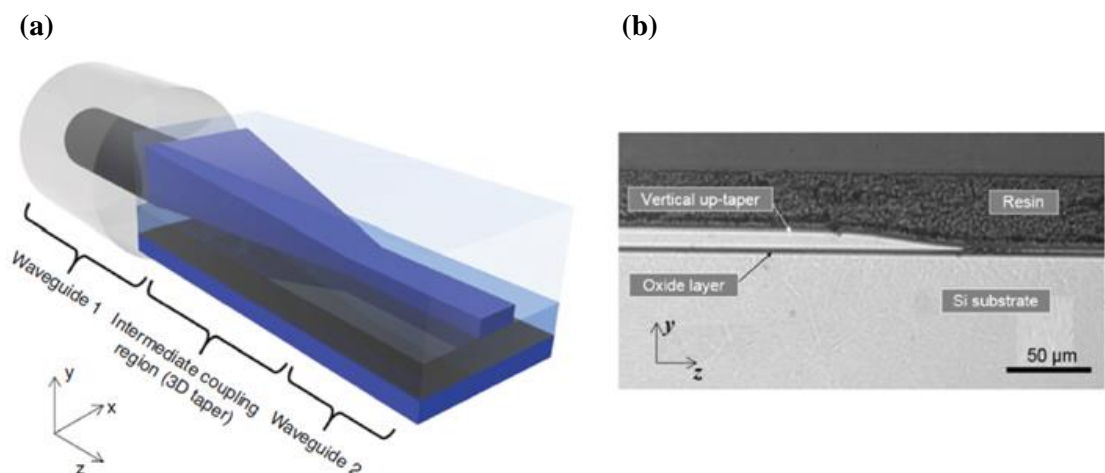
1.20. att. Konusveida viļņvada shēma [95]



1.21. att. Transmisijas atkarībā no m parametra (a) no 0,2 līdz 2 un (b) no 1 līdz 4 [95]

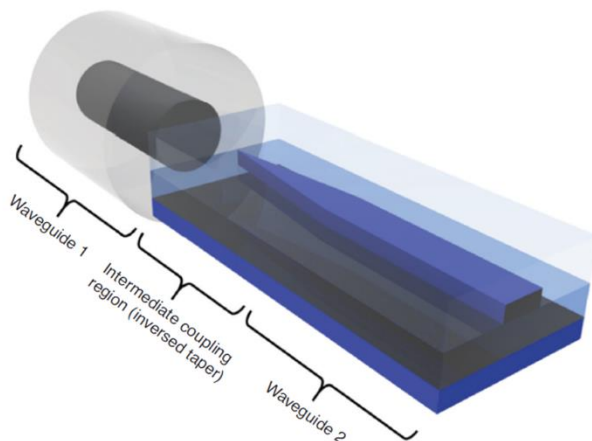
Parasti, ievadišanas efektivitāte palielināsies, samazinoties konusa leņķim. Tomēr praktiski, kad leņķis ir ļoti mazs, konusa garums būs ļoti garš, kā rezultātā radīsies lieli izkliedes zudumi, ko izraisa virsmas raupjums un ietekmē sistēmas izmēru un čipa. Plašāka un augstāka konusveida struktūra palielina kūļa pozicionēšanas pielaidi.[12] Tāda lineāra gaismas ievadišanas struktūra ir viegli izgatavota ar litogrāfijas procesiem, bet problēma ar plakanajiem viļņvadiem ir tā, ka tie veic modas saskaņošanu tikai horizontālajā plaknē. Tāpēc starp šķiedru un viļņvadu joprojām pastāv augsta *MFD* neatbilstība. Lai panāktu labāku efektivitāti, modai ir jāveic izplešanās ne tikai plaknē, bet arī ārpus plaknes. To var panākt, izgatavojot 3D viļņvada konusu (sk. 1.19. att.), kur viļņvada augstums (un ne tikai platums) tiek pakāpeniski mainīts gaismas izplatīšanās virzienā.

Ražošanas procesi, kas nepieciešami šāda veida *SU-8* konusiem, ietver pelēko toņu maskas un ultravioletās (UV) pelēkās skalas litogrāfiju [96] vai elektron-staru litogrāfiju[95]. Abi procesi prasa papildu īpašas izgatavošanas darbības, piemēram, biezas materiālu uzklāšana un kodināšana. Nav zināmi 3D konusa risinājumi *SU-8* viļņvadiem.



1.22. att. Viļņvads (a) ar 3D konusu un (b) tā šķēsgriezuma piemērs izgatavots ar pelēka-toņa ēnas maskām [14]

Cits 3D konusa veids ir apgriezts konuss (sk. 1.23. att.), kuram viļņvada izmēri tika sašaurināti līdz neliela gala izmēriem pie čipa malas. Šīs struktūras darbības princips balstās uz gaistošo gaismas lauku viļņvada galā, lai palielinātu viļņvada modas izmēru līdz 4,3-6 μm . Tomēr šīs struktūras ir simtiem mikrometru garas. Šī 3D struktūra ļauj kompakti savākt visu ievadīto gaismu ar gaismas ievadīšanas efektivitāti 83,2% (zudumi līdz pat -0,36 dB). [15], [97]



1.23. att. Viļņvads shēma ar apgrieztu konusu (ar apvalku ar mazu laušanas koeficientu) [14]

Galvenie konusveida risinājumu trūkumi ir: 1). konusa struktūras ir simtiem mikrometru garas un 2). modas izmērs kļūst jutīgs pret konusveida gala izmēra izgatavošanas precizitāti un atkārtotamību.[16] Apgrieztam konusam zudumi nāk no: 1). jaudas, kas savienota ar konusveida uzgaļa vadīto modu; 2). modas pārejas zudums (samazinājās ar konusa garumu); 3). izkliedes zudumi konusa nelīdzenuma vai sienu raupjuma dēļ (palielinās ar konusveida garumu). [14], [97]

1.5. Raksturlielumi un metodes raksturošanai

Pamatojoties uz literatūras apskata šī darba sadaļā 1.4., pastāv izaicinājums ievadīt gaismu mazos viļņvados (mazāk nekā 10 μm diametrā) uz fotoniskajiem čipiem. Gaismas ievadīšanas zudumi parasti ir atbildīgi par lielāko daļu no kopējiem zudumiem mikroierīcēs. Tomēr bieži vien ir lietderīgi zināt atsevišķi gan ierīces iekšējos, gan savienojuma zudumus. Piemēram, ja izmērītie kopējie ievadīšanas zudumi ir pārāk lieli priekš optiskās ierīces izpētes gaitas vai praktiskas lietošanas, ir jānosaka, vai iemesls ir slikts savienojums, vai iekšēja degradācija.

1.5.1. Zudumi gaismas ievadīšanai no malas

Ievadot gaismu viļņvadā vai savienojot kopā divas optiskās ierīces, rodas zudumi. Tos izraisa vairāki faktori, galvenie no tiem ir:

- viļņvadu sānu novirze;
- serdes diametru atšķirības;
- viļņvadu apertūras skaitliskās atšķirības;
- viļņvadu asu neatbilstība;
- sprauga starp viļņvadu galiem;
- atspīdums no viļņvadu galiem;
- gala apdare un viļņvadu tīrība. [51]

Gaismas ievadīšanas efektivitāte ir vissvarīgākais un fundamentāls parametrs, kas parāda izejas jaudas attiecību pret ieejas jaudu pēc gaismas izplatīšanās un modas pārveidošanās uz gaismas ievadīšanas interfeisiem. Ģeometriski, gaismas pārveidošanu nosāka modu laukumu pārklāšanas integrālis [12]:

$$\eta = \frac{(\iint E_1(x, y)E_2^*(x, y)dxdy)^2}{\iint E_1(x, y)E_1^*(x, y)dxdy \iint E_2(x, y)E_2^*(x, y)dxdy}, \quad (1.23)$$

kur E_1 un E_2 ir kompleksās elektriskā lauka amplitūdas sākotnējai modai un delokalizētai modai pēc ievadīšanas. Var vienkāršot gaismas ievadīšanas aprēķinus katram zudumu faktoram, apskatot vienmodu aksiāli simetrisko viļņvadu ar pakāpju laušanas koeficientu profilu ($n_s > n_{ap}$), kur jauda ir vienmērīgi sadalīta pa aksiāli simetrisko viļņvada kodoliem. Ir vairāki modu nesakritības faktori: sānu novirze, modu laukumu izmēra nesakritība, skaitlisko apertūru nesakritība, sprauga starp viļņvadiem un atpakaļ atstarošanas (sk. 2. pielikumā).

Sanu novirzes zudumi, ir novirze starp viļņvadu serdes centriem, kas rāda mazāku pārklāšanas laukumu [51]:

$$\alpha = 10 \log \left\{ 1 - \left(\frac{2\Delta z}{\theta_{kr} r_0} \right)^2 \right\}, \quad (1.24)$$

kur Δz – attālums starp vienu un otro viļņvadu centru (nobīde), gadījumā ja $d < 20\%$ no serdes rādiusa, θ_{kr} – krišanas leņķis, r_0 – savienoto viļņvadu rādiusi.

Neatbilstības var rasties arī, ja šķiedras ir ideāli izlīdzinātas, bet tām ir atšķirīgi serdes laukumi, jeb *MFD* [51]:

$$\alpha = 10 \log \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 = 20 \log \left(\frac{D_1}{D_2} \right), \quad (1.25)$$

kur D_1 – viļņvada diametrs no kura izplūst gaisma, D_2 – savācēja diametrs

Skaitlisko apertūru nesakritības gadījumā, kad viļņvads kura izplūst gaisma, ir lielāka NA nekā otram, tad gaisma ieplūdis otrā viļņvadā ārpus pieņemšanas leņķa un nebūs ierobežota tā serdē [51]:

$$\alpha = -20 \log \left(\frac{NA_1}{NA_2} \right), \quad (1.26)$$

kur NA_1 – skaitliskā apertūra viļņvadam no kura izplūst gaisma, NA_2 – savācēja viļņvada skaitliskā apertūra. No iepriekšminētā var secināt, ka gadījumos kad $D_1 < D_2$ vai $NA_1 < NA_2$, zudumu nav.

Gadījumā, kad viļņvadu asis nesakrīt, gaismas tiek ievadīta otrā viļņvadā pie lielākiem leņķiem un atkarībā no skaitliskās apertūras, daļa no stariem netiek ierobežota viļņvada serdē. Līdzīgi, ar lielo NA_2 , asu nesakritības ietekme ir mazāka [51]:

$$\alpha = 10 \log \left\{ 1 - \frac{N_0 \cdot \theta}{\theta_{kr} \cdot NA_2} \right\}, \quad (1.27)$$

kur θ – leņķis (radiānos) starp viļņvadu asīm.

Zudumi uz spraugas starp viļņvadiem rodas no tā, ka gaisma iziet no avota viļņvada koniskā starā ar izkļiedes leņķi, kas ir atkarīgs no tās NA . Lieliem NA ir lielāki zudumi, jo to stari diverģē ātrāk [51]:

$$\alpha = -10 \log \left\{ 1 - \left(\frac{\Delta z \cdot NA}{2D \cdot n_0} \right) \right\}, \quad (1.28)$$

kur Δz – attālums starp viļņvadiem, D – viļņvada diametrs, n_0 – epoksīda laušanas koeficients.

Gaismai, izejot cauri materiālu interfeisiem ar dažādiem laušanas koeficientiem, rodas zudumi no Freneļa atspīduma. Gan sānu gan režģa gaismas ievadīšanas struktūras cieš no Freneļa atspīdumiem savienojuma saskarē. To var viegli atrisināt, pietiekami noliekot abas viļņvadu gaismas ievadīšanas virsmas, izmantojot laušanas koeficienta saskaņotus epoksīda materiālus starp diviem materiāliem vai izmantojot pret atspīdumu pārklājumus. Piemērām, gaismai, pārejot no stikla ($n_1=1,5$) uz gaisu ($n_2=1,0$), rodas atspīdums ap 4%, jeb 0,177 dB. Ievadot gaismu no viena viļņvada otrajā bez cieša kontakta, abas atstarojošās virsmas jau rāda 0,354 dB, kas rāda ievērojamus zudumus gaismas ievadīšanas procesā. Tad, samazinot starpību n_1-n_2 , var samazināt zudumus.

Epoksīda izmantošanas gadījumā, laušanas koeficients ir tuvāks n_1 laušanas koeficientam. Piemērām, ja $n_2=1,4$, tad kopējie atstarošanas zudumi divām virsmām, saskaņā ar formulu (1.28), jau kļūst 0,01 dB. Atstarotā gaisma traucē lāzera diodei, izraisot modu lēcienus. Ievadot gaismu no mikro lāzera viļņvadā, pie noteiktām spraugas izmēriem starp tiem var veidoties *Fabry-Perot* tipa parazitārais rezonators, kas samazina enerģijas pānesi līdz pat 50%. [51] Vienkārši atgrieztus optiskus zudumus var izvērtēt šādi [51]:

$$\alpha_{ievad} = -10 \cdot \log\left(\frac{P_{at}}{P_{iev}}\right), \quad (1.29)$$

kur P_{at} – atstarota jauda, P_{iev} – ievadīta jauda.

Daudzos praktiskos mehāniskajos savienojumos un savienotājos ir iekļauti laušanas koeficienta atbilstības gēli, kas bieži ir viskozi šķidrums, piemēram, glicerīns vai silīcija eļļa nelīmētiem savienojumiem vai caurspīdīgas epoksīda līmes. Šāda pildviela, kas ievietota spraugā, samazina izkliedētas gaismas daudzumu, samazina Freneļa atspīdumu, atbrīvo no parazītiskā *Fabri-Perot* rezonatora ietekmes. Jāņem vērā, ka šāds laušanas koeficienta saskaņošanas materiāls palielina jutību pret leņķisko novirzi (sk. formulu (1.28)).

Viļņvadu gala apstrādei arī ir lielā nozīme, īpaši optisko šķiedru izmantošanā. To var samazināt, izmantojot neperpendikulāras izej malas šķiedrai vai viļņvadam, lai nodrošinātu, ka atpakaļ atstarota gaisma tiek absorbēta šķiedru apšuvumā. Šķiedru uzgaļiem tiek izmantots līdzīgs paņēmieni, lai novērstu atspīduma izraisīto interferenci. [51]

Pilnībā ievadīt galveno modu tikai tad, kad ir ideāls amplitūdas profils, tostarp plakanas fāzes frontes, kas ir perpendikulāras serdes asij. Ideālā viļņvadu sagatavošanas un savstarpējās izvietošanas gadījumā modu sakrītības efektivitāte būs [98]:

$$\eta = \frac{4r_x r_y r_0^2}{(r_0^2 + r_x^2)(r_0^2 + r_y^2) + z^2} = \frac{4r_x r_y r_0^2}{(r_0^2 + r_x^2)(r_0^2 + r_y^2)}, \quad (1.30)$$

kur r_x un r_y – ir modu rādiusu pus-platumi priekš $1/e$ amplitūdas līmeņa x un y plaknēs, r_0 – ievadītas no šķiedras modas rādiuss, z – attālums starp šķiedru un viļņvadu. Gaismas ievadīšanas zudumus ar gaismas ievadīšanas efektivitāti saista sakarība:

$$\alpha_{ievad} = 10 \cdot \log \eta. \quad (1.31)$$

1.5.2. Gaismas ievadīšanas mērīšanas metodes

Būtisks solis fotonisko ierīču izstrādē ir to īpašību raksturošana. Galvenās īpašības, kas nosaka tālākās ierīces pielietošanas iespējas, ir tas kopējie optiskie zudumi. Tā kā, mikro ierīces sastāv no viļņvadiem, gaismas ievadīšanas un izvadīšanas elementiem, kā arī aktīviem un pasīviem elementiem, teorētiska un eksperimentāla zudumu noteikšana ir sarežģīta, neprecīza vai dažreiz nav iespējama.

Ir dažādas metodikas kā izvērtēt viļņvada zudumus atsevišķi: viļņvada atgriešana [99], prizmas savienojums [100], izkliedētās gaismas mērījums [101] un citas metodes. Atgriešanas metode balstīta uz gaismas intensitātes mērīšanu viļņvada izejā pie dažādiem viļņvada garumiem, ko panāk ar viļņvadu saīsināšanu. Rezultātā, var iegūt datus ar pārraides un garuma līknes slīpumu. Šī metode ir precīza viļņvadiem no neorganiskiem materiāliem, jo tās

kristālografiskas plaknes atvieglo viļņvadu precīzu nogriešanu. Metodi grūti pielietot viļņvadu garumiem zem 1 cm. [12] Tā kā *SU-8* nav kristālisks materiāls, tas nejauši saplīst un pat uzrāda visko-elastīgumu istabas temperatūrā [43] un viļņvada šķautņu kvalitāte kļūst ļoti slikta (2-5 dB/šķautne)[102]. Tāpēc, viļņvadu šķelšanās vai griešanas rezultātā tiek mainīta viļņvada malas virsma, jeb mainās gaismas ievadīšanas nosacījumi.

Var izmantot augstas refrakcijas koeficienta gaismas savienojuma prizmas, kur viena tiek turēta fiksēta, kamēr izvades prizma tiek pārvietota pēc katra mērījuma, lai mainītu efektīvā parauga garumu. Šī metode ir mazāk precīza, zemas gaismas ievadīšanas nosacījumu atkārtojamības dēļ, kad prizma tiek pārvietota uz jaunu pozīciju. Metodi grūti pielietot viļņvadu garumiem zem 1 cm. Izklidētās gaismas mērīšanas tehnikai ir nepieciešama struktūras viendabība visā viļņvada garumā un laba gaismas izkliede uz vadošās struktūras vertikālās virsmas, lai kamera varētu to efektīvi uzņemt. Bet galvenais trūkums šai metodei ir tas ka jānodrošina ļoti efektīvu gaismas ievadīšanu viļņvadā, lai ievadīta gaisma netrāpītu viļņvadus ārpusē. Alternatīvi viļņvadiem var izveidot likumus lai izvārtos no minētas problēmas, bet tad jāmaina fotoniskās ierīces dizainu, kas nav vienmēr iespējams. Pārejam zināmām metodēm ir lielas mērījumu nenoteiktības. [103]

Ir nesagraujama metode no Tachikura et al [104] kā eksperimentāli novērtēt gaismas ievadīšanas zudumus atsevišķi no vadāmās konstrukcijas izplatīšanās zudumiem, kas piemērota integrētiem optiskiem čipiem, kuriem jau ir pievienoti šķiedru uzgaļi. Alternatīvi, Thanh-Nam Nguyen et al pētījumā [103] tika piedāvāta metode iepriekšminētās metodes modifikācija, kur pārbaudāmās ierīces galos nav nepieciešami savienotāji, tādējādi padarot šo metodi pieejamu gan optiskajām šķiedrām, gan integrētajiem optiskajiem viļņvadiem. Metodes būtībā ir mērījumu sērija, kur secīgi mēra izejošo optisko jaudu no katra optiskās shēmas posma, nemainot gaismas ievadīšanas nosacījumus (sk. 1.24. att.):

1. Mērīt gaismas avota optisko jaudu P_0 ;
2. Ievadīt gaismu no avota optiskā šķiedrā ar kuru tiks veikta gaismas ievadīšana čipā, mērīt P_{B+} no AB posma;
3. Nodrošināt optimālo gaismas ievadīšanu no šķiedras pētāmā fotoniskajā čipā (maksimālas gaismas pārraides stāvoklis) – P_{D+} ;
4. Nodrošināt optimālo gaismas izvadīšanu no pētāmā fotoniskajā čipa izejas šķiedrā (maksimālas gaismas pārraides stāvoklis) – P_{F+} ;
5. Nomainīt gaismas virzienu no $A-F$ uz $F-A$, saglabājot gaismas ievadīšanas stāvokļus BC un DE , mērīt P_{A-} , kuram jābūt vienādam ar P_{F+} ;
6. Izņemt pirmo šķiedru AB , uzņemt P_C ;

7. Izņemt pētāmo ierīci, uzņemt P_E^- .

| Setup | Measured Power | Identifiable Value |
|-------|----------------|--|
| | P_0, P_B^+ | L_{AB} |
| | P_D^+ | L_{AD} |
| | P_F^+ | L_{AF} |
| | P_A^- | L_{FA} |
| | P_C^- | L_{FC} (supposed to be equal to L_{CF}) |
| | P_E^- | L_{EF} |

1.24. att. Zudumu mērīšanas shēma pa posmiem ar attiecīgām mērījumu vērtībām

Tehnika ir balstīta uz pieņēmumiem:

- vienmodu viļņvadi;
- neņemt vērā radiācijas modas viļņvadu apšuvumos vai apvalkos, jo tie vājas un ietekmēs tikai viļņvada zudumus, bet ne gaismas ievadīšanas zudumus.
- gaismas avots un jaudas mērītājs mērījumu laikā ir stabili laikā, kā arī šķiedru un ierīču zudumi;
- ka izmērītie zudumi nav atkarīgi no izplatīšanās virziena;
- veicot mērījumus abos izplatīšanās virzienos, tiek izmantots viens un tas pats avots un fotodetektors;
- mērījumiem izmantotā jauda ir pietiekami zema, lai izvairītos no nelineāriem efektiem, kas varētu ietekmēt rezultātus.

Eksperimentālo mērījumu rezultātā, saņemam gaismas jaudas vērtības P_j no kuriem var izvērtēt L_{ij} posmu zudumus starp punktiem i un j (sk. 1.25. att.): $L_{AB} = P_0 - P_{B+}$; $L_{BD} = P_{D+} - P_{B+}$; $L_{AF} = P_{F+}$; $L_{FA} = P_{A-}$; $L_{EC} = P_{C-}$; $L_{EC} = P_{C-} - P_{E-}$; $L_{FE} = P_{E-} - P_0$. Nezināmie ir L_{BC} , L_{CD} , L_{DE} un gaismas ievadīšanas zudumi no lāzera uz optisko šķiedru ir iekļauti ievadšķiedras zudumos. Analizējot optisko shēmu var izvest sekojošas atkarības:

$$L_{BC} + L_{CD} + L_{DE} = L_{BE} = L_{AF} - L_{AB} - L_{EF} \quad (1.32)$$

$$L_{BC} + L_{CD} = L_{BD} = L_{AD} - L_{AB} \quad (1.33)$$

$$L_{CD} + L_{DE} = L_{CE} = L_{CF} - L_{EF} \quad (1.34)$$

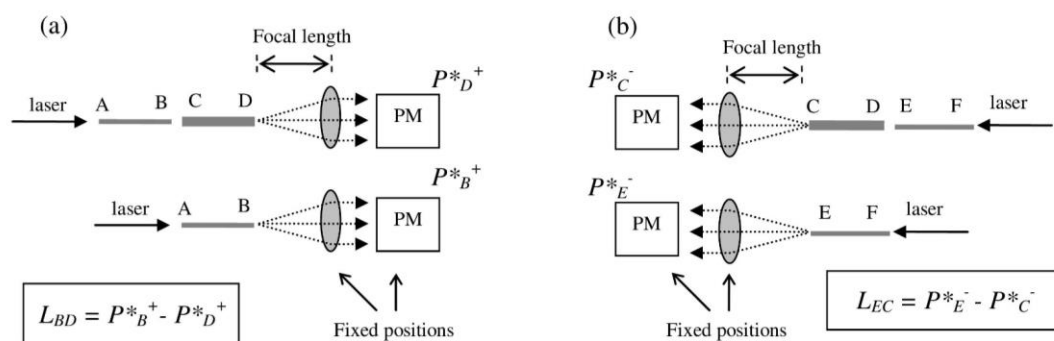


Fig. 2. Setup of measurements in step 2 (a) and in step 5 (b) when the DUT is a waveguide. PM: powermeter.

1.25. att. Mērijumu metodika: a). L_{BD} iegūšana un b). L_{EC} iegūšana [103]

Pieņemot kā $L_{CE} = L_{EC}$, no vienādojumiem (1.32), (1.33) un (1.34) ievadīšanas zudumi būs $L_{DE} = L_{AF} - L_{EF} - L_{AD}$ un $L_{BC} = L_{AF} - L_{AB} - L_{CF}$. Aizvietojot L_{DE} un L_{BC} vienādojumā (1.32), (1.33) un (1.34), aprēķina ierīces vai viļņvada zudumus L_{CD} .

Zudumus aprēķina pēc formulas:

$$\alpha = 10 \times \log \frac{P_{k+}}{P_{k-}} \quad (1.35)$$

kur P_k – optiskā jauda attiecīgos posmos.

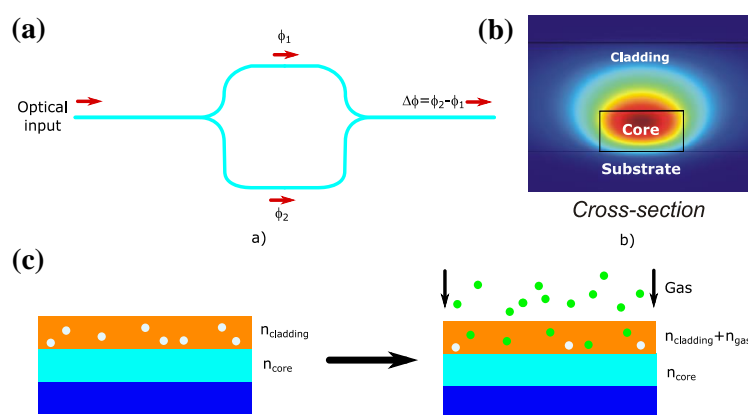
Ir vairāki tehniski aspekti kuri jāņem vērā mērīšanas procedūrā. Viļņvada vai mikroierīces optiskajam raksturojumam ir nepieciešams efektīvi ievadīt gaismu pie ieejas un savākt gaismu izejas galā caur detektoru. Lai ievadšķiedrai ir atbilstoša NA un MFD var izmantot objektīvu, kas turklāt arī ļauj izvairīties no gaismas, kas nokļūst savācēj šķiedrā un detektorā.

Gan vienmodu, gan daudzmodu šķiedrām detektoriem ir daudz lielāks virsmas laukums nekā optisko šķiedru serdeņiem, un tāpēc rodas tikai ļoti mazs savienojuma zudums (galvenokārt iekšējās Freneļa atstarošanas dēļ). Silīcija detektori spēcīgi reaģē uz 850 nm viļņu garumiem, savukārt indija gallija arsenīda (InGaAs) detektori spēcīgi reaģē uz 1300 nm un 1550 nm viļņu garumiem. Detektori nodrošina tikai lineāru reakciju ierobežotā ieejas signāla līmeņa dinamiskā diapazonā. Tāpēc tie ir jākalibrē konkrētam lietojumam un paredzamajam jaudas diapazonam.

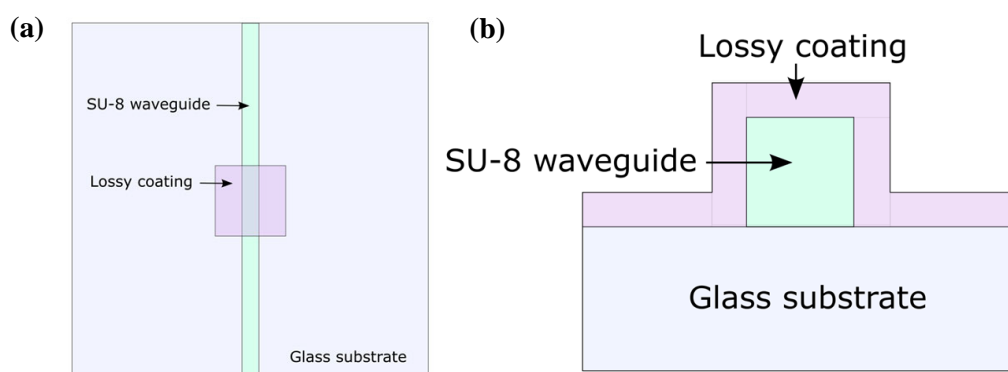
Ievadot gaismu fotoniskajā čipā, jāpārlicinās ka gaismas ir ievadīta pareizi, viļņvada kvalitāte ir atbilstoša un fotoniskajā ierīce strādā pareizi. Tādu analīzi var veikt analizējot gaismas kūli, kas iznāk no čipa ar CCD vai $CMOS$ lāzeru kameru. Gaismas stara intensitātes sadalījuma formas parametru rezultāti ir atkarīgi no izvēlētajā MFD mērīšanas metodes. Populārākas metodes industrijā ir *Gauss fit*, *Super Gauss fit* un *Knife edge*. Turklāt, ar kameru var izvērtēt lāzera stara diverģenci un jaudu. Gaismas stara novirzi nosaka, izmērot jaudas profilu dažādos attālumos no viļņvada izejas malas. [105]

2. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA

Šajā darbā kā gaismas ievadīšanas efektivitātes izpētes objekti bija divas jaunizstrādātas fotoniskās ierīces – Optiskais gāzes sensors (OGS) un Zudumradošo modu rezonators (angl. – *Lossy Mode Resonance* (LMR)). OGS parauga struktūras tika veidotas no *SU-8* viļņvadiem uz 4 collu nātrija-kaļķa stikla pamatnēm ($\text{Ø}101,6 \times 0,7$ mm vai $\text{Ø}101,6 \times 1,1$ mm), kurus sagriež uz atsevišķiem paraugiem. Tā struktūras sastāv no viena 10×1 μm konusveida savienojuma gaismas ievadīšanai ar pāreju uz 1×1 μm viļņvadiem, 50/50 dalītāja un divām MCI struktūrām (sk. 2.1.-a. att.). LMR parauga struktūras tika veidotas no taisniem 30×30 μm *SU-8* viļņvadiem uz nātrija-kaļķa stikla mikroskopa slaida pamatnēm ($75,0 \times 25,0 \times 1,1$ mm) kuriem atgriez galus ļaujot piekļuvi viļņvadu galiem (sk. 2.2.-a att.).



2.1. att. Fotoniskajās ierīces Optiskais gāzes sensors (OGS) shēma: a) skats no augšas; b). simulācija *SU-8* viļņvadam ar *PMMA* pārklājumu; c). darbības princips



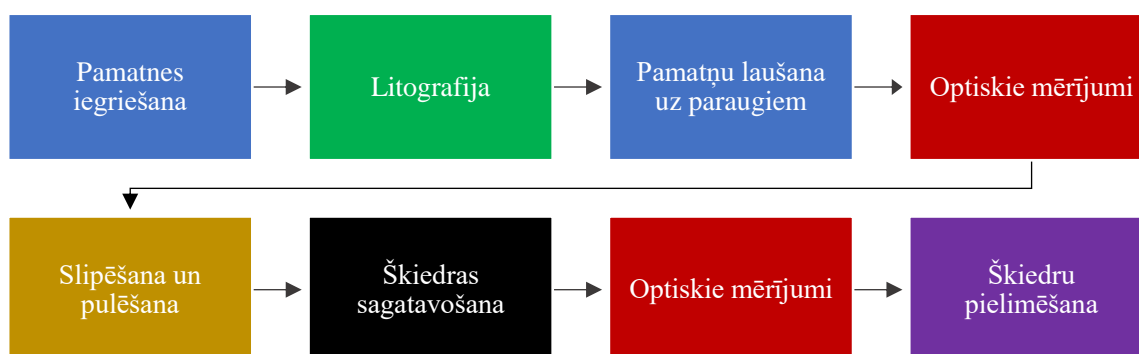
2.2. att. Fotoniskajās ierīces Zudumradošo modu rezonatora (LMR) shēma: a). skats no augšas b). šķērsgriezums (LMR) [106]

Abu ierīču funkcionalizācija notiek ar speciāliem pārklājumiem virs *SU-8* viļņvadiem. OGS MCI plecs tiek pārklāts ar gāzu jūtīgo *PMMA* (sk. 2.1.-c att.) kas maina savu laušanas koeficientu (sk. 2.1.-b att.), bet LMR viļņvads tiek pārklāts ar metāla plāno kartiņu kas izraisa

gaismas rezonansi (sk.2.2.-b att.). Minētas mikroierīces šobrīd vēl tiek aktīvi izstrādātas un pētītas. Ņemot vērā sadaļā 1.4. minētos gaismas ievadīšanas metožu priekšrocības, trūkumus un realizācijas iespējas, tika izvēlēta sānu gaismas ievadīšanas metode ar šķiedru pielīmēšanu priekš dota polimēru fotoniskās ierīces.

2.1. Fotonisko čipu izgatavošana

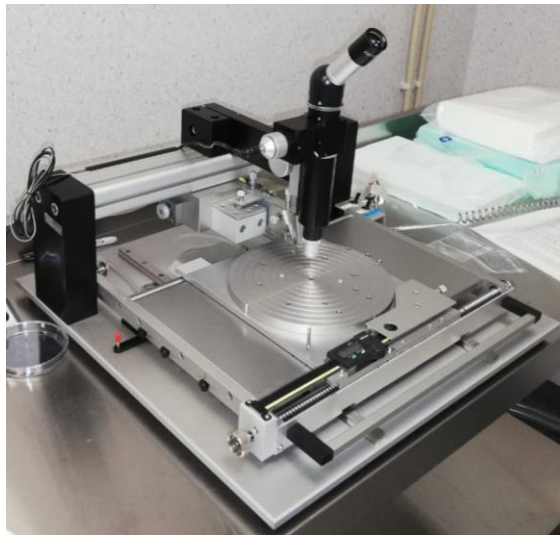
Ierīces ražošanas process sastāvēja no (sk. 2.3. att.): pamatnes iepriekšējas iegriešanas, substrāta tīrīšanas, optiskās litogrāfijas procesa, substrāta sadalīšanas paraugos (mikro-čipos), mikročipu slīpēšanas un pulēšanas, optisko īpašību mērīšanas un šķiedru pielīmēšanas.



2.3. att. Paraugu izgatavošanas procesa shēma

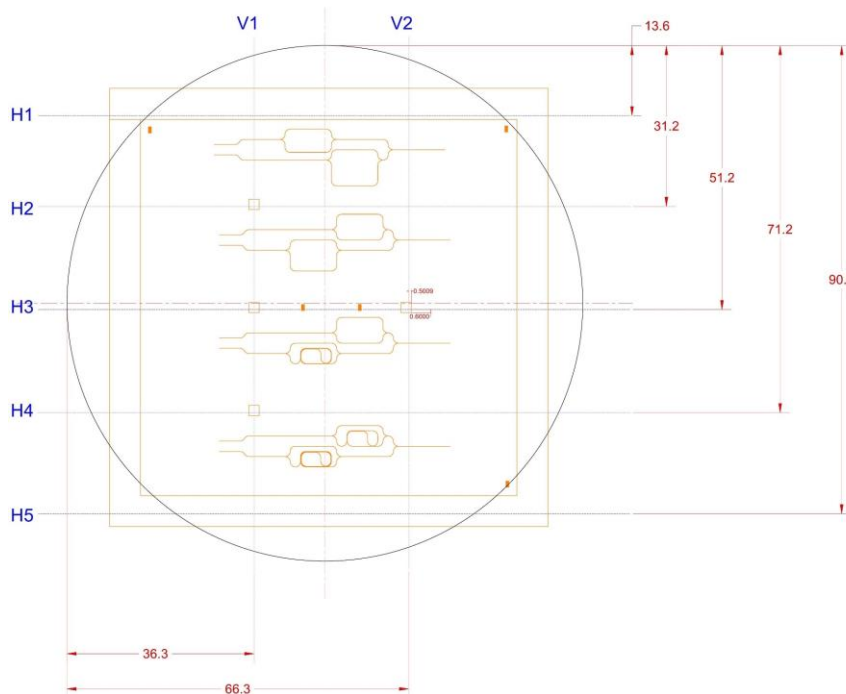
Pamatnes apakšējā virsma tika iegriezta pirms litogrāfijas procesiem, lai varētu veiksmīgi izgatavot vairākus paraugus ar vienmērīgiem *SU-8* viļņvadu izmēriem. Pēc litogrāfijas procesiem pamatne tika sadalīta paraugos, laužot to pa iepriekš iegrieztām līnijām. Tādā veidā griešana netraucēja mikro-izgatavošanas procedūrai un rezultātā veidoja pie pamatnes lūzuma malām viļņvadu galus raksturošanai un turpmākai sānu gaismas ievadīšanai.

Iegriešanas eksperimenti priekš OGS paraugiem tika veikti uz 0,7 un 0,5 mm bieziem stikla plāksnēm un priekš LMR paraugiem uz 1,1 mm mikroskopa stikla priekšmetstikliņiem. Iegriešanai tika izmantota iekārta *Diamond Scriber RV-129* (sk. 2.4. att.). Tā skrāpēja stikla pamatni ar dimanta asmeni. Iekārtas darbības diapazoni bija: asmeņa leņķis $55 - 65 \pm 0,1^\circ$, asmeņa dziļums paraugiem no -5 līdz $0,1 \pm 0,01$ mm, pieliktais spēks 5 – 581 cN. Svarīga bija arī asmeņa kvalitāte. Pamatnes tika notīrītas ar izopropanolu, noslaucītas ar tīrās telpas salvetēm. Katra pamatne tika novietota ar augšējo virsmu uz iekārtas galdiņa, fiksēta ar vakuumu un ieskrāpēta ar vairākiem griezumiem pēc OGS un LMR shēmām (sk. 2.5. un 2.6. attēlos (zilā krasā)). Darbojoties ar *Diamond Scriber RV-129*, tika pārbaudītas dažādas asmenim pieliktā spēka, dziļuma un leņķa lieluma ietekme uz griezuma kvalitāti.



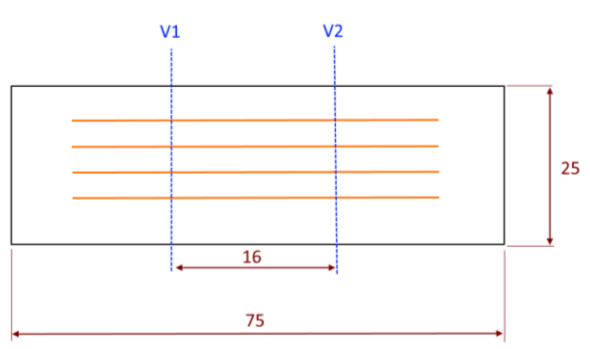
2.4. att. Griešanas iekārta *Diamond Scriber RV-129*

OGS skrāpēšanas shēmā (sk. 2.5. att.) ir redzams, ka pamatne tika sadalīta četros paraugos pēc *H1-H5* līnijām. LMR ierīce tika veidota uz mikroskopa slaida vienā eksemplārā. Katram paraugam bija skrāpēšanas līnijas *V1* un *V2*, kuras pēc litogrāfijas procesa atradušās zem mikročipu ieejas un izejas viļņvadiem. Bija nepieciešams atrast labākus skrāpēšanas parametrus nātrija-kaļķa stikla pamatnēm. Laušanas rezultātā bija jādabū, galvenokārt, taisnstūrveida viļņvadu gali ar minimāliem bojājumiem un plakanām, gludām pamatnes malām bez plaisām un citiem vizuāli pamanāmiem defektiem, kas traucētu gaismas ievadīšanai.



| |
|---|
| Pamatne: Nātrij-Stikls 4"x 0.7 mm |
| Process: Griešana |
| Precizitate: 0.01 |
| Mervienība: mm |
| Izmēri |
| Griešana |
| Pārnese priekš 10um ieejai |
| OGS Maska |
| Dizaina pozīcija |

2.5. att. OGS paraugu skrāpēšanas un litogrāfija maskas shēma



2.6. att. LMR paraugu skrāpēšanas un litogrāfija maskas shēma

Pamatņu iegriešanas rezultātā uz pamatnes ieskrāpētās puses bija palikušas stikla daļiņas, bet otrajā pusē - putekļi un metāla daļiņas pēc saskarsmes ar skrāpēšanas iekārtas paraugu galdiņu. Lai pamatnes varētu izmantot fotolitogrāfijas procesos, tās bija jānotīra. Stikls vispirms tika notīrīts ar izopropanolu un salvetēm, mehāniski berzējot, lai noņemtu lielāku daļu stikla gabalu un organisko netīrumu. Tālāk, pamatne, novietojot to fluor-polimēra turētājā un stikla traukā, tika tīrīta ultraskaņas vannā *Elmasonic P 60 H* ar hloroformu, acetonu, izopropanolu un deterģenta 2% šķīdumu atsevišķi pa 15 minūtēm pie 30-40 °C frekvenču skenēšanas režīmā. Pēc katra cikla pamatnes tika noskalotas ar dejonizētu ūdeni. Vafeļu skalošanai tika izmantots augstas tīrības pakāpes (pretestība – 18 MΩ) dejonizēts ūdens. Pēc mazgāšanas ūdens no pamatnēm tika nopūsts ar slāpekli.

Lai nodrošinātu labu *SU-8* fotorezista adhēziju uz stikla pamatnēm, no pamatnes bija jāizņem absorbētais ūdens, izžāvējot to ar karsēšanas plītiņu *Unitemp HP-155*, noturot 2 minūtes uz 115°C. Turamākai adhēzijas uzlabošanai, tika izmantota plazmas tīrīšanas iekārta *Plasma System GIGAbatch 360M*, kas bija kompakts reaktors fotorezista ar vakuuma kambari (0,05 – 1,5 mbar vakuums) un mikroviļņu (MV) avotu (jauda 0 – 1000 W, frekvence 2,45 GHz) plazmas ģenerēšanai. Tīrīšanas procesa parametri: O₂ (99,999%) plūsma – 1000 sccm; procesa spiediens – 0,8 mbar; MV jauda – 800 W; laiks – 10 min; tipiskā procesa temperatūra ap 25 – 55 °C.

Viļņvadi tika veidoti no *SU-8* fotorezista *Gersteltec*, ar kuru pārklāja stikla pamatni ar rotējošās pārklāšanas tehniku. Šajā pārklāšanas tehnikā uz pamatnes tika uzpilināts ap 1 ml rezista, tad substrāts tika pagriezts pēc sekojošas programmas:

1. solis: 30 sekundes, paātrinājums 100 apgr./min. sekundē;
2. solis: 30 sekundes, 3000 apgr./min.;
3. solis: 30 sekundes, paātrinājums = -100 apgr./min. sekundē.

Rezultātā tika iegūta vienmērīga polimēra plānā kartiņa ar $1,00\pm 0,15$ μm biezumu gar visu pamatnes virsmu, izņemot tās malas. Tālāk rezistam bija veikta pirms-eksponēšanas karsēšana uz plītiņas *Unitemp HP-155*, vienmērīgi uzsildot pamatni no istabas temperatūras līdz 95 $^{\circ}\text{C}$ ar ātrumu 6 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ un pēc tam noturot temperatūru 500 sekundes. Pamatne tika dabiski atdzesēta. Apkartējās vides parametri: *ISO 7* tīrtelpa, 20 ± 2 $^{\circ}\text{C}$, mitrums $40\text{-}60\%RH$.

Pēc tam, kad polimēra ierīces slānis bija uzklāts ar rotējošās uznešanas metodi, tika izveidota *PIC* struktūra, izmantojot litogrāfijas metodi. Lai izgatavotu fotoniskus čipus ar lielāko veiktspēju, tika izmantots foto-maskas savienošanas process priekš 1×1 μm *SU-8* viļņvadiem. Maskas bija izveidotas no nātrij-kaļķa stikla ar hroma pārklājumu izkodinātu pēc OGS dizaina un saturēja četras OGS paraugu struktūras, ka arī logus maskas pozicionēšanai attiecīgi skrāpēšanas līnijām. Paraugu eksponēšanai tika izmantota *Karl Suss MABA6* maskas savietošanas iekārta, kas bija aprīkota ar 350 W dzīvsudraba lampu, i-līniju, h-līniju un neitrāla blīvuma filtriem. Maskas tika precīzi savietotas ar skrāpēšanas līnijām parauga apakšējā virsmā un nogādāta ciešā saskarē ar pamatni, piespiežot to ar vakuumu -300 mbar. *SU-8* fotorezists tika eksponēts caur masku ar 365 nm UV gaismu (i-līnijas filtrs), rezultējot ar dozu – 300 mJ pastāvīgas dozas režīmā. LMR paraugiem fotorezists tika apstarots izmantojot tieša ieraksta iekārtu *Laser writer Heidelberg $\mu\text{PG} 101$* , jo LMR viļņvadu virsmas raupjumam bija lielā nozīme. Apstarošana notika ar 70 mW 375 nm lāzeru, rezultējot ar dozu 1500 mJ/cm². Apkartējās vides parametri: *ISO 7* tīrtelpa, 20 ± 2 $^{\circ}\text{C}$, mitrums $>40\%RH$.

Pēc eksponēšanas paraugiem tika veikta karsēšana uz plītiņas *Unitemp HP-155* vienmērīgi uzsildot pamatni no istabas temperatūras līdz 95 $^{\circ}\text{C}$ ar ātrumu 6 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ un pēc tam noturot temperatūru 270 sek. Pamatne tika dabiski atdzesēta. Eksponēšanas laiks un pēc-eksponēšanas karsēšanas procesa apstākļi bija iepriekš optimizēti, lai samazinātu mehāniskus spriegumus *SU-8* rezistam un novērstu to plaisāšanu. *SU-8* rezista attīstīja 20 sekundes izmantojot attīstītāju *MR-Dev 600*. Pēc tam pamatne tika notīrīta, izmantojot izopropanolu un dejonizēta ūdens skalošanu, un izžāvēta ar slāpekļa pistoli.

Tā kā iegūto struktūru bija paredzēts izmantot ierīcē, kuru nepieciešams sagatavot gaismas ievadišanai ar slīpēšanas un pulēšanas procesiem, paraugam tika veikta sacietināšanas karsēšana (angl. – *Hard bake*) uz *Unitemp HP-155* divos soļos: pamatne tika vienmērīgi uzsildīta no istabas temperatūras līdz 125 $^{\circ}\text{C}$ ar ātrumu 6 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ un pēc tam temperatūra tika noturēta 30 min. Pamatne tika dabiski atdzesēta. Tas paaugstina viļņvadu struktūru mehānisku un termisko izturību.

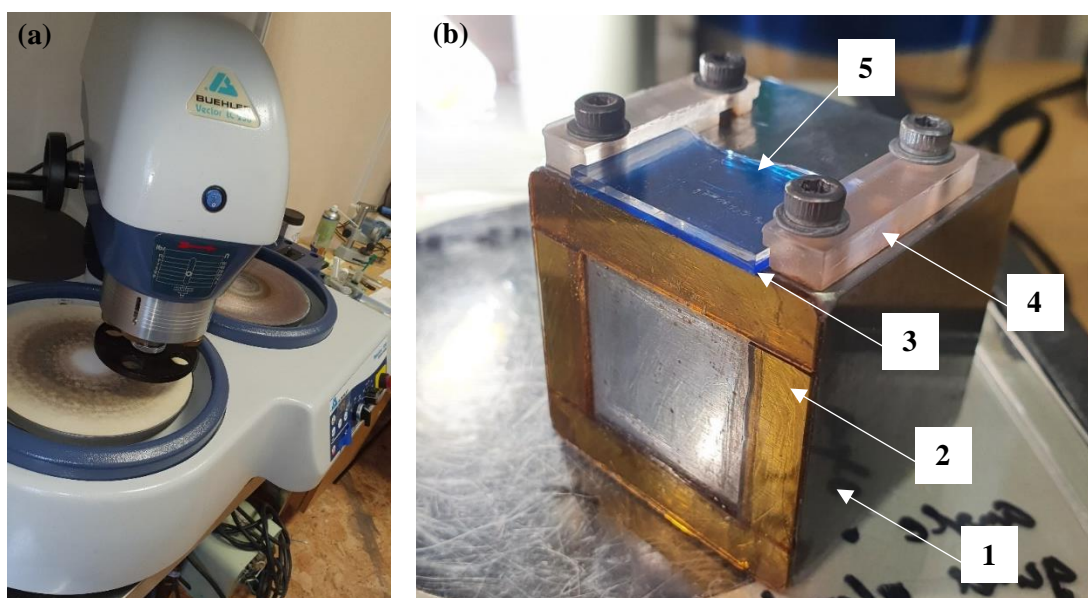
Izgatavotiem *SU-8* viļņvadiem tika veikta kvalitātes kontrole, uzņemot attēlus ar *Nikon 150* optisko mikroskopu $50\text{-}1000X$ palielinājumu robežās. Viļņvadu struktūrām bija jābūt

vienāda izmēra visiem paraugiem, bez defektiem un bojājumiem, ar gludu virsmu un jāturas uz pamatnes ar masku definētajās vietās. Viļņvadu galu laterālie izmēri tika mērīti ar *Nikon 150* optiskā mikroskopa *NIS-Elements D* programmatūru izmantojot paralēlu līniju funkciju, kura ļauj precīzi mērīt distanci starp divām līnijām definējot mērīšanas līnijas gar viļņvada malām neatkarīgi no viļņvadu leņķisko pozīciju redzes laukā. Plāno kārtiņu biezuma mērīšanai tika izmantota iekārta *Profilier Dektak 150*, kas kārtiņu biezumus mēra ar adatu braucot pāri kārtiņas virsmai. Profil-metra izšķirtspēja bija līdz $\pm 0,1$ nm.

2.2. Fotonisko čipu sagatavošana

Pamatne tika sadalīta, izmantojot pamatnes laušanas metodiku, manuāli ar pirkstiem vai ar speciāliem laušanas instrumentiem. Pēc pamatnes laušanas tika pārbaudīta mikroierīces funkcionālā struktūra, viļņvadu un to sānu virsmas kvalitāte, izmantojot optiskus mikroskopus *Nikon Ci* un *Nikon 150*, 50-1000X palielinājumu robežās un skenējošu elektronu mikroskopu *SEM Helios 5 UX*. Priekš efektīvas sānu gaismas ievadīšanas un šķiedru pielīmēšanas, viļņvadu galiem un parauga malai bija jābūt taisniem, gludiem un bez plaisām.

Ja pēc laušanas, viļņvadiem netika novēroti bojājumi, paraugam tika ievadīta gaisma un mērīts signāls. Lai novērstu viļņvadu un pamatnes malas bojājumus, uzlabot malas leņķi priekš šķiedru pielīmēšanas, paraugi tika slīpēti un pulēti. Slīpēšanas un pulēšanas procesi tika veikti manuāli uz *Buehler MetaServ 250* pulēšanas iekārtas (sk. 2.7.-a att.).



2.7. att. Pulēšanas process: a). iekārta Buehler MetaServ 250; b). paraugu turētājs (1) - nerūsējošā tērauda kubs; (2) – stikla balsti; (3) – paraugs; (4) – parauga turētāji; (5) aizsārgstikls

Procesam tika izveidots paraugu turētājs no nerūsējoša tērauda ($40,00 \times 40,00 \times 40,00 \pm 0,01$ mm) (sk. 2.7.-b att.) ar parauga fiksatoriem vienā malā un stikla balstiem otrā. Paraugs tika

stiprināts ar fiksatoriem ar fotoniskajām struktūrām uz augšu, ar vienu parauga malu ap 0,1 mm virs otras puses ar stikla balstiem.

Tā kā optiskās litogrāfijas procesā *SU-8* struktūru pozīcija tika definēta attiecīgi pamatnes iegriešanas līnijām, tad parauga sānu malas bija $\pm 0,1 \mu\text{m}$ paralēli fotoniskajā čipa ieejas un izejas viļņvadiem. Fiksatoru pozīcijā tika kalibrēta ar $\pm 0,01 \text{ mm}$ precizitāti lai nodrošinātu taisnu čipa novietošanu pret pulēšanas plaknes. Tāpēc, fotonisko čipu var precīzi novietot uz pulēšanas turētājā piespiežot čipa malu pie fiksatorā.

Stikla balsti tika izveidoti no nātrija-kaļķa stikla 30-40x5x1 mm gabaliem, kuri tika termiski pielīmēti ar vasku un izmantoti priekš procesa tīrības un kontroles. Stikla balstiem pirms parauga slīpēšanas bija jābūt ar vienādiem biezumiem $\pm 10 \mu\text{m}$. Puse ar stikla gabaliem un izceltu parauga malu tika noslīpēta un nopulēta. Procesā laikā bija noticis pielīmēto stikla gabalu nodilums kopā ar parauga malu. To tika kontrolēts, novietojot paraugu turētāju ar slīpētu malu uz augšu un mērot dziļuma sadalījumu pa slīpētas malas perimetru izmantojot mikrometru statīvu. Tas bija ļāvis nodrošināt taisnu malas leņķi paraugam ($\Delta \pm 0,01^\circ$).

Fiksatori tika izstrādāti *CAD* programmā *Fusion 360* un izveidoti ar 3D druku no 4 ml *Zortax resin tough clear*, izmantojot *Zortax Inkspire 3D* drukas iekārtu: slāņa biezums 0,05 mm, slāņa ekspozīcijas laiks 12 sekundes, platformas pacelšanas ātrums 60 mm/min.

Slīpēšanas un pulēšanas procesā izmantotie materiāli norādīti 2.1. tabulā. Parauga vizuāla kvalitātes kontrole procesu laikā tika veikta ar *MBS-9* optisko mikroskopu 5X-100X palielinājuma robežās un pēc procesa beigām ar *Nikon Ci* optisko mikroskopu 50-1000X palielinājumu robežās.

2.1. tabula

Pulēšanas procesā izmantotie materiāli

| <i>Process</i> | <i>Materiāli</i> |
|---|--|
| <i>Mazgāšana</i> | <i>18MΩ-cm dejonizēts ūdens, ziepes, izopropanols</i> |
| <i>Lubrikants slīpēšanas un pulēšanas procesam</i> | <i>Buehler MetaDi Fluid</i> |
| <i>Tērauda nesēj-plāksne slīpēšanas vai pulēšanas audumam</i> | <i>Buehler MagnoMet Magnetic Plate</i> |
| <i>Diski ar smilšpapīru slīpēšanai</i> | <i>Buehler CarbiMet™ 400 grit un 600grit</i> |
| <i>Presēts audums sākotnējai pulēšanai</i> | <i>Buehler TexMet™ P un TexMet™ C</i> |
| <i>Presēts audums pulēšanai</i> | <i>Buehler TexMet™ C un VerduTex™</i> |
| <i>Sintētiskā viskozes audums galīgai pulēšanai</i> | <i>Buehler MicroCloth™ un ChemoMet™</i> |
| <i>Polikristāliskā suspensija pulēšanai 15μm</i> | <i>Buehler 15μm MetaDi™ Supreme Polycrystalline Suspension</i> |

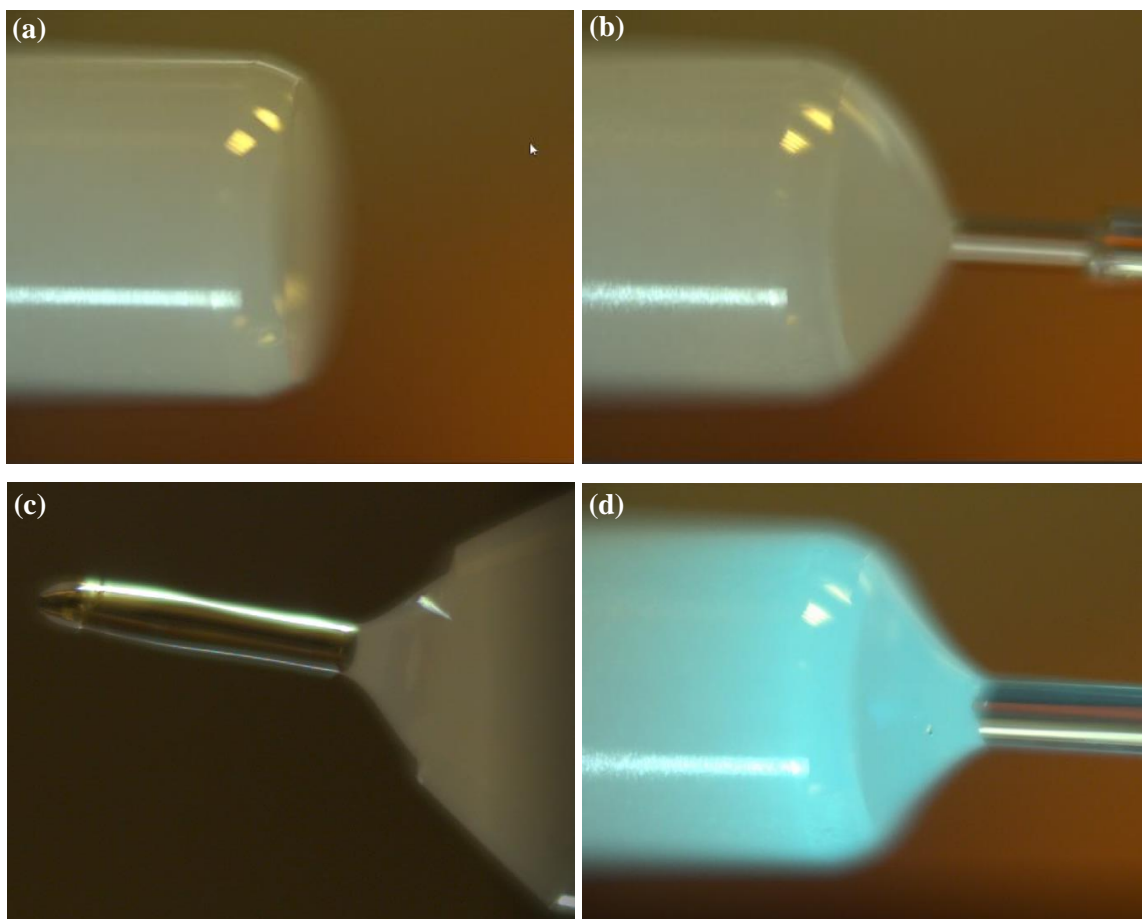
| <i>2.1. tabulas turpinājums</i> | |
|--|---|
| <i>Polikristāliskā suspensija pulēšanai 6μm</i> | <i>Buehler 6μm MetaDi™ Supreme Polycrystalline Suspension</i> |
| <i>Polikristāliskā suspensija pulēšanai 3μm</i> | <i>Buehler 3μm MetaDi™ Supreme Polycrystalline Suspension</i> |
| <i>Polikristāliskā suspensija pulēšanai 1μm</i> | <i>Buehler 1μm MetaDi™ Supreme Polycrystalline Suspension</i> |
| <i>Galīgā pulēšana - 0,06 μm sola-gēla alumīnija oksīda suspensija</i> | <i>Buehler MasterPrep Suspension</i> |
| <i>Galīgā pulēšana - 0,06 μm amorfa koloidālā silīcija dioksīda suspensija</i> | <i>Buehler MasterMet Suspension</i> |

2.3. Šķiedru izgatavošana un sagatavošana

Lai izgatavotu optiskā šķiedra uzgali, tika izmantoti keramiskās šķiedras uzgali *Thorlabs CF126* no cirkonija ar izmēriem ($\varnothing 2,5 \times 10$ mm) ar $126+3/-0$ μm priekš 125 μm optiskām šķiedrām. OGS prototipēšanai paraugiem tika izmantota vienmodu optiskā šķiedra *Thorlabs HP630* ar modas laukuma diametru $MFD=4,0\pm 0,5$ μm pie $\lambda=630$ nm un apvalka diametru 125 ± 1 μm (specifikācijas sk. 3. pielikumā). LMR prototipēšanai tika izmantotas daudzmodu optiskās šķiedras *Thorlabs FG025LJA* un *FG050UGA* ar apvalku diametriem 125 ± 2 μm un $125+1/-2$ μm. *FG025LJA* tiek izmantota kā ievadīšanas šķiedra ar serdes diametru 25 ± 3 un $NA=0,100\pm 0,015$ (sk. 4. pielikumā). *FG050UGA* tika izmantota kā šķiedra gaismas izvadīšanas no čipa. Serdes diametrs tam bija 50 ± 1 μm un $NA=0,22\pm 0,02$ (sk. 5. pielikumā). Lai izgatavotu šķiedru ar uzgali bija nepieciešams ielīmēt šķiedru uzgalī, slīpēt un pulēt to galu. Šķiedras ielīmēšanu veica izmantojot izstrādāto *Mikro-optikas salīmēšanas iekārtu*.

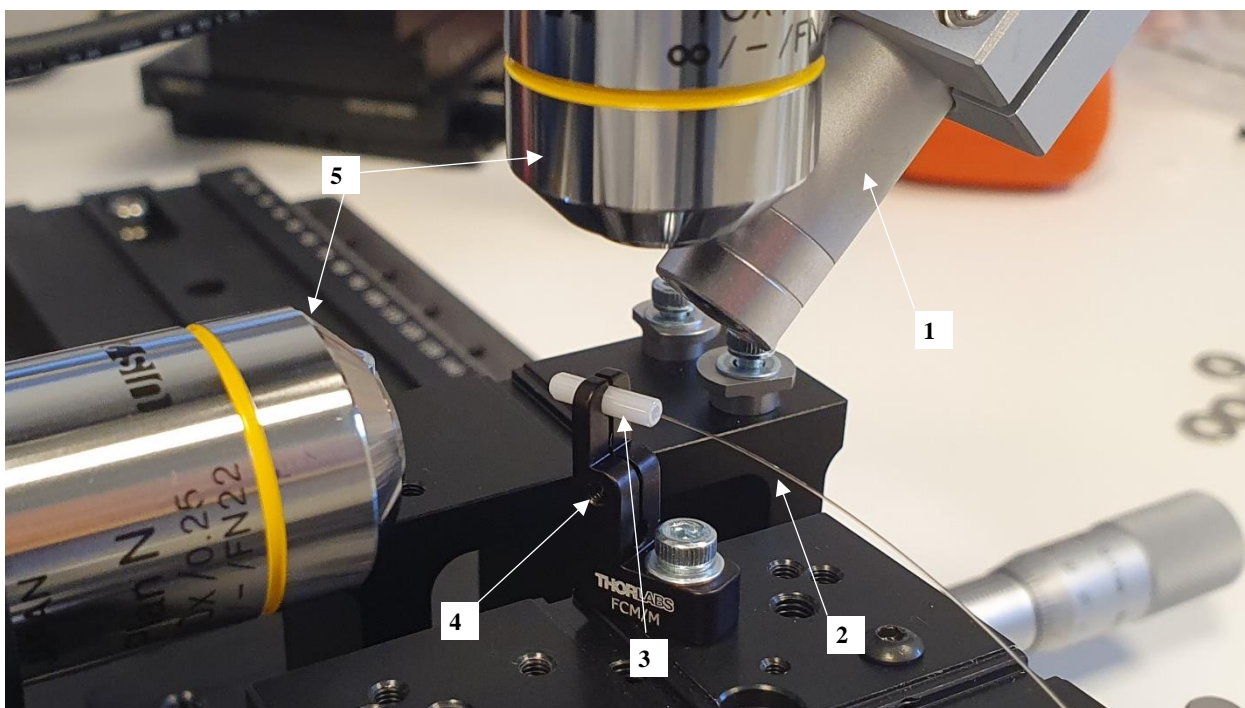
Keramiskais uzgalis tika nostiprināts *Thorlabs FCM-13/M* fiksatorā uz vienas platformas (14). No optiskās šķiedras spoles ar šķērēm tika nogriezts gabals ar vēlamu garumu. Optiskās šķiedras gals tika attīrīts 13 ± 1 mm garumā no akrilāta aizsargpārklājuma, izmantojot 125-135 μm optiskās šķiedras 250 - 343 μm pārklājumu noņemšanas rīku *Microstrip (Thorlabs T06S13)*. Šķiedras gals tika attīrīts ar bezputekļu salvetēm *Kimwipes (Thorlabs KW 32)* un izopropanolu. Šķiedra tiek nostiprināta uz XYZ nano-metriskās platformas ar slīpuma un līkuma leņķa θ_{XY} regulēšanu (4). Izmantojot pozicionēšanas kameras (13) izsekoja šķiedras pārvietošanu ielīmēšanas laikā.

Ar kameru palīdzību, izmantojot īlenu, manuāli tika uzklāts UV-cietējošas līmes piliens $<10\mu\text{l}$ uz keramiska uzgaļa gala, kur bija atradies konusa dobums priekš šķiedras (sk. 2.8. att.-a/b). Tālāk, šķiedra tika ielikta uzgaļa kanālā (sk. 2.8. att.-b) tā, lai šķiedras gals izspiestu līmi no otras uzgaļa puses un izietu cauri (sk. 2.8. att.-c) līdz šķiedras pārklājums iebrauktu uzgaļa konusa dobumā, pieskaroties līmei (sk. 2.8. att.-d).

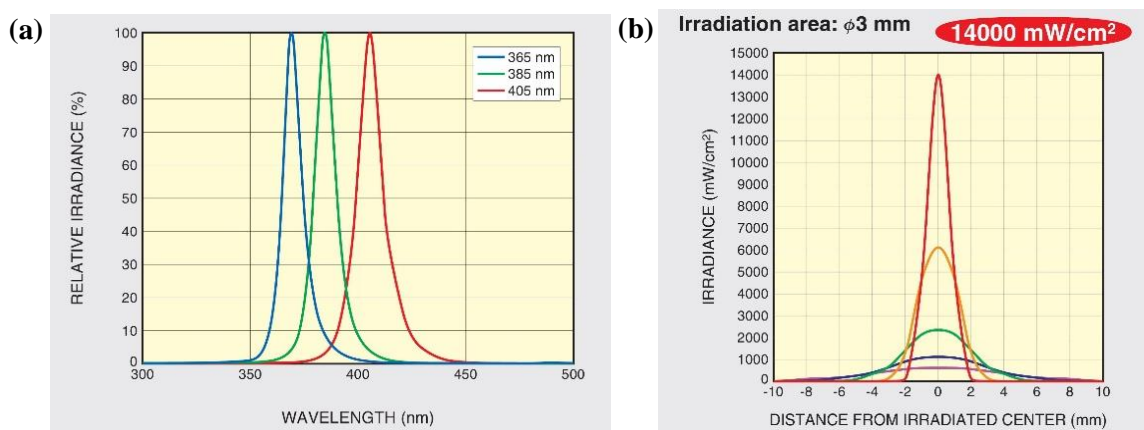


2.8. att. Optiskās šķiedras ielīmēšanas procedūra (skats no augšas): a). uzgalis nostiprināts ar konisko dobumu ārā; b). uzklāta līme un ielikta attīrīta šķiedra; c). šķiedras gals izspiests ārā uzgaļa otrā pusē kopā ar līmi; d). šķiedra ielikta iekšā līdz polimēra slāņa galam un apstarota ar UV

Sagatave tika apstarota ar UV gaismu (sk. 2.9. att.) izmantojot UV-diodi *Hamamatsu Lightningcure LI4310-210* ar viļņa garumu 385 nm gaismas ievadīšanas iekārtā (sk. 2.10.-a att.). UV-gaismas diodei bija objektīvs kurš nodrošina gaismas fokusēšanu Ø3 mm punktā (*LI4310-200+E11923-010*), nodrošinot maksimālo apstarošanu līmes atrašanas vietā (sk. 2.10.-b att.). Atkarībā no UV starojuma jaudas blīvuma, cietināšanas ātrums apstarošanas punktā varēja tikt regulēts. Diodei bija iespējams programmēt jaudu 1–100±1 % (no 0 līdz 14 W/cm²), ekspozīcijas laiku 0-300±0,1 sek., izmantojot *LED* kontrolleri (*Lightingcure C14052-1-A3*), un attālumu no parauga, izmantojot turētāja skrūves.



2.9. att. Izveidota optiskā šķiedra ar uzgali: 1 – UV-avots; 2 – optiskā šķiedra; 3 – uzgalis no cirkonija; 4 – uzgala turētājs; 5 – novērošanas kamera



2.10. att. Hamamatsu Lightningcure L14310-210 UV-diodes spektrs un gaismas intensitātes sadalījums pa apgaismojuma laukumu

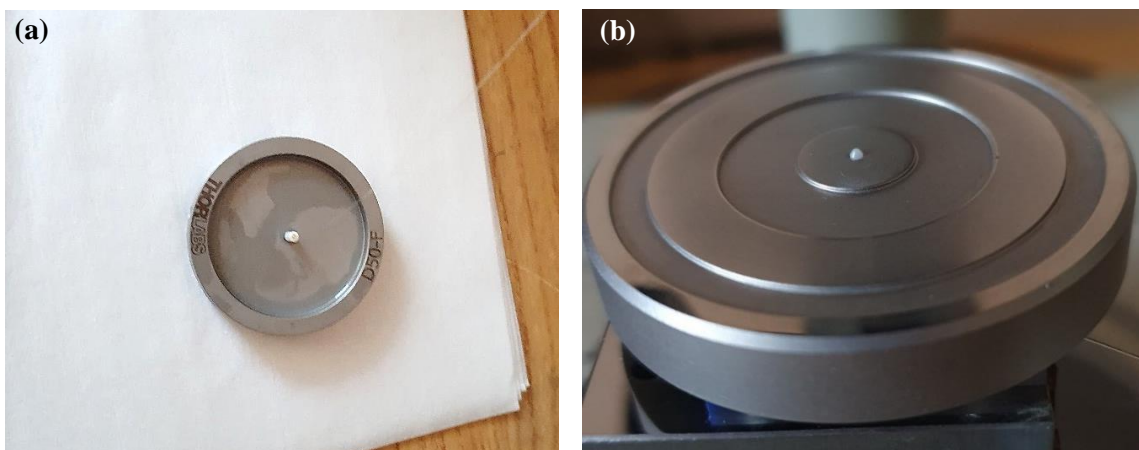
UV gaismas avots pārvietojās kopā ar augšējo novērošanas kameru un bija fokusēts uz aktīvas darba zonas. Uzgalis tiek apstarots trīs vietās visā garumā ar jaudu no 1 līdz 14 W/cm² un eksponēšanas laiku no 10-300 sekundēm UV-cietošām līmēm *NOA 61* vai *Addison Clear Wave AC-535AN-F* (sk. 2.2. tabulā). Apkartējās vides parametri: ofisa telpa 17-22±1°C, mitrums 26-47%RH.

Izmantoto līmju būtiskie parametri (no ražotāja specifikācijām)

| Parametrs | Līme | |
|---|--|---|
| | NOA 61 | AC-535AN-F |
| <i>Eksponēšanas viļņgarums [nm]</i> | 320-380 | 320-400 |
| <i>Eksponēšanas doza [J/cm²]</i> | 3 | 10 |
| <i>Termiskā pēcapstrāde</i> | 50°C, 12 stundas | 60-100°C, 30-60 minūtes |
| <i>Laušanas koeficienti</i> | <i>n</i> (643,8 nm)=1,5562 <i>n</i> (589,6 nm)=1,5594 <i>n</i> (546,1 nm)=1,5694 <i>n</i> (480,0 nm)=1,5961 <i>n</i> (435,8 nm)=1,5754 | <i>n</i> (1550 nm)=1,558 <i>n</i> (1310 nm)=1,562 <i>n</i> (589 nm)=1,578 |
| <i>Viskozitāte [cps]</i> | 300-450 | 4500-5000 |
| <i>Junga modulis [MPa]</i> | 930-1103 | 2300 |
| <i>Stiepes modulis [MPa]</i> | 19-24 | 61 |
| <i>Pagarinājums pie neveiksmes [%]</i> | 35 | 4 |
| <i>Shore D cietība</i> | 85 | 95 |
| <i>Lineāra saraušanās [%]</i> | 1,5 | <0,2 |
| <i>Stiklošanas temperatūra T_g [°C]</i> | >50 | 165 |
| <i>Darbības temperatūra [°C]</i> | No -150 līdz 125 | No -60 līdz 200 |

Pēc UV-cietināšanas, tika veikta termiskā cietināšana, izmantojot temperatūras žāvkapi, noturot uzgaļus ar AC-535-AN-F5 līmi 30-60 minūtes 60-100°C temperatūru diapazonā, bet ar NOA 61 – 12 stundas pie 50°C, saskaņā ar ražotāja instrukcijām. Pēc atdzesēšanas, līmes un ekspozīcijas parametru derība tika izvērtēta mehāniski manuālā stiepšanas testā uz Mikro-optikas salīmēšanas iekārtas novērojot iespējamās sagataves sagraušanas ar kamerām.

Lai izveidotam uzgalim un šķiedrai būtu optikai piemērota izejošās malas virsma, tā bija jāslīpē un jāpulē. Optiskās šķiedras uzgalis tika ielikts šķiedru galu pulēšanas turētājā Thorlabs D50-F (sk. 2.11.-a att.) un nostiprināts ar skrūvi. Lieks šķiedras gals tika nogriezts ar safīra asmeni un nolūzts (sk. 2.11.-b att.).



2.11. att. Šķiedras uzgalis ar ielīmētu šķiedru nostriprināts turētāja pirms pulēšanas: a) skats no augšas; b). skats uz pulēto pusi

Pulēšanas procedūra tika veikta analogiski fotoniskajā čipa slīpēšanas un pulēšanas procedūrai (sk. 2.2 Fotonisko čipu sagatavošana). Slīpēšanas un pulēšanas procesa laikā tika veikta vizuālā pārbaude, izmantojot *MBS-9* optisko mikroskopu ar palielinājumu diapazonu 5–100X. Mērķis bija dabūt uzgaļa frontālo virsmu perpendikulāru ielīmētai šķiedrai, kā arī plānu, glūdu un bez vizuāliem defektiem (skrāpējumiem, plaisām, iebūvētam daļiņām). Atsevišķi tika pārbaudīta šķiedras izeja ar optisko mikroskopu *Nikon Ci* ar palielinājumu 50X-1000X robežās. Pēc vizuālas kontroles šķiedrai tika veikti signāla kvalitātes un jaudas mērījumi, kas bija ļāvis izvērtēt zudumus.

2.4. Zudumu mērīšanas metodika

Viļņvadu zudumus grūti novērtēt reālām fotoniskajām ierīcēm, piemēram – OGS, , jo tiem bija funkcionālie elementi un savienojumi, kuri strādā atšķirīgi atkarībā no gaismas ievadīšanas virziena. Turklāt, apskatītās literatūrā mērīšanas rezultātiem varēja ietekmēt apkārtējā vide, jo tika izmantoti objektīvi lai ievadītu gaismu fotoniskā ierīcē vai optiskā šķiedras tika novietotas neciešā kontaktā ar viļņvadiem. Tāpēc, sadaļā 1.5. apskatīto metodi nepieciešams modificēt.

Gaismas ievadīšanas procedūra fotoniskajam čipam ar optiskām šķiedrām:

1. Tika mērīta jauda P_B no optiskās šķiedras, kas pievienota gaismas avotam.
2. Gaisma tika ievadīta fotoniskajā čipā, izmantojot optisko šķiedru.
3. Optiskā šķiedra tika pozicionēta ieejas viļņvada priekšā, novietota ciešā kontaktā ar to un pielīmēta pie tā.

4. Pie fotoniskā čipa izejām tika pozicionēts izvadīšanas šķiedras uzgalis, atrasts no čipa izejošais signāls, izmantojot fotodetektoru, un pie čipa izejas tika pielīmēta šķiedra ar uzgali, nemainot gaismas ievadīšanas nosacījumus ieejas šķiedrai.
5. No izvadšķiedras gala tika mērīta izejošā signāla jauda – P_F .

Tā kā netika veikti atsevišķi *SU-8* viļņvadu zudumu pētījumi, tika pieņemts, ka reālie *SU-8* viļņvada zudumi atbilst teorētiskajiem 0,19 dB/cm pie $\lambda=635$ nm [37], 0,2 dB/cm [45] pie 1090 nm un zem 1 dB/cm priekš 300-500 nm diapazona [46]. *SU-8* absorbcijas ieguldījums tika uzskatīts par dominējošu.

Pēc gaismas ievadīšanas procedūras kopējie zudumi bija:

$$\alpha = 10 \cdot \log \frac{P_0}{P_F}, \quad (2.1)$$

kur P_0 – gaismas avota izejošās gaismas jauda, P_F - signāls no izvadšķiedras pēc fotoniskā čipa.

Kopējie gaismas ievadīšanas un izvadīšanas zudumi starp fotonisko čipu un optiskajām šķiedrām bija:

$$\alpha = 10 \cdot \log \frac{P_B}{P_F} - \alpha_{SU-8} - \alpha_{FE}, \quad (2.2)$$

kur P_F - signāls no izvadšķiedras pēc fotoniskā čipa, α_{SU-8} – fotoniskās ierīces zudumi, izvades α_{FE} – izvades optiskās šķiedras zudumi pēc ražotāja specifikācijām. Tā kā OGS čipam bija divas izejas, kopējie zudumi fotoniskajām čipam ar šķiedrām tika aprēķināti, izmantojot:

$$\alpha = 10 \cdot \log \frac{P_B}{P_{F1} + P_{F2}}, \quad (2.3)$$

kur P_B – signāla jauda no ieejas šķiedras pirms salīmēšanas procedūras, P_{F1} un P_{F2} – signāls no kreisās un labās OGS izejām caur šķiedrām. Fotoniskais ierīces zudumi tika aprēķināti kā:

$$\alpha_{SU-8} = \alpha_{SU-8}(\lambda) \cdot l, \quad (2.4)$$

kur $\alpha_{SU-8}(\lambda)$ ir zināmie zudumi materiālam vai viļņvadam pie noteiktā viļņgaruma un l – viļņvadu kopējais garums, kuru izmērīja ar *Nikon 150*.

Gaismas ievadīšanas zudumi no lāzera uz optisko šķiedru, kas tika izmantota gaismas ievadīšanai fotoniskajā čipā:

$$\alpha = 10 \cdot \log \frac{P_0}{P_B} - \alpha_{AB}, \quad (2.5)$$

kur P_B – signāla jauda no ieejas šķiedras pirms salīmēšanas procedūras, α_{AB} – optiskās šķiedras zudumi pēc ražotāja specifikācijām. Visu aprēķinu un mērījumu kopām tika izmantota vidēja vērtība ar standartā kļūdu *SE* [107]:

$$SE = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (2.6)$$

kur σ – standartā novirze un N – kopējais paraugu skaits.

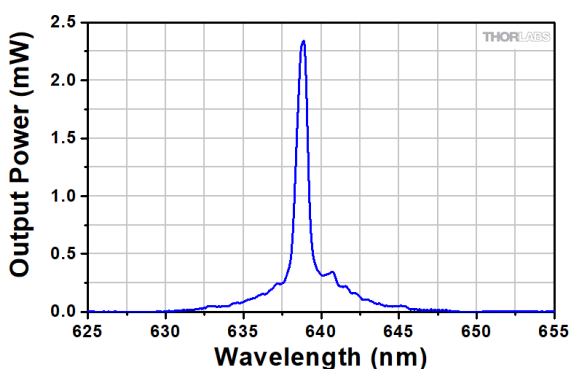
Galvenie zudumu faktori bija: 1). MFD nesakritība starp optiskajām šķiedrām un viļņvadiem; 2). fotoniskās ierīces un šķiedras uzgaļa slīpēšanas leņķa kļūda $\pm 0,01^\circ$ katrai malai; 3). pozicionēšanas kļūda gaismas ievadīšanas laikā bija zem $\pm 0,5^\circ$. Spraugas izmēram starp pulētu optiskās šķiedras serdi un SU-8 viļņvadu bija jābūt $< 1 \mu\text{m}$. Labi sagatavojot ievadīšanas elementus, precīzi ievadot gaismu no pulētas optiskās šķiedras un pielīmējot to ciešā kontaktā ar pulēto viļņvadu galu, gaismas ievadīšanas teorētiskus zudumus var izvērtēt, izmantojot sakarību (1.31).

2.5. Gaismas ievadīšana

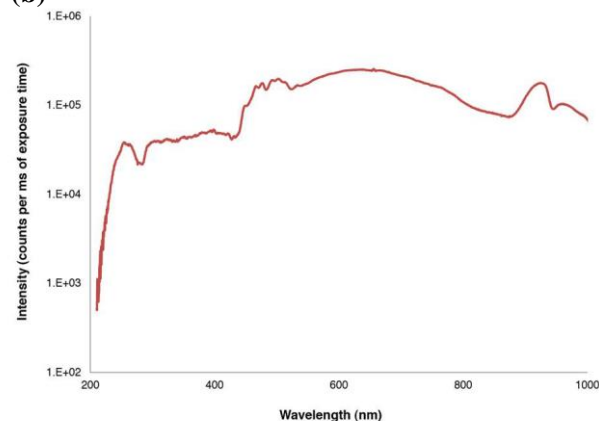
2.5.1. Gaismas ievadīšanas iekārta

Gaisma tika ievadīta OGS un LMR čipos no attiecīgā gaismas avota, izmantojot optisko šķiedru ar pulēto uzgali. Tika izmantoti divi gaismas avoti: 1). diožu lāzeris *Thorlabs HLS635* ar 635 ± 10 nm monohromatisko vienmodu gaismu priekš gaismas ievadīšanas vienmodu OGS čipā un 2). *DH-2000-BAL* balansēts deiterija volframa halogēna lampa ar balto gaismu priekš gaismas ievadīšanas daudzmodu LMR čipā.

(a)

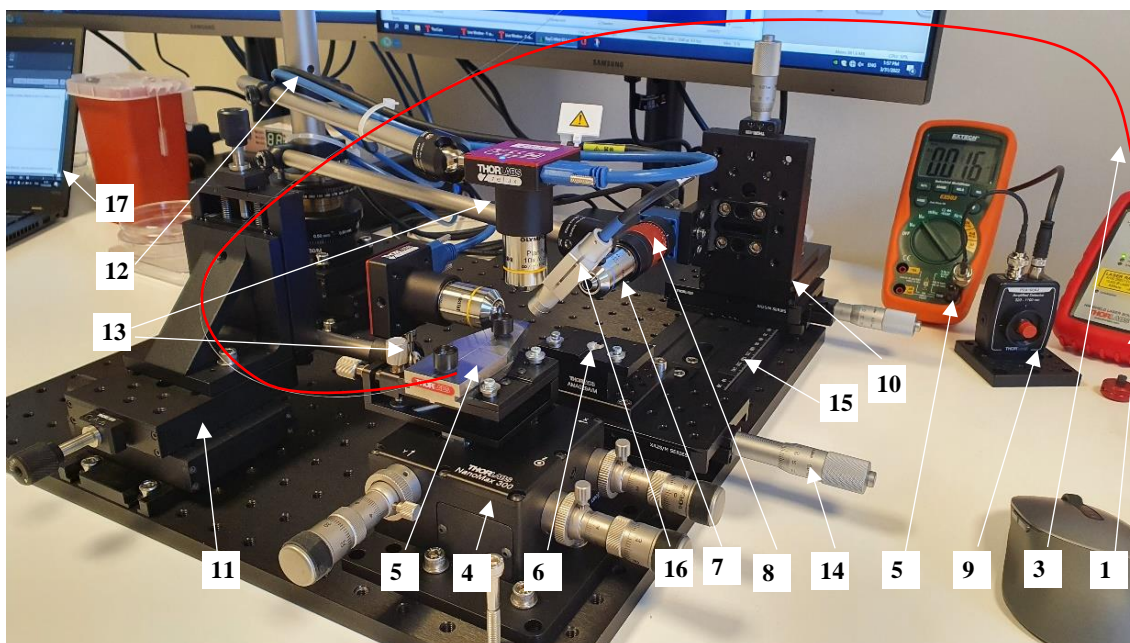


(b)



2.12. att. Izmantotu gaismas avotu spektri: a). *HLS635* lāzeris ar centrālo viļņvada garumu 635 nm; b). *DH-2000-BAL* ar baltas gaismas spektru

Optisko šķiedru aktīvai pozicionēšanai priekš viļņvadiem jāizmanto precīzi mikro-mehāniskie rīki un optiskā sistēma. Fotonisko čipu zuduma mērījumiem, sānu gaismas ievadīšanas mērījumiem un ārējas optikas pielīmēšanai tika izstrādāta Mikro-optikas salīmēšanas iekārta (sk. 2.13. att.).



2.13. att. Uzbūvētā mērīšanas un salīmēšanas iekārta

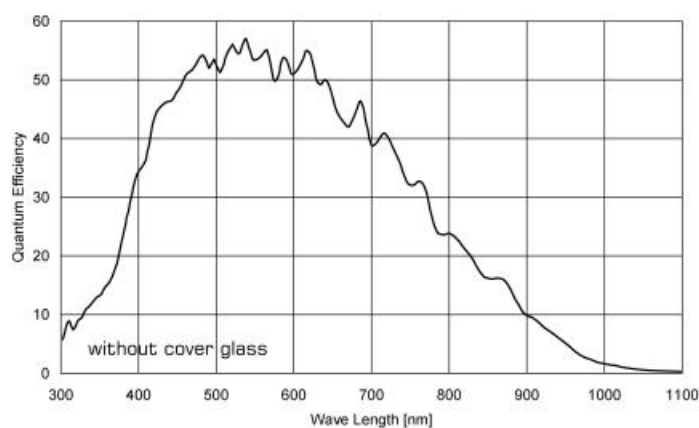
Iekārtas sastāvs: 1 – lāzers; 2 – FC šķiedras savienotājs (nav attēlots); 3 – optiskā šķiedra; 4 – XYZ nano-metriskā platforma ar slīpuma un līkuma leņķa θ_{XY} regulēšanu; 5 – optiskās šķiedras turētājs (vieta ievadīšanas optikai); 6 – paraugs; 7 – mērīšanas kameras optiskā sistēma; 8 - *CMOS-Nano-1.001* mērīšanas kamera; 9 – fotodetektors *Thorlabs PDA100A2* (savienots ar kalibrētu voltmetru); 10,11,12 – XYZ mikro-metriskās platformas; 13 – *CMOS* kameras priekš pētāmās optikas pozicionēšanas; 14 – X mikro-metriskā platforma paraugam; 15 – optiskā sliede paraugam un mērīšanas kamerai; 16 – UV gaismas diode līmes apstarošanai priekš optisko komponentu pielīmēšanas pie čipa; 17 – dators ar monitoriem.

Gaismas ievadīšanas optikas platforma (4) sastāvēja no XYZ nano-metriskas platformas ar slīpuma un pagrieziena regulēšanas iespējām un ļāva skenēt optiskā čipa malu $XYZ\theta_{XY}$ virzienos ar $\Delta XYZ = \pm 1 \mu\text{m}$ un $\Delta\theta_{XZ} = \pm 0,5^\circ$ precizitāti. Reālistiski, platforma ļāva nepārtraukti regulēt optikas pozīciju ar zem $1 \mu\text{m}$ robežās. Fotoniskais čips (6) tika novietots uz X-regulējamas platformas (14).

Precīzai optisko komponentu pozicionēšanai tika izmantotas mikro-metriskās platformas: (10) pētāmajam paraugam, (11) (12) priekš digitālām *CMOS* kamerām (*Zelux™ 1.6 MP*, *Thorlabs CS165CU/M*) (13) un lāzera profilēšanas kamerai (14) (15). Izmantojot ievadīšanas optikas precīzu pozicionēšanu ar mikro-metriskām platformām un signāla skenēšanu ar lāzera kameru, tika atrasta optimāla gaismas ievadīšanas optikas pozīcija, novērojot visstiprāko izejošo signālu no čipa izejošiem viļņvadiem. Pirms mērījumu sākšanas bija jāizveido fona kalibrācija (angl. – *background calibration*). Fona attēli bija jāiegūst bez lāzera apgaismojuma.

No fotoniskajā čipa izejošā gaisma tika savākta parauga pretējā galā ar optisko sistēmu (7), kas sastāvēja no 40X objektīva (*Olympus Plan N, RMS40X, NA 0,65*) un 2X ahromatiska Galileja stara paplašinātāja (*AR Coated: 400 - 650 nm, Thorlabs GBE02-A*), lai aizsargātu lāzera stara profilēšanas kameru (8) *CinCam CMOS-Nano-1.001*. Kā opciju, bija iespējams uzstādīt neitrāla spektrālā blīvuma absorbcijas filtrus (ND 1.0, 2.0 un 3.0). UV-absorbcijas filtrus. Atkarībā no eksperimenta dizaina tika izmantoti arī citi rīki. Sanu gaismas ievadīšanas metode pieļauj darbību kas nav atkarīga no viļņa garuma, tomēr bija diezgan jutīga pret sānu novirzes zudumiem.

Lāzera profilēšanas kamerai *CMOS-Nano-1.001* mērīšanas kamera bija *CMOS 2048x2048* (4,2 mega-pikseļu) matrica, ar pikseļu izmēriem $5,5 \times 5,5 \mu\text{m}$. Spektrāla uzņēmība bija 400-1320 nm robežās (sk. 2.14. att.) un signāla dinamiskais kontrasts 60dB (1:1000). Ekspozīcijas laiku var regulēt 100 μs – 100 ms robežās.



2.14. att. *CMOS-Nano-1.001* mērīšanas kameras spektrālā jūtība

2.5.2. *Gaismas ievadīšanas process*

Viļņvada optiskā raksturošana tika veikta, ievadot atbilstošo gaismas viļņa garumu fotoniskajā čipa viļņvadu struktūru ieejas viļņvada un savācot gaismu no tā izejas gala uz detektora. Gaismas ievadīšana tika veikta no $\lambda=635\pm 10$ nm lāzera gaismas avota *Thorlabs HLS635* vai baltas gaismas avota *Ocean Insight DH-2000-BAL*.

Pirmkārt, bija jāpārbauda šķiedras uzgaļa kvalitāti pēc pulēšanas ar signāla jaudas mērījumiem. Izejoša signāla kvalitāte pārsvarā tika pārbaudīta pievienojot šķiedru pie gaismas avota un analizējot izejošas gaismas jaudu. Papildus tam bija iespēja apkrafit izejoša signāla modas kvalitāti un izmērus izmantojot lāzera profilēšanas kameru gaismas ievadīšanas iekārtā.

Lai uzsāktu mērīšanas procedūra, iepriekš izveidotais šķiedras uzgaļa brīvais gals ar pliku šķiedru tika attīrīts no akrilāta aizsargpārklājuma 13 ± 1 mm garumā, izmantojot 125-135 μm optiskās šķiedras 250-343 μm pārklājumu noņemšanas rīku *Microstrip (Thorlabs T06S13)*.

Šķiedras gals tika attīrīts ar bezputekļu salvetēm *Kimwipes (Thorlabs KW 32)* un izopropanolu un ievietots lāzera gaismas avota FC adapterī, izmantojot *Thorlabs BFT1* un *B30126C3* šķiedras adapterus (sk. 2.15. att.). Šķiedras uzgalis tika mazgāts ar izopropanolu un vates kociņu un ievietots fotodetektorā *Thorlabs PDA100A2* ar *SM1FC2* adapteri zudumu mērīšanai. Tas bija atļāvis kvantitatīvi izvērtēt uzgaļa kvalitāti pēc slīpēšanas un pulēšanas.



2.15. att. Šķiedras uzgaļa pārbaudes procedūra

Fotodetektora aktīvs laukums ($\varnothing 9,8$ mm) bija uztvēris gaismu 320-1100 nm diapazonā. Fotodetektoram bija iespēja regulēt signāla pastiprinājumu 10-70±10dB robežās. Fotodetektora jūtība bija atkarīga no viļņa garuma (sk. 2.16. att.). Fotodetektors bija izdevis spriegumu 0-10 V diapazonā pēc atkarības:

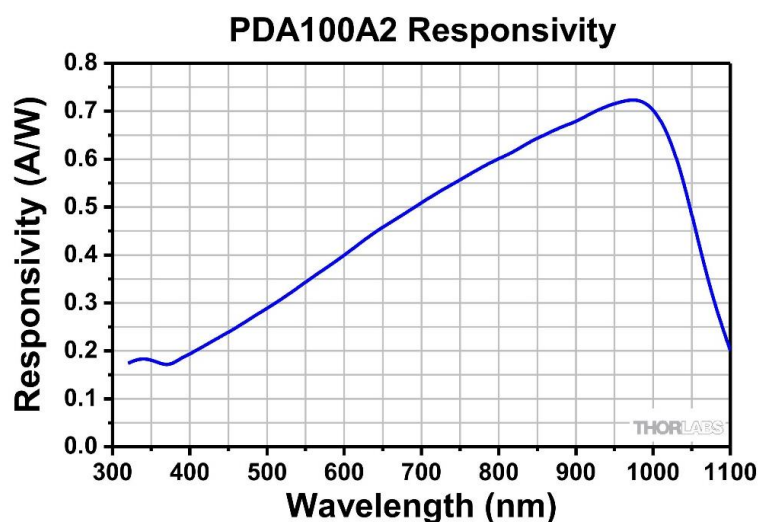
$$V_{OUT} = \Re(\lambda) \cdot TG \cdot SF \cdot P, \quad (2.7)$$

kur $\Re(\lambda)$ – spektrālā jūtība, A/W; TG – signāla pastiprinājums (angl. – *transimpedence pastiprinājums*), dB; SF – mērogojošs faktors; P – signāla jauda, W.

$$SF = \frac{R_{Load}}{R_{Load} + R_S} = 0,5, \quad (2.8)$$

kur R_{Load} – vada pretestība 50Ω (starp fotodetektoru un multimetru); R_S – fotodetektorā iebūvēta rezistora pretestība kas bija 50Ω.

No fotodetektora spektrālās jūtības grafika (sk. 2.16. att.) tika izrēķināti $\Re(635\pm 10$ nm) = 0,45±0,05 A/W, bet priekš baltas gaismas ņemta vidēja vērtība $\Re(300-1100$ nm) = 0,42±0,07 A/W. *DH-2000-BAL* gaismas avotam pie 600-650 nm bija maksimālā gaismas intensitāte, tāpēc $\Re=0,42\pm 0,07$ A/W bija piemērota vērtība mērījumiem. Turklāt, zudumu mērījumi pēc būtības izmanto relatīvās vērtības, tāpēc var izmantot iepriekš aprēķināto \Re , nevis integrēto vērtību.

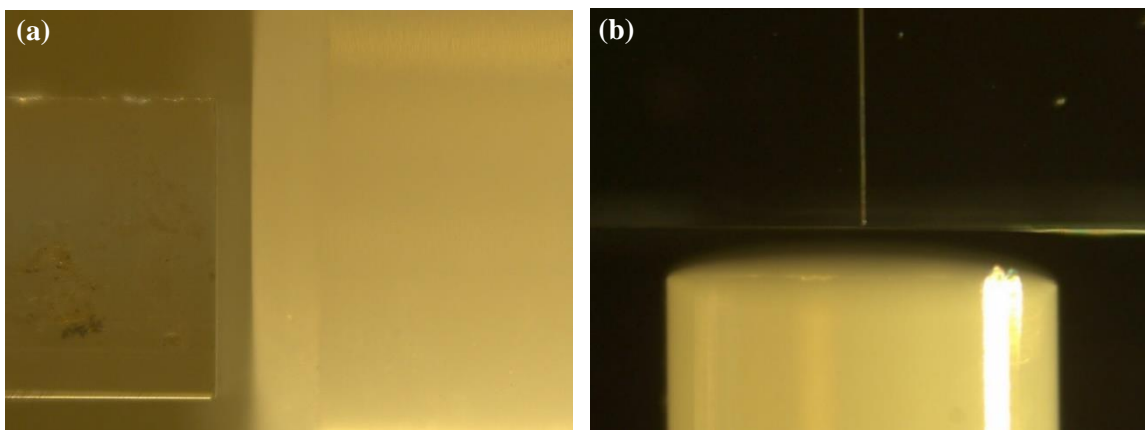


2.16. att. Fotodetektora PDA100A2 spektrāla jūtība

Thorlabs DVM1 multimetrs mēra spriegumu no fotodetektora 0-10 V ± 0,01 mV. Zinot lāzera avota specifictu jaudu, vajadzēja pārlicināties, ka jaudas zudumi šķiedrai ar pulētu uzgali nebija pārsnieguši optiskās šķiedras specifictus zudumus. Veicot mērījumus tika iegūti spriegumu vērtības un jauda tika aprēķināta pēc formulas:

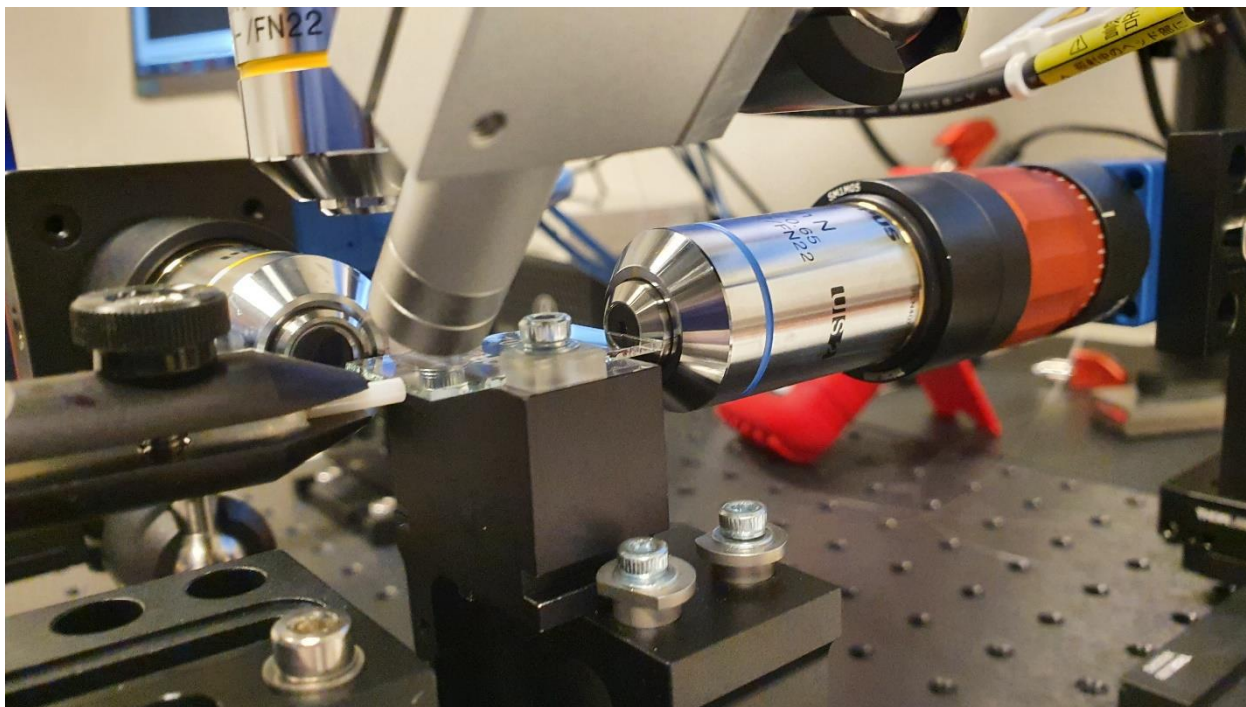
$$P = \frac{V_{OUT}}{\mathfrak{R}(\lambda) \cdot TG \cdot SF'} \quad (2.9)$$

Pēc veiksmīgas pārbaudes, uzgalis tika nostiprināts Mikro-optikas salīmēšanas iekārtā uz XYZ nano-metriskas gaismas ievadīšanas optikas platformas, izmantojot *Thorlabs HFF001* turētāju. Fotoniskais čips tika novietots uz tam paredzētas platformas (14) un piestiprināts ar parauga fiksatoriem pie turētāja *Thorlabs HHB001*. Čipa ievad malas tika noslaucītas ar viegliem pieskārieniem ar vates kociņu ar izopropanolu. Šķiedras uzgalis tika pietuvināts pie fotoniskajā čipa priekšējās malas kreisa gala. Ar CMOS kamerām (13) pārbaudīja čipa un šķiedras uzgaļa stāvokli (sk. 2.17. att.-a, b).



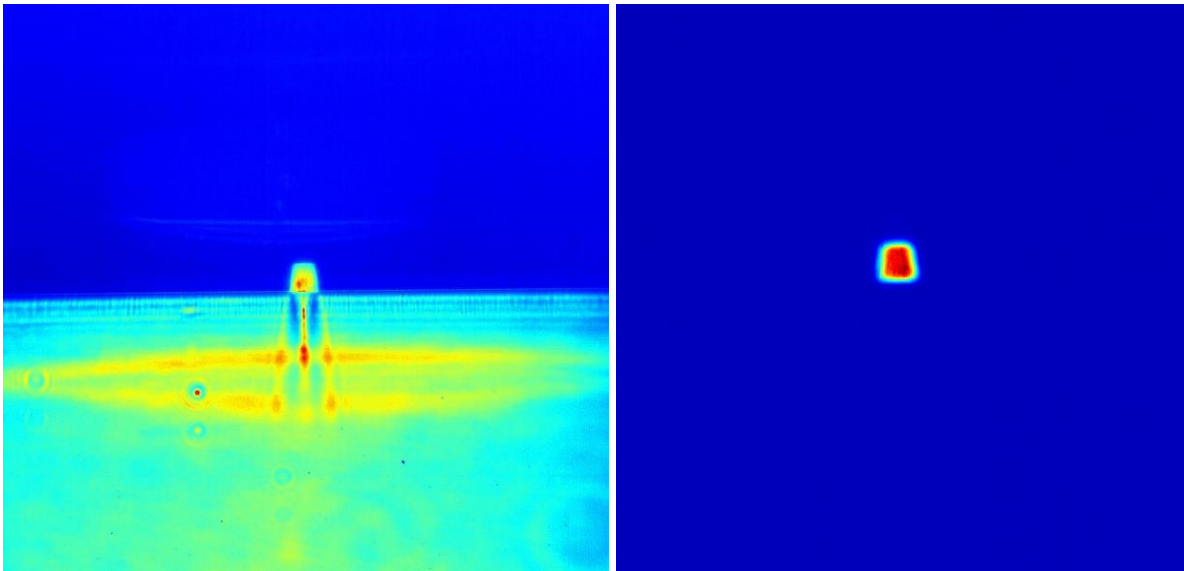
2.17. att. Šķiedra uzgaļa pozicionēšana pret pamatnes: (a) – Y-skats; (b) – šķiedras uzgaļa pozicionēšana priekšā viļņvadam

Ar CMOS kameru palīdzību, tika pielāgota šķiedras uzgaļa XYZ θ_{XY} pozīcija, lai uzgaļa un čipa malas būtu paralēlas Y- un Z-skata virzienos. Izmantojot parauga platformu (14) un Z-skata CMOS kameru (13), fotoniskajā čipa ievad-viļņvads tika novietots (X virzienā) pretī šķiedras uzgaļa izejai (sk.2.17. att.-c). Platforma (10) ar lāzera stara profilēšanas kameru (8) CinCam CMOS-Nano-1.001 pa sliedi (15) (Y virzienā) tika pietuvināta pie fotoniskajā čipa aizmugurējās malas (sk.2.18. att.).



2.18. att. Signāla uzņemšana no OGS parauga ar lāzera stara profilēšanas kameru CinCam CMOS-Nano-1.001 (Olympus Plan N RMS40X, Thorlabs GBE02-A)

Šķiedras uzgalis tika novietots nedaudz zemāk (Z virzienā) par ieejas viļņvadu, kad gaisma speciāli tika ievadīta pamatnē, nodrošinot izkliedi pa visu pamatnes malas laukumu. Izmantojot Y-virziena mikro-metrisko skrūvi profilēšanas kameras platformai (10), profilēšanas kamera tika fokusēta uz parauga aizmugurējās malas izmantojot signālu no kameras (sk. 2.19.-a att.).



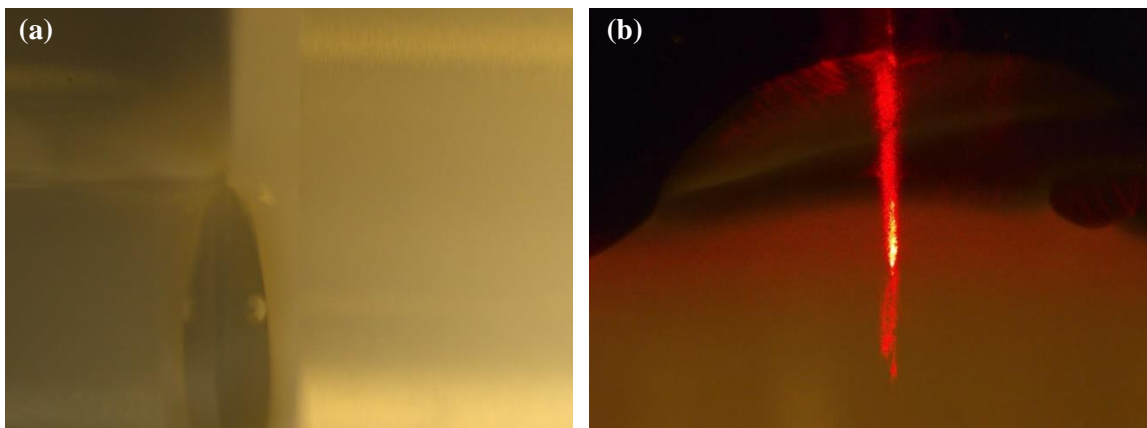
2.19. att. Piemēri: a). lāzera kameras fokusa pielagošana uz pamatnes malas un viļņvada pozīcijas atrašana, ievadot gaismu no šķiedras pamatnē; b). gaismas pilnīgi ievadīta viļņvadā (CMOS-Nano-1.001, 20X palielinājums)

Uzgalis tika atgriezts pozīcijā pret viļņvada ieeju un novietots tuvāk ($50\mu\text{m} > Y > 10\mu\text{m}$). Izmantojot X- un Z-virziena mikro-metriskas skrūves, ar profilēšanas kameru (10) skenēja aizmugurējo mala pēc signāla profilēšanas kamerā no fotoniskā čipa izejām (sk. 2.19.-b att.). Veicot nepieciešamas uzgaļa pozīcijas korekcijas XYZ θ_{XY} , tika atrasts maksimāls signāls no čipa izejas viļņvadiem.

Signāla modas forma tika analizēta, izmantojot *RayCi V2.6 Std.* programmatūru. Mērķis: stiprs, apaļš signāls. Ekspozīcijas laiks un pastiprināšana tika izvēlēta tā, lai signāls nebūtu pārsātināts, bet būtu pietiekoši stiprs priekš analīzes. Alternatīvi, kameras programmatūra automātiski pielāgoja ekspozīcijas laiku/pastiprinājuma vērtību (50%-90% apgaismojums). Analizējot gaisa kūļus ar kameru jāņem vērā esošo objektīvu konfigurāciju, galvenokārt palielinājumu. Kameras programmatūra mēra modas izmērus attiecīgi pret kameras pikseļu izmēriem. Tādēļ, definējot lai iekārta aprēķināja modas izmērus mikrometros, tas izdod izmērus kā 1 pikselis bija $5,5 \times 5,5 \mu\text{m}$. Turklāt, aprēķinot gaismas kuļā reālus ģeometriskas parametrus, jādala modas izmērus kas doti no kameras uz attiecīgo objektīvu sistēmas palielinājumu.

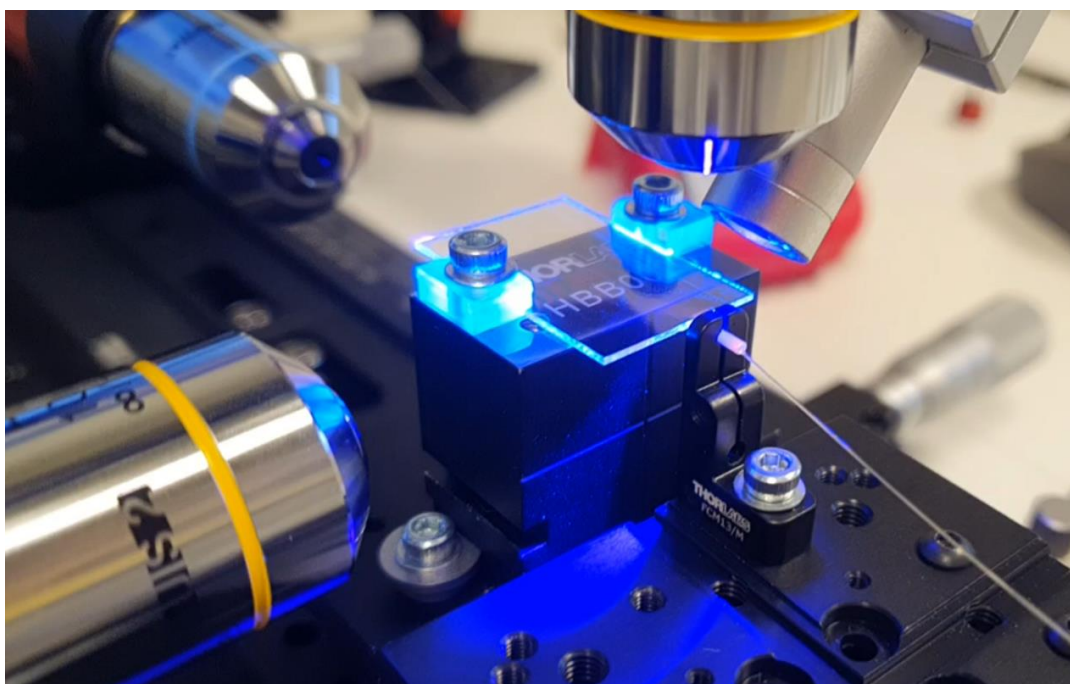
Tālāk, šķiedras uzgali nobīdīja ap $2000\mu\text{m}$ Y- virzienā. Ar CMOS kameru palīdzību, manuāli izmantojot īlenu uz šķiedras uzgali tika uzklāts $\sim 2\mu\text{l}$ piliens ar UV-cietējošo līmi *Addison Clear Wave AC-535-AN-F5* ar laušanas koeficientu ap $n=1,576$ pie 635 nm vai *NOA 61* ar $n=1,555$ pie 635 nm . Laušanas koeficienti aprēķināti no specififikācijām (sk. 6. un 7. pielikumos). Abas līmes tika izvēlēti ar laušanas koeficientiem tuvāk *SU-8* un šķiedras serdes koeficientiem un bija jākalpo arī kā laušanas koeficienta pielāgošanas gēls.

Uzgali tika pietuvināts tuvāk pie čipa Y^+ virzienā 10-100 μm attālumā, tas bija ļāvis līmei ietecēt starp uzgali un fotonisko čipu pa visu uzgaļa laukumu. Pakāpeniski pietuvinot uzgali pie fotoniskajā čipa, balstoties uz profilēšanas kameras signāla, un veiktas nepieciešamas uzgaļa pozīcijas korekcijas $XYZ\theta_{XY}$, saglabājot maksimālo signālu no izejas viļņvadiem. Rezultātā, satuvināja uzgali ciešā kontaktā ar fotonisko čipu (sk.2.20. att.).



2.20. att. UV-cietējoša līme starp pamatni un uzgali: a). skats no malas; b). skats no augšas ar 635 nm gaismu kas tiek ievadīta viļņvadā

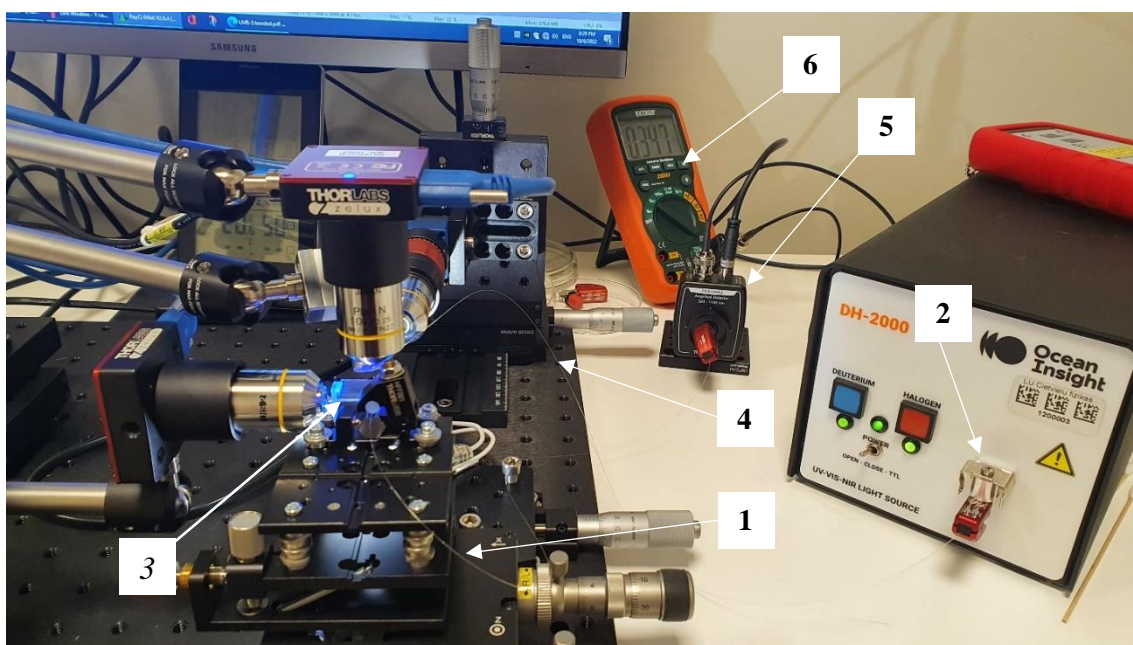
Tālāk, savienojuma vieta tika apstarota ar jaudu no 1 līdz 14 W/cm^2 un eksponēšanas laiku no 10-300 sekundēm, cietinot UV-līmi (sk. 2.21. att.). Lai samazinātu UV-gaismas pāreksponēšanas ietekmi uz mikroierīces *SU-8* viļņvadiem, līmes cietināšanas laikā tika izmantota UV-diode *Hamamatsu Lightningcure L14310-210* ar viļņa garumu 385 nm kam bija mazāka spektrālā pārklāšanās ar *SU-8* absorbcijas spektru salīdzinot ar tipiskiem 365 nm vai plaša UV spektra UV-cietināšanas lampām.



2.21. att. Uzgaļa pielīmēšana pie fotoniskā čipa: līmes cietināšana ar UV-gaismu

Pēc līmes sacietināšanas tika veikta gala modas analīze un mērījumi, izmantojot profilēšanas kameru un *RayCi V2.6 Std.* programmatūru, atkārtojot iepriekš aprakstīto mērīšanas procedūru. Tādā veidā bija iespējams salīdzināt signāla kvalitāti pirms un pēc šķiedru pielīmēšanas.

Lai pielīmētu izejas šķiedras pie fotoniskā čipa: 1). pielīmētais uzgalis un fotoniskais čips tika atbrīvoti no fiksatoriem; 2). fotoniskais čips tika pagriezts ar brīvo (aizmugurējo) malu pret XYZ nano-metriskas platformas gaismas ievadīšanas optiku; 3). jauna šķiedra tika uzstādīta ar uzgali uz platformas; 4). brīvo izejas šķiedras galu ievietoja fotodetektorā, izmantojot FC adapteri; 5). atkārtoja agrāk aprakstīto uzgaļa pielīmēšanas procedūru. Pielīmējot izejas šķiedras, precīzai uzgaļa pozicionēšanai tika izmantotas CMOS Y- un -Z kameras un signāls no fotodetektora. Izejošais signāls P_F no izejas šķiedrām tika mērīts ar fotodetektoru (sk. 2.22. att.).



2.22. att. LMR zudumu mērīšana: FG025LJA šķiedra (1) ar pliko galu gaismas avota ar SMA adapteri (2) un ar pulēto uzgali pie fotoniskajā čipa ievadmalas (3), izvadšķiedra FG050UGA (4) ar pulēto uzgali pie čipa izejas malas un ar pliko galu fotodetektorā ar SMA adapteri (5) un multimetrs jaudas mērījumu atspoguļošanai (6)

Pēc UV-cietināšanas ieejas un izejas viļņvadiem, tika veikta termiskā cietināšana lai prototipu var pārvietot un izmantot reālajā vidē ar temperatūras svārstībām. Prototips ar šķiedrām tika ielikts stikla Petri traukā un noturēts temperatūras žāvskapī 30-60 minūtēs pie 60-100°C, lai līme varētu pilnīgi sacietēt un pielāgoties uzgaļa un čipa kristāliskām struktūrām un saglabāt savas īpašības ražotāja specificētā mitruma un temperatūras diapazonā.

2.6. Gaismas jaudas sadalījuma modelēšana

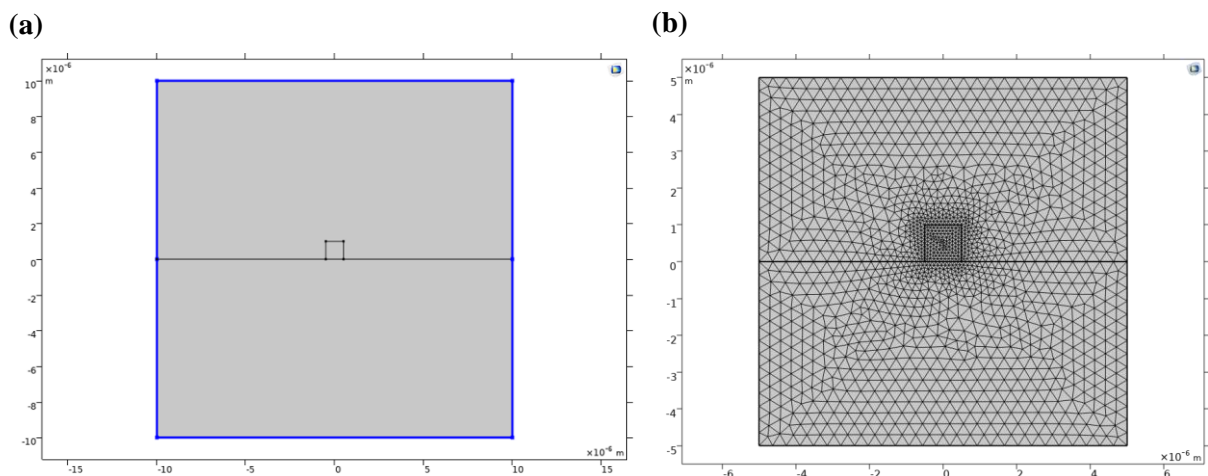
Tika veikta 2D viļņvada simulācija, izmantojot galīgo elementu metodi ar *Comsol Multiphysics 5.6* programmatūru ar elektromagnētiskā lauka moduli (*Electromagnetic Field Module (EFM)*), frekvences apgabalā (*The Wave Optics, Electromagnetic Waves, Frequency Domain*). Šīs modulis tiek izmantots, lai aprēķinātu elektriskos un magnētiskos laukus sistēmām, kuru viļņa garums bija salīdzināms ar vai daudz mazāks par pētāmo ierīci vai sistēmu. Simulācijas tika veiktas ideālam viļņvadam un neietver gaismas ievadīšanas un izvadīšanas nosacījumus, kas var ietekmēt izejoša signāla modas.

COMSOL vidē tika uzbūvēta ģeometrija taisnstūrainam *SU-8* viļņvadam un stikla pamatnei. Viļņvadu un sistēmas ģeometriskie izmēri un laušanas koeficienti tika definēti kā mainīgie, kas ļāva mainīt tas parametrus ievadot vērtības vai sakarības. Laušanas koeficienta $n(\lambda)$ sakarības priekš *SU-8* viļņvada un stikla pamatnes, tika ņemtas pēc Koši modeļa:

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^3} + \frac{D}{\lambda^4} + \dots, \quad (2.10)$$

kur A, B, C, D un citi koeficienti tika eksperimentāli iegūti ar *Spectral ellipsometer Woollam RC2– XI* iekārtu priekš *SU-8* no 300-1100 viļņgaruma spektra [106]. Gaisa laušanas koeficients pieņemts kā $n_{\text{gais}} = 1,000$.

Sistēmas izmēri tika izvēlēti pietiekoši lieli lai iztver iespējamo modas pārraidi ārpus viļņvadiem. Sistēmas izmēri bija 20x20 μm priekš 1 x 1 μm viļņvada un 10 x 1 μm konusveida savienojuma ievadmalas. Priekš 30 x 30 μm viļņvadiem tika uzbūvēta 100x100 μm sistēma. Sistēmas ārējai robežai tika piešķirts izkliedes robežnosacījums (*Scattering boundary condition*) ar cilindrisko izkliedēto viļņa tipu (*Scattered wave type: cylindrical*) (sk. 2.23.-a att.).



2.23. att. Uzbūvētā ģeometrijas piemēri ar a). 1 x 1 μm viļņvadu un izkliedes robežnosacījumu; b). elementu režģi priekš 30 x 30 μm viļņvadu.

Galīgo elementu režģis tika uzbūvēts ar blīvo trijstūra struktūru (angl. – *Free triangular*), kas ļāva definēt galīgo elementu izmēru un sadalījumu. Viļņvada šķērsgriezumam tika piešķirts režģa elementu maksimālais izmērs 0,1 μm , bet stiklam un gaisam – 0,5 μm . Pārējie režģa parametri, kā elementu sadalījums un to pielāgošana dotai ģeometrijai, tika definēti automātiski, kas ļāva programmai pašai izvēlēties piemērotāko triangulācijas metodi (sk. 2.23.- b att. un 8. pielikumā).

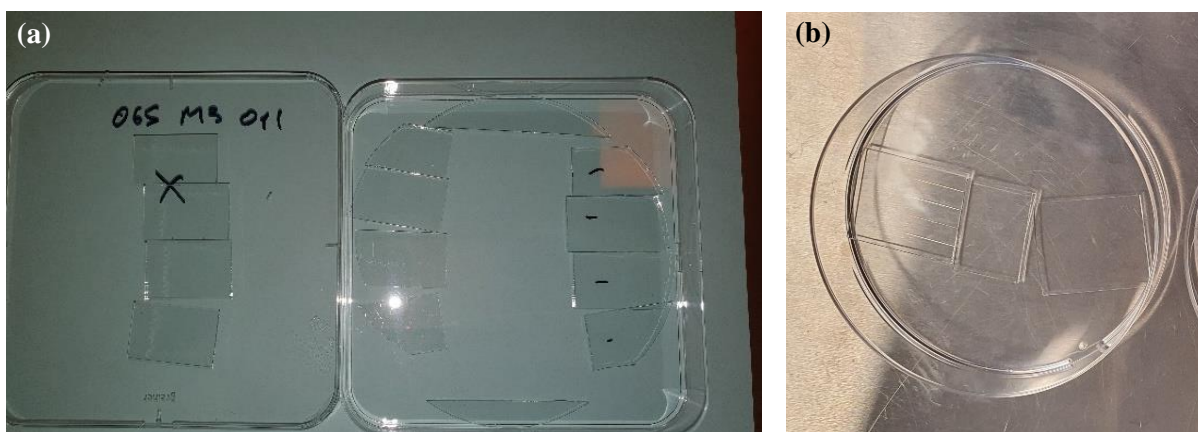
3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA

Fotonisko čipu izgatavošana, SEM analīze un gaismas lauka modelēšana $30 \times 30 \mu\text{m}$ viļņvadiem pie dažādiem viļņu garumiem tika realizēta ar laboratorijas kolēģu palīdzību.

3.1. Fotonisko čipu griešana

Pamatnes skrāpēšanas un laušanas metodes galvenais mērķis bija sadalīt pamatni atsevišķos fotoniskajos čipos un iegūt maksimāli taisnu viļņvada un parauga malu ar minimālu defektu skaitu, lai varētu efektīvi pielīmēt optisko šķiedru. Pamatnes tika iegrieztas izmantojot dimanta asmeni un salauzta izmantojot speciālas stikla laušanas knaibles kā aprakstīts 1.3.4. sadaļā.

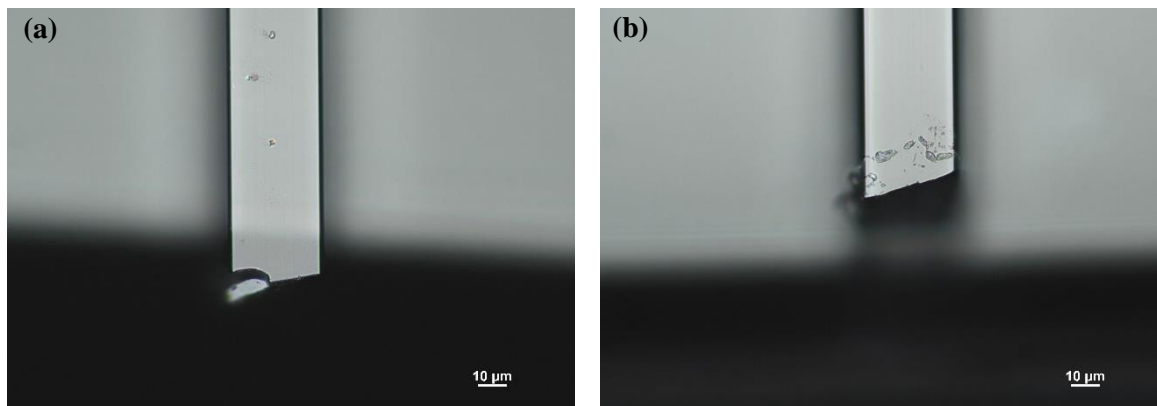
Mainot asmeņa dziļumu paraugiem no -5 līdz $0,1 \pm 0,01$ mm, pielikto spēku $5 - 581 \pm 27$ cN diapazonos. Izmantojot pārāk mazu spēku, zem 107 cN, asmens neiegriez stikla pamatni pietiekoši dziļi, un pamatne nelūzt iegriezuma vietās. Savukārt, pieliekot pārāk lielu spēku, piemēram, 294 cN, stikla pamatne salūzt pārāk agri – mazgāšanas vai litogrāfijas procesa karsēšanas laikā. Skrāpēšana ar dziļumu 0,06-0,10 mm noved pie intensīviem stikla virsmas bojājumiem gar skrāpēšanas līniju (sk. 9. pielikumā) un pie ātras asmeņa novecošanas, kas savukārt arī noved pie minētajiem bojājumiem. Tika atrasti optimālie iegriešanas parametri, kad pamatne tika viegli salauzta ar knaiblēm, gar iegrieztām līnijām ar gludu pamatņu malām (sk. 3.1. att.): 160 – 214 cN spēks, $0,02 \pm 0,01$ asmeņa dziļums un 60° asmeņa leņķis.



3.1. att. Pamatņu laušanas rezultāts: a). OGS paraugi (4 gab.) un b). LMR paraugs

Neatkarīgi no iegriešanas parametriem fotoniskā čipa malas lūst ar vertikālo leņķi līdz $\pm 10^\circ$ (sk. 9. pielikumā). Neatkarīgi no iegriešanas parametriem, viļņvadu gali nejaušā veidā lūst pirms vai pēc pamatnes malas un neseko pamatnes laušanas līnijai. Rezultātā viļņvadu gali nav tieši pie malas. Šis efekts izteikti tika novērots $30 \times 30 \mu\text{m}$ viļņvadiem LMR paraugos. Kad pēc salaušanas viļņvads pārkarājās pāri pamatnes malai (sk. 3.2.-a att.), nebija iespējams savienot

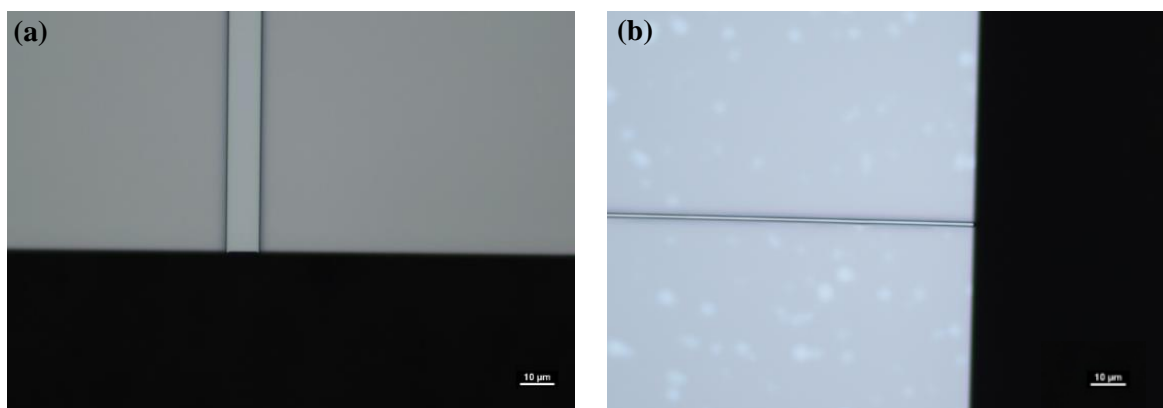
gaismas ievadīšanas konstrukciju ciešā kontaktā ar čipu, nesabojājot viļņvada galu. Pretējā gadījumā, kad viļņvada gals atradās pamatnes virsmas iekšienē tālu no tās malas (sk. 3.2.-b att.), ievadīšanas efektivitāte bija krietni mazāka, dēļ attāluma starp viļņvada un ievadīšanas optikas. Gaismas ievadīšanas efektivitātes eksperimenti atkarībā no viļņvada gala attāluma no malas netika iekļauti šī darba rezultātos.



3.2. att. LMR viļņvadu kvalitāte un attālums no malas pēc pamatnes sadalīšanas: a). viļņvads izceļas 13 μm aiz pamatnes malas; b). viļņvads bojats 14 μm attālumā no malas

Paraugi ar viļņvadu bojājumiem tālu no pamatnes malas ($>500 \mu\text{m}$), vai MCI struktūras OGS gadījumā netika tālāk apstrādāti. Paraugus ar viļņvadu bojājumiem $<500 \mu\text{m}$ no malas tika slīpēti līdz bojājuma vietai, pulēti, un tikai tad veikti optiskie mērījumi. Paraugiem ar viļņvadu galiem, kas atradās $\pm 10 \mu\text{m}$ no malas OGS paraugiem un $\pm 30 \mu\text{m}$ no malas LMR paraugiem tika veikti modu mērījumi pirms slīpēšanas un pulēšanas (sk. 3.5. sadaļā).

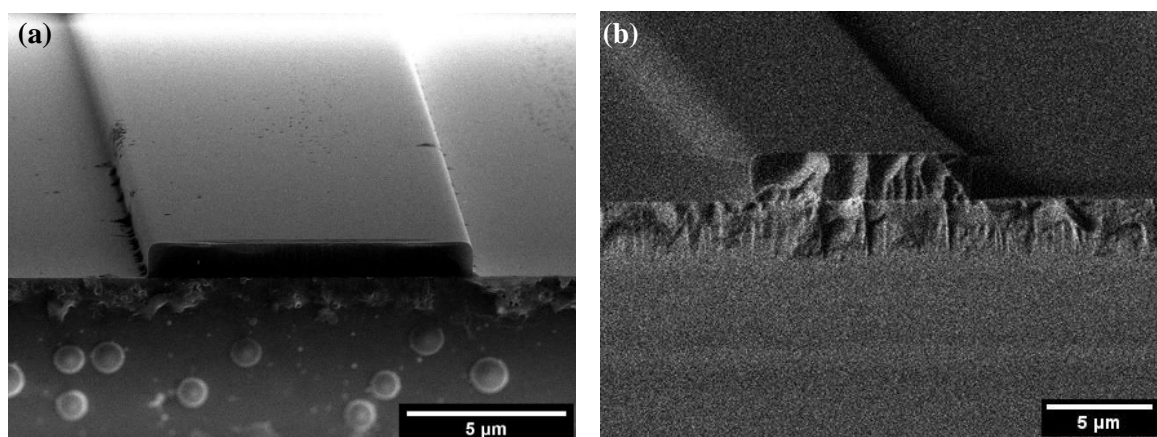
Litogrāfijas posmā sacietināšanas karsēšanas receptes parametri bija pielāgoti tā, lai uzlabotu SU-8 viļņvadu adhēziju un panāktu, ka polimēra viļņvada lūšana seko stikla substrāta plīšanas tendencei. Karsējot paraugus pie lielākām temperatūrām, 145-185°C, tika uzlabots viļņvadu laušanas rezultāts.



3.3. att. Viļņvadu galu atbilstošā kvalitāte pēc skrapēšanas un sacietināšanas karsēšanas optimizācijas: a). OGS konusveida savienojuma ievadmala; b). OGS 1 μm izeja.

OGS konusveida savienojuma ieejas malas kvalitāte tika apskatīta ar *SEM Helios 5 UX*. SEM analīzes paraugiem, kas pārklāti ar zeltu, nenodrošināja skaidru viļņvada gala un substrāta gala malu stāvokļa attēlu, bet ļāva skaidri apskatīt viļņvada un substrāta ārējo virsmu kvalitāti (sk. 3.4.-a. att.). Apskatīt paraugus bez zelta pārklājuma bija izaicinoši, jo ātri veidojās lādiņa uzkrāšanas uz dielektriskiem materiāliem, kas tieši šajā gadījumā bija stikls un polimērs. Bija nepieciešams smalkāk iestatīt iekārtas parametrus, lai samazinātu lādiņa uzkrāšanos, pielāgojot elektrona kūli un detektēšanas parametrus, kā arī bija jāsamazina paraugu apskates laiks.

Viļņvadiem, kas nebija pārklāti ar zeltu, varēja skaidri redzēt viļņvada gala malu. *SU-8* viļņvads seko stikla substrāta plīšanas modelim. Lielākā daļa defektu bija radusies no nelielām vertikālām plaisām, kas atrodas stikla pamatnes malā netālu no pamatnes virsmas pie viļņvadiem (sk. 3.4.-b. att.). Defekti, visticamāk, veidojās no liela sprieguma, kas bija izveidojies stikla pamatnē pēdējā laušanas brīdī tieši pie augšējās malas, kad tā pamatnes puse tika ielūzta apakšā izmantojot knaibles. Līdzīgi bija aprakstīts literatūrā [108], kur *SU-8* viļņvada gala kvalitāte atgādina defektus kā uz pamatnes malas.



3.4. att. *SU-8* konusveida savienojuma malas SEM attēli: a). ar zelta pārklājumu; b). bez zelta pārklājuma

Veiksmīgi sadalītiem paraugiem tika veikta vizuāla kvalitātes kontrole un viļņvadu izmēru mērījumi. Laterālie viļņvadu izmēri tika mērīti ar *Nikon 150* mikroskopu *NIS-D Elements* programmatūrā un viļņvadu augstuma mērījumi – ar *Profiler Dektak 150*. *Profiler Dektak 150* mērījumi tika veikti pie parametriem: skenēšanas garums – 50 μm, laiks – 30 sekundes, izšķirtspēja – 0,006 μm/paraugs, adatas spēks – 1 mg, mērīšanas diapazons – 6,5 μm. Mērījumu rezultāti apkopoti 3.1. tabulā.

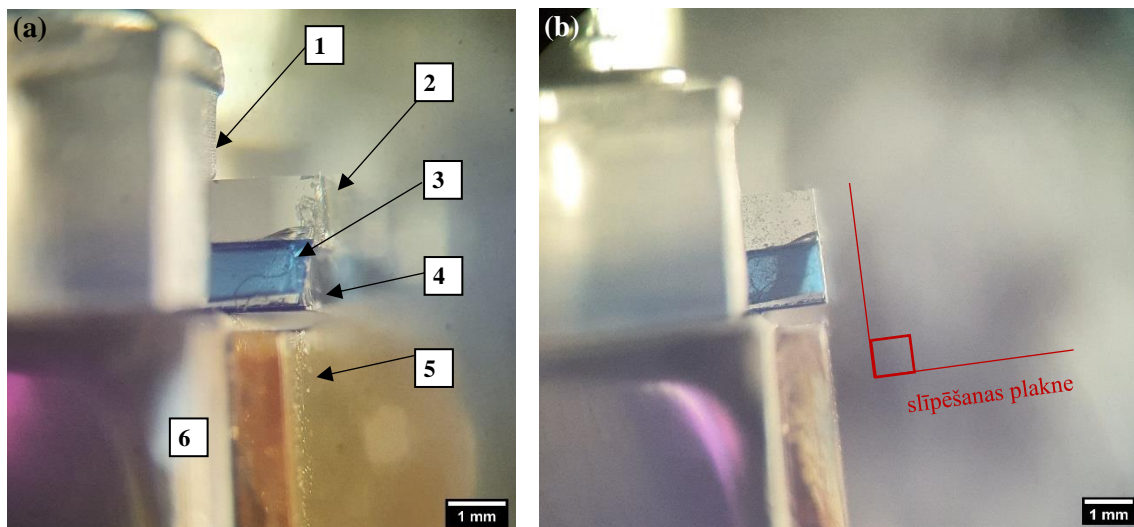
Eksperimentāli noteikti viļņvadu izmēri

| Viļņvadu izmēri | Paraugs | | |
|-------------------------|--|---|------------------------------------|
| | LMR ieeja/izeja (paraugu skaits: 3) | OGS konusveida savienojuma ieeja (paraugu skaits: 10) | OGS izejas (paraugu skaits: 10) |
| Platums, μm | $29,67 \pm 0,25$ | $9,71 \pm 0,32$ | $0,98 \pm 0,07$ |
| Augstums, μm | $29,92 \pm 2,47$ | $1,10 \pm 0,03$ | $1,10 \pm 0,03$ |

3.2. Fotonisko čipu pulēšana

Pēc pamatnes laušanas, fotoniskās ierīces malām bija vertikāls leņķis līdz $\pm 10^\circ$, kas apgrūtināja šķiedru pozicionēšanu tieši pie malas. Pulēšanas procesā mērķis bija izveidot fotoniskais ierīces pamatnei un tas viļņvadu galiem plakanas un glūdas malas bez defektiem.

Vispirms, tika attīstīts čipa sānu malu planarizācijas process, kura rezultātā bija jāiegūst plakana pamatnes mala ar $90 \pm 0,01^\circ$ leņķi pret parauga virsmu. Čipu malu slīpēšana tika veikta galvenokārt ar 600 grit smilšpapīru pie 200 apgr./min un 2-3 N slodzes, 3-8 minūtes atkarībā no fotoniskajā čipa malas sākotnējās pozīcijas ārpus parauga turētāja (100-500 μm) (sk. 3.5. att.).



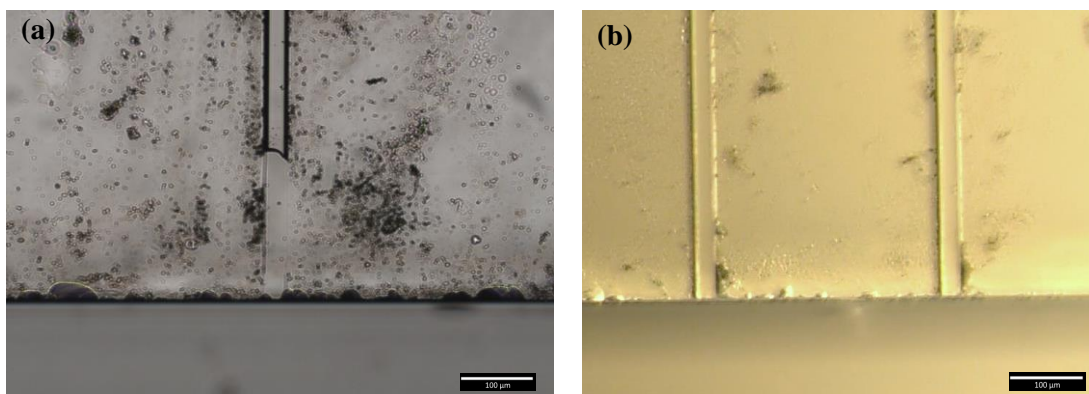
3.5. att. Fotoniskajā čipa malas skāts no sāniem: a). pirms un b). pēc planarizācijas procesa – slīpēta parauga mala perpendikulāri priekš slīpēšanas plaknes (1 –fiksatori; 2 –aizsargstikls; 3 –līpīga plēve; 4 – fotoniskā ierīce; 5 – stikla balsts; 6 – paraugu turētājs)

Malu līdzenums un leņķis attiecībā pret fotonisko mikroshēmu virsmu pēc pulēšanas netika mērīts. Tika pieņemts, ka iespēja izsekot $\pm 0,01^\circ$ leņķi pulēšanas laikā noteikti

nodrošinātu vismaz $<1^\circ$ malas leņķi attiecībā pret fotoniskās mikroshēmas funkcionālo virsmu un tās viļņvadiem.

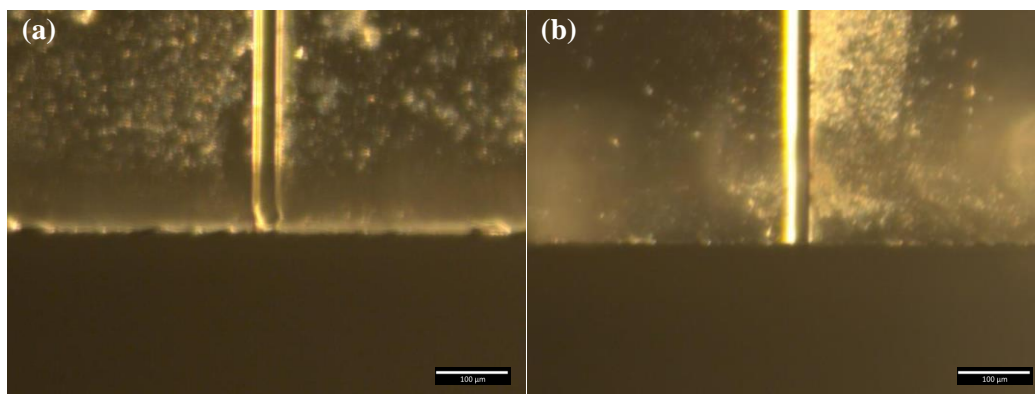
Pēc tam tiek veikta slīpēšana uz cieta auduma *TexMetP* ar 15 μm dimanta suspensiju: 200 apgr./min., 2N slodze, 3-9 minūtes. Ar to tika samazināti intensīvie bojājumi, kas bija radušies iepriekšējā slīpēšanas solī un sagatavot virsmu pulēšanai. Izmantojot rupjāku smilšpapīru (400 graudu smilšpapīru) kā pirmo soli pie 200 apgr./min, 2,5 N, 15 sekundes, tika samazinātas 600 graudu smilšpapīra slīpēšanas soļa laiks līdz 0,5–1 minūtei un slodzi līdz 1,5-2,0 N. Vēlāk sekojoša 15 μm dimanta slīpēšanas soļa laiks arī tika samazināts no 3–9 minūtēm līdz 2–3 minūtēm, visticamāk dēļ tā ka slīpēšanā radītas skrāpējumi stiklā malā palika vienmērīgāki. Biezākām pamatnēm, piemēram - 1,1 mm, bija nepieciešami garāki slīpēšanas soļi, jo bija vairāk stikla materiālu ko noņemt salīdzinot ar 0,5 mm pamatnēm.

Slīpēšanas procesa rezultātā fotonisko ierīču gali tika intensīvi bojāti (sk. 3.6.-a att.). Tas tika novērsts (sk. 3.6.-b att.) pielīmējot virs *SU-8* struktūrām lipīgo plēvi un stikla vāku kā parādīts 3.5.-a attēlā – nr. (3). Aizsarg vāks samazināja šķautņu bojājumus un aizsargāja *SU-8* viļņvadu struktūras no abrazīvām daļiņām.



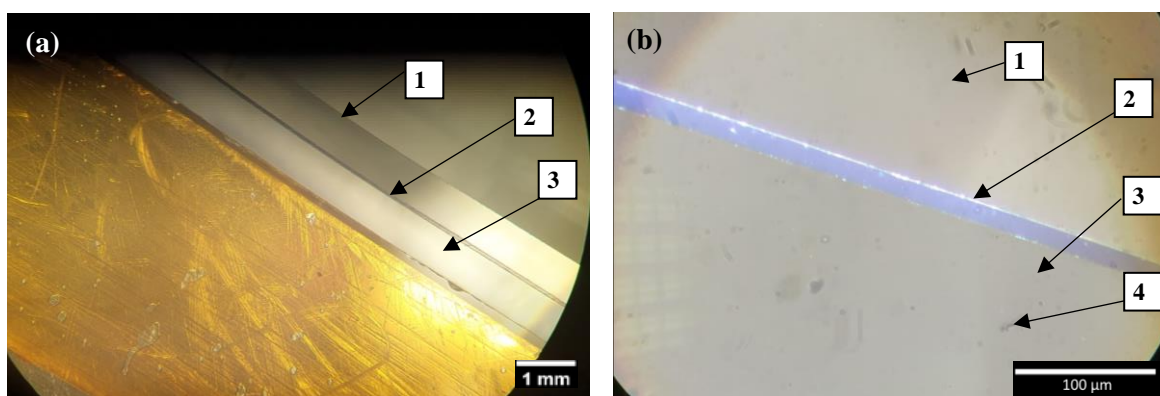
3.6. att. Slīpēšana un pulēšanas process LMR ierīcei: a). bez aizsargslāņa – bojāts viļņvada gals ; b). ar stikla vāku – viļņvada gali pie pamatnes malas

Turklāt, samazinot diska ātrumus no 200 apgr./min līdz 100 apgr./min slīpēšanas procesā tika samazināti viļņvada galu bojājumi un galu nobīde no savas sākotnējās pozīcijas (sk. 3.7. att.). Šie optimizācijas rezultāti sakrīt ar literatūru [69], kur 100 apgr./min ātrums bija piemērotāks polimēra struktūrām, bet 300-350 apgr./min bija piemēroti silīcija substrātam.



3.7. att. Viļņvadu galu kvalitāte LMR ierīcei pie dažādiem ātrumiem: a). >175 apgr./min un b). <175 apgr./min

Tālāk tika attīstīts pulēšanas process izmantojot dažāda veida audumus un pulēšanas suspensijas līdz stāvoklim kad ierīces mala ir plakana, gluda un bez vizuāliem defektiem (sk. 3.8. att.). Visi iepriekš minētie procesa uzlabojumu noveda pie gala optimāliem procesa parametriem un materiāliem (sk. 3.2. tabulā).



3.8. att. Fotonisku ierīču malu kvalitāte pēc pulēšanas: a). 20X palielinājumā un b). 100X palielinājumā (1 – stikla aizsargvaks; 2 – aizsargplēve; 3 – fotoniskā ierīce; 4 – putekļi objektīvu sistēmā)

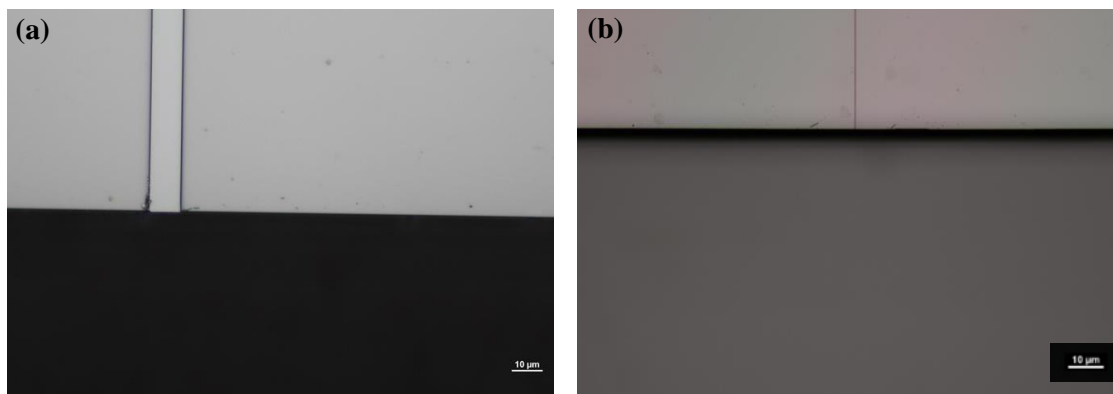
3.2. tabula

Pulēšanas procesa optimāli materiāli un parametri un OGS un LMR paraugiem

| Process | Materiāli | Spēks, N | Ātrums, apg./min. | Laiks, min |
|-------------|---|---------------|----------------------|---------------|
| Slīpēšana 1 | Disks ar smilšpapīru (izmērs:600grit); Lubrikants (50ml) | $2\pm 0,5$ | 100 ± 10 | $0,5\pm 0,25$ |
| Slīpēšana 2 | Disks ar smilšpapīru (izmērs:600grit); Lubrikants (50ml) | $2\pm 0,5$ | 125 ± 10 | $1\pm 0,5$ |

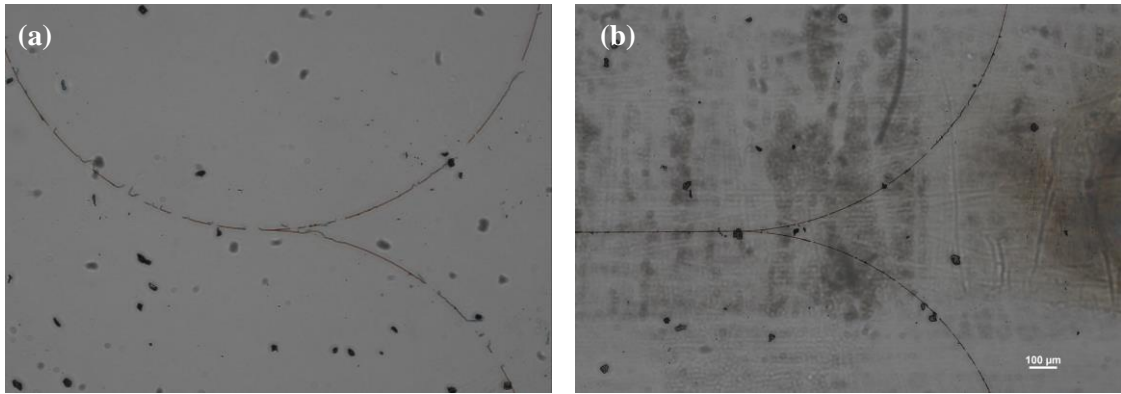
| <i>3.2. tabulas turpinājums</i> | | | |
|--|----------------|---------------|--------------|
| <i>Disks 10" TexMetP PSA; Pulēšanas emulsija MetaDi Supreme 15 μm (dimants);</i> | <i>1,5±0,5</i> | <i>125±10</i> | <i>3±1</i> |
| <i>Disks 10" VerduTex PSA; Pulēšanas emulsija MetaDi Supreme 6 μm (dimants);</i> | <i>1±0,5</i> | <i>150±10</i> | <i>5±2</i> |
| <i>Disks 10" VerduTex PSA; Pulēšanas emulsija MetaDi Supreme 3 μm (dimants)</i> | <i>1±0,5</i> | <i>175±10</i> | <i>3±0,5</i> |
| <i>Disks 10" ChemoMet PSA; Pulēšanas emulsija MetaDi Supreme 1 μm (dimants)</i> | <i>1±0,5</i> | <i>175±10</i> | <i>3±0,5</i> |

Galvenokārt, materiālu komplektā ietilpst cietie pulēšanas audumi *VerduTex* un *ChemoMet*, kuri saglabā ierīces malas plakanumu un audums minimāli trap viļņvadus procesa laikā. Gan OGS, gan LMR paraugu pulēšanas process uzlaboja substrāta malu virsmas līdzenuma kvalitāti, vizuālo raupjumu un likvidēja dziļās plaisas (sk. 3.8. att.), saglabājot vai uzlabojot viļņvadu kvalitāti (sk. 3.9.-a att.). Grūti izvērtēt 1 x 1 μm viļņvada gala kvalitāti ar optisko mikroskopiju.



3.9. att. Viļņvadu galu kvalitāte ar optimāliem parametriem un materiāliem: a). OGS 10μm plats konusveida viļņvads; b). OGS 1 μm plats izejas viļņvads

Diemžēl, neatkarīgi no izvēlētiem procesa parametriem un izmantotajiem materiāliem, OGS MCI struktūras tika iznīcinātas pēc pulēšanas procesa lipīgas aizsargplēves noņemšanas laikā (sk. 3.10. att.). Iemesli tam varētu būt: 1). pulēšanas suspensijas daļiņu nonākšana līdz MCI struktūrām un to sabojāšana; 2). SU-8 adhēzijas problēma.



3.10. att. OGS MCI struktūru bojājumi pulēšanas procesa rezultātā

Pirmkārt, acīmredzams 3.10. attēlā, kā pulēšanas pulveris nonāca līdz MCI struktūrām. Grūti novērtēt vai abrazīvas daļiņas atrodas starp plēvi un pamatni. Iespējams, abrazīvas daļiņas ar 1 līdz 6 μm izmēriem sabojāja 1 x 1 μm viļņvadus. Alternatīvi, aizsargstikla mehāniskā iedarbība uz SU-8 viļņvadiem varēja sabojāt viļņvadu struktūras. parauga stiprināšanas, pulēšanas vai noņemšanas laikā. Jebkurā gadījumā, jāizstrādā citu parauga stiprināšanas veidu ar citiem materiāliem. Otrkārt, Sliktās SU-8 adhēzijas gadījumā, lipīga plēve noņem viļņvadus no pamatnes. Vajadzētu izpētīt pamatnes tīrīšanas kvalitāti, rezista eksponēšanas parametrus un galvenokārt – papildus sacietināšanas karsēšanu. Alternatīvi var izmantot plēvi ar mazāko lipīguma pakāpi.

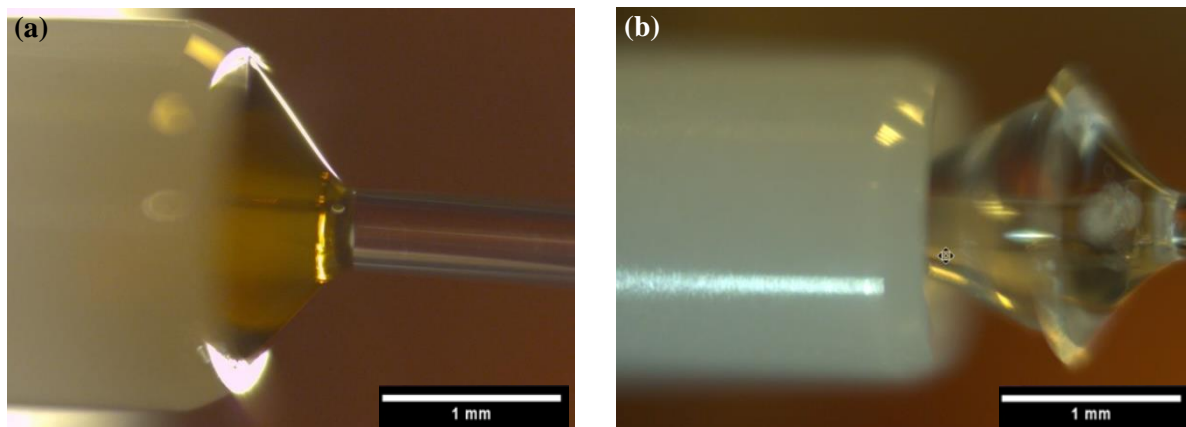
Tā kā stikls bija cietāks nekā polimērs, stiklam pulēšanas laikā jābūt seklāki skrāpējumi un līdz ar to labāka virsmas kvalitāte nekā SU-8 struktūrām. Turklāt, nepieciešama papildus SEM analīze viļņvadu galiem. Turklāt, iespējams būs nepieciešama turpmāka pulēšanas procesa attīstīšana: procesu parametri, jaunie materiāli, piemēram, papildus pulēšanas soļu pievienošana ar $<0,5 \mu\text{m}$ abrazīvām suspensijām viļņvadu kvalitātes uzlabošanai.

3.3. Šķiedru sagatavošana

Izgatavoto optisko šķiedru uzgaļu frontālai virsmai bija jābūt perpendikulāra ielīmētajai šķiedrai un bez vizuāliem šķiedras vai uzgaļa defektiem. Tās pulētajai malai bija jābūt bez skrāpējumiem, plaisām un iebūvētam daļiņām, īpaši, šķiedras laukā. Izejas šķiedras modai bija jābūt ar Gausa tipa intensitātes sadalījumu pa šķiedras serdes laukumu, un izejas signāla jaudai bija jābūt pietiekoši lielai, lai kopējie čipa un gaismas ievadīšanas zudumi ļautu veikt izejoša signāla jaudu.

Gan vienmodu, gan daudzmodu šķiedras ar 125 ± 1 , 125 ± 2 un $125+1/-2 \mu\text{m}$ diametriem tika veiksmīgi ielīmēti uzgaļos ar iekšējo kanālu $126+1/-0 \mu\text{m}$ caur konusa dobumu, sacietinot šķiedru ar UV līmēm NOA61 vai AC535-AN-F5 (sk. 3.11.-a). Par to liecināja šķiedras stāvokļa

nemainīgums zem mehāniskas slodzes pulēšanas laikā un gadījumos, kad šķiedrā tika stiepta ārā no uzgaļa. Gadījumā ja UV-cietināšanas parametri nebija optimāli – šķiedra neturējās pie uzgaļa (sk. 3.11.-b).



3.11. att. Šķiedras stiepšanas testa rezultāti: a). veiksmīgi ielīmētā šķiedra; b). līmes saķeres iznīcināšana

NOA 61 vieglāk ietecēja uzgaļa kapilārā kanālā, kamēr *AC-535-AN-F5* lielākas līmes viskozitātes dēļ, to atkārtoti vai lēni bija jākustina šķiedru iekšā lai izvairītos no gaisa burbuļiem uzgaļa kanālā. Varēja izmantot plašus apstarošanas parametrus no 1% līdz 100% UV jaudas un no 15 līdz 300 sekundēm. Lai varēja pārlicināties ka līme ir pilnīgi eksponēta, UV doza bija apmēram 2 reizes lielāka nekā specificēts ražotājam – $>6 \text{ J/cm}^2$ priekš *NOA 61* un $>20 \text{ J/cm}^2$ priekš *AC-535-AN-F5*. Tas ļāva kompensēt iespējamo UV absorbciju cirkonija uzgalī un stikla pamatnē. Pāreksponēšana UV-līmēm līdz pat 3-5 reizēm bija ieteikta tās specifikācijās. Šķiedras uzgaļi pēc tam tika veiksmīgi pulēti izmantojot 2.3. sadaļā aprakstītu metodiku. Šķiedru uzgaļu slīpēšanas un pulēšanas optimālie parametri ir apkopoti 3.3. tabulā.

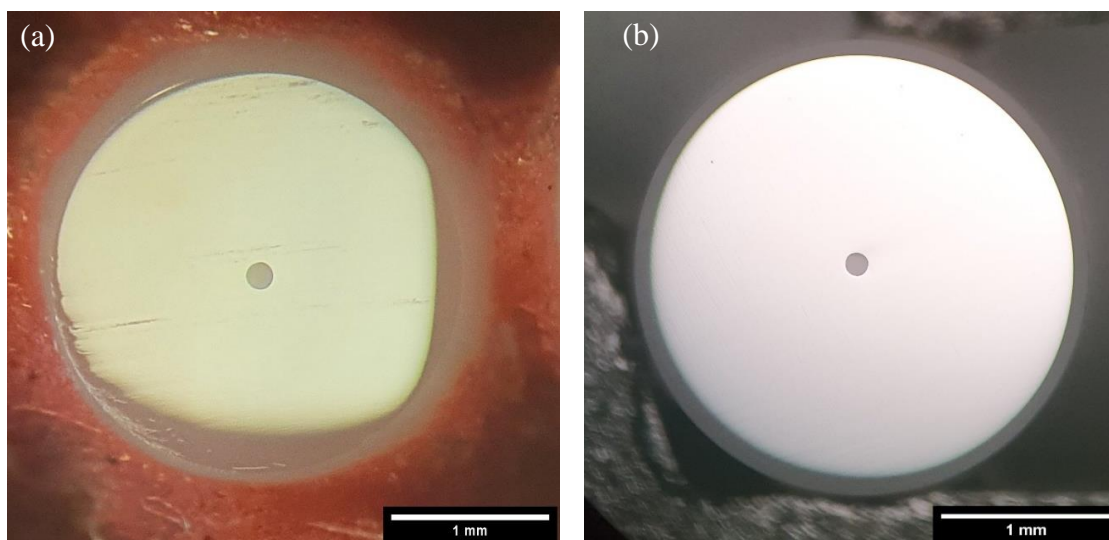
3.3. tabula

Pulēšanas procesa optimāli materiāli un parametri un OGS un LMR paraugiem

| <i>Process</i> | <i>Materiāli</i> | <i>Spēks, N</i> | <i>Ātrums, apg./min.</i> | <i>Laiks, min</i> |
|--------------------|--|---------------------|------------------------------|-----------------------|
| <i>Slīpēšana 1</i> | <i>Disks ar smilšpapīru (izmērs:600grit); Lubrikants (50ml)</i> | $1 \pm 0,5$ | 100 ± 10 | $0,25 \pm 0,1$ |
| <i>Slīpēšana 2</i> | <i>Disks ar smilšpapīru (izmērs:600grit); Lubrikants (50ml)</i> | $2 \pm 0,5$ | 150 ± 10 | 1 ± 1 |
| <i>Slīpēšana 3</i> | <i>Disks 10" TexMetP PSA; Pulēšanas emulsija MetaDi Supreme 15 μm (dimants);</i> | $2 \pm 0,5$ | 175 ± 10 | 2 ± 1 |

| | | | | |
|--|--|--------------|-------------|------------|
| <i>Pulēšana 1</i> | <i>Disks 10" TexMetC PSA; Pulēšanas emulsija MetaDi Supreme 6 μm (dimants);</i> | $1,5\pm 0,5$ | 200 ± 10 | 4 ± 2 |
| <i>Pulēšana 2</i> | <i>Disks 10" VerduTex PSA; Pulēšanas emulsija MetaDi Supreme 3 μm (dimants)</i> | $1\pm 0,5$ | 225 ± 10 | $2\pm 0,5$ |
| <i>Pulēšana 3</i> | <i>Disks 10" ChemoMet PSA; Pulēšanas emulsija MetaDi Supreme 1 μm (dimants)</i> | $1\pm 0,5$ | 250 ± 10 | $3\pm 0,5$ |
| <i>Vienmodu šķiedrām: Pulēšana 4</i> | <i>Disks 10" MicroCloth PSA; Galīgas pulēšanas suspensija Buehler MasterMet Suspension $0,06\ \mu\text{m}$ (amorfa koloidālā silīcija dioksīds)</i> | $0,5$ | 275 ± 10 | $3\pm 0,5$ |

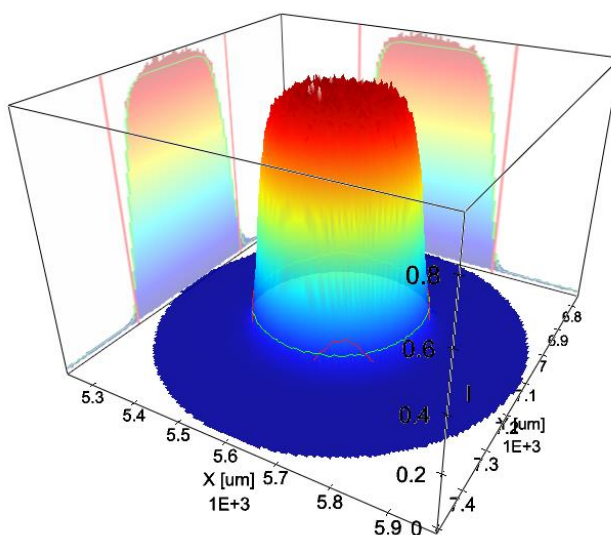
Šķiedru uzgaļu sagatavošanas kvalitāti izvērtēja ar optisko palielinājuma robežās izmantojot MBS-9 optisko mikroskopu 5X-100X palielinājuma robežās. Bieži sastaptie defekti pulēšanas procesā optimizācijas sākumā bija: uzgaļa priekšpusē skrāpējumi, noslīpētas malas un nedaudz neapaļa šķiedras kanāla forma (sk. 3.12.-a. att.). Tie bija no pārāk ilgas vai agresīvas slīpēšanas vai pulēšanas, nenovērstiem bojājumiem iepriekšējos soļos. Tādiem uzgaļiem atkārtēja slīpēšanas un pulēšanas procedūru. Šķiedru pulēšanas kvalitāte tika ievērojami uzlabota (sk. 3.12.-b. attēlā).



3.12. att. Pulētu uzgaļu piemēri ($\text{Ø}2,5 \times 10,5$ mm cirkonijs ar 630HP šķiedru): a). ar defektiem; b). bez kritiskiem pulēšanas defektiem

Pēc vizuālas kontroles, izmantojot *Cinogy* lāzera kameru tika izvērtēta modas kvalitāte un izmērs optiskām šķiedrām *FG025LJA* (sk. 3.13. att.) un *630HP*. Modas lauka diametra (*MDF*) mērījumam tika izvēlēta Gausa super-pielāgošanas metode, jo dotām šķiedrām bija jābūt Gausa tipa signālam, bet balstoties uz veiktām simulācijām daudzmodu viļņvadam, daudzmodu šķiedrām arī varētu sagaidīt nelielo plato modas centrā.

Lāzera kameras *RayCi* programmatūra automātiski pielāgoja ekspozīcijas laikus lai signāla intensitātē būtu zem sliekšņa līmeņa. Programmatūra automātiski aprēķināja kopējo gaismas intensitātes profilu un aprēķināja tiem modu izmērus. *MFD* tika aprēķināts *630HP* šķiedrai kā 4,52 μm un *FG025LJA* šķiedrai – 28,73 μm , izmantojot Gausa super-pielāgošanas metodi. Rezultāti priekš *630HP* atbilst ražotāja specifikācijām, bet *FG025LJA* gadījumā – nav zināms (sk. 3. un 4. pielikumos).



3.13. att. Šķiedras modas pārbaudes piemērs: *FG025LJA* šķiedras 3D modas profils (1,575 mW ievadītas baltas gaismas jauda, Ekspozīcija: 112 μs ; Pastiprinājums : 1,00 x, ND 3.0 filtrs, 20X palielinājuma optika).

Izejošas gaismas jaudas mērījumi pulētiem šķiedru uzgaļiem veikti ar fotodetektoru *Thorlabs PDA100A2*. Šķiedrās gaismas tika ievadīta caur pliku šķiedras galu (angl. – *bare fiber*), izmantojot *FC* šķiedras adapteri. Šis gals tika vairākkārt nogriezts ar safīra asmeni līdz stāvoklim, kad bija sasniegts maksimālais izejošais signāls no testējama šķiedras uzgaļa. Šādā veidā varēja izslēgt gaismas ievadīšanas kļūdu starp gaismas avotu un šķiedru, kura ietekmētu mērīšanas rezultātu. Mērījumu dati ir apkopoti 3.4. tabulā.

Šķiedras uzgaļu signāla jaudas mērījumi no Thorlabs HLS635 lāzera 2,5 mW režīmā

| Šķiedra | Uzgaļa veids | Vidējā jauda, mW |
|-------------------------------|------------------------|------------------|
| Vienmodu šķiedra 630HP | Pliks šķiedras gals | 0,52±0,01 |
| | Ø1,25x6,4 mm cirkonijs | 0,54±0,01 |
| | Ø2,5x10,5 mm cirkonijs | 0,45±0,01 |
| Daudzmodu šķiedra FG025LJA | Pliks šķiedras gals | 0,12±0,01 |
| | Ø2,5x10,5 mm cirkonijs | 0,15±0,01 |
| Daudzmodu šķiedra FG050UGA | Pliks šķiedras gals | 0,11±0,01 |
| | Ø2,5x10,5 mm cirkonijs | 0,11±0,01 |

Dati tika salīdzināti ar referenci – jauda no plikā šķiedra gala. Pulētai šķiedrai, rezultātam jābūt vienādam vai līdzīgam references šķiedras signālam. References šķiedra bija testējamas šķiedras versija ar pliko gala izeju, kurš tika nogriezts ar safīra asmeni no abām pusēm. No rezultātiem var secināt kā šķiedras tika sagatavotas ar sliktu kvalitāti. Eksperimentu laikā tika pamanīta lāzera avota izejas signāla nestabilitāte laikā. Fotodetektora voltmetrā ±0,1-0,3V, kas apmēram bija 0,02-0,04 mW.

Optiskā šķiedras sagatavošanas kvalitāte kopumā atbilst gaismas ievadīšanas prasībām. Šķiedru pulēšanas kvalitāti var uzlabot veicot starp pulēšanas soļiem vizuālo kontroli ar stiprāko mikroskopu (vismaz, 100X-500X) un vienmērīgu parauga apgaismojumu. Turpmāk var veikt šķiedru izejas modas kvalitātes pārbaudi, kā arī uzgaļa SEM analīzi lai atrastu iespējamus iemeslus signāla pasliktināšanai. Iespējams, ir vērts pūlēt šķiedras ar <0,05 μm dimanta suspensijām, vai jāpārskata izmantoto pulēšanas procedūru. Izejošo signālu no šķiedras var uzlabot veidojot pret-atspoguļošanas pārklājumus uz uzgaļa gala, piemēram, ar ALD vai PVD metodēm, [54], [55].

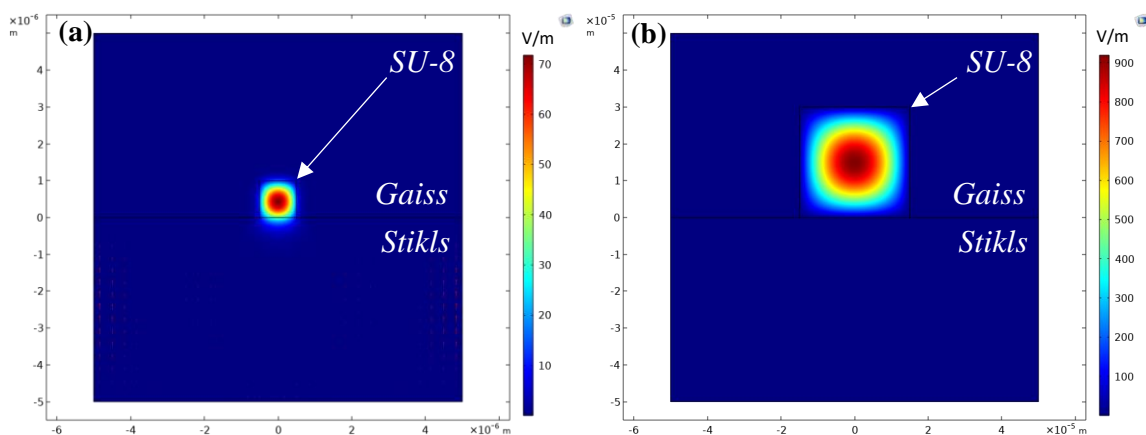
3.4. Gaismas jaudas sadalījuma modelēšana

Simulējot viļņvadu modas, tika iegūta informācija par teorētisko gaismas intensitātes laukuma sadalījumu, kam vajadzēja pastāvēt dotajos viļņvados. Rezultātiem bija jāatbilst literatūrā esošai informācijai par modam polimēru viļņvados. Sadaļā 2.6. aprakstīta metode ļāva precīzi aprēķināt efektīvo laušanas koeficientu, modas skaitu un formu 1 x 1, 10 x 1 un 30 x 30 μm viļņvadiem uz stikla pamatnes. Uzbūvētā režģa statistiku sk. 8. pielikumā.

Laušanas koeficienta vērtības $SU-8 n_{SU-8}(\lambda=635 \text{ nm}) = 1,5778$ saskan ar literatūrā dotām 1,5841 – 1,596 robežām pie 635±2 nm [37],[45] un stikla $n_{stikls}(\lambda=635 \text{ nm}) = 1,4506$ saskan ar literatūru [109].

SU-8 1 x 1 μm viļņvadam tika aprēķinātas divas fundamentālas modas ar $\approx 60\text{-}70$ V/m intensitātēm (sk. 3.14.-a att. un 10. pielikumā - (a, b)), kā arī divas augstās pakāpes modas, ar mazākām bet ievērojamām intensitātēm ($\approx 35\text{-}60$ V/m), kurām moda daļēji pēc gaistošā gaismas lauka izplatās pamatnē kā (sk. 10. pielikumā, (c) un (d) attēlos.).

10 x 1 μm konusveida savienojumam ievadmalas pusē arī eksistēja divas fundamentālas modas (sk. 11. pielikumā, (a) un (c) attēlos), kur vienai modai bija daudz mazāka intensitāte nekā otrajai (≈ 300 V/m un ≈ 40 V/m attiecīgi), dēļ lielas atšķirības starp viļņvada laterāliem un vertikāliem izmēriem. Fundamentālas modas laterālais izmērs bija ap 6 μm , kas bija nedaudz vairāk nekā *MFD* $4,0 \pm 0,5$ μm optiskai šķiedrai *HP630*, kas nozīmē kā moda no šķiedras tikai laterāli pāries konusveida savienojumā. Tālāk, moda tika adiabatiski pārraidīta 1 x 1 μm viļņvadā. 30 x 30 μm viļņvadā ir fundamentāla moda (≈ 900 V/m) (sk. 3.14.-b att.) un augstākas kārtas modas intensitātes ($\approx 450\text{-}900$ V/m) bija līdzīgas fundamentālām modām (sk. 12. pielikumā, (a)-(e)). Citiem viļņa garumiem 30 x 30 μm *SU-8* viļņvadam modu konfigurācija bija līdzīga un netika attēlota.



3.14. att. Transversālās elektriskās (TE) amplitūdas simulācijas rezultāti izmantojot galīgo elementu metodi COMSOL 5.6: fundamentālas modas a). 1 x 1 μm un b). 30 x 30 μm *SU-8* viļņvadiem.

Nav zināma literatūra ar vienmodu un daudzmodu *SU-8* viļņvadu modelēšanu uz stikla pamatnes. Literatūrā var atrast simulācijas priekš *SU-8* viļņvadiem kopā ar modificēto *SU-8* [45] un *PMMA* [48] apvalkiem. Minētajā literatūrā gan 0,7 x 1,5 μm , gan 1 x 5 μm *SU-8* viļņvadu gadījumos tika iegūta fundamentālā moda pie 635 nm, bet viļņvadā moda nav pilnībā ierobežota. Šajā darbā, 1 x 1 viļņvadu simulācijā iegūti līdzīgi rezultāti. Tātad uzbūvētas galīgo elementu sistēmas parametri bija izvēlēti pareizi.

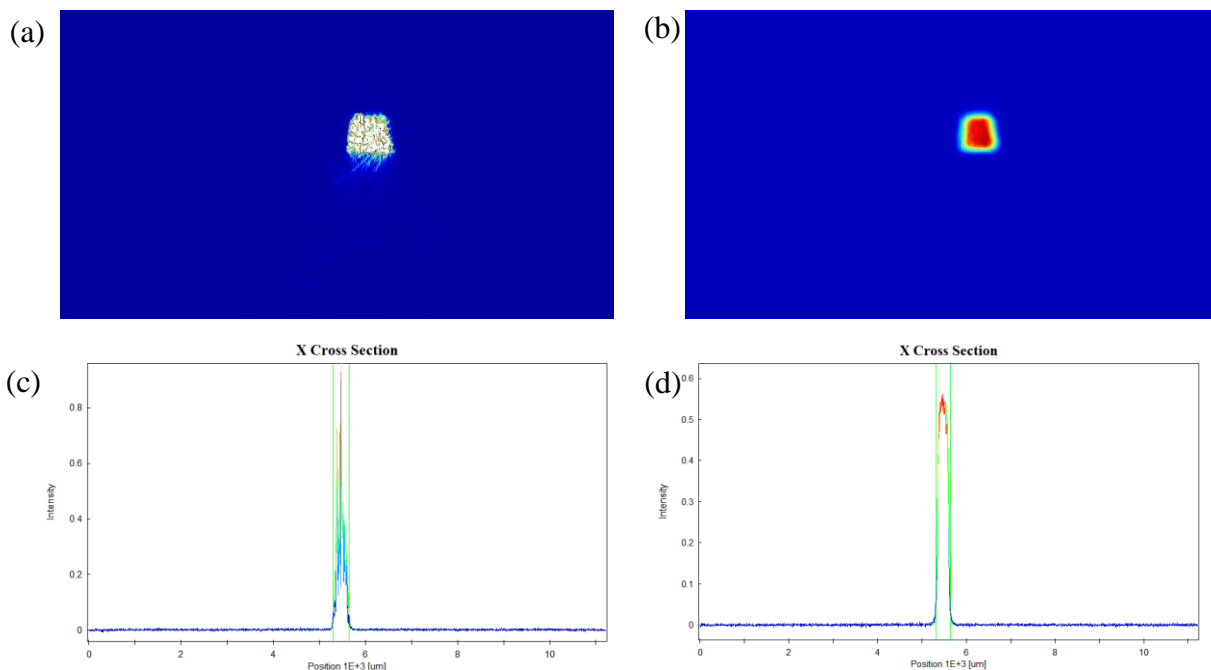
Gaismas modelēšanu varētu paplašināt veicot pilno simulāciju, kur būtu iekļauti gaismas ievadīšanas elementi, lai kvantitatīvi izvērtētu zudumu faktorus, atrast potenciālas problēmas

un iespējas tās uzlabot. Minētas simulācijas var veikt ar galīgo elementu metodi *COMSOL*, *Zemax* vai *MatLab* vidēs.

3.5. Modu mērījumi daudzmodu *SU-8* viļņvadam

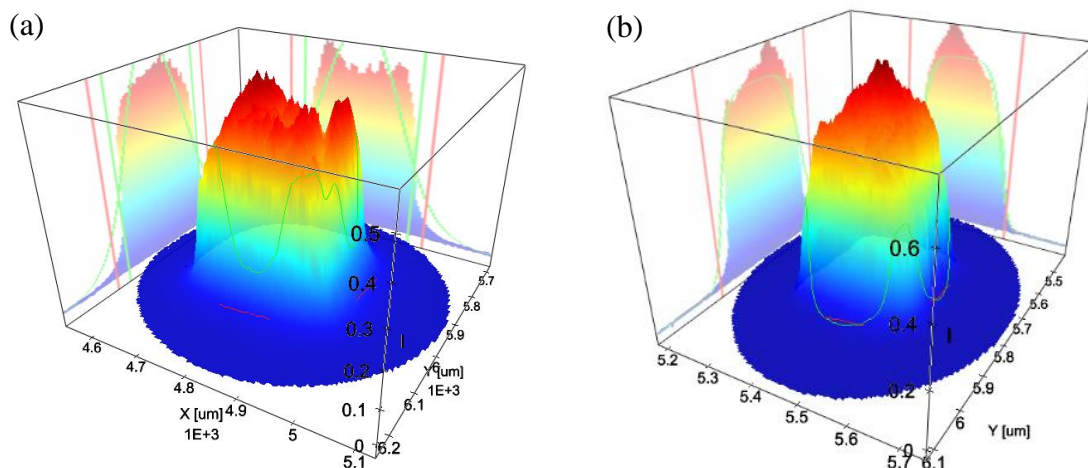
Ja izgatavotie fotoniskie čipi tika pareizi sagatavoti, tajos bija pareizi ievadīta un izvadīta gaisma, tad reālajiem izejas signāla modu mērījumiem bija jāatbilst simulētiem rezultātiem. Izejošā gaisma no LMR un OGS čipiem tika projicēta uz *Cinogy* lāzera kameras *CCD* matricas caur objektīvu sistēmu ar atbilstošu palielinājumu un analizēta ar *RayCi* programatūru.

Gan monohromatiskā, gan baltā gaisma tika veiksmīgi ievadīta LMR čipa *SU-8* viļņvadā, izmantojot daudzmodu šķiedru *FG025LJA* (sk. 3.15.-a, b. att.). 635±10 nm gaismas gadījumā varēja skaidri redzēt signāla graudainību, jeb vairākas modas pirms un pēc čipa pulēšanas. Baltas gaismas gadījumā, varēja redzēt vienmērīgu daudzmodu signālu pirms un pēc pulēšanas (sk. 3.15.-b att.). Balstoties uz 30 x 30 μm viļņvada simulācijām, tajā eksistēja vairākas augstas kārtas modas ar lielām intensitātēm. Tāpēc, modas profils vairāk atkārtu taisnstūra viļņvada formu, nevis klasisko Gausa tipa sadalījumu kā būtu dominējošās fundamentālas modas gadījumā. Modu profila formu varēja arī salīdzināt X- vai Y- plaknē pie dažādiem ievadītas gaismas viļņa garuma diapazoniem (sk. 3.15.-c, d att.) Turpmāk, gaismas ievadīšanai LMR ierīcei tika izmantota balta gaisma no *DH-2000-BAL*.



3.15. att. 30 x 30 μm viļņvada modas forma ar ievadīto a). 635 nm 0,57 mW gaismu; b). 0,26 mW balto gaismu; un to modu attiecīgie X-šķersgriezumi – (c) un (d) (eksponēcijas laiks – pastiprinājums – 1,00x; optikas sistēmas palielinājums – 20X)

Pēc LMR parauga pamatņu iegriešanas, litogrāfijas un laušanas, viļņvadu galu kvalitāte vai pulēšanas procesu rezultātā modas profila formai bija novērojams nevienmērīgums un samazināta signāla intensitāte (sk. 3.16.-a att.). Pēc LMR čipu slīpēšanas un pulēšanas procedūras ievadītais signāls kļuva asāks un 1,5 stiprāk (sk. 3.16. att.-b.).



3.16. att. LMR paraugu modu 3D profila tipiskā forma a). pirms pulēšanas un b). pēc pulēšanas (ievadītas baltas gaismas jauda – 0,26 mW; pastiprinājums – 1,00 x; optikas sistēmas palielinājums – 20X, ekspozīcijas laiki: a). 1,470 ms un b). 981 μs attiecīgi)

Veicot modas lauka diametra (MDF) mērījumus, visiem viļņvadiem tika izvēlētas divas metodes, Gausa pielāgošanas ($1/e$ līmenis) un Gausa super-pielāgošanas ($1/e^2$ līmenis). Gaismas jaudas sadalījuma modelēšanas rezultātos visiem dotiem viļņvadu tipiem galvenā moda bija Gausa tipa fundamentāla moda. Bet veicot pirmos mērījumus, varēja pamanīt signālu aso piķu formu, kurai bija vērtīgi izmantot arī Gausa super-pielāgošanas metodi, jo šīs metodes eksponentei ir papildus parametrs, kurš tiek brīvi pielāgots. Turklāt tika izvēlēts $1/e^2$ līmenis, lai izvērtētu lielāku modas laukuma izmēra vērtību nekā ar klasisko Gausa.

Lāzera kameras *RayCi* programmatūra automātiski pielāgoja ekspozīcijas laikus tā, lai signāla intensitātē būtu zem sliekšņa līmeņa. Programmatūra automātiski atpazīna kopējo gaismas intensitātes profilu $30 \times 30 \mu\text{m}$ viļņvadu izejām un aprēķināja tām modu izmērus pēc Gausa pielāgošanas un super-pielāgošanas metodēm (sk. 3.5. tabula).

Moda laukuma diametra mērijumu rezultāti pirms pulēšanas (paraugu skaits: 6)

| <i>Parametrs</i> | <i>Super-Gausa pielāgošana ($1/e^2$), μm</i> | <i>Gausa pielāgošana ($1/e$), μm</i> | <i>Viļņvadu izmēri, μm</i> |
|--------------------------------|---|---|--|
| <i>Maksimālais platums</i> | <i>18,04±0,98</i> | <i>12,88±0,46</i> | <i>29,92±2,47</i> |
| <i>Minimālais platums</i> | <i>16,04±2,23</i> | <i>11,00±1,19</i> | <i>29,67±0,25</i> |
| <i>Eliptiskums</i> | <i>0,89±0,03</i> | <i>0,78±0,07</i> | |
| <i>Ekscentriskums</i> | <i>0,45±0,05</i> | <i>0,59±0,11</i> | |

MFD rezultāti rāda, ka modas izmērs bija ap 1,5-2,7 reizes mazāks nekā viļņvada izmēri atkarībā no *MFD* mērīšanas metodes. Modas simulācijas rezultātos fundamentālā moda neizgāja ārpus viļņvada malām un koncentrējas viļņvada centrā, un to izmērs bija ap 12-20 μm . Pēc tam LMR paraugi tika slīpēti, pulēti un atkal mērīti (sk. 3.6. tabulā).

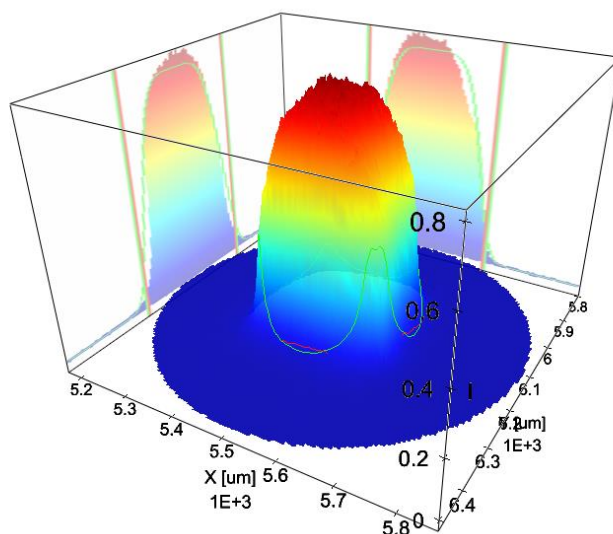
Moda laukuma diametra mērijumu rezultāti pēc pulēšanas (paraugu skaits: 3)

| <i>Parametrs</i> | <i>Super-Gausa pielāgošana, μm</i> | <i>Gausa pielāgošana, μm</i> | <i>Viļņvadu izmēri, μm</i> |
|--------------------------------|--|--|--|
| <i>Maksimālais platums</i> | <i>15,87±1,07</i> | <i>14,42±0,39</i> | <i>29,92±2,47</i> |
| <i>Minimālais platums</i> | <i>13,79±0,59</i> | <i>13,33±1,05</i> | <i>29,67±0,25</i> |
| <i>Eliptiskums</i> | <i>0,82±0,11</i> | <i>0,82±0,11</i> | |
| <i>Ekscentriskums</i> | <i>0,54±0,17</i> | <i>0,54±0,17</i> | |

Modas izmēri pēc pulēšanas ir samazinājušies par ~15%. Pirmkārt, pēc LMR malas planarizācijas, bija iespējams pietuvināt optisko šķiedru pamatnes malai un viļņvada galam. *FG025LJA* šķiedrai ir mazāks *MFD* nekā viļņvadam, bet $NA=0,1$. Iespējams, tāpēc kā LMR viļņvads bija taisns un relatīvi īss, ievadīta moda palika labi koncentrēta centrā. Otrkārt, viļņvadu ieejas un izejas malu virsmas kvalitāte bija uzlabota pulēšanas laikā, kas samazināja gaismas izkliedes faktoru, ievadot gaismu no šķiedras. Pēc ievadšķiedras pielīmēšanas *MFD* izmēri nebūtiski mainījušies standarta kļūdas ietvaros, (sk. 3.7. tabulā) un modas forma palika gludāka (sk. 3.17. att.). Visticamāk optiskā līme nedaudz samazināja izkliedes un atstarošanas zudumus uz *SU-8* viļņvada gala defektiem.

Moda laukuma diametra mērījumu rezultāti pēc šķiedru pielīmēšanas (paraugu skaits: 3)

| <i>Parametrs</i> | <i>Super-Gausa pielāgošana, μm</i> | <i>Viļņvadu izmēri, μm</i> |
|----------------------------|--|--|
| <i>Maksimālais platums</i> | <i>15,37±0,72</i> | <i>29,92±2,47</i> |
| <i>Minimālais platums</i> | <i>14,18±0,10</i> | <i>29,67±0,25</i> |
| <i>Eliptiskums</i> | <i>0,83±0,10</i> | |
| <i>Ekscentriskums</i> | <i>0,54±0,10</i> | |



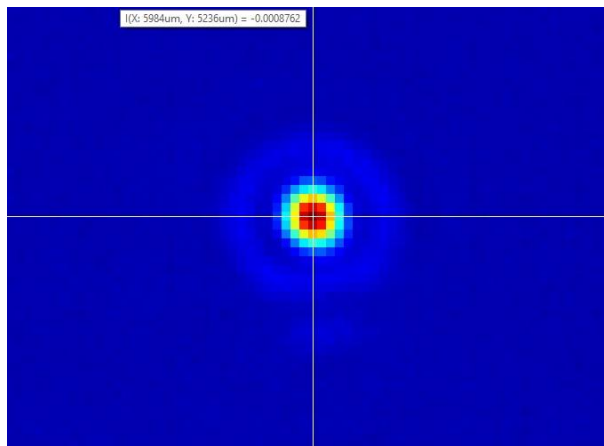
3.17. att. LMR paraugu modu 3D profila forma pēc gaismas ievadīšanas ar pielīmēto FG025ULJA šķiedru ar cirkonija uzgali un AC-535-AN-F5 līmi (ievadītas baltas gaismas jauda – 0,26 mW; ekspozīcijas laiks: 167 μs ; pastiprinājums – 1,00 x; optikas sistēmas palielinājums – 20X)

Viss iepriekšminētais liecina par to kā gaismas ievadīšanas metode ar LMR čipa pulēšanu un šķiedras pielīmēšanu ir piemērota daudzmodu baltas gaismas ievadīšanai 30 x 30 μm SU-8 viļņvadā. Lai precīzāk salīdzinātu mērījumu rezultātus ar simulācijas rezultātiem, simulācijas vidē jāaprēķina modas izmērus, izmantojot Gausa 1/e un Gausa 1/e² metodes. Turklāt, būtu vērtīgi salīdzināt rezultātus ar citām MFD aprēķinu metodēm.

3.6. Modu mērījumi vienmodu SU-8 viļņvadiem

Balstoties uz simulācijām, 1 x 1 μm viļņvadā bija jābūt pārsvarā tikai fundamentālai modai ar gausa tipa sadalījumu. Monohromatiskā 635±10 nm gaisma no vienmodu lāzera tika veiksmīgi ievadīta OGS fotoniskā čipa 2D konusveida 10 x 1 μm savienojumā no 630HP vienmodu šķiedras ar MFD 3-4 μm . Izejošie signāli no OGS čipa tika projicēti uz Cinogy lāzera kameras CMOS matricas caur objektīvu sistēmu ar 80X palielinājumu un analizēti ar RayCi

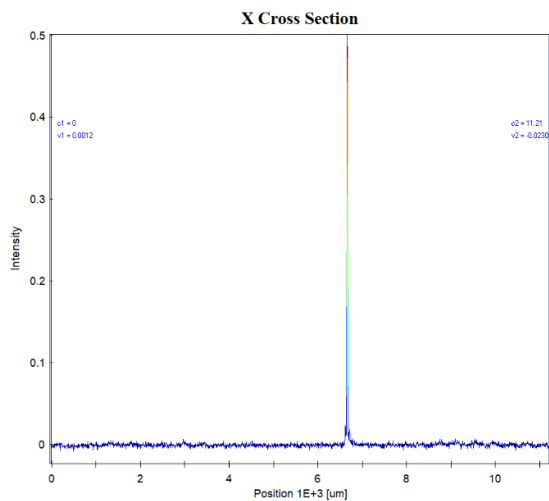
programmatūru (sk. 3.18. att.). Iegūts signāls no katras izejas bija vizuāli apaļš un jaudīgs (sk. 3.18. att). Signālā varēja pamanīt vāju gaismu zem viļņvada – otras kārtas modas pamatnē – kura nebija būtiska, salīdzinot ar fundamentālas modas intensitāti.



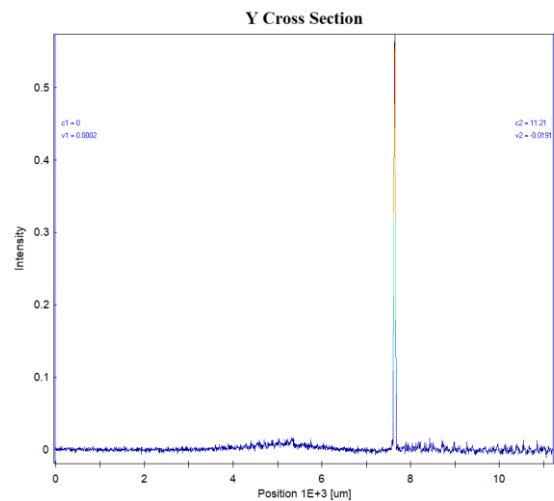
3.18. att. Izejošais signāls no 1 x 1 OGS viļņvada (eksponēcijas laiks: 167 μs, pastiprinājums : 1,00X; 80X objektīvu palielinājums; >4X papildus digitālais palielinājums)

Tā kā OGS paraugam bija 50/50 *SU-8* dalītājs un divas 1 x 1 μm izejas no čipa, bija jāiegūst 50/50 gaismas intensitāšu sadalījums starp ierīces optiskajām izejām. Apskatot abas izejās (kreiso un labo), eksponēcijas laiks bija 167 μs (sk. 3.19. att.-a, b.), kas liecināja par to, ka signāla jauda abām izejām bija vienāda, un OGS struktūrām bija atbilstošā kvalitāte un gaisma tika ievadīta pareizi. Programmatūrai bija grūti atpazīt un aprēķināt *MFD* tādām asām signāla pīķim ar tik mazu izšķirtspēju. *MFD* tika mērīts manuāli $\sim 1/e^2$ līmenī, izmantojot *ImageJ* no iegūtiem signāla intensitātes bildēm (sk. 3.19. att). Apkopojot 30 mērījumus, $0,98 \pm 0,07 \times 1,00 \pm 0,03$ μm OGS izejām *MFD* sanāca $0,89 \pm 0,06$ μm ($\pm 6,74$ % kļūda). Šis rezultāts labi saskan ar simulācijas rezultātiem, kur modas lielāka daļa bija viļņvada iekšienē, bet moda ir tuvāk viļņvada malām nekā lielākam 30 x 30 μm *SU-8* viļņvadam. Lai precīzāk varētu salīdzināt mērījumu rezultātus ar simulācijas rezultātiem, eksperimentu nepieciešams uzlabot, precīzi aprēķinot modas izmērus simulācijas vidē, izmantojot Gausa $1/e$ un Gausa $1/e^2$ metodes.

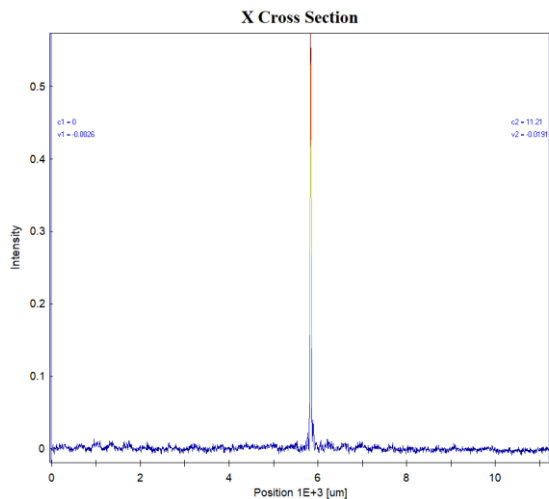
(a)



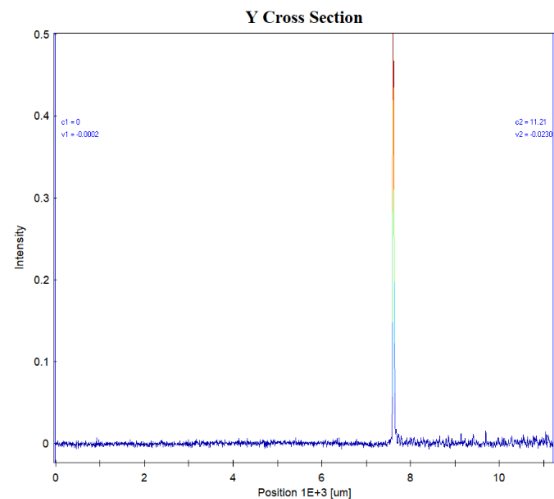
(b)



(c)



(d)



3.19. att. OGS čipa 1 x 1 μm izeju modu šķersgriezumi pirms pulēšanas: a). kreisā izējas X šķersgriezums; b). kreisā izējas Y šķersgriezums; c). laba izējas X šķersgriezums; d). labas izējas Y šķersgriezums (0,42 mW ievadītas gaismas jauda, Ekspozīcija: 167 μs ; Pastiprinājums : 1,00X, 80X palielinājuma optika)

Gaismas punkta izmērs uz *CMOS* matricas teorētiski bija ap $\text{Ø}80 \mu\text{m}$, bet pikseļa izmērs $5,5 \mu\text{m} \times 5,5 \mu\text{m}$, kas noved pie teorētiskās mērīšanas kļūdas ap $\pm 6,87\%$, kas saskan ar mērīšanas rezultātu kļūdu. Palielināt mērījumu precizitāti varētu, izmantojot objektīvu sistēmu ar lielāko palielinājumu, piemēram, 100X objektīvs *Mitutoyo MY50X-825* vai *MY100X-806* kopā ar 2X-10X stara paplašinātāju *THORLABS GBE02-A* vai *GBE10-A*. Tad, varētu sasniegt palielinājumu līdz pat 1000X, un tad $1000 \mu\text{m}$ stara projekcijai uz *CMOS* mērīšanas kļūda būtu no $\pm 0,5$ līdz $< 0,01\%$. Tas ļautu mērīšanas kameras programmatūrai labāk atpazīt un izmērīt modas profila diametru. Alternatīvi, būtu jāizmanto objektīvu karuseli līdzīgi kā mikroskopiem,

lai varētu efektīvi nopozicionēt objektīvu pie katra viļņvada izejas un pēc tam, pārejot uz lielāka palielinājuma, mērīt signālu. Minētie uzlabojumi krietni palielinātu mērīšanas sistēmas izmērus un izmaksas.

Diemžēl, nebija iespējams veikt OGS parauga optiskus mērījumus pēc pulēšanas procedūras, jo nevienam paraugam neizdevās izvairīties no intensīviem MCI struktūru bojājumiem. To varētu atrisināt tikai uzlabojot pulēšanas procedūru. Turklāt, netika izpētīta ievadītas gaismas sānu vai leņķa novirzes ietekme uz signāla sadalīšanos tādēļ, kā OGS čipa izejas bija 3000 μm tālu viena no otras un nebija iespējams mērīt tās vienlaicīgi. Tādu izpēti vieglāk paveikt, izgatavojot OGS ierīces ar <100 μm attālumu starp izejām, lai abu izeju 80X projekcijas ietilptu uz kameras 10 x 10 mm CMOS matricas laukuma.

3.7. Gaismas ievadīšanas zudumi mikroierīcēm

Gaismas ievadīšanas metode tika kvantitatīvi izvērtēta ar zudumu un gaismas ievadīšanas efektivitātes aprēķiniem. Optiskās sistēmas lāzeris-čips-detektors kopējiem zudumiem bija jābūt vismaz tādiem, lai izejošā signāla gaismas punkta izmērs un jauda būtu pietiekoši lai fotodetektors reģistrētu signālu no izejošas šķiedras. Turklāt, jo mazāki ir zudumi gaismas ievadīšanā, jo mikroierīce ir piemērotākā savam pielietojumam.

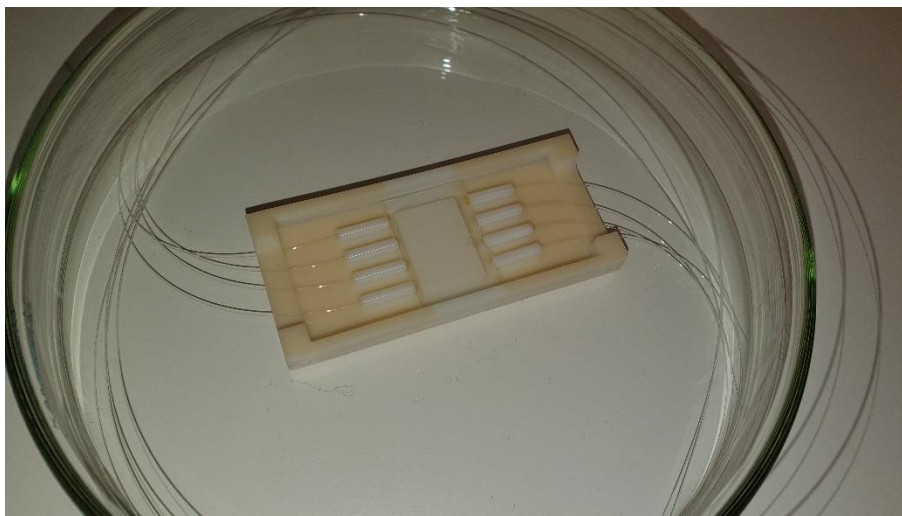
3.7.1. LMR gaismas ievadīšanas zudumi

Pēc 2.4. sadaļā aprakstītas aprēķinu metodikas tika izvērtēti ievadīšanas un izvadīšanas zudumi. Balstoties uz modas simulācijām un mērījumiem LMR viļņvadiem, to modas izmēri bija no $11,00 \pm 1,19$ līdz $18,04 \pm 0,98$ μm , bet *FG025LJA* modas izmēri ap 28,73 μm . Aprēķinot ievadīšanas efektivitāti pēc formulas (1.30), sanāca $\eta=61\%$ pēc Gausa 1/e metodes un $\eta=66\%$ pēc Gausa 1/e² super-pielāgošanas metodes. Tad, LMR čipa gaismas ievadīšanas zudumiem pēc formulas (1.31) bija jābūt no -1,8 dB līdz -2,15 dB. *MFD* neatbilstības pēc (1.25) ir jau iekļauti aprēķinos (1.30). Modu nesakritību starp *SU-8* viļņvadu un *FG050UGA* izvadšķiedru nebija iemesla aprēķināt, jo šķiedras serdes diametrs bija 1,67 reizēs lielāks un *MFD* nesakritības faktors šeit bija izslēgts. Tā kā sprauga starp pulētām šķiedrām un pulētiem viļņvadiem fotoniskajai mikroierīcei netika novērota, tad šīs zudumu faktors tika izslēgts.

Pēc 2.4. sadaļā aprakstītas metodikas tika izvērtēti kopējie zudumi OGS un LMR mikroierīcēm ar šķiedrām un atsevišķi LMR gaismas ievadīšanas zudumi ar pieņēmumu, ka dotas mikroierīces *SU-8* viļņvadiem reāli zudumi atbilst teorētiskajiem $0,19 \pm 0,03$ dB/cm.

Mērījumu procesā, izejošais signāls no ievadšķiedras ar pulēto uzgali bija $152,12 \pm 17,34$ μW un izejošais signāls no izvadšķiedras bija $64,21 \pm 5,35$ μW . Maksimālie zudumi izvadšķiedrā

FG050UGA bija 10 dB/km pie 808 nm (sk. 5. pielikumā), jeb $0,010 \pm 0,002$ dB izmantotas šķiedras 1,0 \pm 0,2 metra garumā. Tad, aprēķinot pēc sakarības (2.2), gaismas ievadīšanas un izvadīšanas zudumi 30 x 30 μ m viļņvadiem kopā bija 3,40 \pm 0,52 dB. Gaisma tika ievadīta ar šķiedru pielīmēšanu ar 50% kopējo efektivitāti (sk. 3.20. att.).



3.20. att. Optisko šķiedru pielīmēšanas rezultāts: LMR fotoniskā ierīce ar 4 SU-8 viļņvadiem, FG025LJA ievad-un FG050UGA izvadšķiedrām (fotoniskā ierīce tika ielīmēta plastmasas korpusā un atrodās Petri tasē)

Eksperimentālā vērtība ir ap 1,5-1,8 lielāka nekā teorijā. Iemesli tam varu būt sekojoši: 1). aprēķinos netika ņemts vērā modas zudumi; 2). nav zināms par faktiskās UV-līmes pārraides īpašībām pēc sacietināšanas (īpaši UV daļā), jo pastāv iespēja kā apstarošanas parametri nebija optimāli UV absorbciju; 3). šķiedru pozicionēšanas kļūdas; 4). neņemti vērā NA neatbilstības un atpakaļ atstarošanas.

Nordström M. 2006 gada pētījumā [102] ar vienmodu optisko šķiedru ar 125 μ m apvalku, 9 μ m serdi, 7,8 μ m *MFD* ($1/e^2$) un $NA=0,13$ ievadīja 635 nm un 1550 nm gaismu 5 x 4,5 μ m un 10 x 4,5 μ m viļņvados ar 5.5 – 10 dB zudumiem katrai malai. 5 x 4,5 μ m viļņvada *MFD* bija 9,6 μ m ($1/e^2$). Nordström M. 2007 gada pētījumā [45] ar uzlabojumiem to pašu vienmodu šķiedru ar mazāko *MFD* nekā viļņvadam izdevās ievadīt gaismu ar 3 dB/mala efektivitāti.

Ņemot vērā ka *FG025LJA* šķiedras *MFD* bija lielāks nekā viļņvada *MFD* un zudumos ir iekļauti izvadīšanas zudumi, tad salīdzinot ar minētiem pētījumiem [45],[102], šī darbā izmantota gaismas ievadīšanas metode ir krietni efektīvāka. Tas pierāda kā izmantota gaismas ievadīšanas metode bija efektīva un to aprēķinu metodikā bija pareiza. Gaismas ievadīšanu LMR gadījumā varētu uzlabot izmantojot ievada optisko šķiedru ar mazāko *MFD*, kas ir plaši pieejami industrijā, piemēram, *Thorlabs FG010LDA* ar 10 μ m serdi.

Kopējie zudumi posmā lāzeris-fotodetektors, aprēķinātas pēc sakarības (2.5), LMR paraugiem ar šķiedrām bija $12,00 \pm 0,42$ dB, jeb 6,3% efektivitāte. Lielākais ieguldījums kopējiem zudumiem ir gaismas ievadīšana no lāzera uz optisko šķiedru. To var uzlabot izmantojot lāzeru avotu ar iebūvēto šķiedras izeju un to šķiedras galu pielodēt pie čipa ievadšķiedras, tādēļ zudumi lāzeris-šķiedra būtu <1 dB un šķiedra-šķiedra <0.05 dB [15], [51], [89].

3.7.2. OGS gaismas ievadīšanas zudumi

Balstoties uz modas simulācijām OGS konusveida savienojuma viļņvadam, tās modas izmēri bija ap $6,5 \pm 0,5$ μm un $0,85 \pm 0,1$ μm , bet *HP630* modas izmēri ap $4,52$ μm ($1/e^2$). Aprēķinot ievadīšanas efektivitāti pēc sakarības (1.30), sanāca no $\eta = 34 \pm 3\%$. Tad, zudumi gaismas ievadīšanai OGS čipā pēc sakarības (1.31) bija jābūt $-4,35 \pm 0,4$ dB. *MFD* neatbilstības kā sakarībā (1.25) ir jau iekļauti aprēķinos pēc sakarības (1.30).

Modu nesakritību starp *SU-8* 1×1 μm izejas viļņvadu un *HP630* izvadšķiedru nebija iemesla aprēķināt, jo šķiedras *MFD* ap 4 reizēs lielāks un *MFD* nesakritības faktors šeit ir izslēgts. Tā kā sprauga starp pulētām šķiedrām un pulētiem viļņvadiem fotoniskai mikroierīcei netika novērota, tad šis zudumu faktors tika izslēgts.

OGS paraugiem nebija iespējams izmērīt zudumus, jo tiem bija iznīcinātas struktūras fotoniskajā čipa pulēšanas laikā. Mērījumu procesā, izejošais signāls no ievadšķiedras ar pulēto $\varnothing 2,5 \times 10,5$ mm uzgali bija $0,45 \pm 0,01$ mW. Maksimālie zudumi *HP630* šķiedrā bija 12 dB/km pie 630 nm (sk. 3. pielikumā), jeb $-0,012 \pm 0,002$ dB izmantotas šķiedras $1,0 \pm 0,2$ metra garumā pirms un pēc OGS čipa. Teorētiskiem zudumi izejot cauri jābūt OGS: gaismas ievadīšanā - $4,35 \pm 0,4$ dB, OGS viļņvados $-0,665 \pm 0,11$ dB un izvadšķiedras $-0,012 \pm 0,004$ dB. Tad, kopējie zudumi posmā no ievadšķiedras līdz fotodetektoram būtu $5,039 \pm 0,514$ dB. Tad, pie optimāliem gaismas ievadīšanas un citiem labvēlīgiem apstākļiem, sagaidīta signāla jauda no OGS izejas šķiedras būtu ap 144 μW . Papildus tam jāņem vērā 50/50 dalītāju fotoniskai ierīcei rezultējot ar 72 μW .

Aprēķinot sprieguma lielumu no sakarības (2.7), fotodetektoram sagaidītais izejošais spriegums būtu 0.486 mV pie 30 dB pastiprinājuma. Pie 30dB pastiprinājuma, tumšā strāva izdod 16 mV signālu. Tāpēc, lai būtu iespējams reģistrēt izejošo signālu no OGS, vajadzētu palielināt lāzera jaudu vismaz 10 reizēs. Bet, piemērotāk būtu samazināt gaismas ievadīšanas zudumus no lāzera uz optisko šķiedru, ko var panākt ar lāzeru avota izmantošanu, kuram ir iebūvēta šķiedras izeja un to šķiedras izejas galu pielodēt pie OGS čipa ievadšķiedras, tādēļ zudumi lāzeris-šķiedra un šķiedra-šķiedra būtu minimāli: <1 dB un <0.05 dB [15], [51], [89].

Treškārt, izmantojot litogrāfijas paņēmienus var marķēt 1 μm viļņvadu izejas lai tos varētu vieglāk atrast pozicionējot izej-šķiedru, izmantojot *CMOS* kameru. To var panākt, pievienojot litogrāfijas maskai kura satur viļņvadu shēmu, pievienot liela izmēra apzīmējumus, kā kvadrāti, bultiņas vai mērogu.

Uzlabot gaismas ievadīšanas efektivitāti var izstrādājot 3D *SU-8* konusveida savienojumu. Literatūra nav zināmi piemēri ar tādām struktūrām. Lai tos izstrādātu, pirmkārt, jāveic konusveida formas un izmēru simulāciju izmantojot speciālo programmatūru optiskiem aprēķiniem, kā *OpticStudio's Zemax* vai *Ansys Lumerical's Photonic Multiphysics Simulation tools*. Otrkārt, būtu nepieciešams izstrādāt to izgatavošanas procesu. Piemēram varētu izmantot pelēko toņu maskas un ultravioletās pelēkās skalas litogrāfiju [96] vai elektron-staru litogrāfiju [95].

3.7.3. *Gaismas ievadīšanas un mērīšanas metodikas analīze*

Izstrādātajai metodei bija vairākas priekšrocības. Pirmkārt, apkārtēja gaisma neietekmēja veiktos mērījumus, jo tika izmantotas ievad- un izvadšķiedras, kuri bija precīzi pozicionētas priekšā viļņvadiem. Otrkārt, pielīmējot šķiedras, tika izmantota optiskā UV-cietošā līme, kura strādā kā laušanas koeficienta saskaņošanas materiāls, kam jāsamazina *NA* neatbilstības un atstarošanas zudumi. Tādēļ, aprēķinos šie faktori netika ņemti vērā. Treškārt, pielīmētās šķiedras nodrošina stabilu laikā signāla pārraidi caur fotonisko ierīci.

Turklāt, ir vērtīgi izpētīt ievadītas gaismas stabilitāti pie dažādām temperatūrām un mitruma speciālā klimatiskā kamerā. Svarīgi būtu arī novērtēt līmes izturību zem mehāniskas slodzes ar materiālu slogošanas mašīnu, piemēram, *Zwick/Roell 2.5*, jo savienojuma mehāniskais izturīgums definē iespēju izmantot fotonisko ierīci industrijā.

Galvenais šīs metodes trūkums bija tas, ka nevarēja atsevišķi mērīt gaismas ievadīšanas zudumus fotoniskās ierīces abās pusēs, kā aprakstīts literatūrā [103], [104], jo šķiedras tika secīgi pielīmētas. To var uzlabot, papildinot Mikro-optikas salīmēšanas iekārtu ar papildus XYZ platformu otrajai šķiedrai, lai varētu viegli pārslēgt gaismas izplatīšanas virzienu, nemainot ievadīšanas un izvadīšanas optisko šķiedru pozīciju attiecīgi pret viļņvadiem uz ierīces, kā aprakstīts literatūrā [103].

Metodes realizācijai nepieciešams izmantot agresīvu priekš polimēru viļņvadiem slīpēšanas un pulēšanas procedūru. Šo procesu nepieciešams attīstīt vai aizvietot ar alternatīvām metodēm, lai varētu veiksmīgi sagatavot vienmodu polimēru šķiedru pielīmēšanai viļņvadu mikroierīcēs.

Turklāt, būtu vērtīgi papildināt signāla jaudas mērījumus ar mērījumiem tieši no fotoniskā čipa izejām gaismas ievadīšanas laikā, un papildus uzstādīt platformu priekš izvadšķiedras. Tad varētu atsevišķi izvērtēt gaismas ievadīšanas un mikroierīces zudumus. Alternatīvi, visus jaudas mērījumus var paveikt ar *CMOS* vai *CCD* kameru, atbilstoši izveļoties references signālu, ar kuru veikt salīdzinājuma mērījumus.

SECINĀJUMI

Izpētītā literatūra sniedza priekšstatu par to, ka nav izstrādātas kvalitatīvas gaismas ievadīšanas metodes polimēru fotonikas viļņvadiem. Izstrādāta gaismas ievadīšanas metode sastāvēja no: pamatnes iegriešanas, optiskās litogrāfijas procesa, substrāta sadalīšanas mikroierīcēs un to slīpēšanas un pulēšanas un šķiedru pielīmēšanas.

Tika veiksmīgi izstrādātā Mikro-optikas salīmēšanas iekārta, lai izgatavotu optiskās šķiedras ar uzgaļiem, veiktu gaismas ievadīšanu ar vien- un daudzmodu optiskajām šķiedrām, pētītu fotonisko ierīču modas kvalitāti un zudumus mikroierīcēm ar viļņvadu izmēriem līdz pat $1 \times 1 \mu\text{m}$.

Optiskā signāla kvalitātes analīze $30 \times 30 \mu\text{m}$ viļņvadiem radīja Gausa tipa signāla jaudas uzlabošanas par 1,76 dB pēc mikroierīces malu pulēšanas un vēl par 7,69 dB pēc šķiedru pielīmēšanas. Modas mērījumu rezultāti 1×1 , 10×1 un $30 \times 30 \mu\text{m}$ *SU-8* viļņvadiem atbilst simulācijās iegūtiem rezultātiem. Gaismas ievadīšanas un izvadīšanas zudumi kopā LMR ierīcei ar šķiedrām tika aprēķināti kā $3,41 \pm 0,52$ dB. Rezultāts ir ievērojami labāks nekā apskatītajos pētījumos.

Uzlabot gaismas ievadīšanas efektivitāti var, izmantojot šķiedras ar atbilstoši mazāko *MFD* un izveidojot pret-atstarošanas pārklājumus uz optiskās šķiedras uzgaļiem, ko var panākt ar *PVD* vai *ALD* metožu izstrādi. Turklāt, var izstrādāt 3D *SU-8* konusveida savienojumu, sākumā veicot 3D simulācijas, un tad izgatavot to, piemēram, izmantojot elektronu staru litogrāfiju. Mērīšanas procedūru varētu uzlabot, papildinot Mikro-optikas salīmēšanas iekārtu ar stara dalītāju pie *CMOS* mērīšanas kameras un fotodetektora, lai varētu atsevišķi izvērtēt fotonisko čipu zudumus.

Izstrādātā pulēšanas metode neļāva sagatavot OGS fotonisko čipu turpmākiem mērījumiem un šķiedru pielīmēšanai, jo ierīces $1 \times 1 \mu\text{m}$ viļņvadi tika sabojāti slīpēšanas un pulēšanas procesā. Turpmāk ir nepieciešams uzlabot šo procesu un veikt viļņvadu galu kvalitātes SEM analīzi.

Šajā darbā izmantotās metodikas un iepriekšminētie problēmu iespējamie risinājumi norāda turpmāko pētījumu virzienus, ko iespējams veikt LU CFI fotonikas platformas attīstīšanai.

DALĪBAS KONFERENCĒS UN PUBLIKĀCIJĀS

Maģistra darba rezultāti prezentēti konferencēs:

Konferenču prezentācijas:

Bendins A., Bundulis A., Ļetko E., Mozolevskis G., “*Light coupling into SU-8 waveguides*”, Nordic Nanolab User meeting 2022, Gēteborga, Zviedrija, Maijs 2022.

PATEICĪBAS

Latvijas Universitātes Cietvielu fizikas institūts kā izcilības centrs ir saņēmis finansējumu no Eiropas Savienības programmas *Horizon 2020 Framework Programme H2020-WIDESPREAD-01-2016-2017-TeamingPhase2*, projekta CAMART² granta līguma Nr.739508 ietvaros. Šis darbs ir līdzfinansēts Eiropas Reģionālās attīstības fonda projekta "Optiskais gāzes sensors" Nr. *KC-PI-2020/47* ietvaros:

1.2.1.2. specifiskā mērķa "Atbalsts tehnoloģiju pārneses sistēmas pilnveidošanai";

1.2.1. Darbības programmas "Izaugsme un nodarbinātība" "Palielināt privātā sektora ieguldījumus pētniecībā un attīstībā".

IZMANTOTĀ LITERATŪRA UN AVOTI

- [1] X. Tu *et al.*, “50-Gb/s silicon optical modulator with traveling-wave electrodes,” *Opt. Express*, vol. 21, no. 10, pp. 12776–12782, May 2013, doi: 10.1364/OE.21.012776.
- [2] Z. Zhang, R. Pitwon, and J. Feng, “Optics Communications: Special issue on Polymer Photonics and Its Applications,” *Opt. Commun.*, vol. 362, pp. 1–2, 2016, doi: 10.1016/j.optcom.2015.11.010.
- [3] W. Wang, L. Zhang, and W. Zhang, “Analysis of Optical Fiber Methane Gas Detection System,” *Procedia Eng.*, vol. 52, pp. 401–407, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.02.160.
- [4] W. Bogaerts *et al.*, “Silicon microring resonators,” *Laser Photon. Rev.*, 2011, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/2384/582831>.
- [5] D. Kohler, I. Allegro, S. F. Wondimu, L. Hahn, W. Freude, and C. Koos, “Lasing in Si₃N₄-organic hybrid (SiNOH) waveguides,” *Opt. Express*, vol. 28, no. 4, p. 5085, 2020, doi: 10.1364/oe.381572.
- [6] Y. Zhang *et al.*, “A compact and low loss Y-junction for submicron silicon waveguide,” *Opt. Express*, vol. 21, no. 1, pp. 1310–1316, Jan. 2013, doi: 10.1364/OE.21.001310.
- [7] X. Wang, W. Shi, H. Yun, S. Grist, N. A. F. Jaeger, and L. Chrostowski, “Narrow-band waveguide Bragg gratings on SOI wafers with CMOS-compatible fabrication process,” *Opt. Express*, vol. 20, no. 14, pp. 15547–15558, Jul. 2012, doi: 10.1364/OE.20.015547.
- [8] M. Rosenberger *et al.*, “Polymer planar waveguide Bragg gratings: fabrication, characterization, and sensing applications,” in *Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XXI*, 2017, vol. 10106, pp. 322–330, doi: 10.1117/12.2249830.
- [9] R. Marchetti *et al.*, “Low-Loss Micro-Resonator Filters Fabricated in Silicon by CMOS-Compatible Lithographic Techniques: Design and Characterization,” *Appl. Sci.*, vol. 7, no. 2, 2017, doi: 10.3390/app7020174.
- [10] G. T. Reed, G. Mashanovich, F. Y. Gardes, and D. J. Thomson, “Silicon optical modulators,” *Nat. Photonics*, vol. 4, no. 8, pp. 518–526, 2010, doi: 10.1038/nphoton.2010.179.
- [11] B. Lin *et al.*, “A Polymer Asymmetric Mach-Zehnder Interferometer Sensor Model Based on Electrode Thermal Writing Waveguide Technology,” *Micromachines*, vol. 10, no. 10, p. 628, Sep. 2019, doi: 10.3390/mi10100628.
- [12] R. G. Hunsperger and A. Lee, “Integrated optics theory and technology.” Springer, 2009, doi: 10.1007/b98730.
- [13] A. Pépin, V. Studer, D. Decanini, and Y. Chen, “Exploring the high sensitivity of SU-8 resist for high resolution electron beam patterning,” *Microelectron. Eng.*, vol. 73–74, pp.

- 233–237, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mee.2004.02.046>.
- [14] G. Son, S. Han, J. Park, K. Kwon, and K. Yu, “High-efficiency broadband light coupling between optical fibers and photonic integrated circuits,” *Nanophotonics*, vol. 7, no. 12, pp. 1845–1864, 2018, doi: [doi:10.1515/nanoph-2018-0075](https://doi.org/10.1515/nanoph-2018-0075).
- [15] R. Marchetti, C. Lacava, L. Carroll, K. Gradkowski, and P. Minzioni, “Coupling strategies for silicon photonics integrated chips \[Invited\],” *Photon. Res.*, vol. 7, no. 2, pp. 201–239, Feb. 2019, doi: [10.1364/PRJ.7.000201](https://doi.org/10.1364/PRJ.7.000201).
- [16] D. Vermeulen and C. V. Poulton, “Optical Interfaces for Silicon Photonic Circuits,” *Proc. IEEE*, vol. 106, pp. 2270–2280, 2018.
- [17] X. Mu, S. Wu, L. Cheng, and H. Y. FU, “Edge Couplers in Silicon Photonic Integrated Circuits: A Review,” *Appl. Sci.*, vol. 10, p. 1538, 2020, doi: [10.3390/app10041538](https://doi.org/10.3390/app10041538).
- [18] Y. Xin, G. Pandraud, Y. Zhang, and P. French, “Single-mode tapered vertical SU-8 waveguide fabricated by E-beam lithography for analyte sensing,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 15, 2019, doi: [10.3390/s19153383](https://doi.org/10.3390/s19153383).
- [19] D. Makwani and R. Vijaya, “Fabrication of SU-8 ridge waveguides by optical lithography and their characterization,” *International Journal of Nanoscience*, vol. 10, no. 4–5, pp. 771–775, 2011, doi: [10.1142/S0219581X11008873](https://doi.org/10.1142/S0219581X11008873).
- [20] E. A. J. Marcatili, “Dielectric rectangular waveguide and directional coupler for integrated optics,” *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 48, no. 7, pp. 2071–2102, 1969, doi: [10.1002/j.1538-7305.1969.tb01166.x](https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1969.tb01166.x).
- [21] C.-W. Lee, “Device building blocks for photonic integration : design and process.,” Aug. 2008.
- [22] G. Reed, “An Introduction to Silicon Photonics,” in *Springer Series in Optical Sciences*, vol. 119, 2007, pp. 161–203.
- [23] “Mode Field Diameter (MFD).” Humanetics 2022, 2022, [Online]. Available: <https://fibercore.humaneticsgroup.com/services-support/fiberpaedia/m/mode-field-diameter-mfd>.
- [24] A. W. Snyder and J. Love, *Optical waveguide theory*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [25] D. Bailey and E. Wright, *Practical fiber optics*. Elsevier, 2003.
- [26] S. Zhu, Q. Fang, M. B. Yu, G. Q. Lo, and D. L. Kwong, “Propagation losses in undoped and n-doped polycrystalline silicon wire waveguides,” *Opt. Express*, vol. 17, no. 23, pp. 20891–20899, Nov. 2009, doi: [10.1364/OE.17.020891](https://doi.org/10.1364/OE.17.020891).
- [27] F. P. Payne and J. P. R. Lacey, “A theoretical analysis of scattering loss from planar

- optical waveguides,” *Opt. Quantum Electron.*, vol. 26, no. 10, pp. 977–986, 1994, doi: 10.1007/BF00708339.
- [28] G. Zhang, X. L. Feng, B. Liedberg, and A. Q. Liu, “Gas Sensor for Volatile Organic Compounds Detection Using Silicon Photonic Ring Resonator,” *Procedia Engineering*, vol. 168, pp. 1771–1774, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2017.02.002.
- [29] T. Fuhrmann and J. Salbeck, “Organic materials for photonic devices,” *MRS Bull.*, vol. 28, no. 5, pp. 354–359, 2003.
- [30] G. Keiser, “Optical Fiber Communications,” in *Wiley Encyclopedia of Telecommunications*, 2003.
- [31] D. Liang, G. Roelkens, R. Baets, and J. E. Bowers, “Hybrid Integrated Platforms for Silicon Photonics,” *Materials (Basel)*, vol. 3, no. 3, pp. 1782–1802, 2010, doi: 10.3390/ma3031782.
- [32] D. Liang and J. E. Bowers, “Recent progress in lasers on silicon,” *Nat. Photonics*, vol. 4, no. 8, pp. 511–517, 2010, doi: 10.1038/nphoton.2010.167.
- [33] B. Jalali and S. Fathpour, “Silicon Photonics,” *J. Light. Technol.*, vol. 24, no. 12, pp. 4600–4615, Dec. 2006, [Online]. Available: <http://opg.optica.org/jlt/abstract.cfm?URI=jlt-24-12-4600>.
- [34] P. Dong, Y.-K. Chen, G.-H. Duan, and D. Neilson, “Silicon photonic devices and integrated circuits,” *Nanophotonics*, vol. 3, 2014, doi: 10.1515/nanoph-2013-0023.
- [35] R. Soref, “The Past, Present, and Future of Silicon Photonics,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 12, no. 6, pp. 1678–1687, 2006, doi: 10.1109/JSTQE.2006.883151.
- [36] B. Momeni, E. S. Hosseini, and A. Adibi, “Planar photonic crystal microspectrometers in silicon-nitride for the visible range,” *Opt. Express*, vol. 17, no. 19, pp. 17060–17069, Sep. 2009, doi: 10.1364/OE.17.017060.
- [37] T. C. Sum, A. A. Bettiol, J. A. van Kan, F. Watt, E. Y. B. Pun, and K. K. Tung, “Proton beam writing of low-loss polymer optical waveguides,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 83, no. 9, pp. 1707–1709, Sep. 2003, doi: 10.1063/1.1606502.
- [38] X. C. Tong, *Advanced materials for integrated optical waveguides*, vol. 46. Springer, 2014.
- [39] R. Guertin, M. A. Bianki, C. Lemieux-Leduc, and Y. A. Peter, “Multi-gas detection using Fabry-Perot interferometers on silicon chip,” *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 335, no. September 2020, 2021, doi: 10.1016/j.snb.2021.129655.
- [40] M. Schell and D. de Felipe, “Polymer based photonic integration for sensors,

- communication, and active optical PCB,” in *2017 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ)*, 2017, pp. 185–188.
- [41] Z. Zhang *et al.*, “Hybrid photonic integration on a polymer platform,” *Photonics*, vol. 2, no. 3, pp. 1005–1026, 2015, doi: 10.3390/photonics2031005.
- [42] L. Jacot-Descombes *et al.*, “Inkjet Printing of High Aspect Ratio Superparamagnetic SU-8 Microstructures with Preferential Magnetic Directions,” *Micromachines*, vol. 5, pp. 583–593, Aug. 2014, doi: 10.3390/mi5030583.
- [43] T. Xu, J. H. Yoo, S. Babu, S. Roy, J.-B. Lee, and H. Lu, “Characterization of the mechanical behavior of {SU}-8 at microscale by viscoelastic analysis,” *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 26, no. 10, p. 105001, Aug. 2016, doi: 10.1088/0960-1317/26/10/105001.
- [44] F. Ceysens and R. Puers, “SU-8 Photoresist BT - Encyclopedia of Nanotechnology,” B. Bhushan, Ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 2016, pp. 1–16.
- [45] M. Nordstrom, D. A. Zauner, A. Boisen, and J. Hubner, “Single-Mode Waveguides With SU-8 Polymer Core and Cladding for MOEMS Applications,” *J. Light. Technol.*, vol. 25, no. 5, pp. 1284–1289, 2007, doi: 10.1109/JLT.2007.893902.
- [46] M. Ghantasala, E. Harvey, and D. Sood, “Excimer laser micromachining of structures using SU8,” 1999, doi: 10.1117/12.361208.
- [47] A. Piruska, A. A. Bhagat, K. Zhou, E. T. K. Peterson, I. Papautsky, and C. Seliskar, “Characterization of SU8 optical multimode waveguides for integrated optics and sensing on microchip devices,” *Proc. SPIE - Int. Soc. Opt. Eng.*, vol. 6112, Jan. 2006, doi: 10.1117/12.655667.
- [48] E. Nitiss, A. Bundulis, A. Tokmakovs, J. Busenbergs, and M. Rutkis, “All-Organic Waveguide Sensor for Volatile Solvent Sensing,” *Photonic Sensors*, vol. 9, Apr. 2019, doi: 10.1007/s13320-019-0543-z.
- [49] A. K. Othayoth, B. Srinivas, K. Murugan, and K. Muralidharan, “Poly(methyl methacrylate)/polyphosphate blends with tunable refractive indices for optical applications,” *Opt. Mater. (Amst.)*, vol. 104, p. 109841, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.109841>.
- [50] “PMMA and Copolymer Technical Data Sheet.” Kayaku Advanced Materials, 2021, [Online]. Available: <https://kayakuam.com/wp-content/uploads/2020/07/KAM-PMMA-TDS.4.12.21.pdf>.
- [51] D. Bailey and E. Wright, “5 - Connecting fibers,” D. Bailey and E. B. T.-P. F. O. Wright, Eds. Oxford: Newnes, 2003, pp. 97–119.

- [52] B. G. Yacobi, S. Martin, K. Davis, A. Hudson, and M. Hubert, “Adhesive bonding in microelectronics and photonics,” *J. Appl. Phys.*, vol. 91, no. 10, pp. 6227–6262, 2002, doi: 10.1063/1.1467950.
- [53] R. Rubin, “Fiber optic connectors: Meeting polishing demands,” *Photonics Spectra*, vol. 37, no. 11. 2003.
- [54] D. B. L. Doui, L. Gallais, C. Hecquet, T. Bégou, J. Lumeau, and M. Commandré, “Analysis of energy deposition and damage mechanisms in single layer optical thin films irradiated by IR and UV femtosecond pulses,” in *Proc.SPIE*, Oct. 2015, vol. 9627, p. 962718, doi: 10.1117/12.2192983.
- [55] H. Liu, L. Jensen, H. Mädebach, P. Ma, and D. Ristau, “Comparison of ALD and IBS HfO₂/Al₂O₃ anti-reflection coatings for the harmonics of the Nd: YAG laser,” in *Proc.SPIE*, Jun. 2018, vol. 10691, p. 106911B, doi: 10.1117/12.2315444.
- [56] K. K. Tung, W. H. Wong, and E. Y. Pun, “Polymeric optical waveguides using direct ultraviolet photolithography process,” *Appl. Phys. A*, vol. 80, pp. 621–626, 2005.
- [57] J. Marsella, D. Durham, and L. Molnar, “Handbook of Cleaning for Semiconductor Manufacturing.” Scrivener Publishing LLC Beverly, MA, USA, 2011.
- [58] MicroChem (Woburn; MA), “SU-8 2000 3000 Permanent Photoresists Resist Description,” <http://www.microchem.com/pdf/SU-8-table-of-properties.pdf>, Accessed: 2017-06-06. 2000, [Online]. Available: <http://www.microchem.com/pdf/SU-8-table-of-properties.pdf>.
- [59] M. Sharif and B. Pourabbas, “Enhancement of Electrical and Mechanical Properties of SU-8 Photocrosslinked Coatings Containing Polypyrrole-graphene Oxide Nanoparticles,” *J. Photopolym. Sci. Technol.*, vol. 29, pp. 787–791, Dec. 2016, doi: 10.2494/photopolymer.29.787.
- [60] E. F. Reznikova, J. Mohr, and H. Hein, “Deep photo-lithography characterization of SU-8 resist layers,” *Microsystem Technologies*, vol. 11, no. 4–5. pp. 282–291, 2005, doi: 10.1007/s00542-004-0432-1.
- [61] M. T. Do, “Fabrication of submicrometer 3D structures by one-photon absorption direct laser writing and applications,” Jan. 2015.
- [62] G. S. May and C. J. Spanos, *Fundamentals of semiconductor manufacturing and process control*. John Wiley & Sons, 2006.
- [63] M. Jakešová, *Wireless Bioelectronic Devices Driven by Deep Red Light*. 2021.
- [64] Y. Morimoto, T. Sumitomo, M. Yoshioka, and T. Takemura, “Recent progress on UV lamps for industries,” in *Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications*

- Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting.*, 2004, vol. 2, pp. 1008–1015 vol.2, doi: 10.1109/IAS.2004.1348536.
- [65] J. Dudutis *et al.*, “In-depth comparison of conventional glass cutting technologies with laser-based methods by volumetric scribing using Bessel beam and rear-side machining,” *Opt. Express*, vol. 28, no. 21, pp. 32133–32151, Oct. 2020, doi: 10.1364/OE.402567.
- [66] “Diamond Scribing on GaAs and InP.pdf.” TomoSemi GmbH, 2020, [Online]. Available: <https://www.tomosemi.com/wiki/diamond-scribing/>.
- [67] S. Wan and G. P. Watson, “How to cleave wafers: LatticeGear protocol,” 2021.
- [68] “Chemical Mechanical Planarization—An Introduction,” in *Chemical Mechanical Planarization of Microelectronic Materials*, John Wiley & Sons, Ltd, 1997, pp. 1–14.
- [69] M. S. Ab Rahman *et al.*, “The study of the good polishing method for polymer SU-8 waveguide,” *Opt. Appl.*, Jan. 2009.
- [70] Z. W. Zhong, Z. F. Wang, B. M. P. Zirajutheen, Y. S. Tan, and Y. H. Tan, “Polishing of poly(methyl methacrylate), polycarbonate, and SU-8 polymers,” *Materials Science-Poland*, vol. 25, no. 1, pp. 103–112, 2007.
- [71] K. M. Nowak, H. J. Baker, and D. R. Hall, “Efficient laser polishing of silica micro-optic components,” *Appl. Opt.*, vol. 45, no. 1, pp. 162–171, Jan. 2006, doi: 10.1364/AO.45.000162.
- [72] I. B. T.-G. S. and T. Fanderlik, Ed., “3 - The Technology of Silica Glass Manufacture,” in *Silica Glass and its Application*, vol. 11, Elsevier, 1991, pp. 95–193.
- [73] E. L. H. Thomas, G. W. Nelson, S. Mandal, J. S. Foord, and O. A. Williams, “Chemical mechanical polishing of thin film diamond,” *Carbon N. Y.*, vol. 68, pp. 473–479, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.11.023>.
- [74] “CMP Variables and Manipulations,” in *Chemical Mechanical Planarization of Microelectronic Materials*, John Wiley & Sons, Ltd, 1997, pp. 36–47.
- [75] “Oxide CMP Processes Mechanisms and Models,” in *Chemical Mechanical Planarization of Microelectronic Materials*, John Wiley & Sons, Ltd, 1997, pp. 129–180.
- [76] P. B. Zantye, A. Kumar, and A. K. Sikder, “Chemical mechanical planarization for microelectronics applications,” *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 45, no. 3, pp. 89–220, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2004.06.002>.
- [77] F. W. Preston, “The Theory and Design of Plate Glass Polishing Machines.”
- [78] B. Goss, “Bonding glass and other substrates with UV curing adhesives,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 22, no. 5, pp. 405–408, 2002, doi: <https://doi.org/10.1016/S0143->

- 7496(02)00022-2.
- [79] M. Zickar, W. Noell, C. R. Marxer, and N. Rooij, “MEMS compatible micro-GRIN lenses for fiber to chip coupling of light,” *Opt. Express*, vol. 14, pp. 4237–4249, Jun. 2006, doi: 10.1364/OE.14.004237.
- [80] T. Akashi and Y. Yoshimura, “Profile Control of a Borosilicate-Glass Groove Formed by Deep Reactive Ion Etching,” in *DTIP 2007*, Apr. 2007, pp. 179–183, [Online]. Available: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00257684>.
- [81] M. Kufner, S. Kufner, L. Fiber, and O. Gmbh, “Multimode Splitters Improve Data Transmission.” [Online]. Available: https://www.photonics.com/Articles/Multimode_Splitters_Improve_Data_Transmission/a54835.
- [82] B. E. . Saleh and M. . Teich, “Fundamentals of Photonics 3rd Edition,” vol. 5. pp. 447–469, 2013, [Online]. Available: <https://www.crcpress.com/Fundamentals-of-Picoscience/Sattler/p/book/9781466505094#googlePreviewContainer>.
- [83] L. Chrostowski and M. Hochberg, *Silicon Photonics Design: From Devices to Systems*. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.
- [84] J. Notaros *et al.*, “Ultra-efficient CMOS fiber-to-chip grating couplers,” in *2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, 2016, pp. 1–3.
- [85] S. Nambiar, P. Sethi, and S. K. Selvaraja, “Grating-assisted fiber to chip coupling for SOI photonic circuits,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 8, no. 7. 2018, doi: 10.3390/app8071142.
- [86] R. Marchetti *et al.*, “High-efficiency grating-couplers: demonstration of a new design strategy,” *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–8, 2017.
- [87] C. Prokop, S. Schoenhardt, B. Laegel, S. Wolff, A. Mitchell, and C. Karnutsch, “Air-suspended SU-8 polymer waveguide grating couplers,” *J. Light. Technol.*, vol. 34, no. 17, pp. 3966–3971, 2016.
- [88] D. Taillaert *et al.*, “Grating Couplers for Coupling between Optical Fibers and Nanophotonic Waveguides,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 45, no. 8A, pp. 6071–6077, Aug. 2006, doi: 10.1143/jjap.45.6071.
- [89] M. Arumugam, “Optical fiber communication—An overview,” *Pramana*, vol. 57, no. 5, pp. 849–869, 2001, doi: 10.1007/s12043-001-0003-2.
- [90] V. R. Almeida, R. R. Panepucci, and M. Lipson, “Nanotaper for compact mode conversion,” *Opt. Lett.*, vol. 28, no. 15, pp. 1302–1304, Aug. 2003, doi: 10.1364/OL.28.001302.

- [91] B. Sun, C. Cai, H. Ni, and R. Tan, "Coupler for butt-coupling between edge-emitting lasers and inverted Si taper waveguide," *Int. J. Mod. Phys. B*, vol. 33, p. 1950074, 2019, doi: 10.1142/S0217979219500747.
- [92] M. Fritze *et al.*, "Fabrication of three-dimensional mode converters for silicon-based integrated optics," *J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct.*, vol. 21, 2003, doi: 10.1116/1.1625967.
- [93] C. L. Lee, Likarn, and C. S. Hsiao, "Design for High Efficiency Fiber/Waveguide Power Coupler with SU8 Polymer," *IERI Procedia*, vol. 4, pp. 282–287, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ieri.2013.11.040>.
- [94] S. Khan, S. M. Buckley, J. Chiles, R. P. Mirin, S. W. Nam, and J. M. Shainline, "Low-loss, high-bandwidth fiber-to-chip coupling using capped adiabatic tapered fibers," *APL Photonics*, vol. 5, no. 5, p. 56101, 2020, doi: 10.1063/1.5145105.
- [95] Y. Xin, G. Pandraud, Y. Zhang, and P. French, "Single-Mode Tapered Vertical SU-8 Waveguide Fabricated by E-Beam Lithography for Analyte Sensing," *Sensors*, vol. 19, no. 15, 2019, doi: 10.3390/s19153383.
- [96] L. Vivien, S. Laval, E. Cassan, X. Le Roux, and D. Pascal, "2-D Taper for Low-Loss Coupling Between Polarization-Insensitive Microwaveguides and Single-Mode Optical Fibers," *J. Light. Technol.*, vol. 21, no. 10, p. 2429, Oct. 2003, [Online]. Available: <http://www.osapublishing.org/jlt/abstract.cfm?URI=jlt-21-10-2429>.
- [97] M. Pu, L. Liu, H. Ou, K. Yvind, and J. M. Hvam, "Ultra-low-loss inverted taper coupler for silicon-on-insulator ridge waveguide," *Opt. Commun.*, vol. 283, no. 19, pp. 3678–3682, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2010.05.034>.
- [98] L. A. Wang and C. D. Su, "Tolerance analysis of aligning an astigmatic laser diode with a single-mode optical fiber," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 14, no. 12, pp. 2757–2762, 1996, doi: 10.1109/50.545794.
- [99] S. Toyoda, N. Ooba, M. Hikita, T. Kurihara, and S. Imamura, "Propagation loss and birefringence properties around 1.55 μm of polymeric optical waveguides fabricated with cross-linked silicone," *Thin Solid Films*, vol. 370, no. 1, pp. 311–314, 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(00\)00921-4](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(00)00921-4).
- [100] H. P. Weber, F. A. Dunn, and W. N. Leibolt, "Loss Measurements in Thin-Film Optical Waveguides," *Appl. Opt.*, vol. 12, no. 4, pp. 755–757, Apr. 1973, doi: 10.1364/AO.12.000755.
- [101] E. Nitiss, J. Busenbergs, and M. Rutkis, "Optical propagation loss measurements in electro optical host - Guest waveguides," *Proc SPIE*, vol. 8772, May 2013, doi:

10.1117/12.2017226.

- [102] M. Tenje, D. Zauner, A. Boisen, and J. Hübner, “Monolithic single mode SU-8 waveguides for integrated optics,” in *Proc SPIE*, 2006, vol. 6112, p. 611206, doi: 10.1117/12.644514.
- [103] T.-N. Nguyen *et al.*, “Nondestructive method to measure coupling and propagation losses in optical guided structures,” *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 29, p. 3393, Nov. 2012, doi: 10.1364/JOSAB.29.003393.
- [104] M. Tachikura, “Internal Loss Measurement Technique for Optical Devices Equipped with Fiber Connectors at Both Ends,” *Applied Optics*, vol. 34, no. 34, p. 8056, 1995, doi: 10.1364/ao.34.008056.
- [105] A. M. Kowalevycz and F. Bucholtz, “Beam divergence from an SMF-28 optical fiber. Optical Sciences Division, Naval Research Laboratory,” *Distribution*. pp. 1–17, 2006.
- [106] E. Letko, A. Bundulis, and G. Mozolevskis, “Theoretical Development of Polymer-Based Integrated Lossy-Mode Resonance Sensor for Photonic Integrated Circuits,” *Photonics*, vol. 9, no. 10, 2022, doi: 10.3390/photonics9100764.
- [107] D. K. Lee, J. In, and S. Lee, “Standard deviation and standard error of the mean,” *Korean J. Anesthesiol.*, vol. 68, no. 3, pp. 220–223, 2015.
- [108] C. S. Huang and W. C. Wang, “Large-core single-mode rib SU8 waveguide using solvent-assisted microcontact molding,” *Applied Optics*, vol. 47, no. 25, pp. 4540–4547, 2008, doi: 10.1364/AO.47.004540.
- [109] I. Fanderlik, *Silica glass and its application*. Elsevier, 2013.

PIELIKUMI

1. pielikums
SU-8 fotorezista īpašības

Resist Description

| Property | SU-8 2000 | SU-8 3000 |
|--|--------------|---------------|
| Tone | Negative | Negative |
| Max Single Coat Thickness, μm | 250 | 100 |
| Aspect Ratio | 10:1 | 5:1 |
| Storage Condition/Life | 15-30°C/1 yr | 15-30°C/ 1 yr |

Film Mechanical Properties*

| Property | SU-8 2000 | SU-8 3000 |
|--|-----------|-----------|
| Softening point, DMA (°C) | 210 | 200 |
| Thermal Stability in Nitrogen, onset/5% weight loss (°C) | 295/327 | 277/357 |
| Thermal Stability in Air, onset/5% weight loss (°C) | 279/311 | |
| Young's Modulus (GPa) | 2.0 | 2.0 |
| Coeff. of Thermal Expansion, CTE (ppm/°C) | 52 | 52 |
| Tensile Strength (MPa) | 60 | 73 |
| Elongation at Break (%) | 6.5 | 4.8 |
| Thermal Conductivity (W/m ² K) | 0.3 | 0.2 |

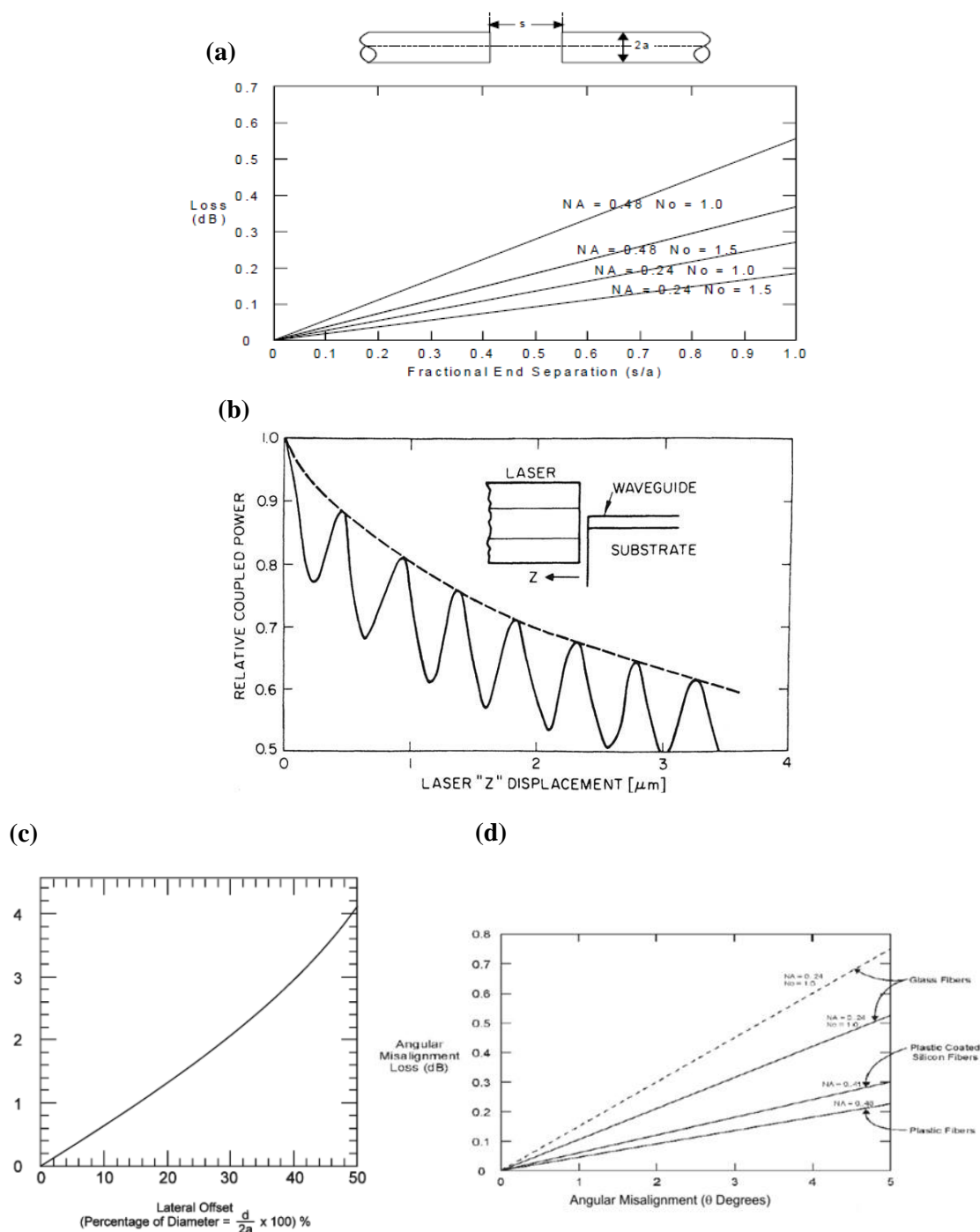
Film Electrical Properties*

| Property | SU-8 2000 | SU-8 3000 |
|---|----------------------|----------------------|
| Dielectric Constant, 1 GHz, 50% RH | 4.1 | 3.2 |
| Dielectric loss, 1 GHz | 0.015 | 0.033 |
| Dielectric Strength (V/ μm) | 112 | 115 |
| Volume Resistivity (Ωcm) | 2.8×10^{16} | 1.8×10^{16} |
| Surface Resistivity (Ωcm) | 1.8×10^{17} | 5.1×10^{16} |

*All samples hardbaked at 150°C/30 min


Gaismas ievadīšanas zudumu sakarības starp viļņvadiem ar Gausa tipa gaismas lauka sadalījumiem

Apraksts: a). Tipiskie ievadīšanas zudumi atkarībā no attāluma un starp viļņvadu galiem un viļņvadu rādiusu (vienādu šķiedru piemērā); b). *Farbi-Perot* efekts ievadot gaismu no attāluma; c). Tipiskie ievadīšanas zudumi atkarībā no laterālas pozicionēšanas (% no diametra, jeb $\frac{d}{2a} \cdot 100\%$); d). Tipiskie zudumi atkarībā no ievadīšanas leņķa θ° . [12], [30]



THORLABS

**Single Mode Fiber:
600 to 770 nm**



630HP


Description

Thorlabs' high-performance fibers were developed for applications such as RGB components requiring generation of couplers, diode pigtailed and unique delivery needs. These fibers feature greater proof test levels and a tighter second mode cutoff tolerance than standard fibers, resulting in higher strength, increased component reliability, better production yields and reduced costs for component manufacturers.

Specifications


| Geometrical & Mechanical | |
|--------------------------|---|
| Cladding Diameter | 125 ± 1 μm |
| Coating Diameter | 245 ± 15 μm |
| Core Diameter | 3.5 μm |
| Core-Clad Concentricity | <0.5 μm |
| Coating Concentricity | ≤5 μm |
| Coating Material | UV Cured, Dual Acrylate |
| Operating Temperature | -55 to 85 °C |
| Minimum Bend Radius | 6 mm (Momentary) 13 mm (Long Term) |
| Proof Test Level | ≥200 kpsi (2%) (1.4 GN/m ²) |

| Optical | |
|--|-----------------------|
| Numerical Aperture (nominal) | 0.13 |
| Core Attenuation | ≤12 dB/km @ 630 nm |
| Operating Wavelength | 600 - 770 nm |
| Second Mode Cut-Off | 570 ± 30 nm |
| Mode Field Diameter (nominal) (1/e ² fit - near field) | 4.0 ± 0.5 μm @ 630 nm |




Specifications Subject
to Change without Notice

November 29, 2017
6828-S01, Rev F
✉ www.thorlabs.com/contact



0.10 NA Multimode Fiber

FG025LJA



Description

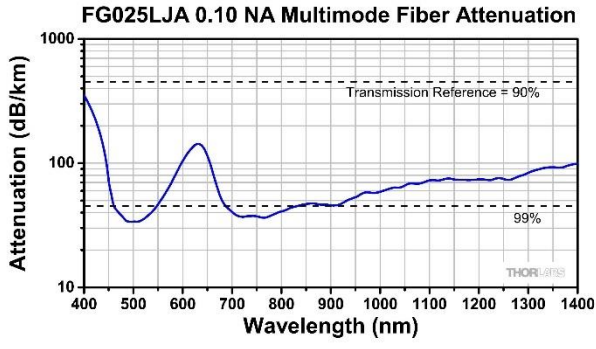
FG025LJA fiber is specifically designed for applications such as laser projection based technologies as well as advanced sensing applications. These fibers provide ultra-high stability in laser transmission.


The fiber is protected with an enhanced coating material that guarantees long-term performance and reliability. The dual layer acrylate material is easy to use, insensitive to tight bending radii, and easy to strip, leaving no residue.

Specifications

| Geometrical & Mechanical | | Optical | |
|--------------------------|--------------------|----------------------|----------------------------------|
| Cladding Diameter | 125 ± 2.0 μm | Numerical Aperture | 0.100 ± 0.015 |
| Coating Diameter | 245 ± 10 μm | Operating Wavelength | 400 to 550 nm and 700 to 1400 nm |
| Core Diameter | 25 ± 3.0 μm | | |
| Core/Clad Concentricity | <1.0 μm | | |
| Coating | Two-layer Acrylate | | |
| Operating Temperature | -60 to 85° C | | |
| Proof Test Level | ≥100 kpsi | | |

Performance Plot






The dashed lines on this graph are benchmarks. Each is calculated for a one meter long hypothetical reference fiber that transmits the noted percentage of input light. As an example, a 1 m long fiber that transmits 90% of input light has an attenuation of 0.458 dB/m, which is equivalent to 458 dB/km.


Specifications Subject to Change without Notice

June 23, 2016
TTN044358-S01, Rev B
✉ www.thorlabs.com/contact

Daudzmodu optiskās šķiedras *Thorlabs FG050UGA* specifikācijas



0.22 NA Standard Glass-Clad, Silica Core Multimode Fiber




Description

Thorlabs' 0.22 NA step-index multimode fibers feature a pure silica core with a fluorine-doped silica cladding and are available with either high or low hydroxyl ion (OH) concentrations for UV to visible (250 - 1200 nm) or visible to NIR (400 - 2400 nm) applications, respectively.

Specifications

| 0.22 NA Hard Cladding, Silica Core, Multimode Fiber | |
|---|--|
| Wavelength Range | 400 - 2400 nm (Low OH) 250 - 1200 nm (High OH) ^a |
| Core / Cladding | Pure Silica / Fluorine-Doped Silica |
| Coating | Acrylate |
| Proof Test | ≥100 kpsi |
| Operating Temperature | -40 to 85 °C |
| Numerical Aperture (NA) | 0.22 ± 0.02 |
| Bandwidth @ 820 nm | 15 MHz•km |



a. Solarization may occur at wavelengths below 300 nm

Visible to IR Transmission (400 - 2400 nm), Low OH

| Item # | Core Diameter | Clad Diameter | Coating Diameter | Maximum Attenuation @ 808 nm | Bend Radius Short Term/ Long Term |
|----------|---------------|---------------|------------------|------------------------------|--|
| FG050LGA | 50 ± 1 μm | 125 +1/-2 μm | 250 ± 10 μm | 8 dB/km | 120 x Cladding Diameter / 240 x Cladding Diameter |
| FG105LCA | 105 +1/-3 μm | 125 +1/-2 μm | 250 ± 10 μm | 8 dB/km | |
| FG200LEA | 200 ± 4 μm | 220 ± 2 μm | 320 ± 16 μm | 8 dB/km | |
| FG400LEA | 400 ± 8 μm | 440 ± 4 μm | 550 ± 15 μm | 8 dB/km | |

UV to Visible Transmission (250 - 1200 nm), High OH

| Item # | Core Diameter | Clad Diameter | Coating Diameter | Maximum Attenuation @ 808 nm | Bend Radius Short Term/ Long Term |
|----------|---------------|---------------|------------------|------------------------------|--|
| FG050UGA | 50 ± 1 μm | 125 +1/-2 μm | 250 ± 10 μm | 10 dB/km | 120 x Cladding Diameter / 240 x Cladding Diameter |
| FG105UCA | 105 +1/-3 μm | 125 +1/-2 μm | 250 ± 10 μm | 10 dB/km | |
| FG200UEA | 200 ± 4 μm | 220 ± 2 μm | 320 ± 16 μm | 10 dB/km | |
| FG400UEA | 400 ± 8 μm | 440 ± 4 μm | 550 ± 15 μm | 10 dB/km | |

Specifications Subject to Change without Notice

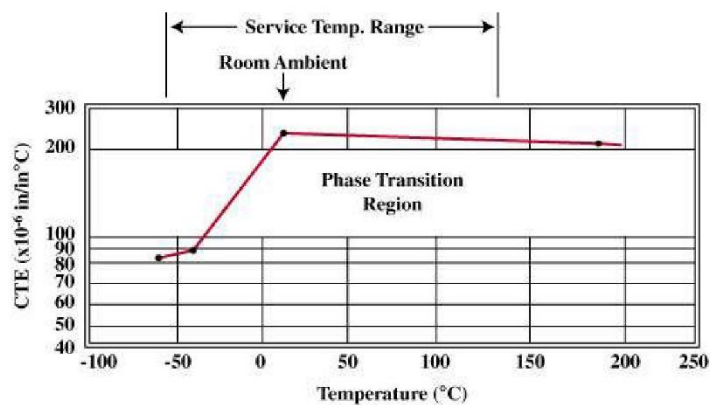
June 9, 2022
TTN006635-S01, Rev F
✉ www.thorlabs.com/contact

NOA 61 UV-cietošanas līmes specififikācijas

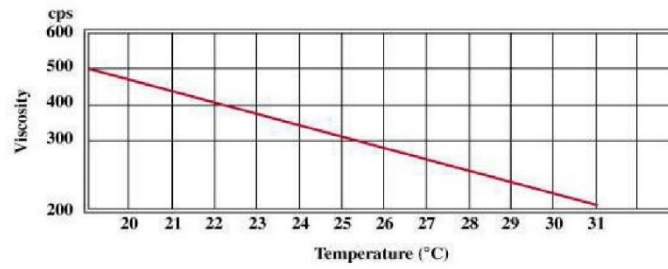
| Liquid | |
|---|--------------------|
| Color (APIHA) | 80 |
| Viscosity at 25° C | 300-450 cps |
| Refractive Index (liquid) | 1.527 |
| Density (gm/cc) | 1.231 |
| Surface Tension (dynes/cm) | 40.0 |
| Flash Point | 175°C |
| Cured Film | |
| Modulus (psi) | 135,000-160,000 |
| Tensile (psi) | 2,800-3,500 |
| Elongation at Failure | 35% |
| Shore D Hardness | 85 |
| Density (gm/cc) | 1.29 |
| Water Vapor Permeability (gm/100 sq. in./24hrs/mil) | 1.48 |
| Water Absorption | 0.16% |
| Linear Shrinkage | 1.5% |
| Dielectric Constant (1 MHz) | 4.04 |
| Dissipation Factor (1 MHz) | 0.045 |
| Volume Resistivity (ohm-cm) | 1.0 x 10 to the 15 |
| Surface Resistivity (Megohms) | 1.0 x 10 to the 9 |
| Dielectric Strength (volts/mil) | 980 |
| Arc Resistance (sec) | 95.6 |

| Wavelength (nm.) | Index |
|------------------|--------|
| 643.8 | 1.5562 |
| 589.6 | 1.5594 |
| 546.1 | 1.5634 |
| 480.0 | 1.5691 |
| 435.8 | 1.5754 |

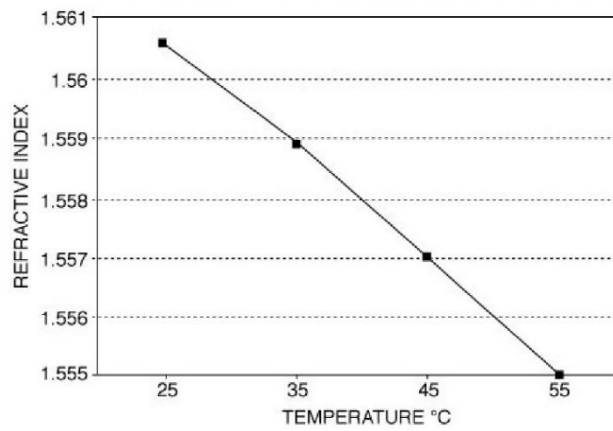
Coefficient of Thermal Expansion as a Function of Temperature



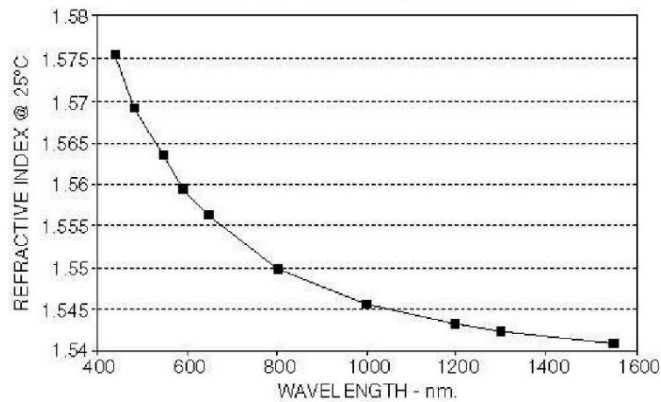
VISCOSITY vs. TEMPERATURE



TEMPERATURE vs. REFRACTIVE INDEX



REFRACTIVE INDEX vs. WAVELENGTH



The Formula for Dispersion of the Refractive Index of NOA 61

$$n_{25^{\circ}\text{C}} = 1.5375 + \frac{8290.45}{\lambda^2} - \frac{2.11046 \times 10^8}{\lambda^4}$$

n = refractive index at wavelength
 λ = wavelength in nanometers

AC-535-AN-F5 UV-cietošas līmes specifikācijas

**PRODUCT DESCRIPTION:**

- Base chemistry: epoxy only, cationic polymerization
- One component adhesive ready for use, solvent-free, UV cureable, room temperature stable

PRODUCT USE:

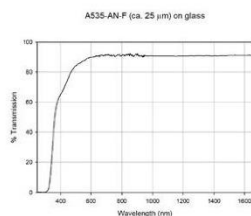
- Bonding glass to glass or glass to metal or glass to ceramic.
- Optoelectronics: fiber to v-groove, lens bonding
- Semiconductor: lens or prism to substrates

FEATURES:

- Epoxy only, high adhesion, high T_g, long shelf and working life, room temperature stable, not sensitive to oxygen in cure process, excellent reliability performances, robust for solder reflow process

INSTRUCTIONS FOR USE:

- 1) Clean the substrates to remove contamination, dust, moisture, salt and/or oil
- 2) Dispense adhesive on substrates
- 3) Bond substrates (with active alignment – optional)
- 4) UV cure to bond
- 5) Thermal post cure to enhance adhesion and full cure.

UV-VIS and NIR Spectra**A535-AN-F**

UV-curable Adhesive

UV CURING CONDITIONS:

- UV Metal Halide or Mercury UV light source with UV-A (320-400 nm) with UV light intensity: 100 to 1,000 mW/ cm²
- LED-365 nm with UV light intensity: 100 to 1,000 mW/ cm²

| LED-365 nm | | Metal Halide/Mercury(UV-A: 320-400 nm) | |
|-----------------------------------|-----------------|--|----------------|
| UV intensity(mW/cm ²) | time (sec) | UV intensity(mW/cm ²) | time (sec) |
| 100 | 100 sec or more | 100 | 50 sec or more |
| or 200 | 50 sec or more | or 200 | 25 sec or more |
| or 300 | 35 sec or more | or 300 | 17 sec or more |
| or 400 | 25 sec or more | or 400 | 13 sec or more |
| or 500 | 20 sec or more | or 500 | 10 sec or more |
| or 1,000 | 10 sec or more | or 1,000 | 5 sec or more |

- Thermal post cure at 60 to 100°C for 30 to 60 minutes will promote full cure and improve adhesion of bonded parts
- The recommended UV cure dose is at the adhesive. If the substrates absorb curing light, then the actual cure dose needs to be increased.

TYPICAL PROPERTIESUncured resin

| | |
|---------------------------|----------------|
| Viscosity (cps, 25 °C) | 4,500 to 5,000 |
| Density (g/mL) | 1.1 |
| Storage (°C) | 15 – 25 |
| Shelf life (15 - 25 °C) | 6 months |
| Working life (15 - 25 °C) | 3 months |

Cured film

| | |
|--|------------------------|
| Outgas, weight % (125°C, 120 hr, air) | 0.10 |
| Outgas, weight % (per MIL-STD 883/5011) | 0.19 |
| Outgas, weight % (per Telcordia GR-1221) | 0.13 |
| Water absorption (% , 100 °C until saturation) | 0.2 |
| Water permeability (g/m 24 hrs) | 2.7 x 10 ⁻⁴ |
| (50 °C/95% RH, 75 μm film) | |
| Shrinkage (linear, %) | < 0.2 |
| Hardness – Shore D | 95 |
| Glass transition temperature (DMA, °C) | 165 |
| Dielectric Strength (estimated, kV/mm) | 20-25 |
| Refractive index of cured film (25°C) | |
| @ 589 nm | 1.578 |
| @ 1310 nm | 1.562 |
| @ 1550 nm | 1.558 |
| Coefficient of thermal expansion (DMA by compression), 4-5 mm thick sample | |
| below T _g (x10 ⁻⁶), °C ⁻¹ | 28 |
| above T _g (x10 ⁻⁶), °C ⁻¹ | 82 |
| Physical properties tested at 25°C, 50% RH (ASTM D638) | |
| Tensile strength, MPa | 61 |
| Elongation (%) | 4 |
| Young's Modulus, MPa | 2,300 |
| Operating temperature, °C | -60 to 200 |

GENERAL USAGE INFORMATION:

Shipment: no restriction on shipment and no cold shipment is needed

Storage: After the adhesive is received in black syringes or amber HDPE bottles, room temperature storage (15-30°C) in the original container is required.

SAFETY AND HANDLING

The uncured adhesive can be cleaned from apparatus with isopropyl alcohol (IPA), methyl ethyl ketone (MEK), or commercial alcohol based cleaning solution. Avoid direct skin and eye contact. Use only in well ventilated areas. Use protective clothing, gloves and safety goggles. Read [Material Safety Data Sheet](#) before handling.

The information presented here represents our best available information and is believed to be reliable, but it does not constitute any guarantee or warranty. Inasmuch as Addison Clear Wave has no control over the exact manner in which others may use this information, it does not guarantee the results to be obtained. Nor does the company make any expressed or implied warranty of merchantability, or fitness for a particular purpose concerning the effects or results of such use. Purchasers are further responsible for determining the suitability of the product for its intended use and the appropriate manner of utilizing the production processes and applications so as to ensure safety, quality and effectiveness. Addison Clear Wave makes no warranties and assumes no liability in connection with the use or inability to use this product.

V1 032020

Addison Clear Wave Coatings, Inc., 3555 Legacy Blvd, St. Charles, IL 60174 USA

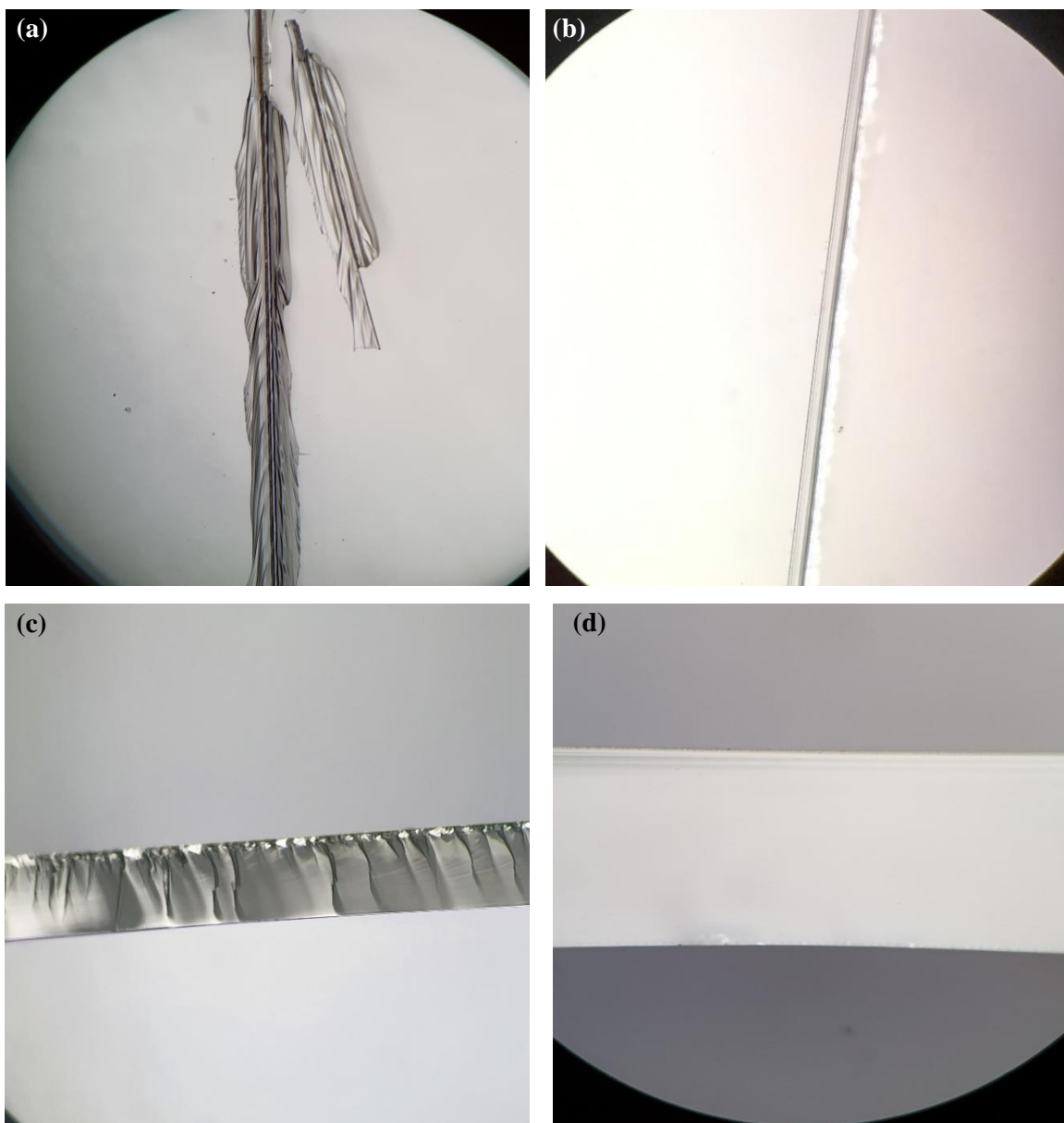
Tel: +1 630-444-1658, Fax: +1 630-444-1683, www.AddisonCW.com

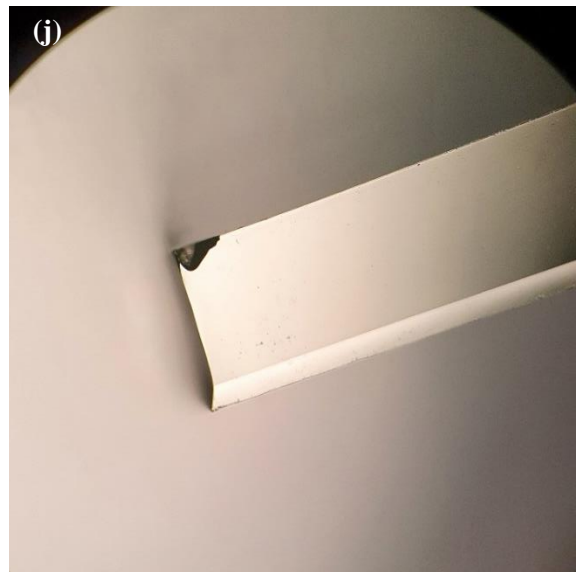
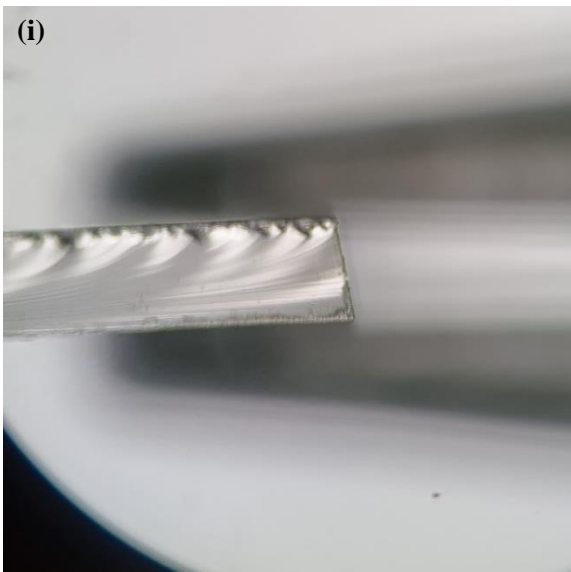
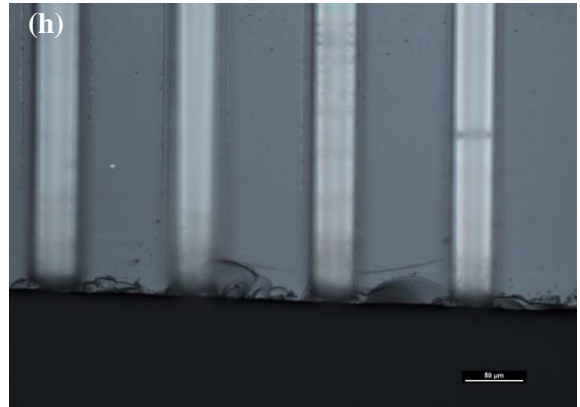
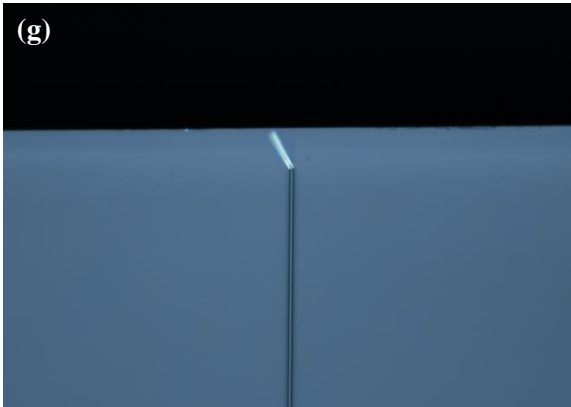
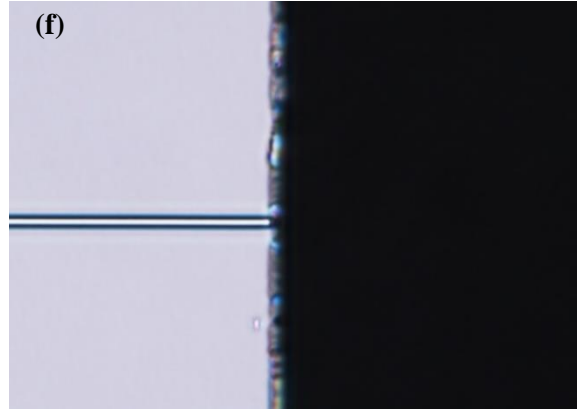
8. pielikums
Uzbūvētā režģa statistika

| Statistika | Vērtība |
|-----------------------------|------------------------|
| Režģa virsotnes | 1485 gab. |
| Trīsstūri | 2858 gab. |
| Malu elementi | 186 gab. |
| Virsošnes elementi | 10 gab. |
| Domēna elementu skaits | 2858 gab. |
| Minimālā elementa kvalitāte | 0,662 |
| Vidējā elementa kvalitāte | 0,9022 |
| Elementu laukuma attiecība | 0,01797 |
| Režģa laukums | 1,0E-10 m ² |

Fotonisko čipu iegriešanas un laušanas optimizācijas process

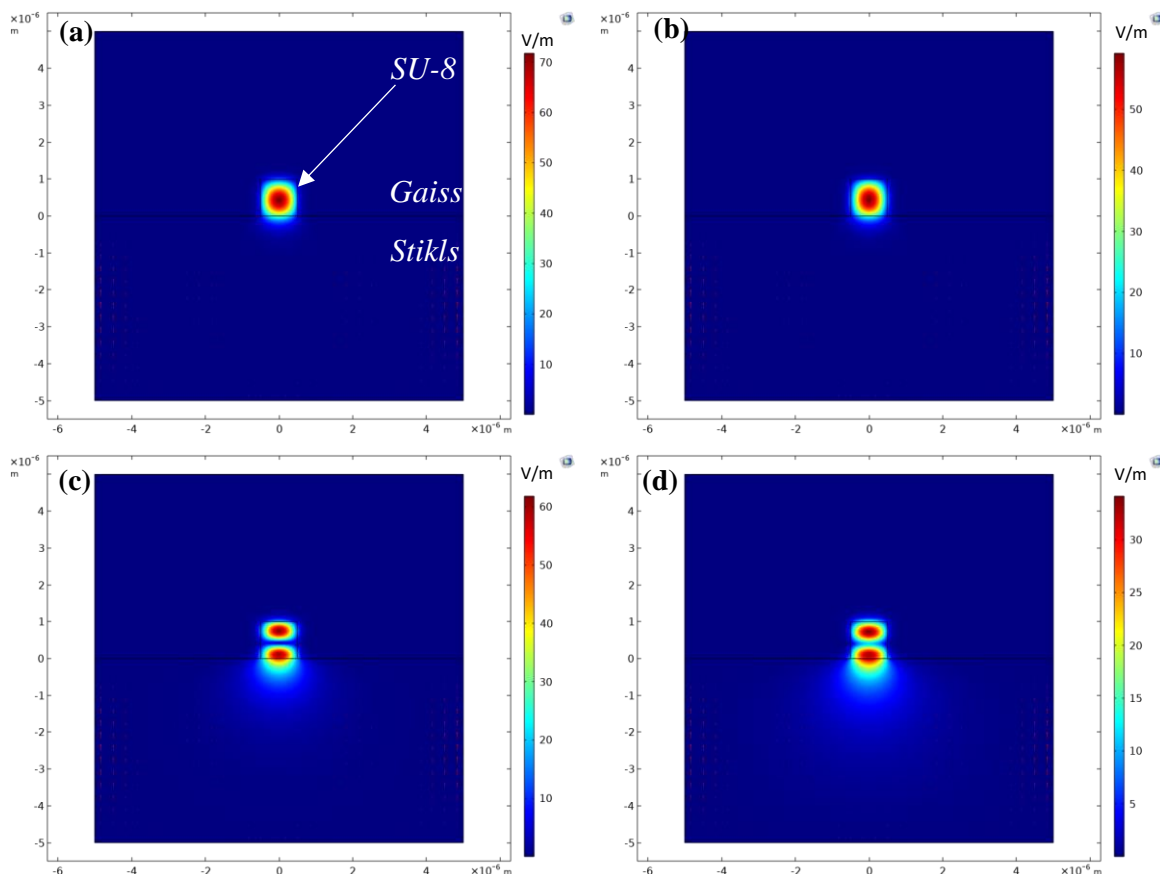
Skrāpēšanas līnijas kvalitāte: a). neoptimālie parametri vai bojāts asmenis; b). pēc optimizācijas (50X palielinājums). Pamatņu malu stāvoklis pēc laušanas: c). pirms skrāpēšanas optimizācijas; d). pēc skrāpēšanas optimizācijas (50X palielinājums). Viļņvadu galu neatbilstoša kvalitāte bez skrāpēšanas optimizācijas: e). OGS konusveida savienojuma ievadmalas; f). OGS 1 μm izeja ar pamatnes bojājumiem; g). OGS 1 μm izeja ar viļņvada bojājumiem; h). LMR pamatnes ievadmalas bojājumi. Pamatņu laušanas rezultāts, skats no fotoniskā čipa malas: i). leņķis ievad-/izvadmalai; j). mala nav plakana (50X palielinājums).





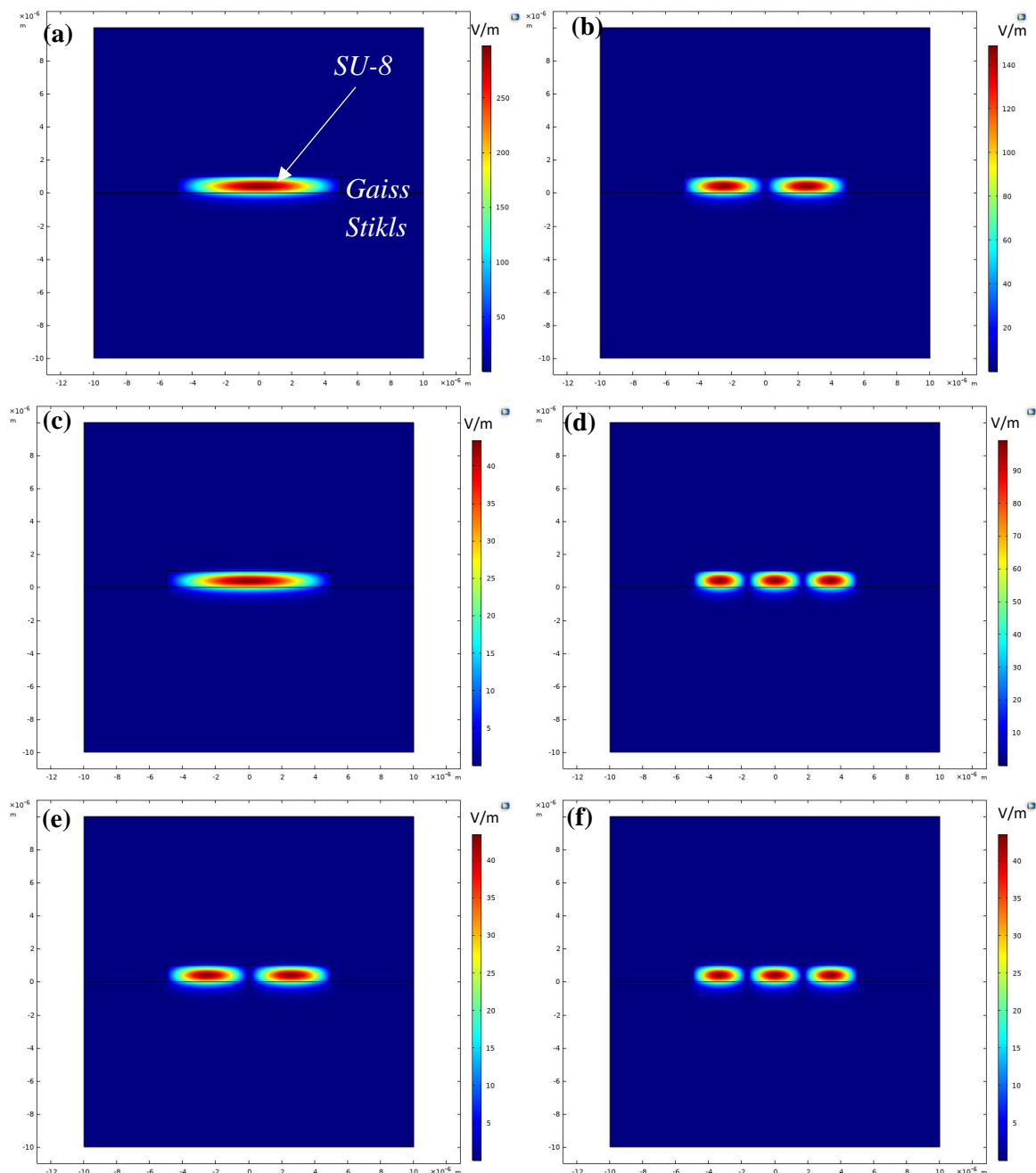
TE amplitūdas simulācija $1 \times 1 \mu\text{m}$ SU-8 viļņvadiem uz stikla

Transversālās elektriskās (TE) amplitūdas simulācija SU-8 $1 \times 1 \mu\text{m}$ viļņvadiem uz stikla pamatnes tika veikta ar 635nm gaismu, ar galīgo elementu metodi COMSOL 5.6 programmatūras vidē. Tika iegūtas modas pie efektīviem laušanas koeficientiem: a). 1,5361; b). 1,5343; c). 1,4838; d). 1,4817.



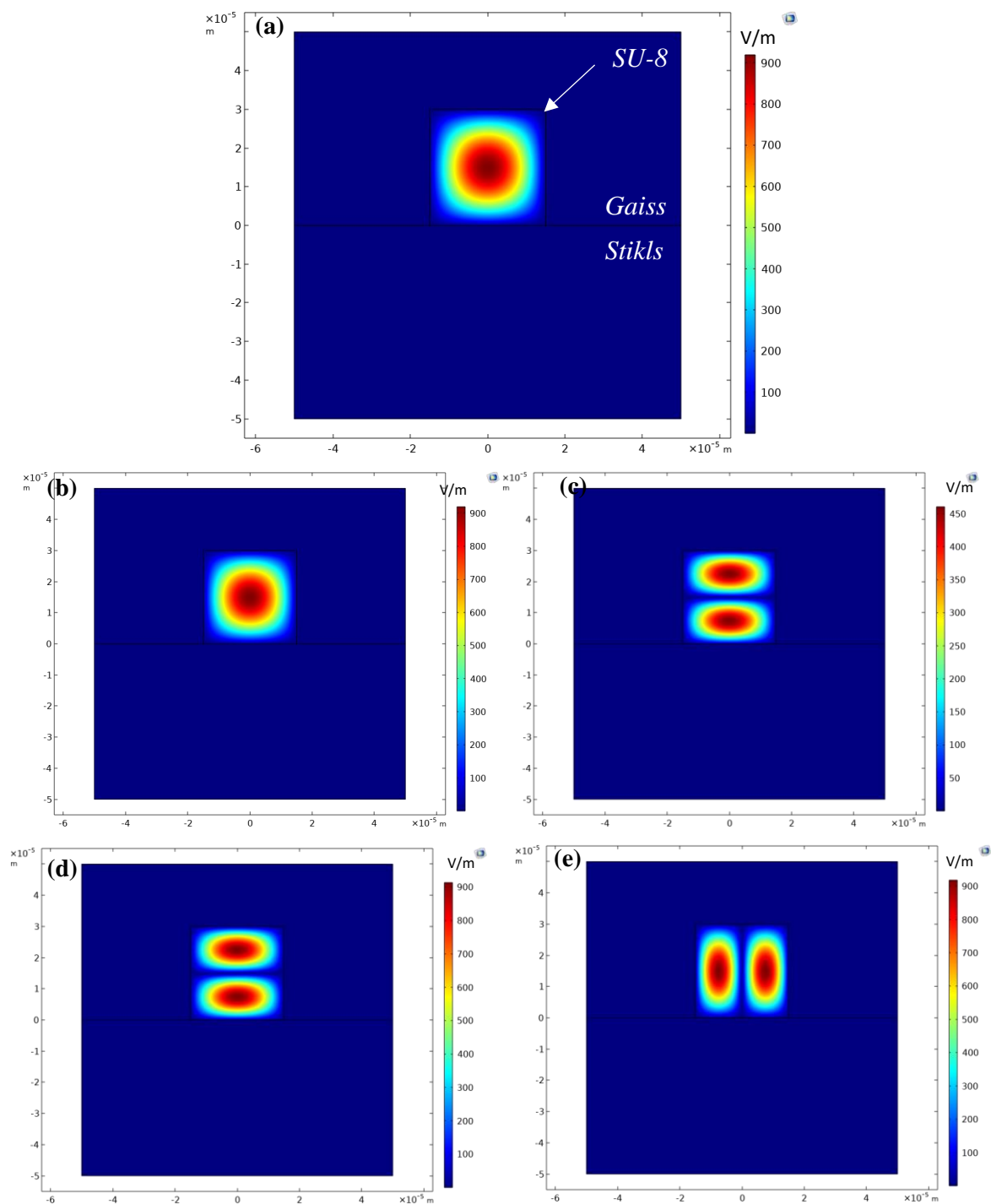
TE amplitūdas simulācija 10 x 1 μm SU-8 viļņvadiem uz stikla

Transversālās elektriskās (TE) amplitūdas simulācija SU-8 10 x 1 μm viļņvada konusveida savienojuma ieejai uz stikla pamatnes tika veikta ar 635nm gaismu, ar galīgo elementu metodi COMSOL 5.6 programmatūras vidē. Tika iegūtas modas pie efektīviem laušanas koeficientiem: a). 1,5523; b). 1,5514; c). 1,5505; d). 1,5498; e). 1,5496; f). 1,5480.



TE amplitūdas simulācija 30 x 30 μm SU-8 viļņvadiem uz stikla

Transversālās elektriskās (TE) amplitūdas simulācija SU-8 30 x 30 μm viļņvadiem uz stikla pamatnes tika vieta 300-1200 nm robežās ar galīgo elementu metodi COMSOL 5.6 programmatūras vidē. Piemēram, 635 nm gaismai tika iegūtas modas pie efektīviem laušanas koeficientiem: a). 1,5777; b). 1,5777; c). 1,5776; d). 1,5776; e). 1,5776 [106]



Maģistra darbs „Gaismas ievadīšanas metodes izpēte SU-8 viļņvadu mikroierīcēm”
izstrādāts LU

Fizikas, matemātikas un optometrijas fakultātē.

Ar savu parakstu apliecinu, ka pētījums veikts patstāvīgi, izmantoti tikai tajā norādītie informācijas avoti un iesniegtā noslēguma darba elektroniskā versija parakstīta ar drošu elektronisko parakstu.

Autors: Aleksejs Bendins (*elektroniskais paraksts*)

Rekomendēju darbu aizstāvēšanai

Vadītājs: *Dr. sc. ing* Gatis Mozolevskis (*elektroniskais paraksts*)

Recenzents: _____ Dr. _____. _____

Darbs iesniegts Fizikas nodaļā _____.2022.

Dekāna pilnvarotā persona: metodiķe Ineta Bērziņa (*elektroniskais paraksts*)

Darbs aizstāvēts maģistra gala pārbaudījuma komisijas sēdē

Komisijas sekretāre: _____ (*elektroniskais paraksts*)

_____.2022. prot. Nr. ____.