



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromagnetického pole

Návrh a realizace polymerních struktur pro fotonické aplikace

Design and realization of polymer structures for photonics applications

Diplomová práce

Bc. Jakub Zavřel

Studijní program: Elektronika a komunikace

Studijní obor: Fotonika

Vedoucí práce: doc. Ing. Václav Prajzler, Ph.D.

Praha 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zavřel** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **457439**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Specializace: **Fotonika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh a realizace polymerních struktur pro fotonické aplikace

Název diplomové práce anglicky:

Design and Realization of Polymer Structures for Photonics Applications

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s teoretickými principy polymerních optických planárních vlnododů.
- 2) Seznamte se s polymerními materiály a s technologiemi používanými pro výrobu polymerních optických struktur. Zvláštní pozornost věnujte technologii LDW (Laser Direct Writing).
- 3) Navrhněte optické vlnodody a struktury za použití dostupných nových optických polymerů a dostupných technologií.
- 4) Podílejte se na výrobě navržených optických vlnododů a struktur.
- 5) Změřte vlastnosti realizovaných optických vlnododů a struktur.
- 6) Dosažené výsledky shrňte do zprávy o rozsahu cca 50 stran.

Seznam doporučené literatury:

1. K. Novotný: Optická Komunikační Technika, skripta ČVUT 1998.
2. J. Klapuch: Návrh nového polymerního optického vlnododu. Bakalářská práce ČVUT 2010.
3. K. L. Kruse: MULTI-MODE AND SINGLE MODE POLYMER WAVEGUIDES AND MULTI-MODE AND SINGLE MODE POLYMER WAVEGUIDES AND STRUCTURES FOR SHORT-HAUL OPTICAL INTERCONNECTS STRUCTURES FOR SHORT-HAUL OPTICAL INTERCON. Michigan Technological University, Dissertation 2015.
<https://doi.org/10.37099/mtu.dc.etsd/977>
4. S. Wang, V. Vaidyanathan, B. Borden: Polymer optical channel waveguide components fabricated by using a laser-direct writing system. Journal of Applied Science & Engineering Technology, Vol. 9, pp. 2009
<https://docplayer.net/41278214-Polymer-optical-channel-waveguide-components-fabricated-by-using-a-laserdirect.html>
5. A. Elmogi, E. Bosman, J. Missinne, Van, G. Steenberge: Comparison of epoxy- and siloxane-based single-mode optical wave-guides defined by direct-write lithography. Opt. Mater. 2016, 52, 26–31.
6. V. Prajzler, P. Nekvindova, J. Spirkova, M. Novotny: Evaluation of the refractive indices of bulk and thick polydimethylsiloxane and polydimethyl-diphenylsiloxane elastomers by prism coupling technique. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, vol. 28, pp. 7951-7961, 2017.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Václav Prajzler, Ph.D., katedra mikroelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **06.09.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **19.02.2023**

doc. Ing. Václav Prajzler, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval především vedoucímu práce, panu doc. Ing. Václavovi Prajzlerovi, Ph.D., za cenné rady při návrhu a výrobě optických vlnodů a rozbočnic a čas, jenž mi věnoval při konzultacích. Dále bych chtěl poděkovat panu doc. RNDr. Janu Vovesovi, CSc. za pomoc s procesem hlubokého reaktivního leptání iontů DRIE (Deep Reactive Ion Etching) a panu Ing. Václavovi Chlupatému za pomoc s 3D tiskem a měřením optického útlumu $50\ \mu m$ kanálkových optických vlnodů.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 4.1.2022

.....
Bc. Jakub Zavřel

Název práce: Návrh a realizace polymerních struktur pro fotonické aplikace

Autor: Bc. Jakub Zavřel

Katedra: Katedra elektromagnetického pole

Vedoucí práce: doc. Ing. Václav Prajzler Ph.D.

E-mail vedoucího práce: vaclav.prajzler@fel.cvut.cz

Abstrakt: Předložená diplomová práce je zaměřena na návrh a realizaci optických polymerních vlnovodů. V první části práce je popsán princip šíření světla planárním optickým vlnovodem. V další části jsou shrnuty polymerní a biokompatibilní materiály používané pro realizaci optických planárních vlnovodů. Následuje návrh jednovidových a mnohavidových planárních optických vlnovodů a mnohavidových planárních optických rozbočnic 1x2Y. Rozbočnice byly optimalizovány pomocí specializovaného simulačního programu BeamPROP od firmy RSoft, který využívá k výpočtu metodu šíření optického svazku BPM (Beam Propagation Method). Praktická část práce je rozdělena na dvě části, kdy první část využívá k výrobě planárních optických vlnovodů negativní předlohu vytištěnou na 3D tiskárně. Jako materiály k výrobě byly zvoleny certifikované biokompatibilní optické polymerní elastomery PDMS (polydimethylsiloxan) NuSil MED-6210 a NuSil MED-6215. Ve druhé části jsou k výrobě vlnovodů využity fotocitlivé polymery a k zapisování struktur je využita laserová litografie s přímým zápisem (LBW – Laser Beam Writing). Byl testován proces výroby jednovidových planárních optických vlnovodů s využitím pozitivního fotorezistu Microposit™ S1805™ G2 nebo S1818™ G2 a technologie hlubokého reaktivního iontového leptání (DRIE – Deep Reactive Ion Etching). K výrobě mnohavidových planárních optických vlnovodů s využitím technologie LBW jsem použil polymerní epoxidové pryskyřice EpoCore a EpoClad.

U přímých vlnovodů vyrobených z certifikovaných biokompatibilních elastomerů PDMS NuSil MED-6210 a NuSil MED-6215 s využitím metody 3D tisku bylo dosaženo hodnot optického útlumu $0,99 \text{ dB/cm}$ na vlnové délce 532 nm , $0,48 \text{ dB/cm}$ na 650 nm , $0,66 \text{ dB/cm}$ na 850 nm , $0,69 \text{ dB/cm}$ na 1300 nm a $2,10 \text{ dB/cm}$ na 1550 nm . Optické kanálkové vlnovody realizované pomocí technologie laserové litografie měli optický útlum vyšší než 1 dB/cm , protože se plně nepodařilo optimalizovat výrobní postup z důvodů technických problémů. Tyto technické problémy byly způsobeny používáním nových zařízení, které při řešení diplomové práce byly ve zkušebním provozu. Přesto provedené experimenty prokázaly vhodnost dané technologie pro výrobu navržených planárních optických vlnovodů a věřím, že navazující práce po optimalizaci technologických procesů umožní výrobu optických vlnovodů s optickým útlumem nižším než 1 dB/cm na vlnových délkách 850 nm a 1300 nm .

Klíčová slova: mnohavidové optické planární vlnovody, jednovidové planární optické vlnovody, optické kanálkové vlnovody, optický útlum, planární optická rozbočnice, 3D tisk, biokompatibilní polymery, biokompatibilní optické vlnovody, laserová litografie, fotorezist, DRIE

Title: Design and realization of polymer structures for photonics applications

Author: Bc. Jakub Zavřel

Department: Department of Electromagnetic Field

Supervisor: doc. Ing. Václav Prajzler Ph.D.

Supervisor's e-mail address: vaclav.prajzler@fel.cvut.cz

Abstract: The enclosed diploma thesis is focused on the design and realization of optical polymer waveguides. The first part aims to describe the principle of light propagation through a planar optical waveguide. The following segment is devoted to summarizing the polymer and biocompatible materials used for the optical planar waveguide implementation. The ensuing section depicts a design of single mode and multimode planar optical waveguides and multimode planar optical 1x2Y splitters. The splitters were optimized using a specialized simulation software BeamPROP, developed by RSoft, which utilizes the Beam Propagation Method (BPM). The practical part is divided into two parts. In the first part a 3D printed negative mould is used for the planar optical waveguides manufacturing. The materials chosen were certified biocompatible optical polymer elastomers PDMS (polydimethylsiloxane) NuSil MED-6210 and NuSil MED-6215. In the second part, the waveguides were produced using photosensitive polymers and for structure manufacturing, the Laser Beam Writing technology was used. To test the process of producing single mode planar optical waveguides, either the positive photoresist Microposit™ S1805™ G2 or S1818™ G2 and the Deep Reactive Ion Etching (DRIE) technology were utilized. Polymer epoxy resin EpoCore and EpoClad together with the LBW technology were used for the construction of multimode planar optical waveguides.

For straight waveguides fabricated from certified biocompatible elastomers PDSM NuSil MED-6210 and NuSil MED-6215 using the method of 3D printing, the values of optical attenuation were measured as $0,99 \text{ dB/cm}$ for the wavelength 532 nm , $0,48 \text{ dB/cm}$ for 650 nm , $0,66 \text{ dB/cm}$ for 850 nm , $0,69 \text{ dB/cm}$ for 1300 nm a $2,10 \text{ dB/cm}$ for 1550 nm . For the optical channel waveguides produced using the LBW technology, the optical attenuation measured exceeded 1 dB/cm , as the manufacturing process couldn't be ideally optimized as a result of technical issues. These issues were caused by using new equipment, which was in trial operation when it was used for the purposes of this diploma thesis. Despite that, the conducted experiments proved the suitability of this technology for the fabrication of the designed planar optical waveguides and it is my firm belief that a subsequent work focused on the technological process optimization will enable the production of optical waveguides with optical attenuation under 1 dB/cm for both 850 nm and 1300 nm wavelengths respectively.

Keywords: multimode planar optical waveguides, single mode planar optical waveguides, optical channel waveguides, optical attenuation, planar optical splitter, 3D printing, biocompatible polymers, biocompatible optical waveguides, laser beam writing, photoresist, DRIE

Seznam symbolů:

Symbol	Veličina	Jednotka
A	optický útlum	[dB·cm ⁻¹]
A_v	vložný optický útlum	[dB·cm ⁻¹]
B	magnetická indukce	[T]
c	rychlost světla ve vakuu	[m·s ⁻¹]
D	elektrická indukce	[C·m ⁻²]
E	intenzita elektrického pole	[N·C ⁻¹]
H	intenzita magnetického pole	[A·m ⁻¹]
h	šířka vlnovodné vrstvy	[m]
j	imaginární jednotka	[-]
k	vlnové číslo	[m ⁻¹]
L	délka struktury	[mm]
L_{in}	délka vstupního vlnovodu	[μm]
L_{out}	délka výstupního vlnovodu	[μm]
L_p	délka referenčního přímého vlnovodu	[μm]
L_{SBend}	délka „ohnuté části“ rozbočnice	[μm]
Δn	rozdíl indexů lomu	[-]
n	index lomu	[-]
n_1	index lomu prvního materiálu na rozhraní	[-]
n_2	index lomu druhého materiálu na rozhraní	[-]
n_c	index lomu krycí vrstvy	[-]
n_f	index lomu vlnovodné části	[-]
n_s	index lomu substrátu	[-]
n_{ef}	efektivní index lomu	[-]
p	normovaný optický výkon	[-]
p_{12}	parametr disperzní rovnice	[-]
p_{13}	parametr disperzní rovnice	[-]
p_{out}	normovaný výstupní optický výkon	[-]
P_{in}	vstupní optický výkon	μW
P_{out}	výstupní optický výkon	μW
P_{outP}	výstupní optický výkon delšího vzorku	μW
t	čas	[s]
v	rychlost světla v prostředí s indexem lomu n	[m·s ⁻¹]
w_{bet}	šířka mezi výstupními rameny rozbočnice	[μm]
w_{in}	šířka vstupního vlnovodu rozbočnice	[μm]
w_{out}	šířka výstupního vlnovodu rozbočnice	[μm]
α	fázová konstanta	[-]
β	měrný útlum	[-]
α_c	kritický úhel lomu	[°]
α_D	úhel dopadu	[°]
α_L	úhel lomu	[°]
α_O	úhel odrazu	[°]
ε	permitivita	[F·m ⁻¹]
λ	vlnová délka	[nm]
μ	permeabilita	[H·m ⁻¹]
ρ	hustota volného náboje	[C·m ⁻³]
φ_1	změna fáze 1. paprsku	[rad]

Seznam symbolů (pokračování):

Symbol	Veličina	Jednotka
φ_2	změna fáze 2. paprsku	[rad]
Ω	úhel ramena od osy rozbočnice	[°]
ϕ	fázový posuv při totálním odrazu	[rad]
ω	úhlová rychlost	[rad·s ⁻¹]
∇	diferenciální operátor nabla	[-]

Seznam zkratk:

Zkratka	Význam zkratky	Český popis
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene	akrylonitrilbutadienstyren
ABS-T	Acrylonitrile Butadiene Styrene	akrylonitrilbutadienstyren (vylepšené složení)
BPM	Beam Propagation Method	metoda šíření optického svazku
COCE	Cyclic olefin copolymer	cyklický olefinový kopolymer
DRIE	Deep Reactive Ion Etching	hluboké reaktivní leptání iontů
DEMI	De-Mineralized	demineralizovaný
EM	Electro-Magnetic	elektromagnetické
FDM	Fused Deposition Modeling	technologie 3D tisku pomocí tiskové struny
IPA	Isopropylalkohol	izopropylalkohol
LBW	Laser Beam Writing	laserová litografie, přímý laserový zápis
MSLA	Masked Stereolithography	maskovaná stereolitografie
NIR	Near Infrared	blízké infračervené spektrum
PAM	Polyacrylamide	polyakrylamid
PDMS	Polydimethylsiloxane	polydimethylsiloxan
PDMDPS	Polydimethyldiphenylsiloxane	polydimethyldiphenylsiloxan
PEG	Poly(ethylene glycol)	Polyethylenglykol
PFCB	Perfluorocyclobutyl Aryl Ether Polymer	perfluorocyclobutyl aryl ether polymer
PGA	Polyglycolide	Polyglykolid
PLA	Poly(lactic acid)	kyselina polymléčná
PLANIO	Laboratoř planárních optoelektronických a optických integrovaných struktur na Katedře mikroelektroniky FEL, ČVUT v Praze	
PLDA	Poly(D,L-lactide)	kyselina polymléčná
PLGA	poly(lactic-co-glycolic acid)	kyselina polymléčná
PLLA	Poly-L-lactide	kyselina polymléčná
PMMA	Polymethyl Methacrylate	polymethyl methakrylát
POC	Propargyloxycarbonyl	Propargyloxycarbonyl
POF	Plastic Optical Fiber	plastové optické vlákno
POMC	Pro-opiomelanocortin	proopiomelanokortin
PVA	Polyvinylalkohol	polyvinylalkohol
SWIR	Short-wave infrared	krátkovlnné IR spektrum
TVRZEPO	tvržení EpoClad/ EpoCore na topné ploténce postupem popsáním v kap. 5.2	
UV	Ultraviolet Light	ultrafialové světlo
VIS	Visible Light	viditelné světlo

Obsah

1	Úvod	2
2	Princip planárních optických vlnovodů	4
2.1	Popis světla jako elektromagnetické vlnění	4
2.2	Popis šíření světla pomocí geometrické optiky	6
2.3	Určení počtu vedených vidů	8
3	Polymerní materiály pro optické planární vlnovody	10
4	Návrh optických struktur	14
4.1	Mnohavidové optické vlnovody	14
4.2	Mnohavidová optická rozbočnice	14
4.3	Návrh jednovidových optických planárních vlnovodů	19
5	Výroba navržených struktur	21
5.1	Výroba mnohavidových rozbočnic a vlnovodů pomocí negativní formy	21
5.2	Výroba struktur pomocí technologie laserové litografie a hlubokého reaktivního iontového leptání	25
6	Diagnostické metody	33
6.1	Měření indexu lomu	33
6.2	Měření transmisních spekter	33
6.3	Optická kontrola vyrobených vzorků pomocí laserového konfokálního mikroskopu	34
6.4	Měření spektrálních charakteristik	35
6.5	Měření optického útlumu	36
7	Výsledky měření	39
7.1	Měření indexů lomu	39
7.2	Měření transmisních spekter	40
7.3	Optická kontrola motivů vytištěných metodou 3D tisku	42
7.4	Optická kontrola kvality vzorků	44
7.5	Měření spektrálních charakteristik	50
7.6	Měření optického útlumu	52
8	Závěr	54
9	Literatura	56

1 Úvod

Optická vlákna se v telekomunikacích používají již několik desetiletí pro přenos dat na velké vzdálenosti. Jejich hlavními přednostmi proti metalickému vedení je nízký optický útlum, velká šířka přenášeného pásma a odolnost proti elektromagnetickému rušení. Pro dálkovou komunikaci se používají jednovidová optická vlákna s rozměrem jádra vlnovodu $8 - 9 \mu m$ a rozměrem pláště $125 \mu m$. Tyto optické vlnovody jsou nejčastěji realizovány z křemenného skla a vynikají především nízkým optickým útlumem pro rozsah vlnových délek $1260 - 1650$, kde komunikační systémy nejčastěji používají vlnové délky 1310 a $1550 nm$. V metropolitních sítích a pro přenos dat na kratší vzdálenosti se používají mnohavidová optická vlákna, která mají rozměr jádra $62,5$ nebo $50 \mu m$ a průměr pláště $125 \mu m$. Mnohavidové optické vlnovody jsou provozovány zpravidla na vlnových délkách 850 a $1300 nm$ [1].

V posledních deseti letech roste význam vysokorychlostní komunikace i na kratší vzdálenosti v řádech stovek metrů s rostoucími nároky spotřebitelů na vysokorychlostní komunikaci. Tyto spoje, využívající viditelné spektrum většinou okolo vlnové délky $650 nm$, mohou být realizovány pomocí levných mnohavidových optických vláken POF s velkým průměrem jádra. Tato vlákna mají nejčastěji jádro tvořené z polymeru PMMA (Poly(methyl methacrylat)) a obvykle mají průměr jádra 980 nebo $735 \mu m$ [2].

Optická komunikace je v poslední době čím dál více využívána také na velmi krátké vzdálenosti, kde optické spojení nebo zpracování optického signálu probíhá na vzdálenosti jen několika málo milimetrů až centimetrů. Tento rozvoj je spojen především s rychlým vývojem superrychlých výkonových počítačů ve velkých výpočetních zařízeních a s vysokými nároky pro nově budovaná datová centra. Zde jsou opět využívány výhody optických vlnovodů, především velká šířka pásma při přenosových rychlostech ($> 10 Gbit.m/sec$). Hlavním kritériem se zde stává cena vlnovodu. Díky tomu, že jsou tyto vlnovody mnohavidové, nevyžadují složité výrobní postupy. Díky krátké vzdálenosti není nízký optický útlum tak zásadní. Pro tyto velmi krátké vzdálenosti jsou snadněji vyrobitelné planární kanálkové vlnovody s čtvercovým jádrem [3]. Pro výrobu těchto vlnovodů je možné s výhodou využít levnější polymerní materiály, které mají nízký optický útlum na přenosových vlnových délkách a zpracovávají se při nízkých teplotách. Polymery jsou také kompatibilní s mnoha jinými materiály, takže jsou ideální volbou pro integrované optické struktury jako jsou vlnovody, rozbočnice, multiplexory nebo optické vazební členy [4].

Předložená diplomová práce navazuje na moji bakalářskou práci *Návrh a realizace optických struktur z nových optických elastomerů, 2019 ČVUT* [5], kde byly navrženy a vyrobeny optické mnohavidové vlnovody a rozbočnice $1 \times 2Y$ s velkým průměrem jádra s využitím negativní formy vyrobené pomocí technologie 3D tisku. Struktury a postupy navržené v mé bakalářské práci byly dále optimalizovány a dosažené výsledky byly publikovány v recenzovaném článku *Large core optical elastomer splitter fabricated by using 3D printing pattern* (DOI <https://doi.org/10.1007/s11082-021-02980-2>) [2].

Tato diplomová práce je rozdělena na dvě části. První část využívá metodu negativní formy vyrobené pomocí 3D tisku navrženou a prezentovanou v mé bakalářské práci. V této diplomové práci pro realizaci struktur optických mnohavidových vlnovodů a rozbočnic $1 \times 2Y$ s velkým průměrem jádra ($550 \mu m$) používám nové certifikované biokompatibilní elastomery PDMS (Polydimethylsiloxane) NuSil MED-6210 a MED-6215 od výrobce Avantor. Biokompatibilní materiály byly zvoleny proto, že využití světla v medicíně nabývá na významu v diagnostice, terapii a v chirurgii. Z důvodu vysoké absorpce a rozptylu tkání ve viditelném a blízkém infračerveném spektru je hloubka prosvícení $< 3 mm$. Proto je potřeba hledat nové materiály a technologické postupy, které umožní realizaci optických struktur s

biokompatibilními vlastnostmi, které umožní přenos a zpracování optického signálu pro lidskou tkáň. Optické vlnovody umožňují prosvícení tkáně do větší hloubky, čehož je možno využít v přesně zacílené laserové chirurgii, optické genetice, kdy je možné pomocí osvětlení aktivovat nebo deaktivovat některé procesy v buňkách, optické terapii nebo optickým zobrazování. Tyto aplikace neumožňují konvenční skleněná nebo polymerní optická vlákna, protože mohou být toxická, nejsou dostatečně flexibilní, čímž mohou tkáň poškozovat, a také nejsou biokompatibilní, takže musí být po použití z tkáně vyňata [6,7].

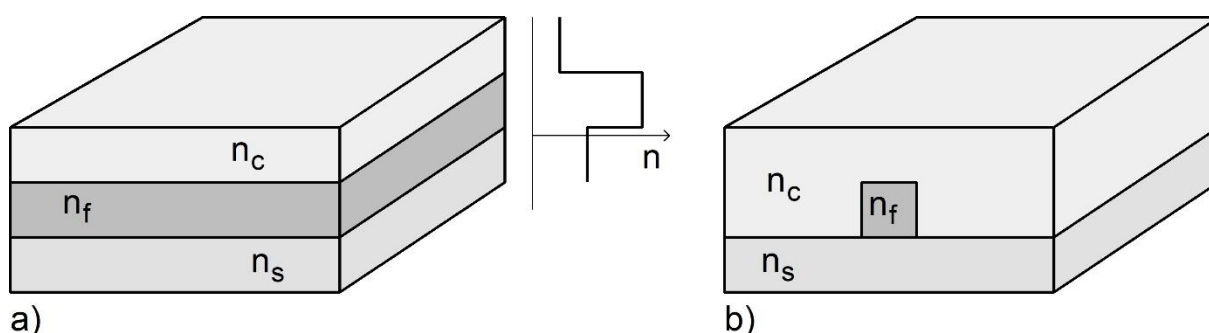
Druhá část diplomové práce se zabývá výrobou optických vlnovodů pro aplikace integrované optiky, fotoniky a optického propojování na velmi krátké vzdálenosti. V diplomové práci se zabývám výrobou polymerních optických vlnovodů za využití technologie laserové litografie s přímým zápisem LBW (Laser Beam Writing). V práci popisuji využití jak *pozitivních fotorezistů*, kdy je osvětlená část odplavena vyvolávacím roztokem, tak i *negativních fotorezistů*, kdy je osvětlená část vytvrzena a vyvolávacím roztokem je odplavena neosvětlená část fotorezistu. *Pozitivní* fotorezist byl využit k testování výroby předloh pro následnou výrobu jednovidových vlnovodů v kombinaci s technologií hlubokého iontového reaktivního leptání DRIE (Deep Reactive Ion Etching). Při tomto procesu je odleptán křemík nekrytý fotorezistem, čímž v něm vzniknou drážky. Jako *negativní* fotorezist byly využity epoxidové pryskyřice EpoCore a EpoClad k výrobě mnohavidových optických vlnovodů s rozměrem jádra $50 \mu m$, kde se předpokládá využití k optickému propojování na krátké vzdálenosti pro pracovní vlnové délky 850/1300 nm.

2 Princip planárních optických vlnovodů

Optický vlnovod může být definován jako jakákoliv struktura, která je použita k vedení elektromagnetických vln v optické části elektromagnetického spektra (viditelné spektrum (VIS: 400 – 700 nm), blízké infračervené spektrum (NIR: 700 nm – 1000 nm) a krátkovlnné IR spektrum (SWIR: 1000 – 2500 nm)) paralelně s její osou. Popis šíření světla ve vlnovodu může vycházet ze dvou přístupů. Prvním, přesnějším, ale matematicky složitějším, je pohlížet na světlo jako na elektromagnetické vlnění, které je popsáno Maxwellovými rovnicemi. Druhým, jednodušším způsobem, je vycházet ze zákonů geometrické optiky, především ze Snellova zákona odrazu a lomu na rozhraní dvou prostředí s různými indexy lomu [8,9,10].

Planární optický vlnovod je jedním ze dvou základních typů vlnovodů, kdy je vlnovodná struktura vytvořena na rovinné podložce. Vlnovodná vrstva s indexem lomu n_f je nanášena na substrát s indexem lomu n_s a obvykle ještě přikryta krycí vrstvou s indexem lomu n_c , která může mít buď pouze ochrannou funkci, anebo vytváří požadované vlastnosti vlnovodné struktury.

Možné rozložení indexů lomu ve struktuře je znázorněno na obr. 2.1. Jedná se o vlnovody se skokovou změnou indexu lomu. Pro indexy lomů musí platit: $n_f > n_s \geq n_c$. Obr. 2.1a znázorňuje rozložení indexu lomu ve 2D struktuře, to je takový vlnovod, jehož jeden příčný rozměr není omezen. Na obrázku je také uveden graf indexu lomu odpovídající jednotlivým vrstvám. Obr. 2.1b znázorňuje rozložení indexů lomu pro 3D strukturu vlnovodu, jehož všechny rozměry jsou omezeny.



Obr. 2.1: *Struktura optického planárního vlnovodu se skokovou změnou indexu lomu,*
a) *rozložení indexu lomu dvourozměrného planárního optického vlnovodu,*
b) *rozložení indexu lomu třírozměrného planárního optického vlnovodu.*

Druhou možností rozložení indexu lomu je gradientní změna indexu lomu. U tohoto rozložení je změna indexu lomu postupná. V této práci se těmito vlnovody nezabývám, proto zde jejich popis není uveden.

2.1 Popis světla jako elektromagnetické vlnění

Světlo je možné popsat jako elektromagnetické vlnění, které je popsáno Maxwellovými rovnicemi, stejně jako vlny z jiné části elektromagnetického spektra. Tento přístup je nezbytný při podrobnějším zkoumání jevů ve vlnovodu, jako je odraz, difrakce, disperze, útlum nebo vazba vidů. Pomocí tohoto přístupu je možné stanovit rozložení energie ve vedené vlně, podmínky jednovidovosti, mezní vlnové délky a mnoho dalších parametrů vlnovodu nezbytných pro kompletní popis a analýzu šíření světla v optickém vlnovodu [3, 9, 10].

Pokud uvažujeme pouze harmonické průběhy vektorů pole, můžeme je popsat fázory. Vzájemné přiřazení časoprostorové funkce např. $E(x, y, z, t)$ a odpovídajícího fázoru $E(x, y, z)$, který je funkcí prostoru, budeme uvažovat ve tvaru:

$$\mathbf{E}(x, y, z, t) = \text{Im}\{\mathbf{E}(x, y, z)e^{j\omega t}\} \quad (1)$$

Omezíme se pouze na dielektrická prostředí, kde budeme šíření EM vln analyzovat. Při uvedených vymezeních mají Maxwellovy rovnice tvar:

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\epsilon\mathbf{E} \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (5)$$

k nim je nutno přiřadit tzv. materiálové vztahy:

$$\mathbf{D} = \epsilon\mathbf{E} \quad (6)$$

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} \quad (7)$$

U komponent optických komunikačních systémů se setkáváme téměř výhradně s materiály, jejichž permeabilita je rovna permeabilitě vakua $\mu = \mu_0$.

Pokud se v elektromagnetickém (EM) poli vyskytuje rozhraní mezi materiály s odlišnými konstantami prostředí, musí být pro tyto vektory splněny podmínky:

- Tečné složky vektoru \mathbf{E} po obou stranách rozhraní se sobě rovnají.

$$E_{t1} = E_{t2} \quad (8)$$

- Rozdíl mezi normálovými složkami vektoru \mathbf{D} po obou stranách rozhraní je roven plošné hustotě volného náboje na rozhraní.

$$D_{n1} - D_{n2} = \sigma_0 \quad (9)$$

- Rozdíl mezi tečnými složkami vektoru \mathbf{H} po obou stranách rozhraní je roven hustotě plošného proudu na rozhraní.

$$H_{t1} - H_{t2} = j \quad (10)$$

- Normálové složky vektoru \mathbf{B} po obou stranách rozhraní se sobě rovnají.

$$B_{n1} = B_{n2} \quad (11)$$

Pokud je rozhraní mezi dielektriky, kde nemůže být přítomen volný náboj ani proud, pak se podmínky (9) a (10) redukuje na:

$$D_{n1} = D_{n2} \quad (12)$$

$$H_{t1} = H_{t2} \quad (13)$$

Šíření vedených vln lze nejlépe analyzovat řešením vlnové rovnice při splnění uvedených okrajových podmínek. Budeme nejprve uvažovat homogenní prostředí (ϵ, μ není funkcí polohy). Z rovnic (2) a (3) je:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\nabla \times \mathbf{H} = \omega^2\mu\epsilon\mathbf{E} \quad (14)$$

Použitím vektorové identity:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2\mathbf{E} \quad (15)$$

a za předpokladu homogenního, izotropního prostředí bez náboje ($\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$) je:

$$\nabla^2\mathbf{E} + k^2\mathbf{E} = 0 \quad (16)$$

$$\nabla^2\mathbf{H} + k^2\mathbf{H} = 0 \quad (17)$$

Rovnice (16) je vlnová rovnice pro harmonickou vlnu, kde k je konstanta šíření daná rovnicí:

$$k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} \quad (18)$$

V ideálním (bezeztrátovém) dielektriku je konstanta šíření reálná:

$$k = \omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_0\varepsilon_r} = \frac{\omega}{c_0}\sqrt{\varepsilon_r} = \frac{2\pi}{\lambda_0}\sqrt{\varepsilon_r} = k_0\sqrt{\varepsilon_r} = k_0n \quad (19)$$

V obecném prostředí je konstanta šíření komplexní:

$$k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon_k} = \alpha - j\beta \quad (20)$$

kde α je fázová konstanta a β je měrný útlum.

Stejným způsobem lze odvodit rovnici pro další vektory pole. Vlnová rovnice může být rozepsána do tří skalárních rovnic. Kupříkladu v kartézské soustavě je pro složku E_x :

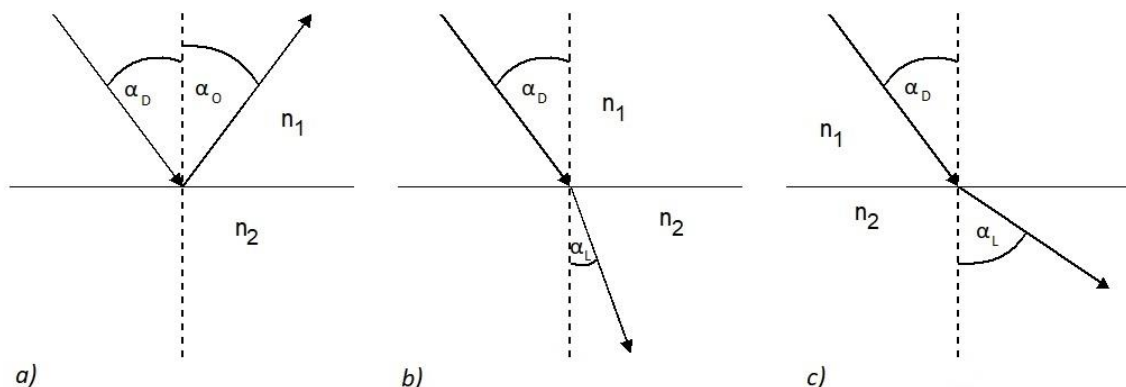
$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} + k^2 E_x = 0 \quad (21)$$

analogicky pro složky E_y a E_z .

Nejjednodušším řešením vlnové rovnice je rovinná uniformní vlna. Je to vlna, pro kterou platí, že vektory \mathbf{E} a \mathbf{H} leží v rovině kolmé na směr šíření a mají konstantní velikost i směr. Budeme nejdříve uvažovat bezeztrátové prostředí. Vlnoplocha, která je definována jako plocha konstantní fáze vlny, je tedy v tomto případě rovina [8].

2.2 Popis šíření světla pomocí geometrické optiky

Vedení světla v optických planárních vlnovodech probíhá na principu totálního odrazu, který lze vyjádřit Snellovým zákonem (viz obr. 2.2) [5, 8, 11, 12]. Ten popisuje chování paprsku na rozhraní dvou prostředí s různými indexy lomu n_1 a n_2 . Může docházet k odrazu (obr. 2.2a), kdy se dopadající paprsek odrazí se stejným úhlem jako dopadl ($\alpha_D = \alpha_O$), nebo k lomu, a to takzvaně ke kolmici (obr. 2.2b) ($\alpha_D > \alpha_L$), kdy paprsek prochází z prostředí opticky řidšího do prostředí opticky hustšího (z prostředí s nižším indexem lomu do prostředí s vyšším indexem lomu), nebo od kolmice (obr. 2.2c) ($\alpha_D < \alpha_L$), kdy paprsek prochází z hustšího do řidšího prostředí [5].



Obr. 2.2: Snellov zákon odrazu a lomu,
a) odraz,
b) lom od kolmice ($n_1 > n_2$),
c) lom ke kolmici ($n_1 < n_2$).

Zákon lze matematicky vyjádřit vztahem:

$$\frac{\sin \alpha_D}{\sin \alpha_L} = \frac{n_1}{n_2} \quad (22)$$

kde α_D je úhel dopadu paprsku, α_L je úhel lomu a n_1 a n_2 jsou indexy lomu prostředí. Index lomu n je definován jako poměr rychlosti světla c ve vakuu k rychlosti světla v daném prostředí v :

$$n = \frac{c}{v} \quad (23)$$

Zvláštním případem lomu od kolmice je, když je $\alpha_L = \frac{\pi}{2}$. Paprsek by se teoreticky šířil rovnoběžně s rozhraním, ale ve skutečnosti dojde k odrazu, kdy se veškerá energie dopadajícího paprsku odrazí od rozhraní. Nejnižšímu úhlu, pro který nastane totální odraz, se říká úhel kritický α_c . Totální odraz nastává i pro úhly vyšší než je úhel kritický ($\alpha_D \geq \alpha_c$). Tento jev je první podmínkou pro vedení světla v optických vlnovodech. Z toho vyplývá, že index lomu jádra vlnovodu musí být vyšší než index lomu substrátu, popř. krycí vrstvy, aby nastal lom od kolmice a mohl nastat totální odraz [5].

Fáze paprsků se při průchodu vlnovodem neustále mění: plynule se vzdáleností a skokově při odrazu. Aby mohl vzniknout vedený vid, musí mít vlnoplocha, která dosáhne bodu D po přímé dráze, stejnou fázi, nebo fázi lišící se o násobek 2π , jako vlnoplocha, která se do bodu D dostane po odrazech v bodech A a B (viz obr. 2.3). Kdyby tomu tak nebylo, vlny by interferovaly a zanikly [8].

Uvedenou podmínku je možno vyjádřit vztahem:

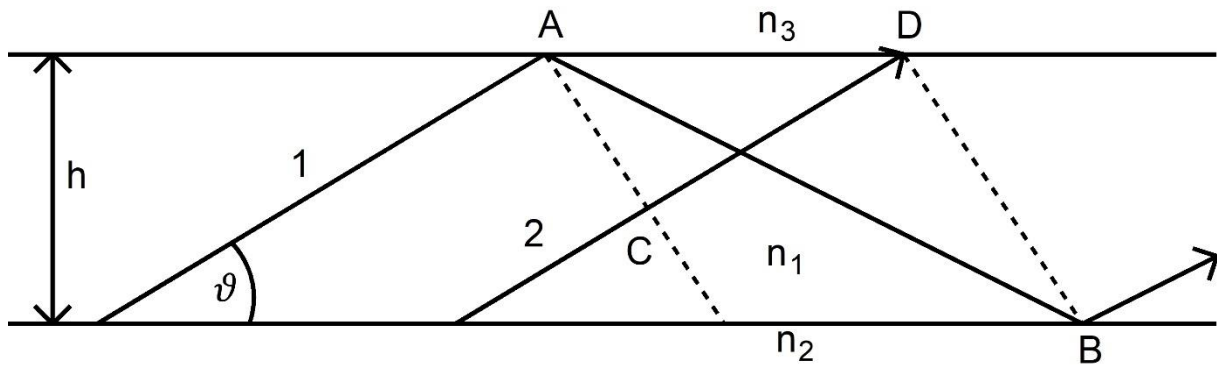
$$k_1 \overline{AB} + \Phi_{12} + \Phi_{23} = k_1 \overline{CD} + 2m\pi \quad (24)$$

kde Φ_{12} a Φ_{23} jsou fázové posuvy při totálním odrazu, m je celé číslo $m = 0, 1, 2, \dots$. Podle obr. 2.3 je:

$$\overline{AB} = \frac{h}{\sin \vartheta} \quad (25)$$

$$\overline{CD} = \overline{AD} \cos \vartheta \quad (26)$$

$$\overline{AD} = \overline{AE} - \overline{DE} = \frac{h}{\tan \vartheta} - h \tan \vartheta \quad (27)$$



Obr. 2.3: Fázová podmínka [8].

Po dosazení do rovnice (24) a s využitím vztahu:

$$k_1 \sin \vartheta = k_{1x} \quad (28)$$

kde k_{1x} je příčná konstanta, což je příčná složka vlnového vektoru vzhledem ke směru šíření. Dostáváme takzvanou disperzní rovnici:

$$2hk_{1x} + \Phi_{12} + \Phi_{23} = 2m\pi \quad (29)$$

Je to transcendentní rovnice a pomocí vztahů:

$$k_{1x} = \sqrt{k_1^2 - \beta^2} = k_1 \sin \vartheta = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_1 \sin \vartheta = k_0 \sqrt{n_1^2 - n_{ef}^2} \quad (30)$$

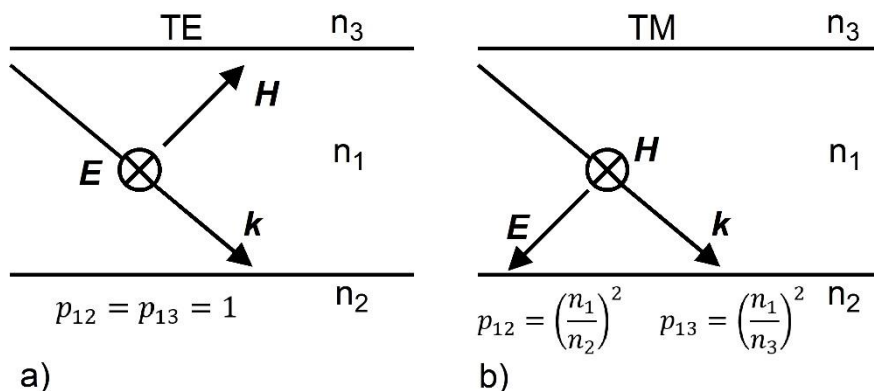
je možno ji upravit pro výpočet kteréhokoliv z parametrů ϑ (úhel dopadu na rozhraní), β (podélná složka vlnového vektoru) nebo n_{ef} (efektivní index lomu), který je definován dále rovnicí (32).

2.3 Určení počtu vedených vidů

V optických vlnovodech dochází k přenosu energie pomocí optických vidů. Jejich počet lze určit pomocí disperzní rovnice. S využitím rovnic (29) a (30) je možné odvodit následující tvar disperzní rovnice pro určení počtu vedených vidů [8]:

$$m = \text{Int} \left\{ \frac{2}{\lambda_0} h \sqrt{n_1^2 - n_2^2} - \frac{1}{\pi} \arctan \left[p_{13} \sqrt{\frac{n_2^2 - n_3^2}{n_1^2 - n_2^2}} \right] \right\} \quad (31)$$

kde h je tloušťka vlnovodné vrstvy, n_1 , n_2 a n_3 jsou indexy lomu vlnovodné vrstvy (n_1), substrátu (n_2) a krycí vrstvy n_3 , λ_0 je vlnová délka světla, funkce $\text{int}()$ zaokrouhluje výsledek na celé číslo směrem dolů a parametr p_{13} je dán typem vedeného vidu TE (transverzálně elektrický) nebo TM (transverzálně magnetický). Typ vidů značíme podle orientace vektorů \mathbf{E} a \mathbf{H} , které jsou znázorněny na obr. 2.4. Na obrázku jsou rovněž uvedeny rovnice pro výpočet parametrů p_{13} a p_{12} , které se vyskytují v jiných podobách disperzní rovnice.



Obr. 2.4: Orientace vektorů \mathbf{E} a \mathbf{H} podle typu vedeného vidu a rovnice pro výpočet parametrů p_{12} a p_{13}
a) vid TE,
b) vid TM.

Z rovnice (31) lze určit kritická tloušťka vrstvy, při níž je uvažovaný vid veden, a to dosažením mezní podmínky vedení vidu, která je dána tzv. efektivním indexem lomu, jenž je definován rovnicí:

$$n_{ef} = \frac{\beta}{k_0} \quad (32)$$

kde β je podélná složka vlnového vektoru. Zmíněná podmínka pro vedení vidu je $n_{ef} = n_2$. Pro kritickou tloušťku vrstvy pro m -tý vid dostáváme tedy rovnicí:

$$h_{km} = \frac{\lambda_0}{2\pi \sqrt{n_1^2 - n_2^2}} \left\{ m\pi + \arctan \left[p_{13} \sqrt{\frac{n_2^2 - n_3^2}{n_1^2 - n_2^2}} \right] \right\} \quad (33)$$

Z rovnice (33) jde určit podmínka existence pouze jednoho vidu, která je dána rovnicí:

$$\arctan \left[p_{13} \sqrt{\frac{n_2^2 - n_3^2}{n_1^2 - n_2^2}} \right] \leq 2\pi \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \frac{h_{km}}{\lambda_0} \leq m\pi + \arctan \left[p_{13} \sqrt{\frac{n_2^2 - n_3^2}{n_1^2 - n_2^2}} \right] \quad (34)$$

Aby byl vlnovod jednovidový, musí mít dostatečně malou tloušťku vrstvy h nebo dostatečně malý rozdíl indexů lomu n_1 , n_2 a n_3 .

3 Polymerní materiály pro optické planární vlnovody

Materiály pro optické planární vlnovody se dají rozdělit na materiály na bázi polovodičů, optická skla, optické krystaly a polymery. Hlavními kritérii pro výběr materiálů pro optické planární vlnovody jsou jejich optické vlastnosti, především optický útlum a index lomu, které jsou oba závislé na vlnové délce světla. Dalšími kritérii jsou jejich mechanické vlastnosti jako je pevnost, pružnost, teplotní a časová stálost atd. Velmi důležitá je také jejich chemická stálost a náročnost výroby. Výběr materiálu je také závislý na technologii, která je pak pro výrobu použita.

Polovodičové materiály jsou nejběžnější kvůli jednoduché integraci s ostatními optickými prvky a kompatibilním technologickým procesům s ostatními polovodičovými technologiemi. Jejich nevýhodou je komplikovaný postup výroby, jejich křehkost a neohebnost. Optická skla a optické krystaly se používají především ve vláknové optice, kdy telekomunikační optická vlákna jsou nejčastěji na bázi křemenného skla. Výhodou je chemická stálost a vysoká teplotní odolnost, nevýhodou je opět technicky náročná výroba a křehkost.

Optické struktury vyráběné z výše zmíněných materiálů vyžadují náročné výrobní procesy, které nejsou šetrné k životnímu prostředí a jsou tedy i ekonomicky náročné. Proto jsou hledány nové materiály, které by netrpěly těmito nedostatky. Jedním z možných řešení je použití polymerních materiálů, které mohou mít vhodné vlastnosti, jako je nízký optický útlum, vhodné hodnoty indexu lomu a možnost jejich laditelnosti, dobrá teplotní stálost, ohebnost a pružnost. Proces výroby vlnovodů pomocí polymerů je technicky výrazně jednodušší než výroba s využitím konvenčních materiálů.

V tab. 3.1 jsou uvedeny jednotlivé druhy polymerů používané pro optické vlnovody společně s jejich nejdůležitějšími speciálními vlastnostmi.

Tab. 3.1: Přehled polymerních materiálů používaných pro optické polymerní vlnovody [5, 13].

Polymerní materiál	Speciální vlastnosti
Polykarbonáty	optická čistota, vysoká odolnost, nízká viskozita taveniny při vysokých teplotách, vysoký dvojlom
Polyimidy	Teplotní stálost (300°C), vysoké ztráty v blízkém IR spektru, vysoký dvojlom
Polystyren	Aromatická struktura, dlouhý uhlovodíkový řetězec, vysoký index lomu $n_d = 1,60$
Akryláty a polymethyl methakryláty (PMMA)	Možnost přizpůsobit vlastnosti, nízká teplotní stálost, nízká T_g , nízký dvojlom, vysoká fotosenzitivita
Polykarbonáty dotované deuteriem nebo halogeny	Nízký útlum v blízkém IR spektru, nízká T_g
Perfluorocyklobutyl (PFCB) akryl ether polymery	Vysoká teplotní stabilita ($T_g = 120-350^\circ\text{C}$), nízký optický útlum (0,25 dB/cm) na 1310 nm a 1550 nm, nízký dvojlom
Cyklo-olefin polymery	Nízký dvojlom pod tlakem, nízká absorpce vlhkosti, vysoká teplotní odolnost, nízký optický útlum ve viditelném a UV spektru
Siloxany nebo silikony	Odolnost vůči nízkým i vysokým teplotám, vodě a oxidaci, nízká smršťivost, bez rozpouštědel
Benzocyclobutene (BCB)	Nízká dielektrická konstanta (2,7, 10 kHz-10 GHz), nízká absorpce vlhkosti, dobrá adheze, teplotní stálost (350°C)

V tab. 3.2 jsou uvedeny vybrané komerčně dostupné polymery vhodné pro fotonické aplikace pod jejich výrobním označením s jejich indexem lomu a optickým útlumem. Uvedené polymery splňují

všechny vlastnosti vyžadované pro jejich použití ve fotonických aplikacích, jako je nízký optický útlum pro viditelné a IR spektrum, dobrá časová a teplotní stabilita, jednoduchá výroba a nízká cena.

Tab. 3.2: Vybrané komerčně dostupné polymerní materiály používané pro optické vlnovody a fotonické aplikace.

Název polymeru	Výrobce	Optický útlum [dB/cm]	Index lomu [-]	Citace
Cyclotene™	DOW Chemical	0,81 @1300 nm	1,552 @633 nm 1,537 @1310 nm 1,535 @1550 nm	[14,15]
EpoCore 50	micro resist technology GmbH	~0,2 @850 nm	1,580 @850 nm	[14,16]
EpoClad 50	micro resist technology GmbH	*	1,580 @590 nm	[14,16]
OrmoClear	micro resist technology GmbH		1.553 @635 nm 1.545 @810 nm	[17]
OrmoClear FX	micro resist technology GmbH	0,41 @632,8 nm 0,47 @964 nm 0,58 @1311 nm 0,50 @1552 nm	1.555 @589 nm	[18]
OrmoClear HI01 XP	micro resist technology GmbH	0,60 @632,8 nm 0,45 @964 nm 0,48 @1311 nm 0,47 @1552 nm	1.604 @589 nm	[18]
OrmoCore	micro resist technology GmbH	0,10 @633 nm 0,23 @1310 nm 0,60 @1550 nm	1,553 @635nm	[14,19]
NTT E3129	NTT Advanced Technology Corporation	*	1,512 @830 nm 1,507 @1300 nm 1,506 @1550 nm	[20]
NTT E3135	NTT Advanced Technology Corporation	0,35@850 nm 0,52@1310 nm 0,61@1550 nm	1,532 @830 nm 1,526 @1300 nm 1,524 @1550 nm	[20]
LIGHTLINK™ XP-6701A	micro resist technology GmbH	~0,05 @ 850 nm ~0,30 @1310 nm > 1,00 @1510 nm	1,5363 @473 nm 1,5204 @632,8 nm 1,5094 @964 nm 1,5045 @1311 nm 1,5024 @1522 nm	[21]
LIGHTLINK™ XH-100145	micro resist technology GmbH	*	1,5126 @473 nm 1,4981 @632,8 nm 1,4870 @964 nm 1,4806 @1311 nm 1,4781 @1522 nm	[21]
Lumogen OVD Varnish 311 (BASF)	BASF Corporation	*	1,507 @623,8 nm	[22]
SUNCONNECT®	Nissan chemical corporation	0,08 – 0,10 @850nm 0,11 – 0,13 @1050nm 0,08 – 0,12 @1060nm 0,27 – 0,29 @1310nm 0,43 – 0,45 @1550nm	1,602 @633nm 1,592 @832nm	[23]

* plášťová vrstva

Biokompatibilní polymerní materiály

V poslední době je věnována značná pozornost optickým polymerním materiálům, které je možno požit pro diagnostiku a přenos informace pro lékařské účely přímo v těle pacienta. Proto jsou studovány vlastnosti biokompatibilních polymerů. Podle definice Národního institutu zdraví USA je biomateriál „*jakákoliv substance získaná z přírody nebo uměle z laboratoře pro biomedicínské účely nebo pro kontakt s biologickými systémy*“. Základními vlastnostmi biomateriálů je, že nejsou toxické, karcinogenní, trombogenní ani imunogenní [6].

Tradiční optické materiály jsou často pro organismus toxické. Navíc mají menší flexibilitu než tkáň a musí z ní být po použití vyňaty, jinak ji mohou mechanicky poškozovat. Z tohoto důvodu jsou hledány materiály, které jsou bioinertní nebo biodegradabilní, mají dostatečnou flexibilitu a také schopnost přenést světlo na dostatečnou vzdálenost. Příklady vybraných biokompatibilních materiálů jsou uvedeny v tab. 3.3 [6].

Tab. 3.3: Vybrané polymerní biokompatibilní materiály a jejich základní vlastnosti [6].

Typ materiálu	Optický útlum [dB/cm]	Index lomu [-]	Rychlost biodegradace
Hedvábí bource morušového	0,1 – 28	1,54 – 1,55	10 min – 1 měsíc
Pavoučí hedvábí	0,7 – 11	1,5 – 1,7	2–3 týdny
Agarózové gely, alginátové gely, želatiny	0,3 – 13	1,34 – 1,54	1 h – 8 týdnů
Celulóza	0,1	1,475	Několik měsíců
Chitosan	0,8 – 7,3	1,38 – 1,54	2–12 měsíců
PLA, PLLA, PDLA*	1,5	1,46 – 1,47	1 týden – 4 měsíce
PGA*		1,45 – 1,51	1 týden – 5 měsíců
PLGA (50/50)*		1,47 – 1,61	1 týden – 6 měsíců
POMC a POC*	0,4	1,49 – 1,54	~1 měsíc
Hydrogely PEG*	0,17 – 25	1,35 – 1,47	Netoxický, inertní, nevstřebatelný
Hydrogely PAM*	1 – 11	1,46 – 1,50	**
PDMS*	0,5	1,41 – 1,47	**
Polyuretan	2	1,46	**
COCE*	4	1,51	**

* PLA – Polylactic acid, PLLA – Poly-L-lactide, PLDA – Poly(D,L-lactide), PGA – Polyglycolide, PLGA – poly(lactic-co-glycolic acid), POMC – Pro-opiomelanocortin, POC – Propargyloxycarbonyl, PEG – Poly(ethylene glycol), PAM – Polyacrylamide, PDMS – Polydimethylsiloxane, COCE – Cyclic olefin copolymer
 ** neuvědno

Dále je uveden detailnější popis polymerních materiálů, které byly použity v této práci k návrhu a výrobě optických struktur. Jedná se o polymery na bázi polydimethylsiloxanu (PDMS), hybridní polymery a epoxidové pryskyřice.

Polydimethylsiloxan (PDMS)

Je to polymer patřící do skupiny silikonových elastomerů. Je to hyperelastický materiál, který má široké využití ve strojírenství, elektronice i v medicíně. Je chemicky stálý, snadno zpracovatelný, transparentní pro optické záření, biokompatibilní a levný [24].

V této práci je PDMS použit pod několika výrobními označeními od tří výrobců. Prvním je *Sylgard 184* od výrobce Dow Corning. Polymer je dodán ve dvou složkách, které jsou smíchány v poměru 10:1 a následně tepelně vytvrzeny. Materiály pod označením *NuSil MED-6215* a *NuSil MED-6210* od výrobce

Avantor jsou biokompatibilní, mají zdravotnickou certifikaci, která prokazuje, že mohou setrvat v lidském těle déle než 29 dní. Polymery jsou opět dodávány ve dvou složkách, které jsou smíchány v poměrech 10:1 (*NuSil MED-6215*) a 1:1 (*NuSil MED-6210*) a následně tepelně vytvrzeny. Materiál *KER-4690* od výrobce Shin-Etsu je opět dodáván ve dvou složkách, které jsou smíchány v poměru 1:1 a následně je polymer vytvrzen pomocí UV záření.

Hybridní polymery

Hybridní polymery jsou složeny z organické a anorganické části, proto mohou vykazovat výjimečné vlastnosti obou typů materiálů najednou. Tyto polymery jsou vhodné pro litografii, mají vhodné dielektrické vlastnosti, nízké teploty zpracování (do 180 °C), kompatibilitu s různými procesy metalizace, potenciál vytvářet nízkoztrátové optické vlnovody pomocí optické litografie atd. Navíc je u těchto materiálů kvůli jejich organicko-anorganické povaze mnoho možností úpravy mechanických a chemických vlastností finální struktury. Anorganická část zajistí výtečnou transparentitu pro optické záření, vysokou teplotní, chemickou a mechanickou stabilitu hybridní sítě [18].

V této práci jsou navrženy vlnovody pro polymery od výrobce micro resist technology GmbH pod výrobním označením *OrmoClear FX* a *OrmoCore*. Tyto polymery jsou dodávány jednosložkově a jsou tvrzeny pomocí UV záření.

Epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice jsou uměle vytvořené látky, které mají více než jednu epoxidovou vazbu. Jejich vlastnosti po vytvrzení záleží na chemickém složení pryskyřic. Obecně mají vysokou chemickou i teplotní odolnost, vysokou adhezi k ostatním materiálům, malou smrštitivost při vytvrzení a vysokou dielektrickou konstantu [25].

V této práci jsou použity polymery od výrobce micro resist technology GmbH pod výrobním označením *EpoCore* a *EpoClad*. Tyto polymery vynikají transmisí na vlnové délce 850 nm a vysokou odolností proti teplotě (> 230 °C) a tlaku. Vyrábí se v několika klonech s mírně odlišným indexem lomu a různou viskozitou pro výrobu různě tlustých vrstev, v této práci jsou použity klony *EpoCore 50*, *EpoCore 2*, *EpoClad 50* a *EpoClad 10* [16]. Opět jsou dodávány jednosložkově a jsou vytvrzovány kombinací teplotního vytvrzování a UV záření.

4 Návrh optických struktur

Navrhl jsem dva typy optických planárních kanálkových vlnodů. Prvním typem byly mnohavidové vlnovody (viz kap. 4.1). Ty se vyznačují velkým průměrem jádra, konkrétně byly navrženy vlnovody s rozměrem jádra 550 a 1000 μm . Tyto rozměry byly zvoleny z důvodu kompatibility s používanými optickými vlákny. Vlnod s jádrem 550 μm je kompatibilní s optickým vláknem MOLEX (FIP500550590, Polymicro TECHNOLOGIES) a 1000 μm s optickým vláknem FG910LEC (Thorlabs LTD) a se standardním optickým vláknem POF (Plastic Optical Fiber) - Industry-standard (IEC 60793-2-40 A4a.2). Dále byly navrženy mnohavidové optické rozbočnice (viz kap. 4.2) pomocí programu BeamPROP od firmy RSoft, který využívá k výpočtům metodu šíření optického svazku (BPM – Beam Propagation Method) a které mají rozměry umožňující připojení zmíněných optických vláken ke vstupním a výstupním vlnodům.

Druhým typem optických vlnodů byly jednovidové optické kanálkové vlnovody (viz kap. 4.3), jejichž geometrické rozměry byly vypočítány na základě změřených indexů lomu použitých polymerních materiálů.

4.1 Mnohavidové optické vlnovody

Mnohavidové optické vlnovody byly vyrobeny z vhodných materiálů dostupných v laboratoři PLANIO (Laboratoř planárních optoelektronických a optických integrovaných struktur na Katedře mikroelektroniky FEL, ČVUT v Praze). Základním kritériem výběru dvojice materiálů pro výrobu byl jejich index lomu, aby struktura mohla vést optické záření. V tab. 4.1 je uveden seznam navržených a vyrobených mnohavidových vlnodů. Jedná se o kombinace materiálů: optický elastomer PDMS (Sylgard 184), hybridní polymer OrmoClear FX, které jsou určeny pro vlnové délky 1300 nm . Dále o PDMS s certifikací pro použití jako biokompatibilní materiály MED-6210 a MED-6215, které jsou určeny pro vlnovou délku 650 nm . Poslední kombinací materiálů jsou epoxidové pryskyřice EpoClad a EpoCore určené pro vlnovou délku 850 nm .

Tab. 4.1: Seznam navržených a vyrobených mnohavidových optických vlnodů s indexy lomu materiálů.

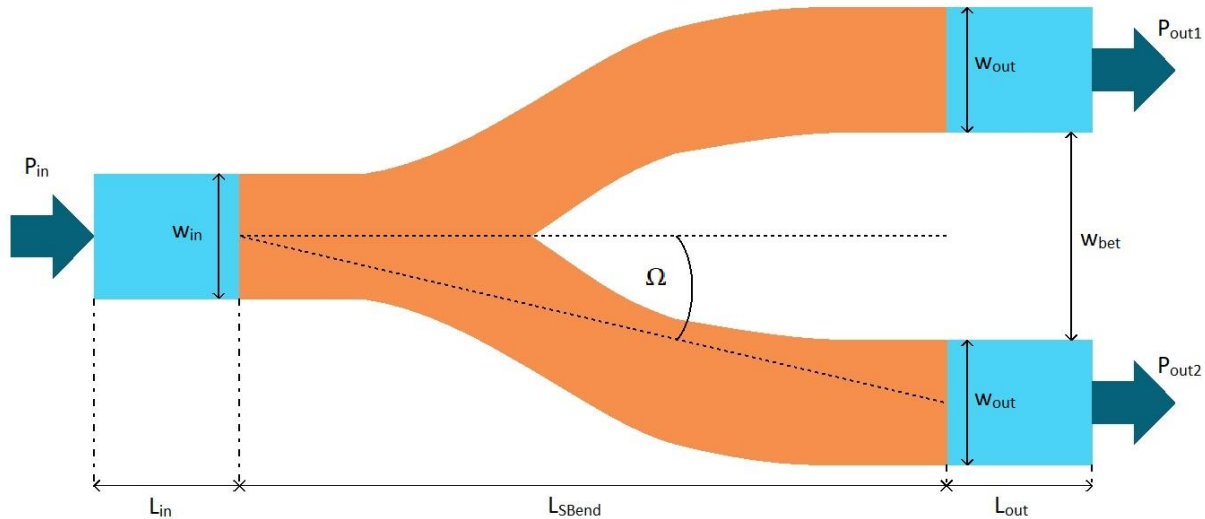
Materiál pláště	Materiál jádra	λ [nm]	n_s [-]	n_f [-]	Δn [-]	Rozměr jádra [μm]
Sylgard 184	OrmoClear FX	1300	1,4010	1,5567	0,1557	550
Sylgard 184	MED-6210	650	1,4051	1,4094	0,0043	550
MED-6215	MED-6210	650	1,4051	1,4247	0,0196	550
MED-6215	MED-6210	1300	1,3969	1,4156	0,0187	1000
EpoClad 50	EpoCore 50	850	1,5718	1,5825	0,0107	50

Vlnovody byly vyráběny dvěma způsoby výroby, které jsou popsány v kapitole 5. Vlnovody s většími rozměry jádra (550 a 1000 μm) byly vyrobeny pomocí negativní formy vytištěné na 3D tiskárně (viz kap. 5.1) a vlnovody z materiálů EpoCore 50 a EpoClad 50 byly vyrobeny pomocí laserové litografie s přímým zápisem LBW (Laser Beam Writing, viz kap. 5.2) s rozměrem jádra 50 μm .

4.2 Mnohavidová optická rozbočnice

Navrhl jsem optické mnohavidové rozbočnice 1x2Y, jejichž strukturální schéma je uvedeno na obr. 4.1. Cílem bylo, aby byl vstupní výkon P_{in} rozdělen přesně na polovinu ve výstupních vlnovodech, tzn. $P_{out1} = P_{out2}$, jedná se tedy o návrh symetrických optických rozbočnic. Při optimalizaci se hledaly optimální rozměry rozbočnice, především úhel odklonu ramene Ω a délka zahnuté části ve tvaru S

L_{SBend} . Zároveň byla snaha o minimalizaci rozměrů rozbočnice, což znamenalo co nejkratší délku L_{SBend} , aby měla rozbočnice co nejnižší vložný optický útlum. Struktury byly navrženy a optimalizovány pro vstupní a výstupní optická vlákna s velkým průměrem jádra, a to $500 \mu\text{m}$. Šířka mezi výstupními vlnovody w_{bet} musela být minimálně rovná w_{out} (tj. $w_{bet} \geq w_{out}$), aby bylo možno připojit výstupní optické vláknové vlnovody.



Obr. 4.1: Schéma optické rozbočnice 1x2Y, převzato z [5].

Návrh struktur jsem provedl v programu BeamPROP, z důvodu časové náročnosti výpočtu pouze pomocí 2D simulace. Pomocí balíčku MOST (RSoft's Multi-Variable Optimization and Scanning Tool) byly optimalizovány geometrické rozměry rozbočnic, a to úhel Ω a délku rozbočnice L_{SBend} (viz obr. 4.1). Návrh byl proveden tak, aby bylo dosaženo co nejmenších rozměrů struktury (co nejmenší délky L_{SBend}), při zachování možnosti připojení výstupních optických vláken a výstupní výkon byl rozdělen přesně na polovinu.

Rozdíl indexů lomu Δn je v této práci definován stejně jako v programu BeamPROP:

$$\Delta n = n_f - n_s \quad (35)$$

kde n_f je index lomu vlnovodné vrstvy a n_s je index lomu krycí vrstvy (substrátu). Návrhy byly optimalizovány pro vlnovou délku $1308,2$ a $654,2 \text{ nm}$ a pro připojení vláken s rozměrem jádra $500 \mu\text{m}$ a s rozměrem pláště $550 \mu\text{m}$.

Seznam provedených návrhů je uveden v tab. 4.2. Hodnoty indexů lomu použitých materiálů pro co nejpřesnější návrh byly měřeny pomocí metody jednohranolové vidové spektroskopie popsané v kapitole 6.1.

Tab. 4.2: Seznam provedených návrhů.

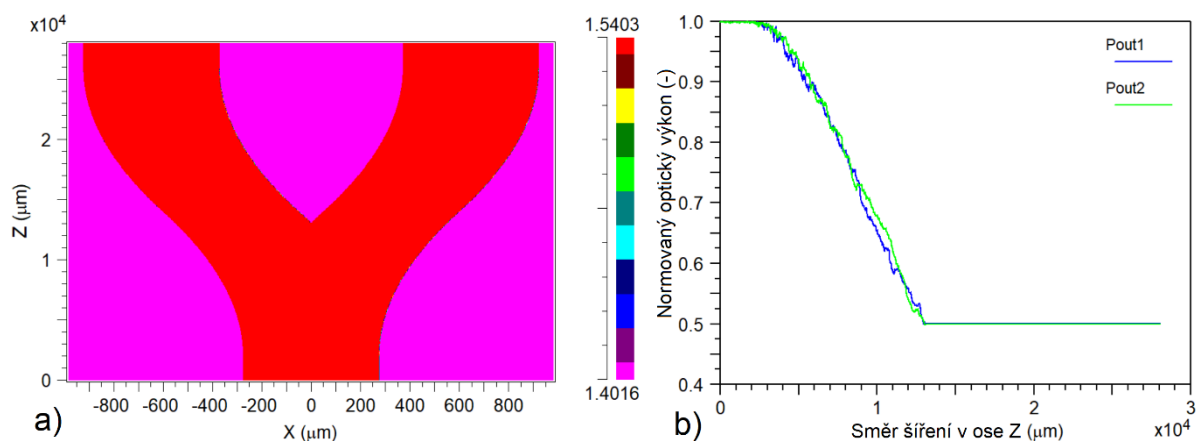
Materiál pláště	Materiál jádra	Vlnová délka [nm]	n_s [-]	n_f [-]	Δn [-]	Rozměr jádra [μm]
Sylgard 184	OrmoClear FX	1308,2	1,4016	1,5403	0,1387	550
UV-PDMS KER-4690	OrmoClear FX	1308,2	1,3994	1,5403	0,1409	550
Gelest OE 39	UV-PDMS KER-4690	1308,2	1,3810	1,3994	0,0184	550
MED-6215	MED-6210	654,2	1,4051	1,4247	0,0196	550

Rozbočnice Sylgard 184 / OrmoClear FX

Prvním návrhem je struktura, která využívá elastomer Sylgard 184 (index lomu 1,4016 pro vlnovou délku 1308,2 nm) jako krycí vrstvu a hybridní polymer OrmoClear FX (index lomu 1,5403 pro vlnovou délku 1308,2 nm) jako vlnovodnou vrstvu.

Rozdíl indexů lomu pro tuto kombinaci materiálů je relativně velký ($\Delta n = 0,1387$), což má za následek relativně krátkou délku rozbočnice pro dosažení optimálního dělení výkonu (struktury jsou optimalizovány, pokud je výkon dělen přesně na polovinu, tj. $P_{out1} = P_{out2}$). Optimalizace byly vždy prováděny nejprve s hrubším krokem pro nalezení optimálního rozmezí úhlu Ω a délky rozbočnice L_{SBend} , poté byl krok zjemněn pro dosažení přesnějšího návrhu a nalezení optimálních rozměrů. Délka vstupního a výstupních vlnovodů byla zvolena 2 mm.

Na obr. 4.2a je uveden profil indexů lomu z programu BeamPROP pro rozbočnici 1x2Y s optimalizovanými rozměry a na obr. 4.2b je graf závislosti normovaného optického výkonu na vzdálenosti ve směru šíření optického signálu strukturou. Optimalizovaná rozbočnice má úhel $\Omega = 1,545$ a délku $L_{SBend} = 24$ mm. Výstupní výkon je rozdělen v poměru 50,02 : 49,96 %.

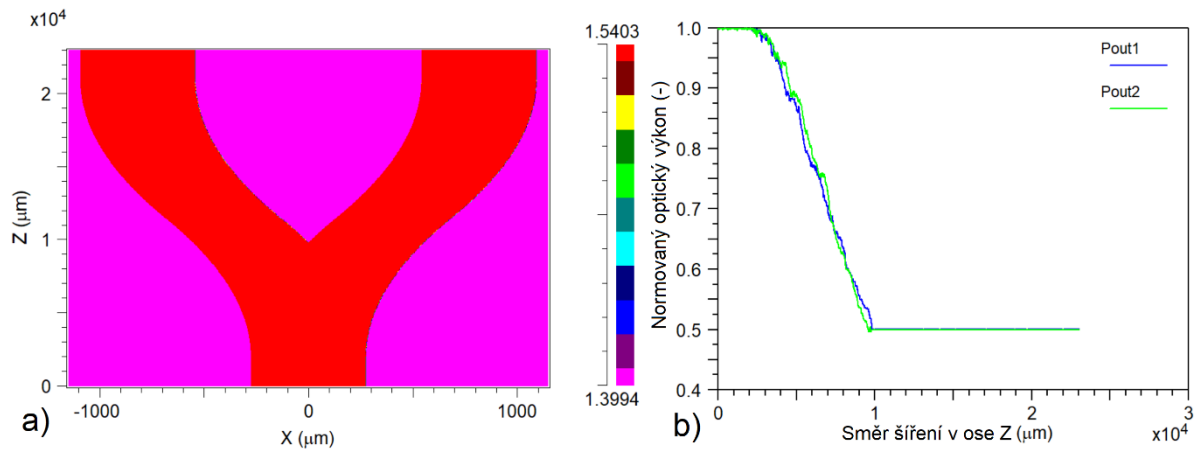


Obr. 4.2: *Návrh rozbočnice Sylgard 184 / OrmoClear FX ($n_f = 1,5403$, $n_s = n_c = 1,4016$, $\lambda = 1308,2$ nm),
a) rozložení indexu lomu ve 2D struktuře pro optimalizovaný návrh ($\Omega = 1,04^\circ$ a $L_{SBend} = 24$ mm),
b) závislost normovaného optického výkonu na vzdálenosti ve směru šíření optického signálu.*

Rozbočnice UV-PDMS KER-4690 / OrmoClear FX

U druhé navržené rozbočnice zůstala stejná vlnovodná vrstva jako v předchozím případě, tedy hybridní polymer OrmoClear FX (index lomu 1,5403 pro vlnovou délku 1308,2 nm) a jako plášťová vrstva byl zvolen polymer UV-PDMS KER-4690 (index lomu 1,3994 pro vlnovou délku 1308,2 nm). Rozdíl indexů lomu těchto materiálů je ještě nepatrně vyšší než v předchozím případě ($\Delta n = 0,1409$), takže i výsledná rozbočnice je kratší.

Na obr. 4.3a je uveden profil indexů lomu z programu BeamPROP pro rozbočnici 1x2Y s optimalizovanými rozměry a na obr. 4.3b je graf závislosti normovaného optického výkonu na vzdálenosti ve směru šíření optického signálu strukturou. Optimalizovaná rozbočnice má úhel $\Omega = 2,461$ a délku $L_{SBend} = 19$ mm. Výstupní výkon je rozdělen v poměru 50,01 : 49,98 %.

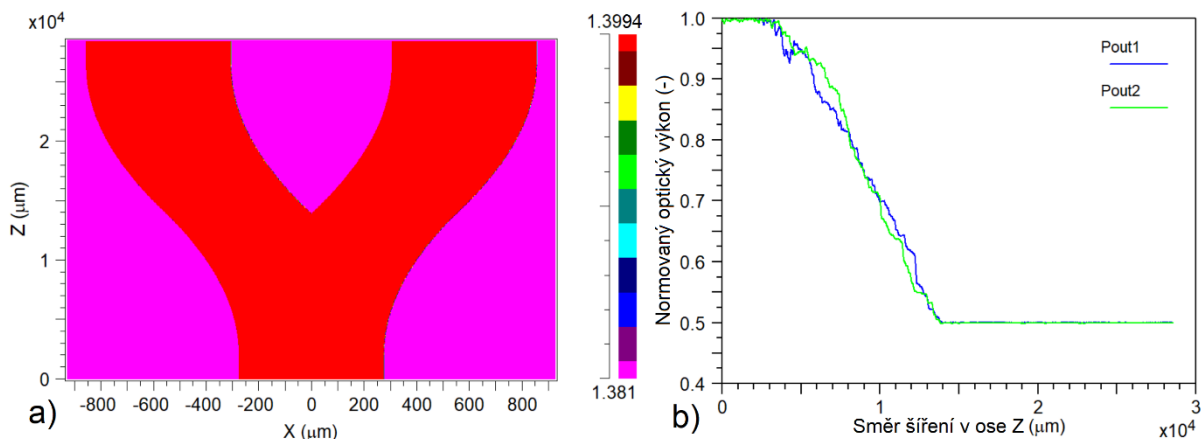


Obr. 4.3: *Návrh rozbočnice UV-PDMS KER-4690 / OrmoClear FX ($n_f = 1,5403$, $n_s = n_c = 1,3994$, $\lambda = 1308,2 \text{ nm}$)*
a) rozložení indexu lomu ve 2D struktuře pro optimalizovaný návrh ($\Omega = 2,461^\circ$ a $L_{SBend} = 19 \text{ mm}$),
b) závislost normovaného optického výkonu na vzdálenosti ve směru šíření optického signálu.

Rozbočnice Gelest OE 39 / UV-PDMS KER-4690

U třetí navržené rozbočnice je použit polymer UV-PDMS KER-4690 (index lomu 1,3994 pro vlnovou délku 1308,2 nm) jako vlnovodná vrstva a jako plášťová vrstva je využit polymer Gelest OE 39 (index lomu 1,3810 pro vlnovou délku 1308,2 nm). Rozdíl indexů lomu těchto materiálů je menší, než v předchozích případech ($\Delta n = 0,0184$), přesto se ale podařilo navrhnout rozbočnici s menšími rozměry.

Na obr. 4.4a je uveden profil indexů lomu z programu BeamPROP pro rozbočnici 1x2Y s optimalizovanými rozměry a na obr. 4.4b je graf závislosti normovaného optického výkonu na vzdálenosti ve směru šíření optického signálu strukturou. Optimalizovaná rozbočnice má úhel $\Omega = 1,358$ a délku $L_{SBend} = 24,5 \text{ mm}$. Výstupní výkon je rozdělen v poměru 50,00 : 49,96 %.

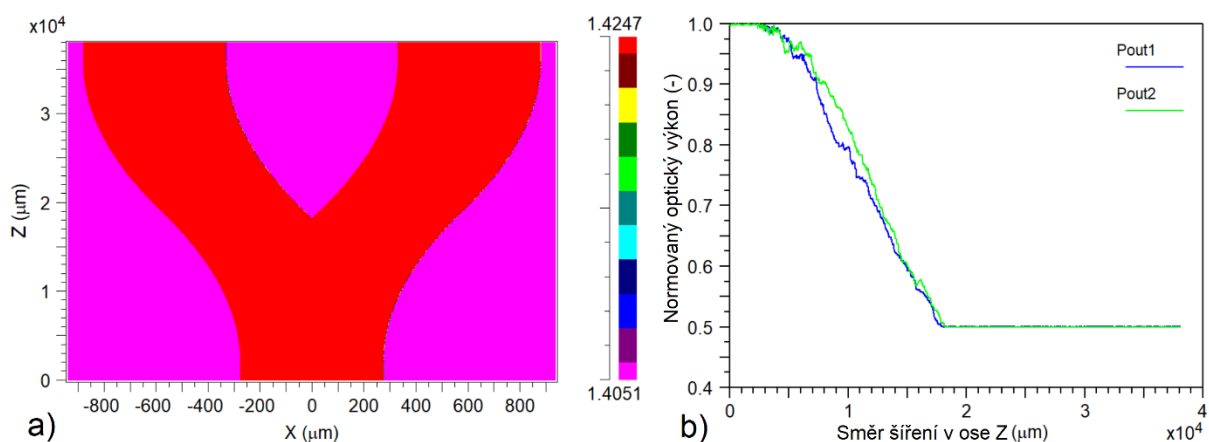


Obr. 4.4: *Návrh rozbočnice Gelest OE 39 / UV-PDMS KER-4690 ($n_f = 1,3994$, $n_s = n_c = 1,3810$, $\lambda = 1308,2 \text{ nm}$)*
a) rozložení indexu lomu ve 2D struktuře pro optimalizovaný návrh ($\Omega = 1,358^\circ$ a $L_{SBend} = 24,5 \text{ mm}$),
b) závislost normovaného optického výkonu na vzdálenosti ve směru šíření optického signálu.

Rozbočnice MED-6215 / MED-6210

Poslední navrženou rozbočnicí je struktura z biokompatibilních silikonových elastomerů PDMS MED-6210 (index lomu 1,4247 pro vlnovou délku 654,2 nm), který slouží jako vlnovodná vrstva a jako plášťová vrstva slouží elastomer MED-6215 (index lomu 1,4051 pro vlnovou délku 654,2 nm). Oba elastomery jsou od výrobce NuSil a mají zdravotnickou certifikaci pro použití k implantaci do lidského těla. Rozbočnice byla optimalizována pro oblast viditelného světla, konkrétně pro vlnovou délku 654,2 nm. Rozdíl indexů lomu těchto materiálů je relativně malý ($\Delta n = 0,0196$), rozbočnice je proto delší než v předchozích případech.

Na obr. 4.5a je uveden profil indexů lomu z programu BeamPROP pro rozbočnici 1x2Y s optimalizovanými rozměry a na obr. 4.5b je graf závislosti normovaného optického výkonu na vzdálenosti ve směru šíření optického signálu strukturou. Optimalizovaná rozbočnice má úhel $\Omega = 1,0202$ a délku $L_{SBend} = 34$ mm. Výstupní výkon je rozdělen v poměru 50,00 : 49,98 %.



Obr. 4.5: *Návrh rozbočnice MED-6215 / MED-6210 ($n_f = 1,4247$, $n_s = n_c = 1,4051$, $\lambda = 654,2$ nm)*
a) *rozložení indexu lomu ve 2D struktuře pro optimalizovaný návrh ($\Omega = 1,0202^\circ$ a $L_{SBend} = 34$ mm),*
b) *závislost normovaného optického výkonu na vzdálenosti ve směru šíření optického signálu.*

V tab. 4.3 je uveden souhrn všech výše provedených návrhů rozbočnic s optimalizovanými parametry. Všechny rozbočnice mají šířku vlnovodného kanálu 550 μm . Nejkratší rozbočnicí je struktura s délkou 19 mm ze silikonového elastomeru UV-PDMS KER-4690, který slouží jako plášťová vrstva, a hybridního polymeru OrmoClear FX, který slouží jako vlnovodná vrstva. Nejdelší rozbočnicí je struktura s délkou 34 mm z biokompatibilních PDMS MED-6215, který slouží jako plášťová vrstva a MED-6210, který slouží jako vlnovodná vrstva. Tento návrh je také jediný optimalizován pro vlnovou délku 654,2 nm, všechny ostatní jsou optimalizovány pro vlnovou délku 1308,2 nm.

Tab. 4.3: Seznam provedených návrhů rozbočnic s šířkou vlnovodu 550 μm s jejich optimalizovanými parametry a poměry výstupních výkonů.

Materiál pláště	Materiál jádra	L_{SBend} [mm]	Ω [°]	λ [nm]	n_s [-]	n_c [-]	Δn [-]	P_{out1}/P_{out2} [-]
Sylgard 184	OrmoClear FX	24,0	1,5450	1308,2	1,4016	1,5403	0,1387	50,02 : 49,96
UV-PDMS KER-4690	OrmoClear FX	19,0	2,4610	1308,2	1,3994	1,5403	0,1409	50,01 : 49,98
Gelest OE 39	UV-PDMS KER-4690	24,5	1,3580	1308,2	1,3810	1,3994	0,0184	50,00 : 49,96
MED-6215	MED-6210	34,0	1,0202	654,2	1,4051	1,4247	0,0196	50,00 : 49,98

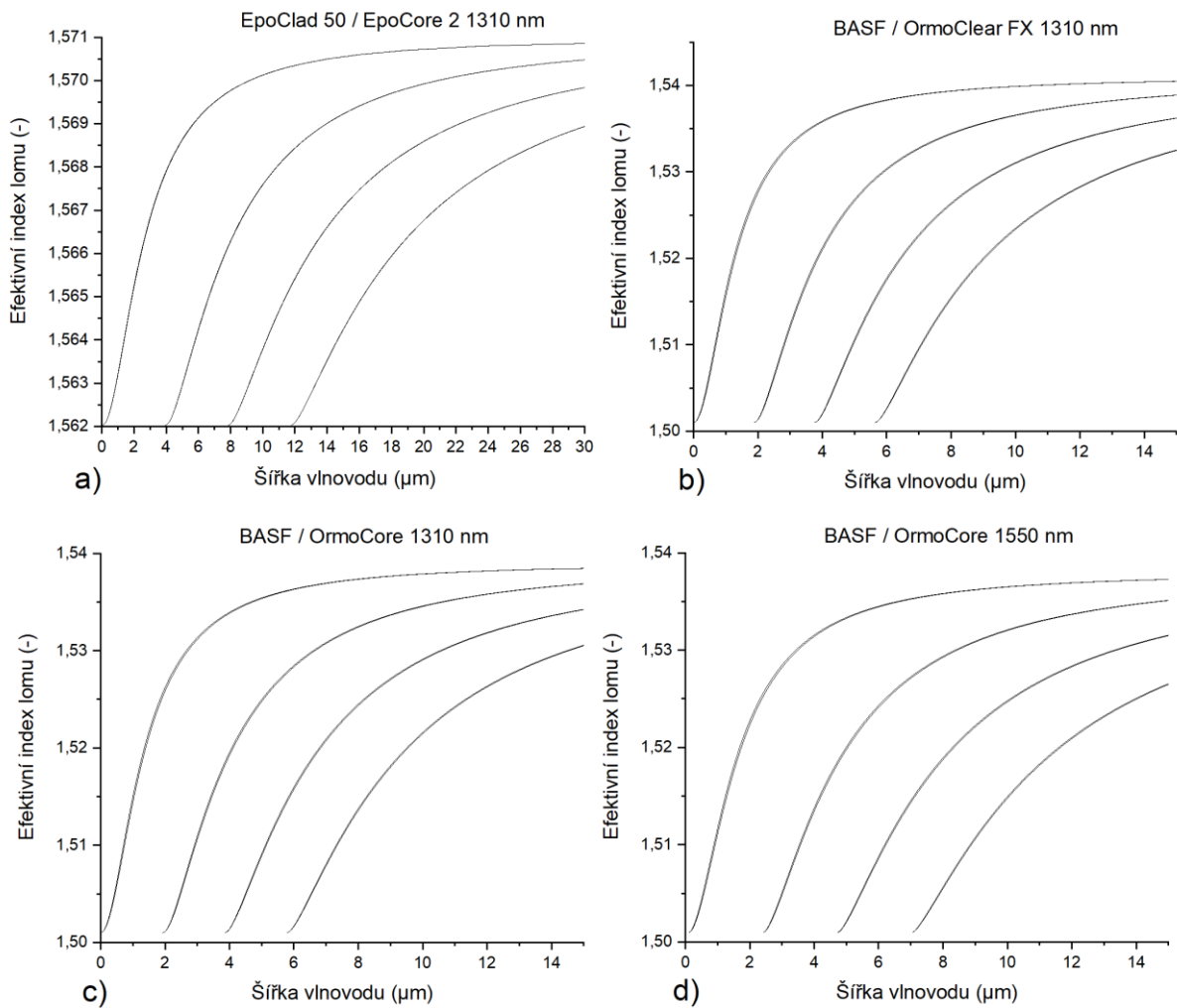
4.3 Návrh jednovidových optických planárních vlnovodů

Posledním navrženým typem vlnovodů byly jednovidové optické planární vlnovody. Pro tento typ vlnovodů je zásadní rozměr jádra, který je nutné vypočítat na základě znalosti indexů lomu jádra i pláště a vlnové délky pro kterou je vlnovod navrhován podle rovnice (33). Seznam navržených jednovidových vlnovodů s jejich rozměry je uveden v tab. 4.4. Tyto vlnovody byly vyrobeny pomocí technologie LBW (Laser Beam Writing – laserová litografie s přímým zápisem) v kombinaci s technologií DRIE (Deep Reactive Ion Etching – hluboké reaktivní leptání iontů), která je popsána v kap. 5.2. Technologie je zvolena z důvodu dostatečného rozlišení a přesnosti pro výrobu takto malých rozměrů, které se při mnou používaných materiálech pohybují v jednotkách mikrometrů maximálně do 3,8 μm (viz tab. 4.4).

Tab. 4.4: Seznam navržených jednovidových vlnovodů s jejich rozměry, operační vlnovou délkou a indexy lomu.

Materiál pláště	Materiál jádra	w [μm]	λ [nm]	n_s [-]	n_c [-]	Δn [-]
EpoClad 50	EpoCore 2	3,8	1310	1,562	1,571	0,009
Lumogen OVD Varnish 311 (BASF)	OrmoClear FX	1,9	1310	1,501	1,541	0,040
Lumogen OVD Varnish 311 (BASF)	OrmoCore	1,9	1310	1,501	1,539	0,038
Lumogen OVD Varnish 311 (BASF)	OrmoCore	2,1	1550	1,500	1,538	0,038

Na obr. 4.6 je uvedena závislost efektivního indexu lomu na šířce vlnovodu pro první čtyři vidy pro všechny navržené vlnovody uvedené v tab. 4.4. Z porovnání obrázků a tabulky lze vidět, že grafy a rozměry vlnovodu uvedené na obr. 4.6b, c, d se příliš neliší, nejmenší rozměr má optický vlnovod, kde jádro tvoří hybridní polymer OrmoCore nebo OrmoClear FX a plášť je tvořen polymerem Lumogen OVD Varnish 311 (BASF). V obou případech je maximální rozměr vlnovodu 1,9 μm při vlnové délce 1310 nm a 2,1 μm při vlnové délce 1550 nm. Naopak největší rozměr pro dosažení jednovidového režimu má případ s vlnovodným jádrem EpoCore 2 a pláštěm EpoClad 50, kdy při vlnové délce 1310 nm je maximální rozměr 3,8 μm (viz graf na obr. 4.6a). Je to dáno rozdílem indexu lomu Δn , který je pro materiály EpoClad 50 a EpoCore 2 menší než pro ostatní navržené kombinace.



Obr. 4.6: Závislost efektivního indexu lomu na šířce (tloušťce) vlnovodné vrstvy pro první čtyři vidy
a) EpoClad 50 jako krycí vrstva a EpoCore 2 jako vlnovodná vrstva, vypočteno pro 1310 nm,
b) BASF jako krycí vrstva a OrmoClear FX jako vlnovodná vrstva, vypočteno pro 1310 nm,
c) BASF jako krycí vrstva a OrmoCore jako vlnovodná vrstva, vypočteno pro 1310 nm,
d) BASF jako krycí vrstva a OrmoCore jako vlnovodná vrstva, vypočteno pro 1550 nm.

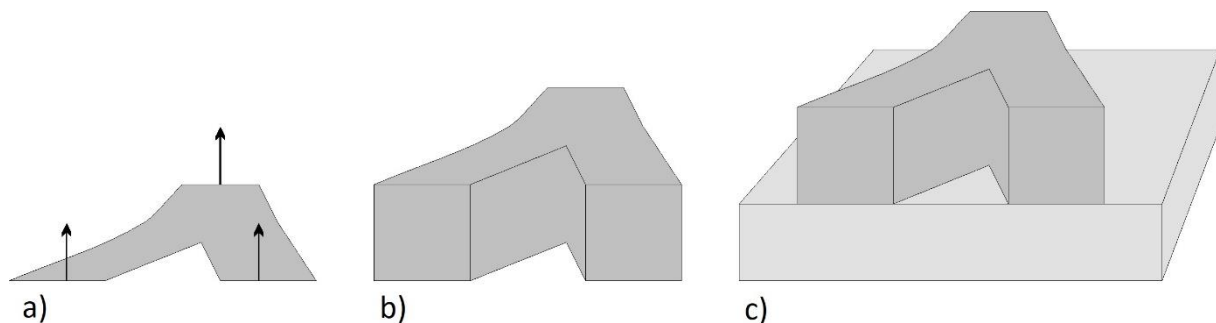
5 Výroba navržených struktur

5.1 Výroba mnohavidových rozbočnic a vlnovodů pomocí negativní formy

Výroba vzorků byla prováděna zaléváním negativního motivu optickými elastomery. Negativní motivy a formy byly vytištěny na 3D tiskárně podle počítačového návrhu. Motiv byl následně vložen do formy a zalit plášťovou vrstvou elastomeru, v níž po vytvrzení a odseparování od formy zůstala drážka ve tvaru požadované struktury. Vytvořený motiv s drážkou byl poté vyplněn vlnovodnou vrstvou, kterou tvořil elastomer s vyšším indexem lomu. Po vytvrzení následovalo zalití horní plášťovou vrstvou, která byla ze stejného elastomeru jako spodní vrstva. Postup výroby vycházel ze zkušeností, jež jsem získal při řešení bakalářské práce [5].

Negativní motiv byl před tiskem vymodelován v počítači na základě počítačové simulace rozbočnic, kterou jsem provedl pomocí programu BeamPROP. Návrh z programu BeamPROP byl vyexportován jako 2D model ve formátu dxf, který byl nadále zpracován v softwaru pro 3D modelování. K úpravě a následnému vytváření hotových motivů a forem jsem použil program FreeCAD [5].

Postup zpracování návrhu z programu BeamPROP v programu FreeCAD je uveden na obr. 5.1. Návrh rozbočnic byl proveden pouze pro 2D model, proto musel být návrh nejprve „vysunut“, aby získal třetí rozměr (viz obr. 5.1a). Jelikož jsou všechny navrhované struktury čtvercového průřezu, stačilo návrh vysunout o jeho šířku (viz obr. 5.1b). Poté musela být k návrhu dokreslena podložka, aby mohl být na formu nalit plášťový polymer (viz obr. 5.1c). Tím byl návrh připraven k exportu a následně k výrobě pomocí technologie 3D tisku [5].



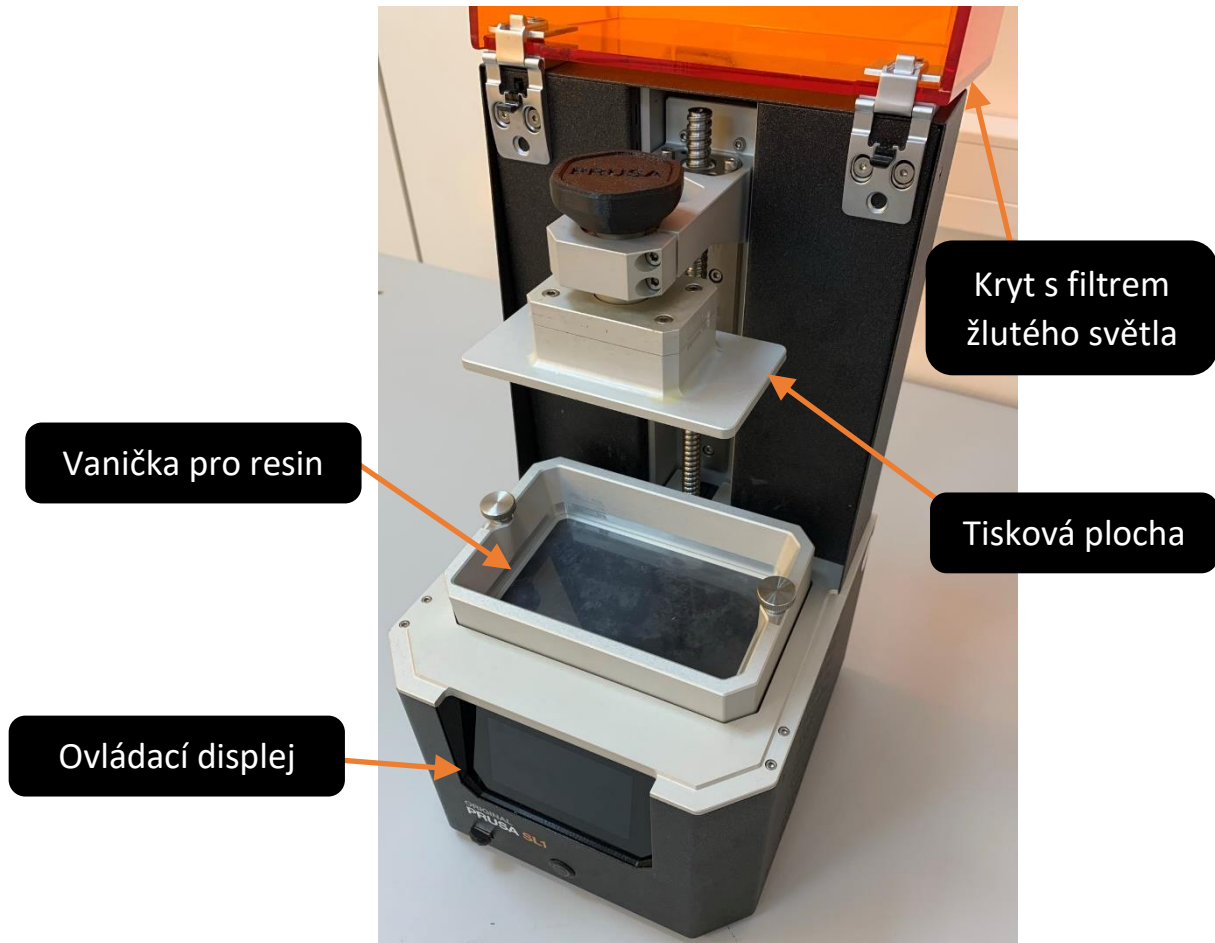
Obr. 5.1: Postup zpracování 2D modelu z programu BeamPROP na 3D model, převzato z [5],

- a) vysunutí 2D modelu,
- b) 3D model jádra vlnovodu po vysunutí,
- c) dokreslení podložky pod jádro vlnovodu, model připravený pro tisk.

Návrh byl exportován z programu FreeCAD ve formě 3D sítě útvaru ve formátu stl. Export z programu BeamPROP je 1000x zvětšený, proto i síť je 1000x větší, než je její skutečná velikost. Síť tedy musela být před finálním přeložením pro software tiskárny zmenšena. K tomu byl použit program MeshLab, který dokáže rozměry sítě stl přepočítat [5]. Nakonec byla síť exportována a přeložena v programu PrusaSlicer pro software tiskárny a vytištěna. Pro tisk negativních motivů byla využita tiskárna Original Prusa SL1 od firmy Prusa Research [26].

Tato tiskárna pracuje na principu MSLA (Masked Stereolithography) a byla použita z důvodu vyšší teplotní odolnosti vytištěných polymerních motivů a přesnějšího tisku motivů než umožňují tiskárny pracující na principu FDM (Fused Deposition Modeling). Tiskárna využívá fotocitlivé polymerní resiny, které jsou vytvrzovány UV zdrojem o vlnové délce 405 nm. Na obr. 5.2 je uvedena fotografie pracoviště

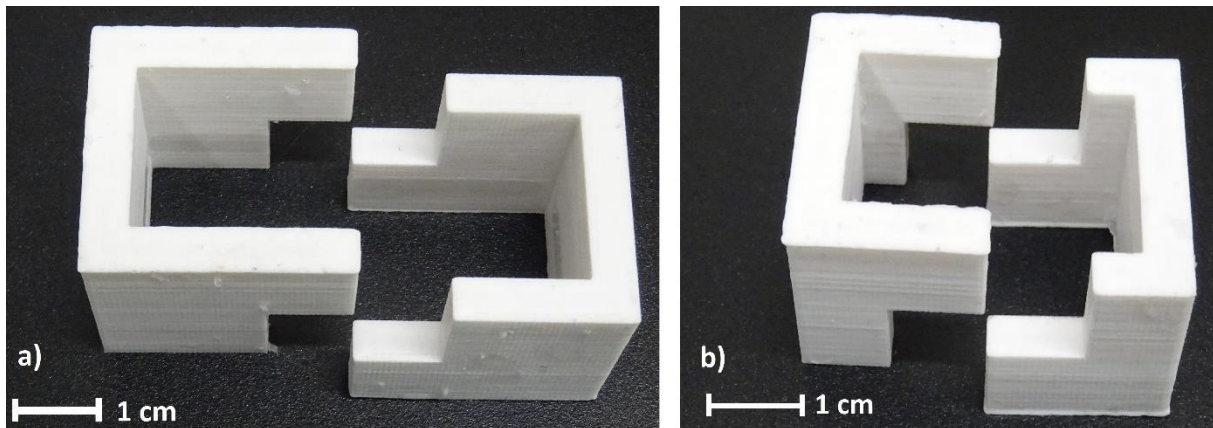
s tiskárnou. Do vaničky, která má dno tvořené transparentní fólií, byl nalit resin, který byl potom osvětčován pomocí UV zdroje přes 5,5" LCD panel s rozlišením 2560×1440p (tedy 0,047 mm na pixel). Při tisku musela být tiskárna přikryta krytem se žlutým filtrem, aby nedocházelo k nežádoucímu vytvrzení resinu. Osvícená část resinu přilne k tiskové podložce, která sjíždí do vaničky s resinem a vytvrďne.



Obr. 5.2: Tiskárna Original Prusa SL1.

Po každé vrstvě se vanička naklopí tak, aby došlo k oddělení ztvrdlé struktury od dna vaničky a aby zároveň zůstal tištěný motiv přichycen na tiskové ploše (na obr. 5.2 se tisková plocha nachází zespodu vyfocené součástky tiskárny). Po vytištění celého motivu byla tisková plocha s vytištěným motivem vyjmuta a přesunuta do mycí a vytvrzovací stanice s izopropylalkoholem (IPA), kde byl odstraněn přebytečný resin. Potom byla struktura znovu osvětlena UV světlem, aby došlo k jejímu finálnímu vytvrzení.

Aby bylo možné negativní motiv zalít tekutým elastomerem, který bylo nutné do vytvrzení udržet v dostatečné vrstvě na povrchu destičky, vyvinul jsem dvoudílnou rozebíratelnou formu (viz obr. 5.3), do které byl polymer nalit. Po vytvrzení polymeru bylo možné rozebráním formy vzorek pohodlně vyjmout. Forma byla složena ze dvou stejných dílů, aby byla možná její snadná výroba. Protože má každá rozbočnice jinou délku, musela být pro každou z rozbočnic vyrobena forma o jiné délce.



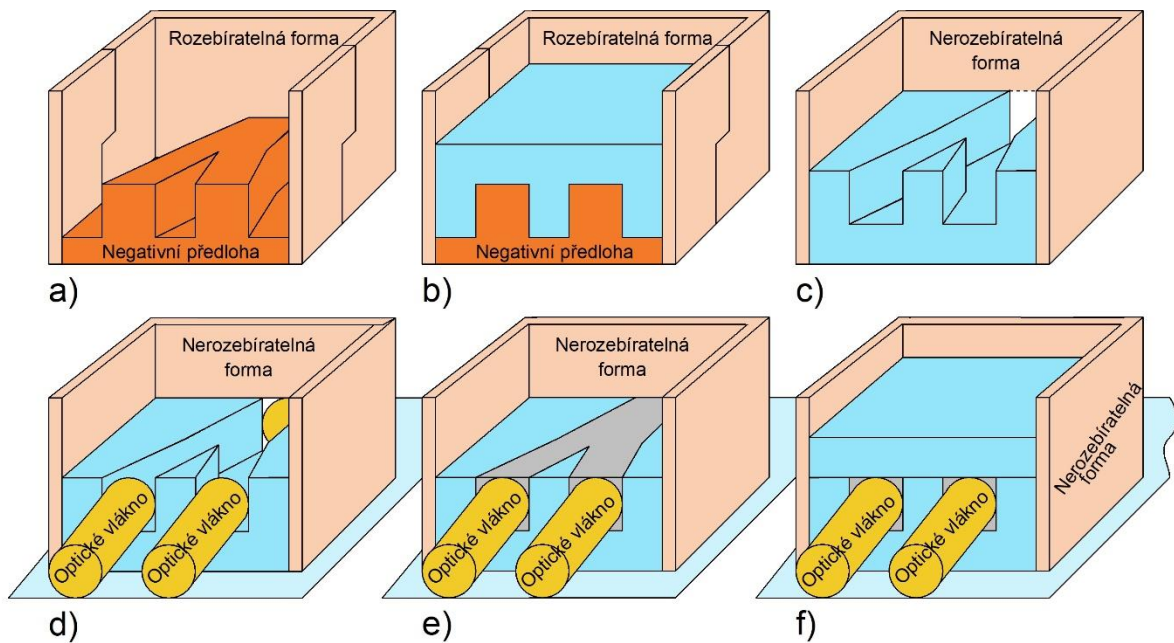
Obr. 5.3: *Fotografie dvoudílných forem pro zalévání vzorků vyrobených pomocí metody 3D tisku FDM tiskárnou Original Prusa i3 MK3S+ za použití tiskové struny ABS-T,*
 a) *fotografie formy pro delší vzorky, rozbočnice a jejich reference,*
 b) *fotografie formy pro kratší vzorky.*

Pro tisk těchto forem byla použita tiskárna Original Prusa i3 MK3S+, taktéž od firmy Prusa Research, která pracuje na principu FDM [27]. Tisk probíhal tak, že nejdříve byla zahřáta tryska, kterou probíhalo nanášení tiskové hmoty, a deska, na kterou byla následně vrstva po vrstvě tisková hmota nanášena. Jako tisková hmota byl použit materiál ABS-T (akrylonitrilbutadienstyren) dodávaný ve formě struny, který byl tryskou roztaven a nanášen na desku ve vrstvách v požadovaném tvaru, ve kterém potom ztuhnul. Po vychladnutí byla forma hotova [5]. Struktury vytištěné touto tiskárnou mají výrazně vyšší drsnost než struktury vytištěné pomocí tiskárny Original Prusa SL1. Nicméně formy z této tiskárny nebyly použity k vytváření stěn vlnovodů, nebyly tedy v optické dráze paprsku. Jejich vyšší drsnost proto neměla vliv na výsledný optický útlum vyrobených vlnovodných struktur.

Všechny vyrobené vzorky měly jako plášťovou i vlnovodnou vrstvu polymer PDMS pod různými výrobními označeními a s různými indexy lomu. Většina vzorků měla jako plášťovou i vlnovodnou vrstvu biokompatibilní elastomer PDMS. Pro plášťovou vrstvu byl použit certifikovaný biomedicínský elastomer s označením NuSil MED-6215 a vlnovodnou vrstvu tvořil biomedicínský elastomer s označením NuSil MED-6210. Oba polymery byly od výrobce Avantor®, do ČR dodány společností APM Technica GmbH. Z finančních důvodů pro ověření technologických procesů byly nejdříve vyrobeny vzorky, které mají jako plášťovou vrstvu polymer PDMS prodávaný pod označením Sylgard 184 výrobcem Dow Corning, dodaný do ČR společností ELCHEMCo. Jako vlnovodná vrstva byl použit opět elastomer NuSil MED-6210.

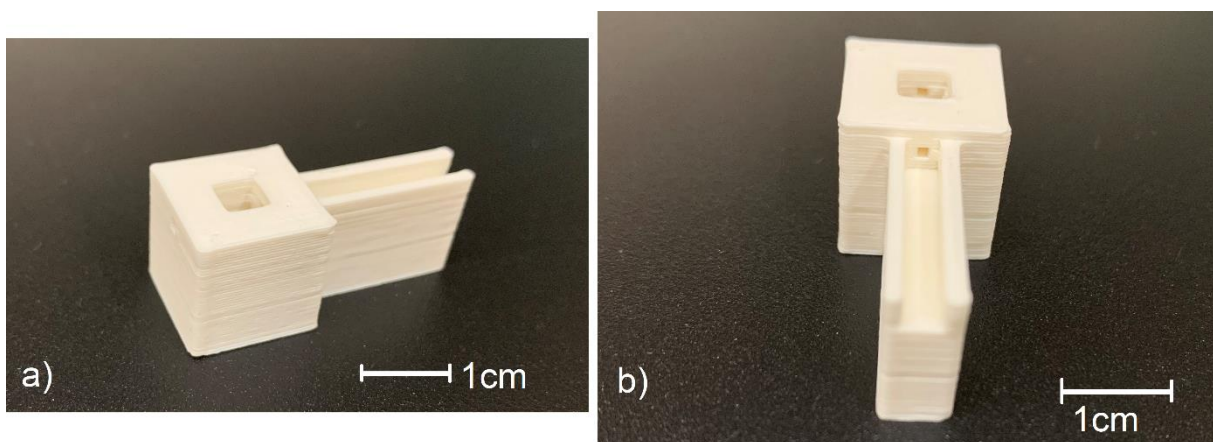
Všechny použité polymery byly dodány ve dvou složkách. Polymery MED byly dodány v balení dvoukartuše, jejíž součástí byl i statický mixér. Vytlačení bylo provedeno pomocí ruční výtlačné pistole. Elastomer MED-6215 byl smíchán v poměru 1:10 a elastomer MED-6210 v poměru 1:1. Složky polymeru Sylgard 184 byly dodány v oddělených nádobách, byly proto smíchány externě v poměru 1:10. Při smíchání se ale do tekutého polymeru dostával vzduch, který pak musel být odstraněn evakuováním za pomoci exikátoru.

Na sestavenou rozebíratelnou formu a do ní vložený negativní motiv (viz obr. 5.4a) musel být před zalitím elastomerem nanesen separátor, aby bylo možné hotový vzorek z formy bez poškození vyjmout. Jako separátor byl použit přípravek Formula 10 od výrobce Ambersil ve formě spreje dodávaný společností ELCHEMCo. Do formy s negativním motivem byl poté nalit tekutý elastomer PDMS (Sylgard 184 nebo MED-6215), který tvořil spodní plášťovou vrstvu (viz obr. 5.4b). Následně byla struktura na třicet minut evakuována v exikátoru, aby došlo k homogenizaci a odstranění přebytečného vzduchu.



Obr. 5.4: Postup výroby vzorku s využitím negativního motivu vyrobeného pomocí 3D tiskárny,
 a) sestavení rozebiratelné formy kolem negativní předlohy vytištěné na 3D tiskárně,
 b) nalití spodní vrstvy (podložky) PDMS do připravené formy,
 c) vyjmutí spodní vrstvy z rozebiratelné formy a vložení do nerozebiratelné formy s otvory pro vlákna,
 d) vložení vláken na kraj drážek určených pro vlnovodnou vrstvu a připevnění celé struktury na skleněnou podložku,
 e) nanesení vlnovodné vrstvy pomocí stěrky,
 f) nalití horní krycí plášťové vrstvy.

Následovalo vytvrzení v laboratorní peci (sušárna MERMET Universal oven UN55) při 65°C po dobu 4 hodin. Poté byla spodní vrstva, ve které byl z negativního motivu kanál určený pro jádro vlnovodu, vyjmuta z rozebiratelné formy a byla vložena do nerozebiratelné formy s otvory pro optická vlákna (viz obr. 5.4c). Vytvrzený silikonový motiv lze oddělit od formy díky vrstvě naneseného separátoru Formula 10. Nerozebiratelná forma byla zvolena proto, aby při manipulaci se vzorkem nedocházelo k vytrhávání optických vláken ze vzorků, a tím k jejich ničení. Ze stejného důvodu byly vzorky připevněny ke skleněné podložce a vlákna byla umístěna do držáků zobrazených na obr. 5.5.



Obr. 5.5: Podpora vláken vyrobená pomocí 3D tiskárny z polymeru ABS,
 a) pohled ze strany,
 b) pohled z čela na drážku pro podepření vlákna s konektorem s viditelným otvorem pro vlákno v těle podpory.

V dalším kroku byla na kraj drážek určených pro vlnovodnou vrstvu vložena optická vlákna a celý vzorek byl upevněn na skleněnou podložku (viz obr. 5.4d). Jako optická vlákna byly použity 15 cm dlouhé křemenné pigtaily Polymicro Optical Fibers (MOLEX) s jádrem o rozměru $500\ \mu\text{m}$ z SiO_2 a pláštěm o rozměru $550\ \mu\text{m}$ z dotovaného SiO_2 (FIP500550590, Polymicro TECHNOLOGIES) [28] s FC/PC konektory. Drážka byla následně vyplněna vlnovodnou vrstvou, kterou tvořil optický elastomer s vyšším indexem lomu než byl materiál pláště a přebytečný materiál byl odstraněn stěrkou (viz obr. 5.4e). Opět byl odstraněn přebytečný vzduch pomocí exikátoru, tentokrát po dobu 15 min a struktura byla vytvrzena v laboratorní peci po dobu čtyř hodin při teplotě 65°C . Nakonec byla do formy nalita krycí vrstva plášťového elastomeru (viz obr. 5.4f) a vzorek byl následně znovu vakuován po dobu 30 min v exikátoru a vytvrzen v laboratorní peci při teplotě 65°C po dobu čtyř hodin.

5.2 Výroba struktur pomocí technologie laserové litografie a hlubokého reaktivního iontového leptání

Druhou metodou výroby vzorků bylo využití technologie přímého laserového zápisu – laserové litografie LBW (Laser Beam Writing). Pro tyto experimenty jsem používal laserový litograf MicroWriter ML[®]3 Pro od firmy Durham Magneto Optics Ltd. [29]. Fotografie pracoviště je uvedena na obr. 5.6. Toto zařízení provádí laserovou litografii na základě virtuální masky. Je tedy možné vytvořit v počítači jakýkoliv vzor, a tím pak litografem osvítit fotorezist, což je výhoda proti optické kontaktní litografii využívající chromových masek, přes kterou je fotorezist osvětlován. V použitém LBW litografu se nachází laserová dioda, která emituje záření o vlnové délce $385\ \text{nm}$, a litograf je vybaven čtyřmi objektivy se zvětšením 3x, 5x, 10x a 20x, které umožňují dosáhnout rozlišení 5, 2, 1 a $0,6\ \mu\text{m}$. Laserem je pohybováno krokovými motory ve 3 osách. Maximální zapisovací plocha litografu je $195 \times 195\ \text{mm}$ a rozměr pracovní plochy, na kterou je umístěn vzorek určený pro zápis je $230 \times 230 \times 15\ \text{mm}$ (maximální rozměr podložky). Litograf je umístěn na optickém stole se vzduchovým tlumením vibrací a je ovládán pomocí připojeného PC s dodaným ovládacím programem.



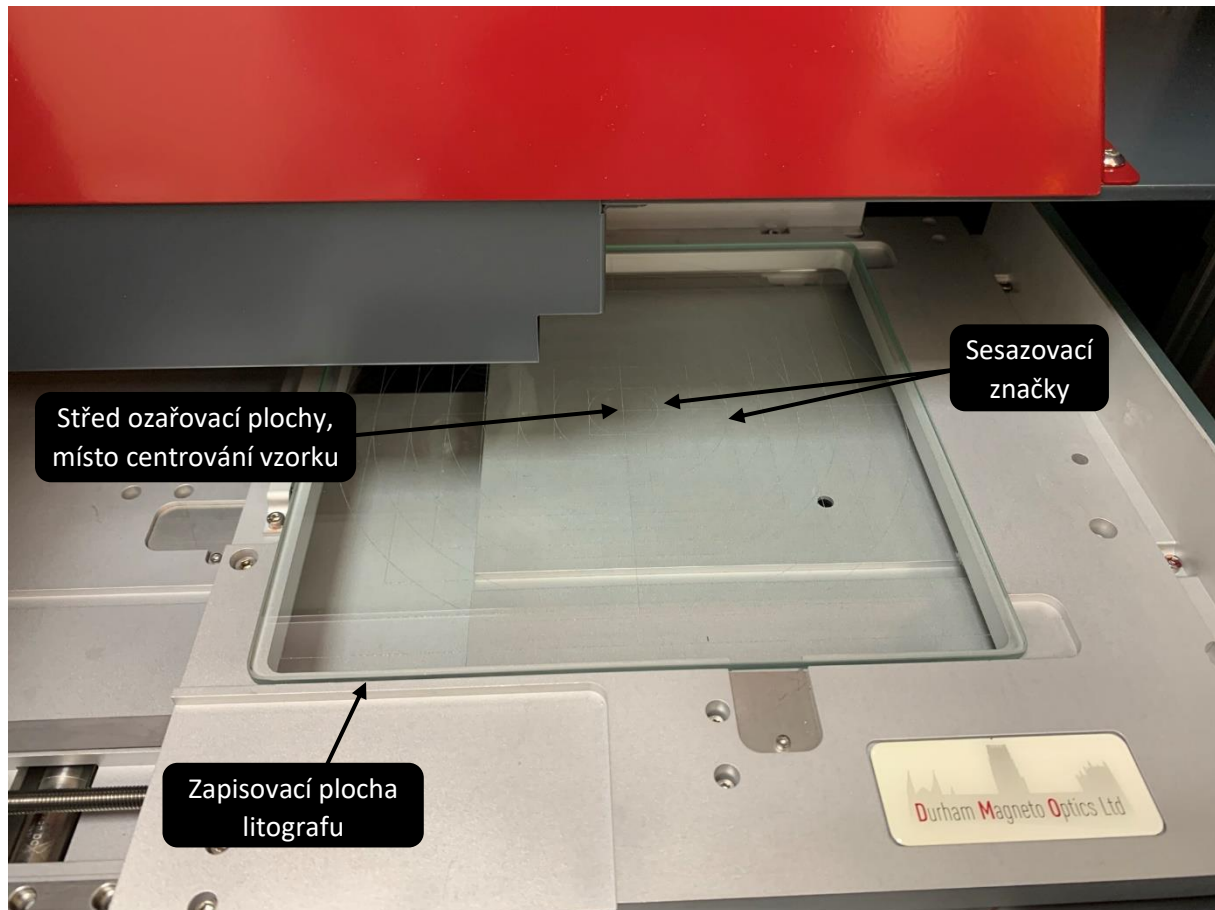
Obr. 5.6: Fotografie pracoviště s laserovým litografem MicroWriter ML[®]3 Pro v laboratoři Nanotechnologie na Katedře mikroelektroniky FEL, ČVUT v Praze.

V laserovém litografu byly ozařovány fotorezisty nanesené na 4" křemíkových deskách a poté bylo prováděno leptání mokrou cestou. Podle typu fotorezistu docházelo k odplavení osvícených nebo neosvícených částí. U *pozitivního fotorezistu* docházelo při ozáření k porušení polymerních vazeb řetězců a tím se při vyvolání ozářené části odplavily, a naopak u *negativního fotorezistu* docházelo při ozáření k polymerizaci (zesíťování a vytvrzení polymeru) a poté při vyvolání zůstaly exponované části neodplavené, zatímco zbytek fotorezistu byl odplaven [30].

Nejdříve tedy byla potřeba nanést fotorezist o požadované tloušťce na křemíkovou desku. K tomu byla využita metoda rotačního lití, která využívá zařízení označované jako *spin coater* (typ POLOS-200). Křemíková deska byla vložena na rotační držák a vystředěna. Upevnění desky k držáku bylo zajištěno připojením vývěvy, která vytvářela podtlak, aby během otáčení nedošlo k utržení desky od držáku. Poté byl na křemíkovou desku nanesen tekutý fotorezist a deskou bylo otáčeno nastavenou rychlostí po definovaný čas. Rychlost otáčení desky se pohybovala v rozsahu 500 – 3 000 otáček za minutu podle požadované nanášené tloušťky vrstvy fotorezistu. Poté následoval proces, který je v anglické literatuře označován jako *prebake* (předpekání), který byl proveden na topné ploténce nebo v laboratorní peci, kde byly aplikovaná teplota a čas vypékání závislé na použitém fotorezistu. Následně už byla deska připravena na osvit v laserovém litografu. Přesný popis nanášení polymerních vrstev je uveden dále.

V laserovém litografu nejprve musela být deska umístěna na ozařovací ploše podle sesazovacích značek, které jsou na ní vyznačeny. Fotografie vnitřního prostoru laserového litografu s pozicí

ozařovaného vzorku je uvedena na obr. 5.7 (ozařovací plocha je skleněná deska uprostřed obrázku). Po srovnání bylo v ovládacím programu k litografu nejprve nutné zaostřit mikroskop na vzorek, aby neměl osvětlený motiv zkreslené hrany. Po zaostření byl zvolen obrazec, který byl zapisován. Litograf umožňuje pracovat s různými formáty souborů, vlnovody byly nakresleny v programu CleWin, což je program, který používá formát .cif, ve kterém jsou uložena vektorová data nakreslených motivů.



Obr. 5.7: Vnitřní prostor laserového litografu MicroWriter ML³ pro vkládání vzorků.

Nakonec bylo potřeba nastavit dávku osvitů v mJ/cm^2 , kterou bude vzorek exponován. Pokud je dávka nedostatečná, nedojde k prosvícení celé tloušťky fotorezistu. Pokud je dávka naopak příliš vysoká, ozářený motiv se začne „rozpíjet“ do stran. Doba expozice motivu byla závislá na velikosti ozářené plochy, nastavené dávce záření (citlivosti použitého polymeru na vlnovou délku 385 nm), zvoleném rozlišení a vybrané kvalitě zápisu. Čas potřebný pro osvit se pohyboval od jednotek minut až po jednotky hodin v závislosti na uvedených parametrech a velikosti osvětovaného motivu. Po dokončení expozice byl vzorek vyjmut z litografu a buď byl přímo vložen do nádoby s vyvolávacím roztokem (do vývojky), nebo byl před vložením do vývojky proveden proces označovaný jako vypékání po osvitě (*post exposure bake*), podle typu fotorezistu. Tento proces probíhal podobně jako proces předpékání, aplikovaná teplota a čas opět závisela na typu fotorezistu.

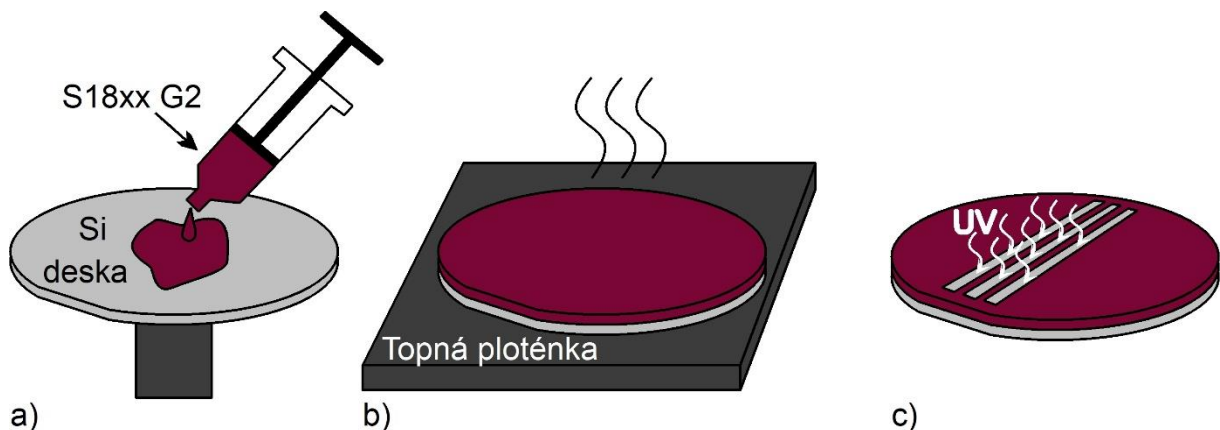
Doba vyvolávání záležela na použitém vyvolávacím roztoku a tloušťce vrstvy fotorezistu. Pokud byl vzorek z vývojky vyjmut předčasně, nedošlo k odleptání celého žadoucím objemu fotorezistu, naopak pokud by byl vzorek ponechán ve vývojce příliš dlouho, může dojít k naleptání částí neurčených k odplavení, a tím k jejich deformaci.

Po vyjmutí z vývojky byl vzorek vložen do demineralizované (DEMI) vody, aby došlo k zastavení leptání. Poté byl vzorek vložen do spin coateru a opět na něj byla nanesena destilovaná voda pro odplavení

zbytků vývojky. Následně byl vzorek pomocí spin coateru vysušen, a tím byla tato fáze výroby ukončena. Pro některé fotorezisty byl ještě aplikován proces dodatečného teplotního vytvrzení při vysoké teplotě, v anglické literatuře označovaný jako *hardbake*. Teplota a čas procesu opět závisela na typu použitého fotorezistu.

Pozitivní fotorezist

Jako pozitivní fotorezisty jsem použil materiály Microposit™ S1805™ G2 nebo S1818™ G2 od firmy micro resist technology GmbH [31]. Typický postup výroby je uveden na obr. 5.8. Fotorezist byl nanesen na spin coateru při 3 000 otáčkách/min (viz obr. 5.8a), což odpovídalo tloušťce vrstvy přibližně $0,5 \mu\text{m}$ pro rezist S1805™ G2 a pro rezist S1818™ G2 byla tloušťka vrstvy přibližně $2,3 \mu\text{m}$. Po nanesení byla deska položena na 60 s na topnou ploténku ohřátou na 115°C (viz obr. 5.8b), čímž došlo k vytvrzení fotorezistu.



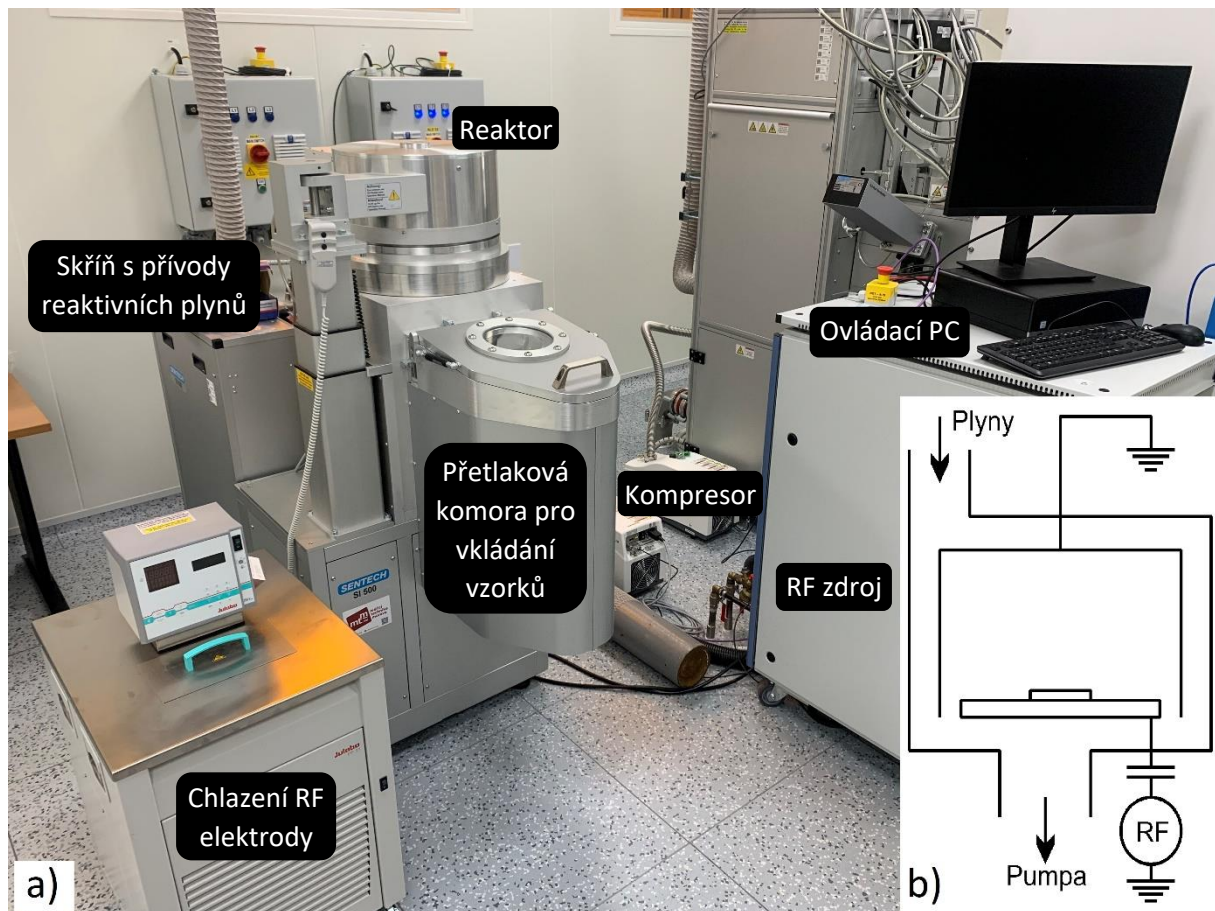
Obr. 5.8: Postup výroby vzorku na LBW s využitím negativního fotorezistu,
 a) nanesení fotorezistu S18xx na 4" Si desku na spincoateru,
 b) vytvrzení fotorezistu na topné ploténce na 115°C po dobu 60 s,
 c) osvětlení vzorku v litografu a vyvolání motivu ve vyvolávacím roztoku.

Následně byla deska vložena do laserového litografu a byl na ni zapsán požadovaný motiv. Zápisem byly porušeny polymerní vazby ve fotorezistu a osvětlené části potom byly odplaveny vyvolávacím roztokem (vývojkou). Výrobce udává dávku v rozmezí $60 - 150 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ pro vlnovou délku 436 nm [31]. Dávka záření byla proto experimentálně optimalizována a zjištěná optimální hodnota je $75 \text{ mJ}/\text{cm}^2$. Po vyjmutí z litografu byla deska vložena do vyvolávacího roztoku MICROPOSIT™ 303A DEVELOPER naředěném v poměru 1:8 s DEMI vodou (viz obr. 5.8c) (v případě fotorezistu Microposit™ S18xx nebyl aplikován proces vypékání po osvitě – post *exposure bake*). Deska byla v roztoku ponechána, dokud se na ní neobjevil požadovaný motiv (přibližně 40 s). Následně byla deska vysušena na spincoateru, a tím byla připravena na proces hlubokého reaktivního iontového leptání DRIE (Deep Reactive-Ion Etching).

Proces DRIE probíhal v zařízení SENTECH ICP-RIE plasma etcher SI 500 [32], které je uvedeno na fotografii na obr. 5.9a. Leptání funguje tak, že do evakuovaného reaktoru jsou vháněny reaktivní plyny, které jsou v něm částečně ionizovány, čímž je vytvořena plazma. Pro proces DRIE pro leptání Si desek je základním plynem, který tvoří plazmu, SF_6 [33]. Ionizaci v případě zařízení DRIE SI 500 zajišťuje planární trojitá spirálová anténa (PTSA – The Planar Triple Spiral Antenna) [32].

Leptaná deska je položena na elektrodě, která je napájena napětím o radiové frekvenci (RF, cca 15 MHz). Druhá elektroda je větší a uzemněná. Napájení menší elektrody zajišťuje vyšší energii bombardujících iontů, což umožňuje anizotropní leptání. Principiální náčrt reaktoru je uveden na obr.

5.9b. Plazma leptá křemík nekrytý fotorezistem a zároveň pomalu odleptává fotorezist. Pro snížení izotropního leptání (leptání do stran) je substrát schlazen [33]. Maximální doba procesu, a tím i maximální hloubka vyleptaných motivů, je omezena tloušťkou fotorezistu. Když dojde k jeho odleptání, začne docházet k rovnoměrnému leptání celého povrchu křemíkové desky.



Obr. 5.9: *Fotografie pracoviště hlubokého reaktivního iontového leptání DRIE (Deep Reactive-Ion Etching),*
 a) *fotografie pracoviště v laboratoři Nanotechnologie na Katedře mikroelektroniky FEL, ČVUT v Praze,*
 b) *principiální schéma RIE reaktoru [33].*

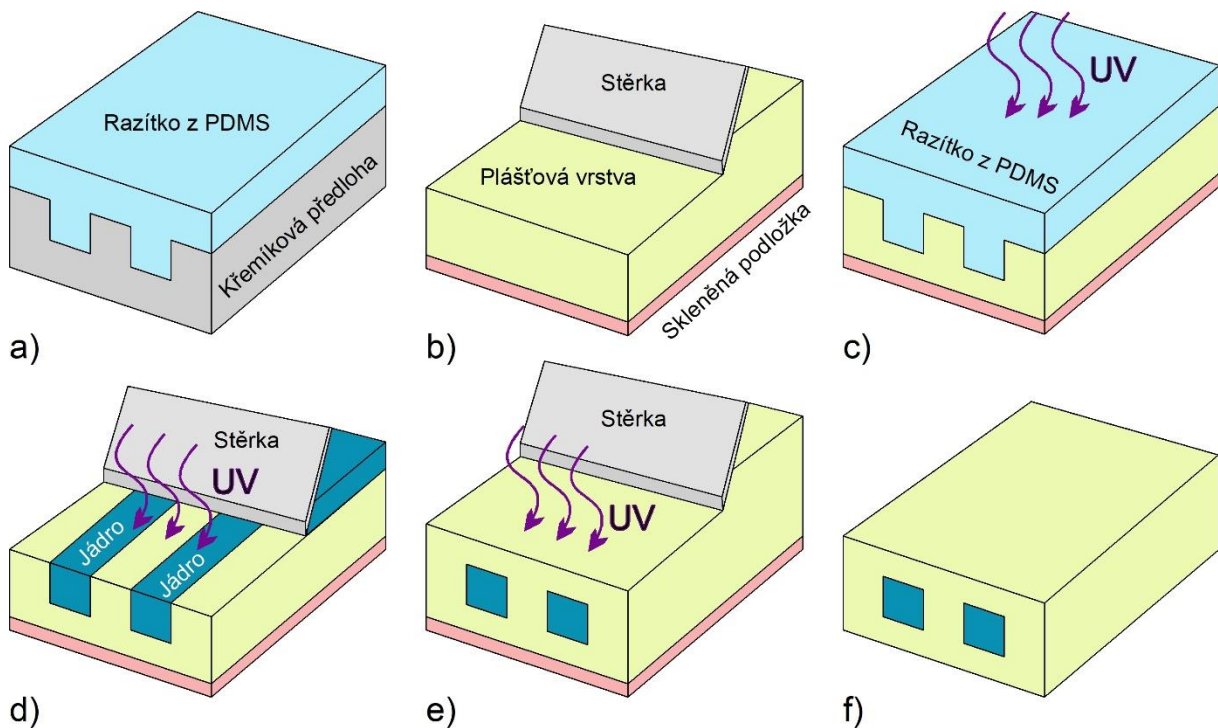
Zařízení DRIE bylo nejdříve uvedeno do provozu: bylo zapnuto jeho chlazení, turbomolekulární pumpa a přívod reaktivních plynů potřebných pro vytvoření plazmy. V ovládacím počítači byly poté zapnuty a synchronizovány veškeré potřebné systémy. Následně byla leptaná deska vložena do zařízení DRIE a byl vybrán recept (předpřipravený postup leptání), ve kterém bylo obsaženo nastavení teploty a instrukce pro zapínání a vypínání veškerých potřebných systémů a pro vhnání a odsávání veškerých plynů potřebných pro leptání ve správných dávkách. Tyto recepty byly poskytnuty dodavatelem systému DRIE. Čas leptání byl nastaven tak, aby bylo dosaženo požadované hloubky leptání.

První byl použit jednoduchý proces DRIE, kdy byly použity plyny SF_6 s průtokem $240 \text{ cm}^3/\text{s}$ a O_2 s průtokem $20 \text{ cm}^3/\text{s}$. U tohoto typu leptání je nevýhodou, že dochází k leptání do stran, a tím rozšiřování kanálků. Proto byl dále testován tzv. *Bosch Process*, kde se střídá fáze leptání s fází depozice polymeru, který chrání vyleptané vertikální hrany před dalším leptáním [33].

Tento proces vyžaduje rychlé přepínání ventilů pro plyny leptací a depoziciční fáze. Při depoziciční fázi dochází k tvorbě polymeru na horizontální i vertikální ploše Si desky rozkladem plynu C_4F_8 . Nejdříve

dojde k uložení uhlíku a poté dochází k fluoraci. Podle aktuální koncentrace plynu CF_2 v plazmě, který je jedním z produktů rozkladu C_4F_8 , je uhlíková vrstva různě fluorována [34,35]. Při leptací fázi je odleptán polymer na horizontálních plochách a je prohloubena leptaná drážka v křemíku. Polymer na vertikální stěně drážky je naleptán, ale poskytne dostatečnou ochranu proti rozšíření leptané drážky. Při tomto procesu mohou vznikat na vertikální stěně proužky, když je stěna odleptána před prvním pokrytím polymerem v depoziční fázi [33]. Pro Bosch Process byly pro leptací fázi použity plyny SF_6 s průtokem $240\text{ cm}^3/\text{s}$ a O_2 s průtokem $20\text{ cm}^3/\text{s}$ a pro depoziční fázi plyn C_4F_8 s průtokem $150\text{ cm}^3/\text{s}$.

Po tomto procesu byl odstraněn zbývající fotorezist pomocí odstraňovače rezistu (remover) mr-Rem 700 od firmy micro resist technology GmbH. Následně byl testován proces, při kterém byla deska využita jako předloha pro výrobu negativní formy z elastomeru PDMS (Sylgard 184). Byla ni nanášena vrstva PDMS, na které, po oddělení od křemíkové formy, zůstal vytvořený motiv ve formě proužků, jež byly použity jako negativní forma (razítko) do UV fotopolymery Lumogen OVD Varnish 311 (BASF). Celý postup výroby je uveden na obr. 5.10.



Obr. 5.10: Výroba vzorků s využitím křemíkové formy vyrobené pomocí kombinací technologií LBW a DRIE, a) výroba razítka z elastomeru PDMS zalitím křemíkové předlohy, b) nanesení plášťové vrstvy vlnovodu na skleněnou podložku pomocí stěrky, c) využití PDMS razítka pro tvorbu vlnodných kanálů v plášťové vrstvě, d) vyplnění vlnodných kanálů vlnodnou vrstvou pomocí stěrky, e) nanesení krycí plášťové vrstvy pomocí stěrky, f) odseparování hotového vzorku od skleněné podložky.

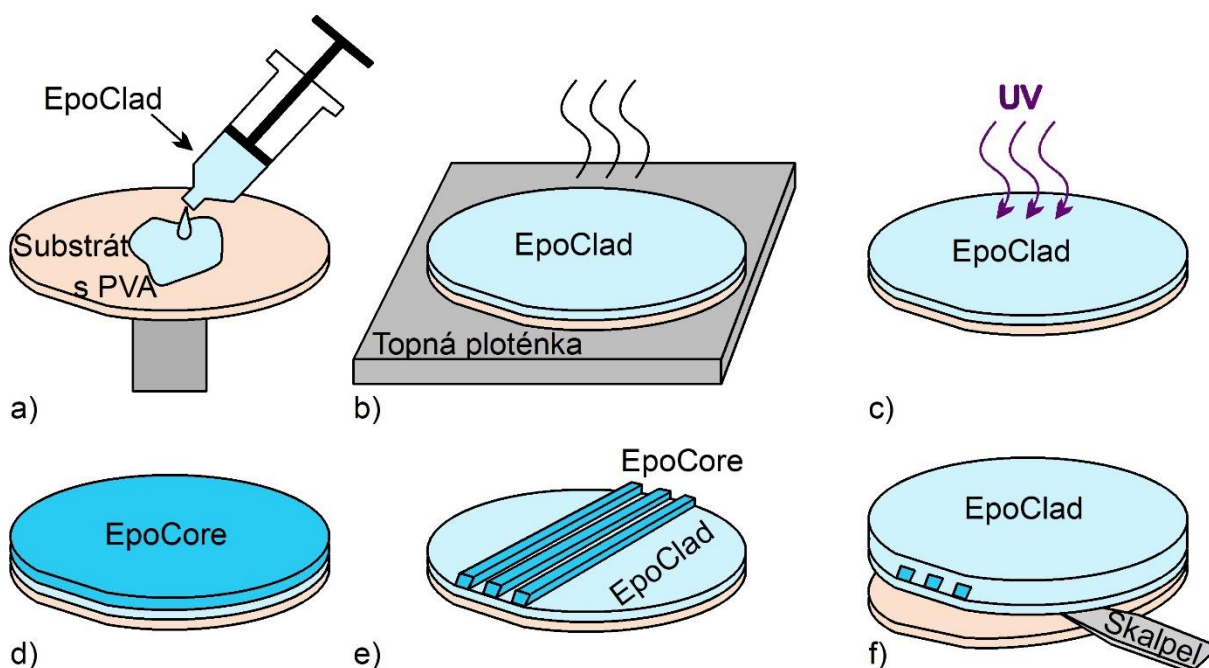
Nejprve byl na křemíkovou desku nanášen polymer PDMS (Sylgard 184), který byl následně vytvrzen při 150°C po dobu 15 min (viz obr. 5.10a). Na desku nebylo nutné nanášet separátor, protože PDMS bylo možné od křemíku oddělit i bez jeho aplikace. Mezi tím byla na skleněnou podložku nanášena vrstva UV fotopolymery Lumogen OVD Varnish 311 (BASF), která sloužila jako plášťová vrstva vlastního vzorku (viz obr. 5.10b). Následně byla vrstva PDMS z křemíkové desky odtržena, čímž vzniklo razítko s požadovanými rozměry, které bylo použito k vytvoření vlnodných kanálů v plášťové vrstvě OVD Varnish 311. Před vlastním tištěním PDMS razítka do polymeru Varnish bylo nutné na PDMS razítko

nanést separátor SP-3 od společnosti ELCHEMCo. Razítko bylo obtisknuto do dříve nanesené plášťové vrstvy fotopolymeru a ta byla vytvrzena pomocí UV záření (viz obr. 5.10c).

Razítko z PDMS bylo odseparováno a vytvořené vlnovodné kanály byly vyplněny vlnovodnou vrstvou (hybridním polymerem *OrmoClear FX* nebo hybridním polymerem *OrmoCore*) opět pomocí stěrky a byly vytvrzeny pomocí UV záření (viz obr. 5.10d). Dále byla pomocí stěrky nanесena horní krycí vrstva, kterou tvořil stejně jako spodní plášťovou vrstvu polymer OVD Varnish 311, a byla opět vytvrzena pomocí UV záření (viz obr. 5.10e). Nakonec byl celý vzorek odtržen od skleněné podložky (viz obr. 5.10f).

Negativní fotorezist

Jako negativní fotorezisty jsem testoval epoxidové pryskyřice od firmy micro resist technology GmbH. Materiál EpoCore byl využit jako vlnovodná vrstva a materiál EpoClad jako plášťová vrstva. K dispozici jsem měl varianty (klony) EpoCore 50, EpoCore 2, EpoClad 50 a EpoClad 10. Postup přípravy vzorků je uveden na obr. 5.11. V případě přípravy samonosných vzorků byl nejdříve na podložku (substrát), kterou byla zpravidla 4" křemíková deska (použity byly i např. FR4 nebo sklo), na spin coateru nanесena vrstva polyvinylalkoholu (PVA), aby bylo možné poté oddělit hotové vzorky od podložky. Poté musela být deska na 24 h odložena před nanесením další vrstvy, aby došlo k ustálení PVA. Roztok PVA byl připraven tak, že 1g PVA v práškové formě byl rozpuštěn ve 25 ml DEMI vody, a pak byl roztok míchán po dobu 60 min při teplotě 50°C, aby došlo k jeho rozpuštění.



Obr. 5.11: Výroba optických polymerních vlnovodů EpoClad/ EpoCore pomocí spin coateru a LBW,
a) nanесení podkladové vrstvy EpoClad na Si substrát s vrstvou PVA,
b) předvytvrzení vrstvy EpoClad na topné ploténce,
c) osvit polymeru EpoClad UV zářením,
d) nanесení vrstvy EpoCore,
e) osvětlení motivu v laserovém litografu a jeho vyvolání,
f) nanесení a vytvrzení krycí vrstvy EpoClad, přizvednutí vyráběné struktury pomocí skalpelu, rozpuštění vrstvy PVA, a oddělení vzorku od podložky.

Dále byla na spin coateru nanесena vrstva polymeru EpoClad (viz obr. 5.11a). Otáčky spincoateru byly nastaveny podle klonu polymeru, které se liší viskozitou, a tím i tloušťkou nanесené vrstvy. Pro EpoClad 50 byla nastavena rychlost otáčení 750 ot./min a pro EpoClad 10 byla nastavena rychlost otáčení

1500 ot./min. Při aplikaci těchto otáček bylo dosaženo tloušťky vrstvy $50\ \mu\text{m}$ pro polymer EpoClad 50 i pro plášťový polymer EpoCore 50, $10\ \mu\text{m}$ pro EpoClad 10 a $2\ \mu\text{m}$ pro EpoCore 2. Následně byla vrstva prvotně vytvrzena následujícím postupem (viz obr. 5.11b) (pro časté opakování procedury bude dále používána zkratka TVZEPO = tvrzení EpoClad/ EpoCore na topné ploténce):

- Deska byla položena na topnou ploténku ohřátou na $50\ ^\circ\text{C}$ na $10\ \text{min}$.
- Poté byla teplota zvyšována vždy o $10\ ^\circ\text{C}$ (tzn. $60, 70$ a $80\ ^\circ\text{C}$), na každé teplotě byla deska ponechána $1\ \text{min}$.
- Při dosažení teploty $90\ ^\circ\text{C}$ byla deska vyhřívána po dobu $10\ \text{min}$.

Po zchladnutí desky na pokojovou teplotu byla nanesená vrstva polymeru vytvrzena pod UV světlem (viz obr. 5.11c) po dobu $10\ \text{min}$ a poté byla znovu tvrzena postupem TVZEPO. Následně byla na spincoateru nanášena vrstva polymeru EpoCore (stejným postupem, jako první vrstva EpoCladu, viz obr. 5.11a a obr. 5.11b), která byla nejprve předtvrzena postupem TVZEPO. Deska před vložením do laserového litografu je znázorněna na obr. 5.11d. V laserovém litografu na ni byl zapsán požadovaný motiv. Dávka záření byla experimentálně optimalizována a byla použita zjištěná optimální hodnota $1900\text{mJ}/\text{cm}^2$. Dále byla na litografu nastavena kvalita zápisu na „High“ a rozlišení $2\ \mu\text{m}$. Deska byla opět položena na plotnu a vytvrzena postupem TVZEPO. Následně byla deska vložena do vyvolávacího roztoku mr-Dev 600 od firmy micro resist technology GmbH na přibližně $3\ \text{min}$. Pro zastavení leptání byla deska vložena do DEMI vody a vysušena pomocí spin coateru. Deska po tomto procesu je znázorněna na obr. 5.11e.

Poslední nanášenou vrstvou byla krycí vrstva EpoCladu, která byla opět nanášena a vytvrzena stejným postupem jako podkladová vrstva (viz obr. 5.11a-c). Nakonec byla deska vložena do DEMI vody, s pomocí skalpelu byla nadzvednuta první vrstva EpoCladu, čímž došlo k vniknutí DEMI vody vzniklé mezery. Tím byla vrstva PVA rozpuštěna a vyráběná struktura byla oddělena od Si podložky (viz obr. 5.11f). V případě, že se hotový vzorek nepodařilo oddělit od podložky například kvůli příliš silné vrstvě polymeru (nebylo možné vrstvu přizvednout skalpelem, protože se EpoClad odlamoval), byla deska odeslána do společnosti Tesla Blatná, kde byla nařezána pomocí diamantové kotoučové pily určené pro řezání korundových a křemíkových desek [36].

6 Diagnostické metody

6.1 Měření indexu lomu

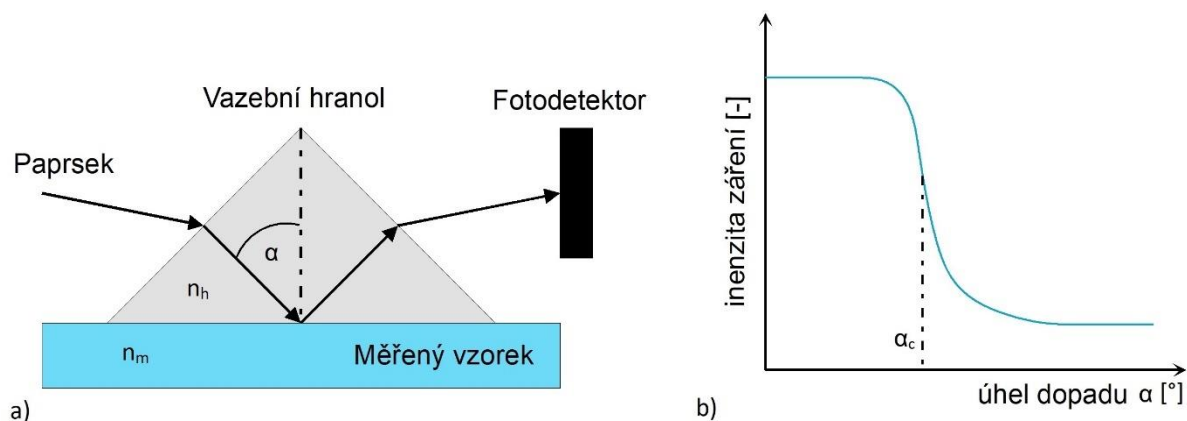
Indexy lomu použitých materiálů jsem měřil pomocí jednohranolové vidové spektrometrie (viz obrázek 6.1a). K měření byl použit přístroj Metricon 2010/M prism-coupler system. Měření bylo provedeno na vlnových délkách 532,0; 654,2; 846,4; 1308,2; 1549,1 a 1652,1 nm. K měření byl použit vazební hranol #200-P-4a s indexem lomu $n = 2,1558$ ($\lambda = 632.8$ nm), který umožňuje měření efektivního indexu lomu v rozsahu 1,2 – 2,02 na vlnové délce $\lambda = 632.8$ nm [37].

Princip metody spočíval v tom, že bylo monochromatickým paprskem svíceno do optického vazebního hranolu s indexem lomu n_h , který byl přiložen k měřenému vzorku o neznámém indexu lomu n_m (viz obr. 6.1a). Na druhé straně hranolu byl fotodetektor, který měřil intenzitu záření odraženého od rozhraní hranolu a vzorku. Při změně úhlu dopadajícího záření může docházet k odražení paprsku od rozhraní a k lomu světla do vlnovodné vrstvy. Když vyneseme závislost naměřené intenzity záření na úhlu dopadu, můžeme určit kritický úhel dopadu pro tyto dva materiály. Na základě naměřeného kritického úhlu α_c , při znalosti indexu lomu vazebního hranolu n_h , lze pak určit index lomu měřeného vzorku ze vztahu [5, 37, 38]:

$$n_m = n_h \cdot \sin \alpha \quad (36)$$

kde n_m je index lomu měřeného vzorku, n_h je index lomu vazebního hranolu a α je kritický úhel dopadu.

Princip určení indexu lomu objemových vzorků z naměřených dat je na obr. 6.1b. Při použití této metody bylo dosaženo přesnosti určení indexu lomu $\pm 0,0005$.



Obr. 6.1: Princip jednohranolové vidové spektrometrie, převzato z [5],

a) princip metody,

b) závislost intenzity záření dopadajícího na fotodetektor na úhlu dopadu a nalezení kritického úhlu.

6.2 Měření transmisních spekter

Pro měření transmisních spekter použitých polymerních materiálů byl použit spektrometr Shimadzu UV-3600 UV-VIS-NIR. Fotografie měřícího pracoviště je uvedena na obr. 6.2. Přístroj umožňuje provádět měření ve spektrálním rozsahu 185 – 3300 nm. Měření bylo provedeno v laboratoři na Katedře fyzikální elektroniky, FJFI, ČVUT v Praze.

Měření probíhalo tak, že světlo ze širokopásmového zdroje bylo přefiltrováno pomocí dvojitého monochromátoru (Czerného – Turnera) nastaveného na měřenou vlnovou délku a přes vzorek dopadalo na detektor. Jako detektor pro UV záření a viditelné světlo byl použit fotonásobič, a pro infračervené a jemu blízké záření *InGaAs* a *PbS* fotodiody. Měření bylo provedeno s krokem 1 nm a pro šterbinu o velikosti 0,7 nm.

Polymerní vzorky byly vyrobeny metodou rotačního lití, byly připraveny na skleněných podložkách (vzorky EpoCore, EpoClad), nebo byly vyrobeny jako samonosné vzorky odlitím do Petriho misek, a pak odděleny (vzorky PDMS). Vzorky byly měřeny pro vlnové délky v rozsahu 300 – 2100 nm.



Obr. 6.2: Měřicí pracoviště pro měření absorpčních spekter UV-VIS-NIR Shimadzu UV-3600 [39].

Pro vzorky PDMS byla transmisní spektra přepočtena na absorpční koeficient pohlcení, protože každý vzorek má jinou tloušťku. Vzorky byly relativně tlusté a v naměřených transmisních spektrech se projevoval útlum vzorků. Přepočet byl proveden podle rovnice [40]:

$$\alpha(\lambda) = \frac{-\ln\left(\frac{t(\lambda)}{100}\right)}{h} \quad (37)$$

kde $t(\lambda)$ je transmise v % na vlnové délce λ a h je tloušťka vzorku v cm.

6.3 Optická kontrola vyrobených vzorků pomocí laserového konfokálního mikroskopu

Pomocí kombinací technologií LBW a DRIE byly vyrobeny vzorky s využitím negativního fotorezistu EpoCore, kdy cílem bylo vyrobit čtvercové vlnovody geometrickým rozměrem 50 μm pro multivodové vlnovody a s rozměrem 1,2 a 3 μm pro testování výroby jednovodových optických kanálkových vlnovodů. Šířku vlnovodů bylo možné změřit jednoduše pomocí optického mikroskopu. Výška vlnovodů byla měřena pomocí 3D povrchového profilometru KEYENCE VK-X1000, který podle situace používal k měření profilu laserovou konfokální metodu nebo metodu s proměnlivým ohniskem [41]. Fotografie měřicího pracoviště je uvedena na obr. 6.3. Měření bylo provedeno na Katedře elektrotechnologie, FEL, ČVUT v Praze.

Měření probíhalo tak, že vzorek byl vložen pod objektiv mikroskopu na otočný stolek a na něm byl poté srovnán, aby vlnovodné kanály byly rovnoběžně se směrem snímání. Následně byl pracovní stolek se vzorkem nastaven do ohniska objektivu mikroskopu pomocí manuálních stavěcích mikroposuvů. Další ovládání už probíhalo pouze softwarově v počítači v ovládacím programu mikroskopu (VK-H1XVE). Byl zvolen výškový rozsah 3D skenování a vybrána metoda s proměnlivým ohniskem nebo laserová konfokální metoda. Nakonec byla data z měření zpracována ve vyhodnocovacím programu KEYENCE Multi File Analyzer a výsledky byly vyexportovány.



Obr. 6.3: Fotografie pracoviště pro měření profilu vzorků 3D povrchový profilometr KEYENCE VK-X1000 [41].

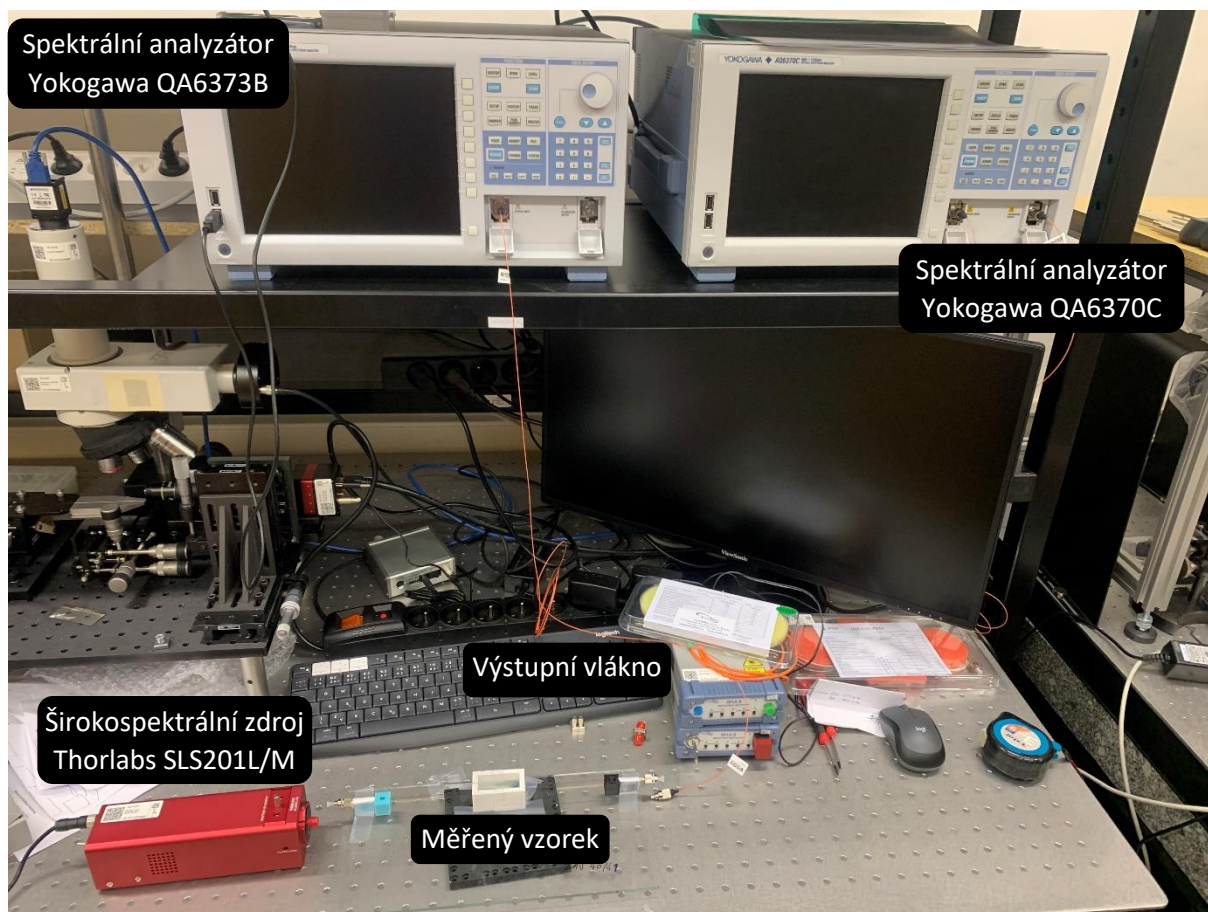
6.4 Měření spektrálních charakteristik

Spektra přenášená vzorky při připojení k širokospektrálnímu zdroji Thorlabs SLS201L/M (stabilizovaný wolfram-halogenový světelný zdroj se spektrálním rozsahem 360 - 2600 nm) byla měřena pomocí spektrálního analyzátoru Yokogawa QA6373B, který umožňuje provádět měření v rozsahu vlnových délek 350 – 1200 nm a Yokogawa QA6370C, který měří v rozsahu 600 – 1700 nm. Fotografie pracoviště je uvedena na obr. 6.4. Měření probíhalo tak, že byl vzorek připojen na širokospektrální zdroj Thorlabs SLS201L/M a výstup byl připojen do spektrálního analyzátoru. Poté bylo spuštěno měření a naměřené spektrum bylo uloženo k dalšímu zpracování. Měření bylo provedeno v Laboratoři planárních optoelektronických a optických integrovaných struktur (PLANIO) na Katedře mikroelektroniky, FEL, ČVUT v Praze.

Z naměřených výkonů byl vypočten měrný optický útlum [dB/cm], který je dán vztahem:

$$A = \frac{P_{out1} - P_{ref}}{L - L_1} \quad (38)$$

kde P_{out1} je naměřený optický výkon na výstupu delšího vzorku v dBm , P_{ref} je naměřený optický výkon na výstupu kratšího vzorku v dBm , L je délka delšího vlnovodu a L_1 je délka kratšího vlnovodu.

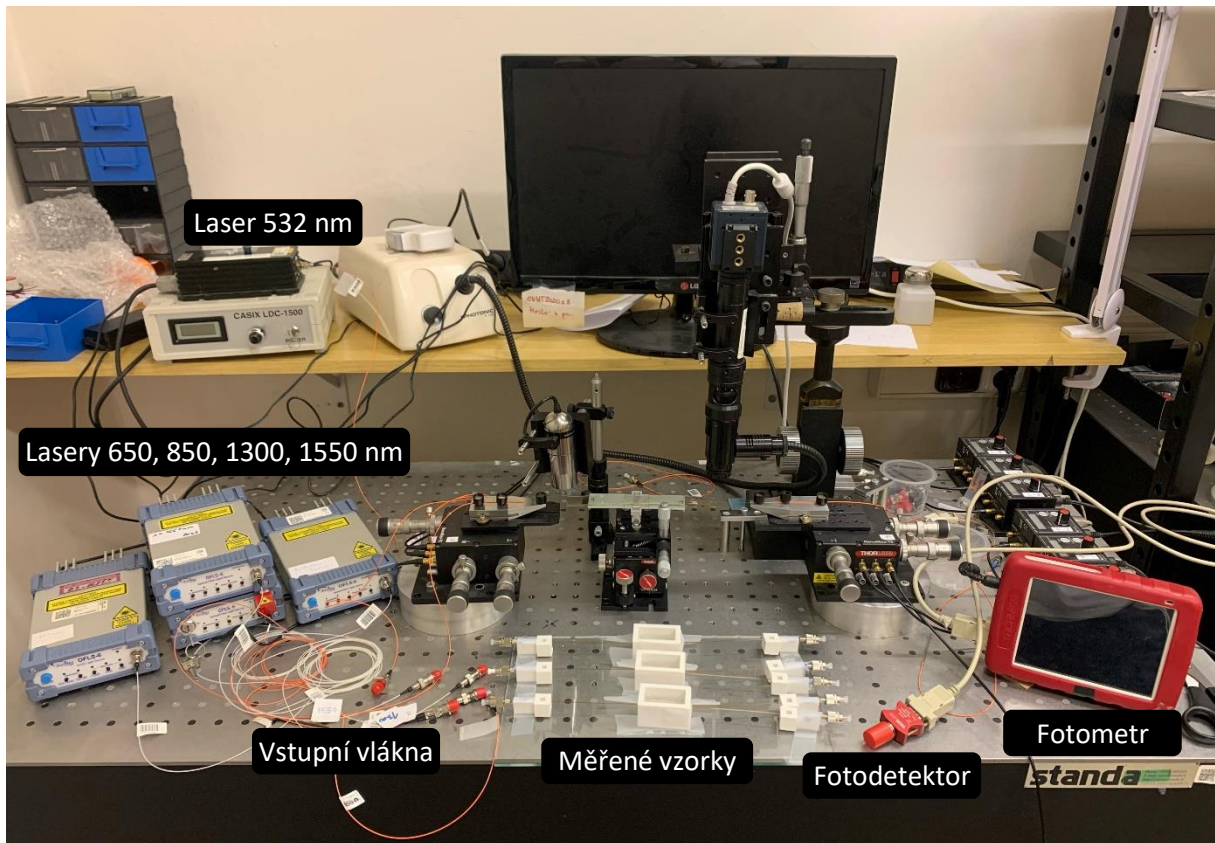


Obr. 6.4: Fotografie měřícího pracoviště se spektrálními analyzátory Yokogawa QA6373B a Yokogawa QA6370C v Laboratoři planárních optoelektronických a optických integrovaných struktur (PLANIO) na Katedře mikroelektroniky, FEL, ČVUT v Praze.

6.5 Měření optického útlumu

Měření optického útlumu bylo provedeno pomocí *Metody dvou délek*. Fotografie pracoviště pro měření optického útlumu je uvedena na obr. 6.5. Při měření byly porovnávány výkony naměřené jednoho vzorku pro dvě různé délky (viz obr. 6.6). Měření bylo provedeno v Laboratoři planárních optoelektronických a optických integrovaných struktur (PLANIO) na Katedře mikroelektroniky, FEL, ČVUT v Praze.

Měření bylo prováděno pomocí následujících laserů: DPGL-2100 Nd:YV04 ($\lambda = 532 \text{ nm}$, $P_{max} = 500 \text{ mW}$), Safibra OFLS-650-FA ($\lambda = 650 \text{ nm}$, $P_{max} = 30,8 \text{ mW}$), Safibra OFLS-6 ($\lambda = 850 \text{ nm}$, $P_{max} = 19,1 \text{ mW}$), Safibra OFLS-6 ($\lambda = 1300 \text{ nm}$, $P_{max} = 3 \text{ mW}$) a Safibra OFLS-L-1550-2-FC ($\lambda = 1550 \text{ nm}$, $P_{max} = 2,5 \text{ mW}$). K měření přenášeného výkonu byl použit fotometr Thorlabs PM200 s připojeným křemíkovým detektorem S151C, určeným pro vlnové délky 400 – 1100 nm, nebo s připojeným *InGaAs* detektorem S155C, určeným pro vlnové délky 800 – 1700 nm.



Obr. 6.5: Fotografie měřícího pracoviště pro měření optického útlumu v Laboratoři planárních optoelektronických a optických integrovaných struktur (PLANIO) na Katedře mikroelektroniky, FEL, ČVUT v Praze.

Měření vzorků probíhalo tak, že byl vzorek připojen pomocí vstupního optického vlákna z jedné strany na zdroj optického záření (laser) a z druhé strany byl napojen přímo na detektor. Protože byly ve vzorcích zality pigtaily s konektory FC/PC, připojení bylo provedeno pomocí FC/PC spojek.

Pro měrný optický útlum [dB/cm] platí vztah:

$$A = \frac{-10 \log \frac{P_{out}}{P_{refP}}}{100(L - L_P)} \quad (38)$$

kde P_{refP} je naměřený optický výkon referenčního vzorku o délce L_P , L je délka vzorku a P_{out} výstupní optický výkon vzorku. Zapojení pro měření optického útlumu je uvedeno na obr. 6.6a.

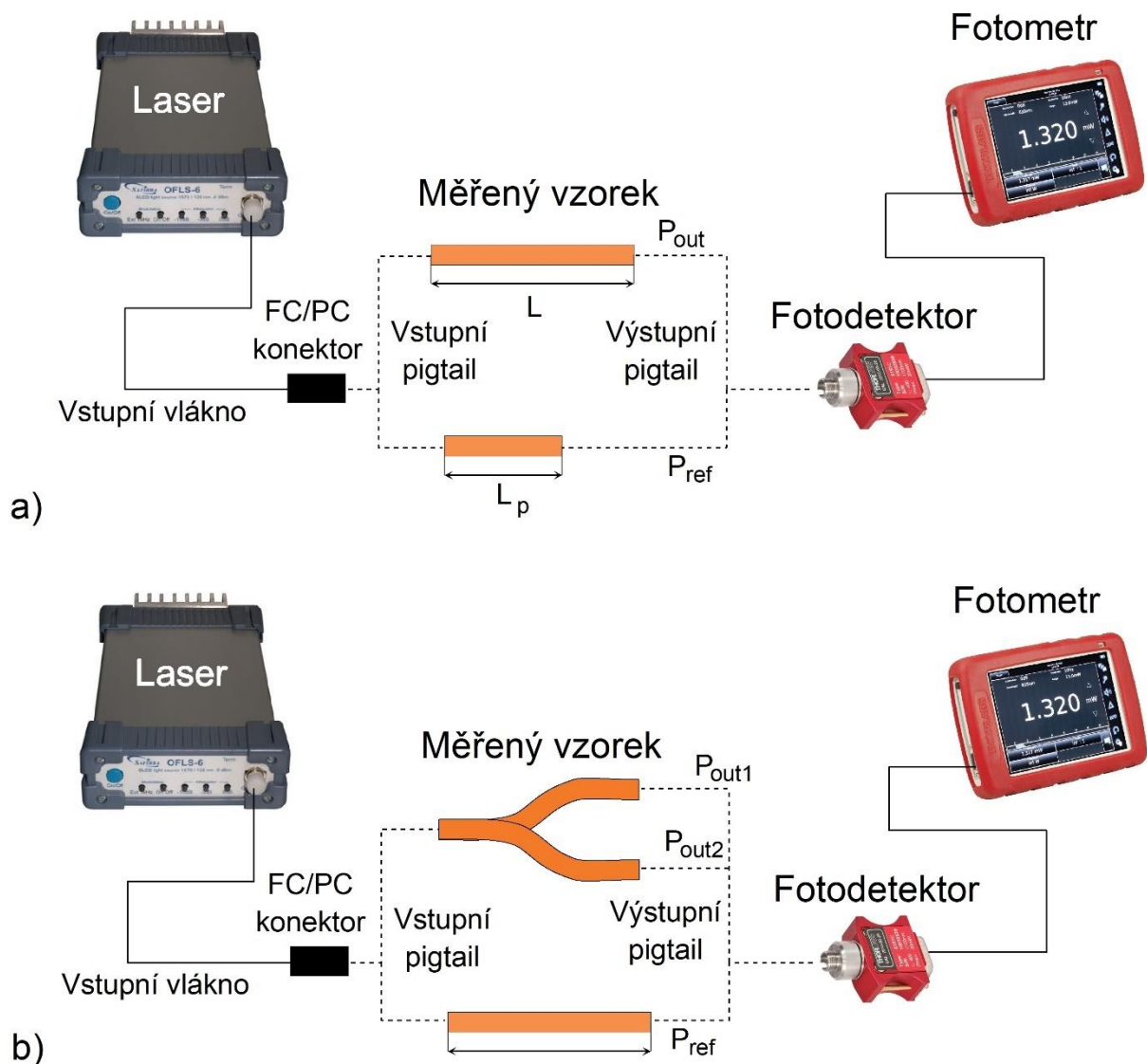
Ze změřených výkonů lze poté spočítat vložný optický útlum α [dB]:

$$\alpha = -10 \log \frac{P_{out}}{P_{ref}} \quad (39)$$

kde P_{ref} je referenční optický výkon naměřený bez vzorku, P_{out} je výstupní optický výkon vzorku, který se pro přímý vzorek změří přímo a pro rozbočnici 1x2Y se rovná součtu naměřených optických výkonů jednotlivých ramen rozbočnice, a je tedy dán vztahem:

$$\alpha = -10 \log \frac{P_{out1} + P_{out2}}{P_{ref}} \quad (40)$$

kde P_{ref} je výkon naměřený na referenčním vzorku k rozbočnici (viz obr. 6.6b) a P_{out1} a P_{out2} jsou výkony naměřené na výstupech jednotlivých ramen rozbočnice.

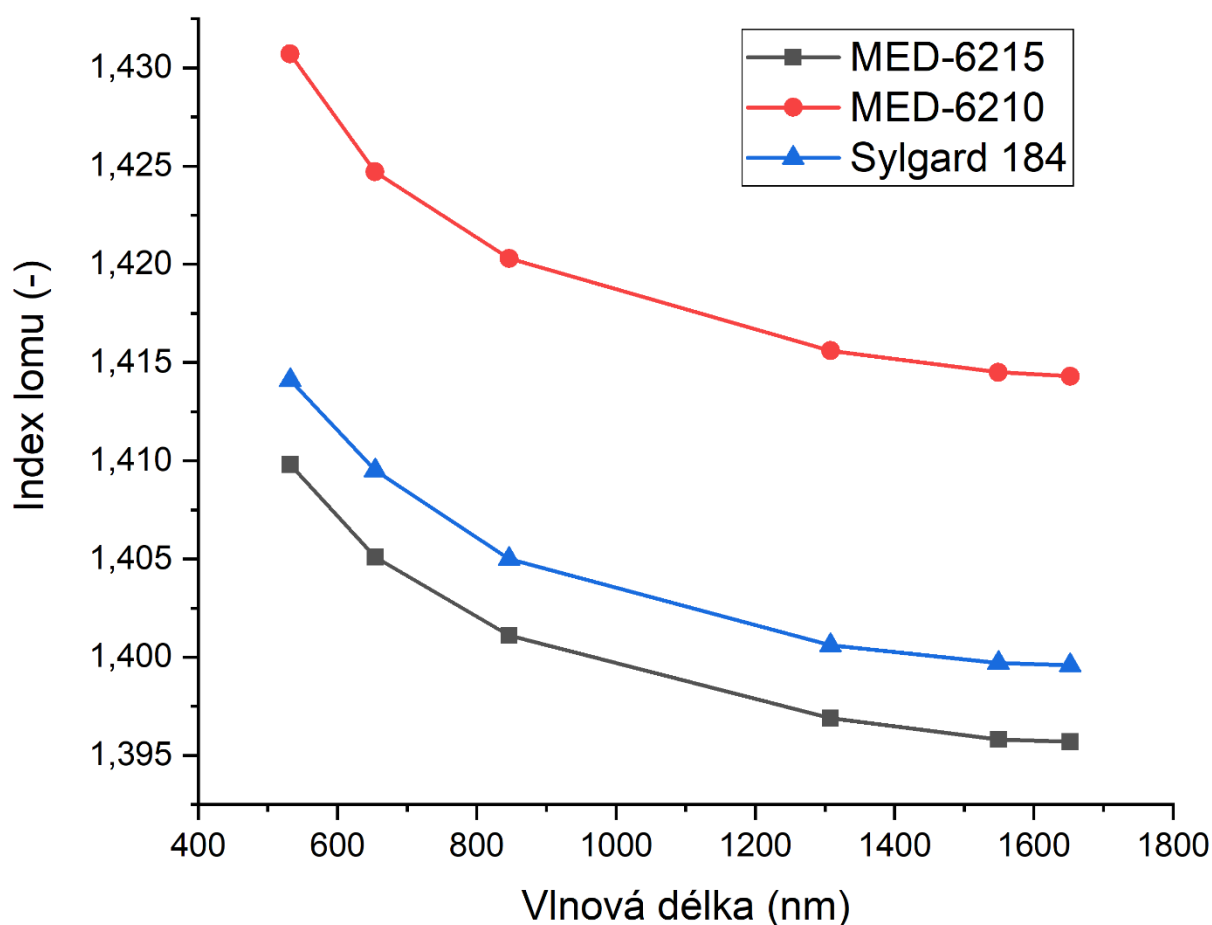


Obr. 6.6: Zapojení pro měření optického vložného útlumu
 a) zapojení pro měření měrného optického útlumu přímého vlnovodu, jako reference je měřen krátký přímý vlnovod,
 b) zapojení pro měření vložného útlumu optické rozbočnice, jako reference je měřen dlouhý přímý vlnovod.

7 Výsledky měření

7.1 Měření indexů lomu

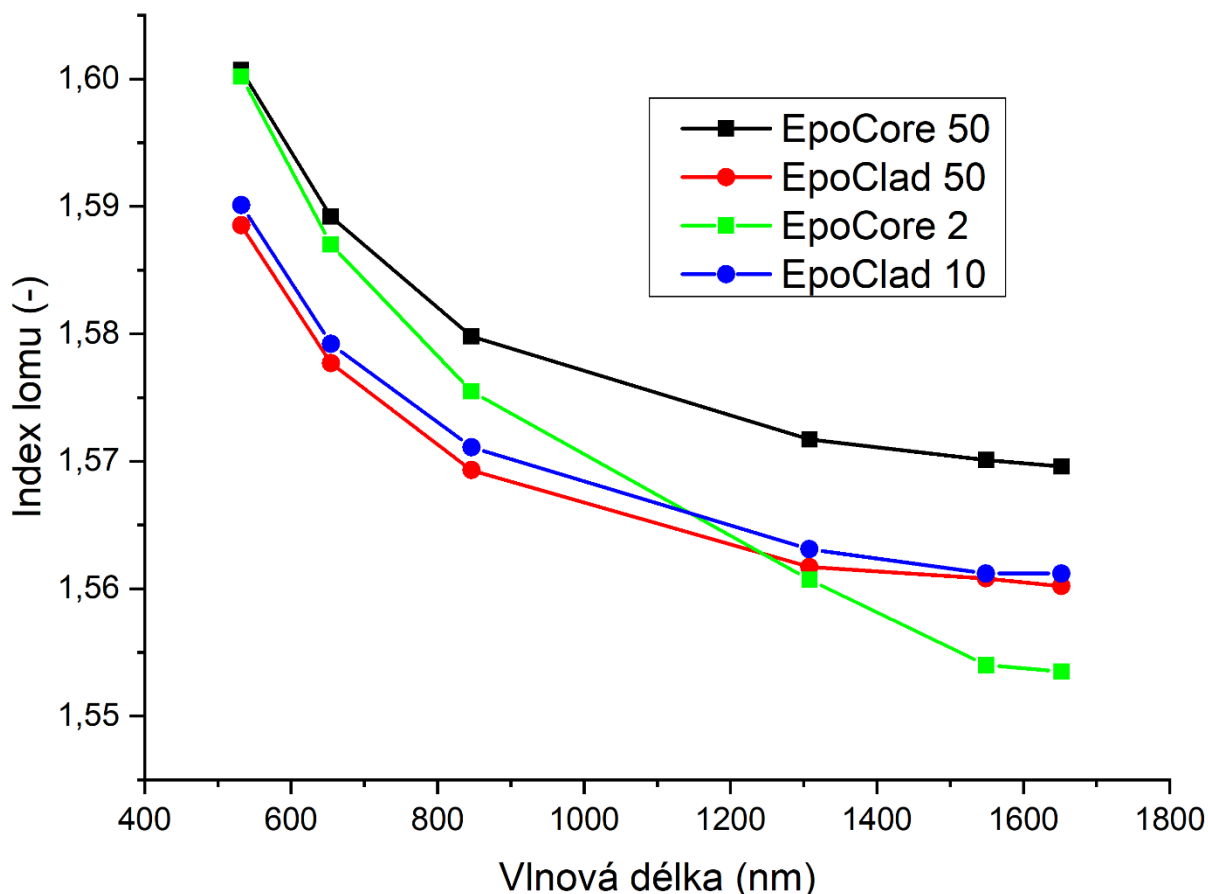
Nejdříve byly měřeny indexy lomu použitých materiálů pomocí jednohranolové vidové spektroskopie popsané v kap. 6.1. Měření bylo provedeno k ověření vhodnosti materiálů k výrobě optických vlnovodů v navržených kombinacích. Naměřené výsledky pro polymery PDMS jsou uvedeny na obr. 7.1. Vzorky, ze kterých byl index lomu měřen, byly vytvrzeny při teplotě 65°C po dobu čtyř hodin. Při této teplotě se vytvrzovaly taktéž vzorky se strukturami určené k měření optického útlumu. Měření bylo provedeno pro vlnové délky 532; 654,2; 846,4; 1308,2; 1549,1 a 1652,1 nm. Z grafu lze vidět, že se zvyšující se vlnovou délkou klesá index lomu materiálu. Dále je patrné, že materiál MED-6210, který sloužil jako vlnovodná vrstva ve vyrobených vzorcích, má nejvyšší index lomu, vyrobené struktury tedy splňují základní podmínku pro vedení světla.



Obr. 7.1: Naměřené hodnoty indexu lomu použitých materiálů PDMS (MED-6215 – polymer pro jádro, MED-6210, Sylgard 184 – polymery určené pro plášťové vrstvy).

Na obr. 7.2 jsou uvedeny naměřené indexy lomu pro epoxidové pryskyřice EpoCore a EpoClad. Z grafu lze vidět, že se zvyšující se vlnovou délkou opět klesá index lomu materiálů. Materiály EpoCore 50 a EpoClad 50, ze kterých byly vyrobeny mnohavidové optické kanálkové vlnovody s rozměrem jádra 50 μm , kdy materiál EpoCore 50 sloužil jako plášťová vrstva a materiál EpoClad 50 jako krycí vrstva splňují podmínku pro totální odraz, a tím pro vedení světla vlnovodem v celém měřeném rozsahu vlnových délek.

Naopak materiál EpoCore 2 má pro vlnové délky 1308,2; 1549,1 a 1652,1 nm nižší index lomu, než materiál EpoClad 10. V tomto rozsahu tedy materiály nesplňují podmínku pro vedení světla a vlnovod z nich pro tento rozsah vlnových délek nelze použít. Tyto materiály měly být použity pro výrobu jednovodných optických vlnovodů, ale ani po konzultaci s výrobcem se do této chvíle nepodařilo najít důvod, proč má materiál EpoCore 2 nižší index lomu ve zmíněném rozsahu vlnových délek. Tyto vlnovody, navržené v kap. 4.3, kde k návrhu byly použity indexy lomu poskytnuté výrobcem, tedy nemohly být vyrobeny.



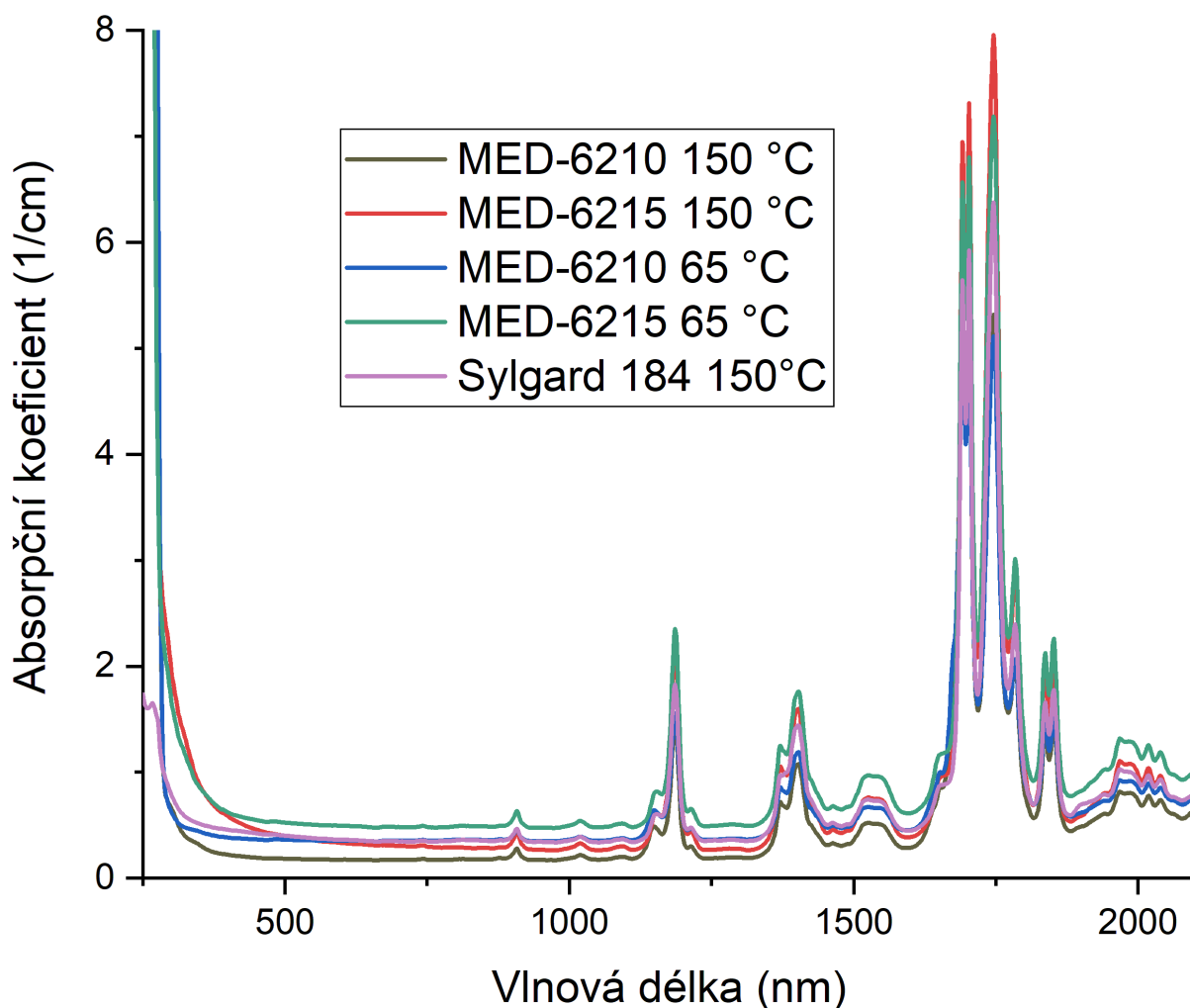
Obr. 7.2: Naměřené indexy lomu použitých klonů materiálů EpoCore / EpoClad.

7.2 Měření transmisních spekter

Transmisní spektra byla měřena podle metody popsané v kap. 6.2. Vzorky z PDMS byly relativně tlusté, a tloušťka každého vzorku byla jiná (řádově milimetry). Do transmisních spekter se už tedy významněji promítla absorpce materiálu. Aby byla transmisní spektra mezi sebou porovnatelná, byla přepočtena na absorpční koeficient pohlcení podle rovnice (37). Na obr. 7.3 je uveden graf závislosti absorpčního koeficientu pohlcení v cm^{-1} na vlnové délce pro vzorky PDMS. Z grafu lze vidět, že měřené materiály mají nízkou absorpci, menší než 0,5 % ve viditelném a blízkém IR spektru. Materiály mají menší absorpční maximum na vlnové délce 905 nm, výraznější na vlnových délkách 1190 a 1400 nm a pak několik maxim mezi vlnovými délkami 1600 – 1900 nm. Na vlnové délce 1500 nm je zvýšená absorpce proti ostatním vlnovým délkám, na kterých byly vzorky měřeny.

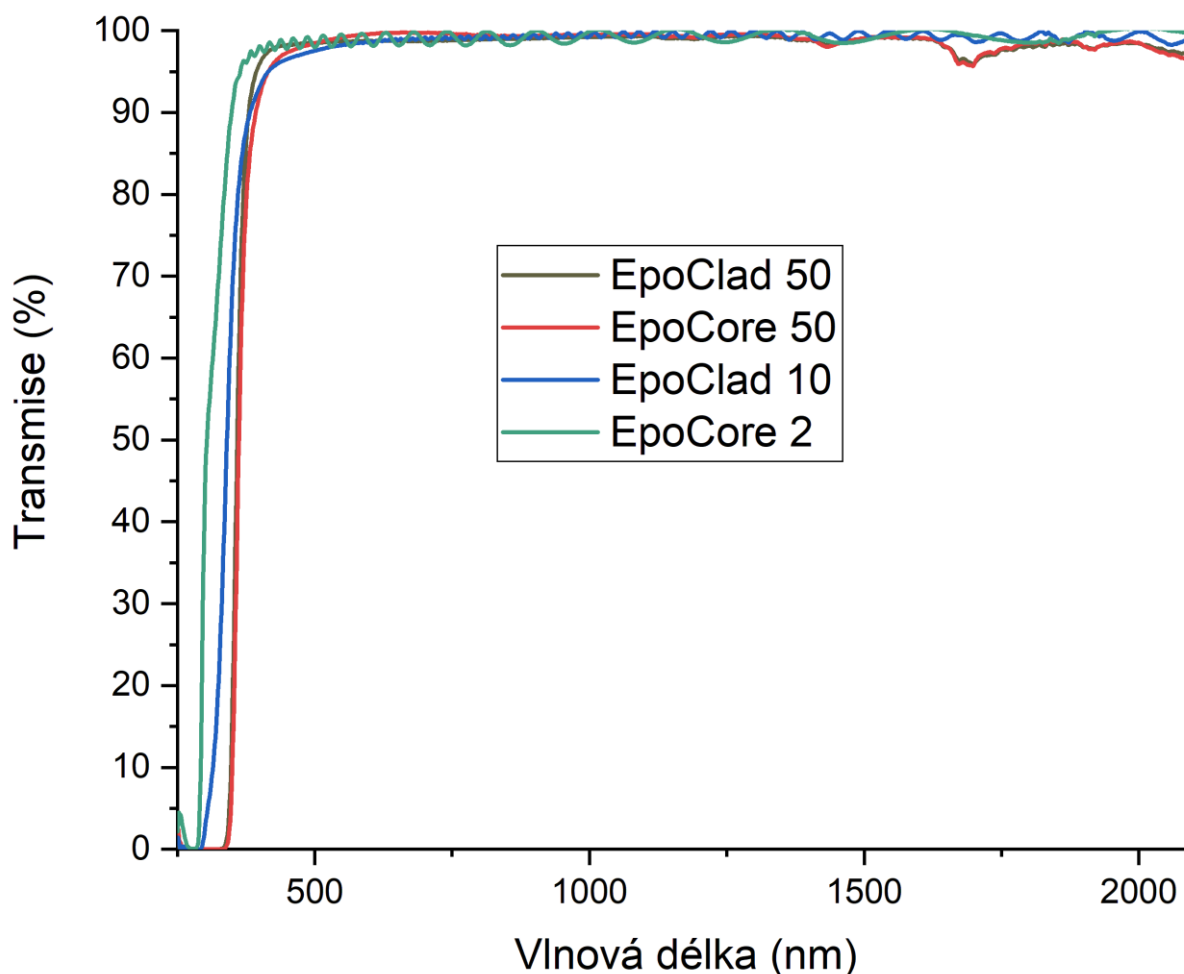
Vzorky vytvrzené při teplotě 150°C mají menší absorpci, než vzorky vytvrzené při teplotě 65°C ze stejných materiálů. Vzorky pro měření útlumu byly tvrzeny při 65°C, protože materiál ABS, ze kterého byly vytvořeny dvoudílné formy, by teplotu přesahující 100°C nevydržel a formy by se deformovaly.

Nejmenší absorpci má certifikovaný biokompatibilní elastomer MED-6210 tvrzený při teplotě 150°C, který sloužil jako vlnodná vrstva, a nejvyšší absorpci má certifikovaný biokompatibilní elastomer MED-6215, který sloužil jako plášťová vrstva.



Obr. 7.3: Vypočtené hodnoty absorpčního koeficientu ze změřených hodnot transmisních spekter použitých materiálů PDMS (MED-6210 – polymer pro jádro, MED-6215, Sylgard 184 – polymery určené pro plášťové vrstvy).

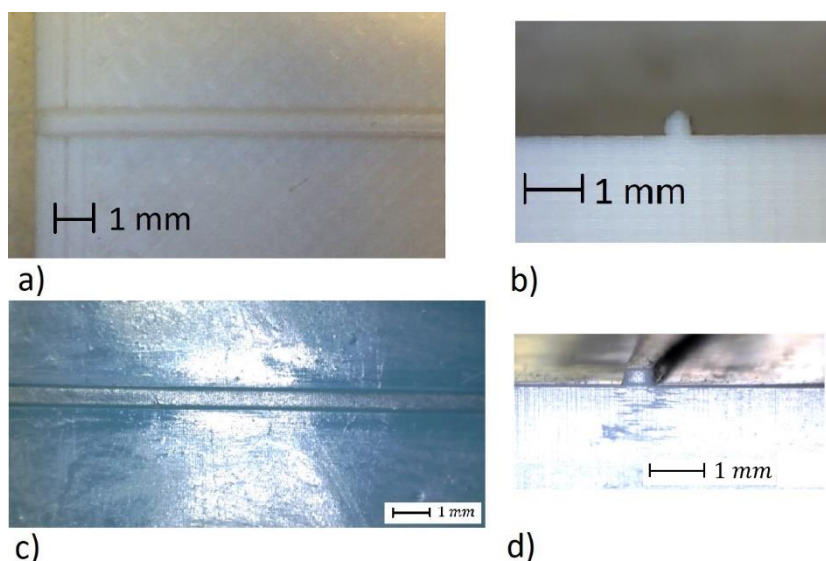
Na obr. 7.4 je uveden graf naměřených transmisních spekter pro epoxidové pryskyřice EpoCore a EpoClad. Z grafu lze vidět, že všechny změřené materiály jsou transparentní téměř v celém měřeném spektru, jen pro UV spektrum jsou hodnoty transmise nízké. Od viditelného spektra, přibližně od 450 nm, už jsou hodnoty transmise v rozmezí 97 – 100 % pro zbytek měřeného spektra, tzn. do 2100 nm. Materiály EpoCore 50 a EpoClad 50 mají menší absorpční maximum kolem vlnové délky 1650 nm, kde mají transmissi asi 93 %, od 2000 nm transmise mírně klesá opět k 93 %. Všechny měřené materiály jsou tedy vhodné k výrobě vlnodů, které budou provozovány na navržených vlnových délkách, jak je uvedeno v kap. 4.



Obr. 7.4: Naměřená transmisní spektra epoxidových pryskyřic EpoCore a EpoClad.

7.3 Optická kontrola motivů vytištěných metodou 3D tisku

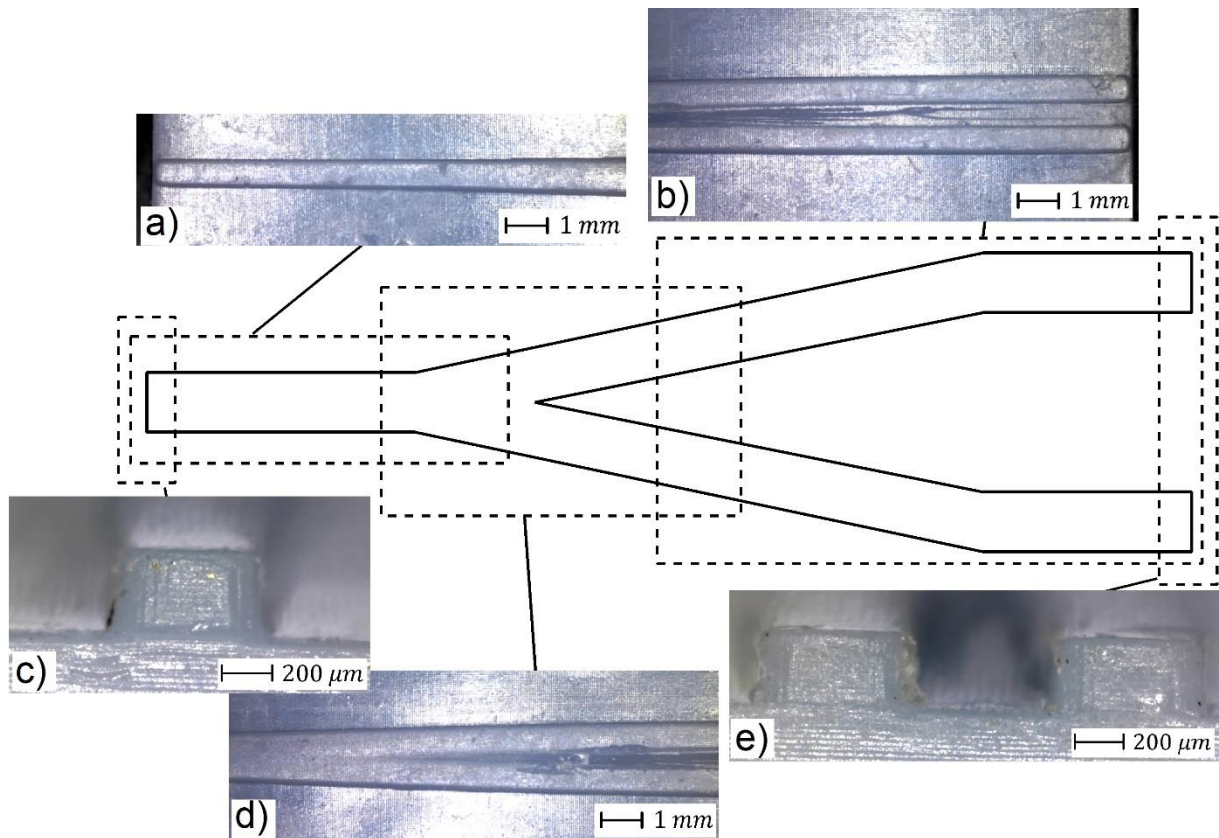
Před zalitím elastomerem byly zkontrolovány rozměry a kvalita vytištěných motivů, zda se na nich nevyskytují defekty, a mohou tedy být použity pro výrobu vzorků. V této práci byla použita jiná technologie tisku pro tisk negativních motivů (princip MSLA – Masked Stereolithography) než v mé bakalářské práci [5] (princip FDM – Fused Deposition Modeling), na kterou tato část diplomové práce navazuje. Tyto technologie proto byly porovnány. Na obr. 7.5 je uvedeno porovnání technologií 3D tisku FDM a MSLA na předloze rovného vlnovodu o rozměru vlnovodné drážky $550 \mu\text{m}$. Na obr. 7.5a a obr. 7.5b jsou uvedeny fotografie vzorků převzaté z mé bakalářské práce [5] a ukazují vzorky vyrobené pomocí technologie FDM. Obr. 7.5c a obr. 7.5d ukazují fotografie vzorků vyrobených pomocí technologie MSLA, která byla vyžita v této diplomové práci. Při porovnání fotografií obou technologií lze pozorovat výrazně nižší drsnost povrchu a lepší přesnost tisku u vzorků, které byly vyrobeny pomocí technologie MSLA. U této technologie také nejsou bez mikroskopu viditelné jednotlivé vrstvy materiálu z tisku, které jsou u technologie FDM viditelné pouhým okem.



Obr. 7.5: Porovnání technologií FDM (Fused Deposition Modeling) a MSLA (Masked Stereolithography) pro 3D tisk na negativní předloze rovného vlnovodu o rozměru drážky $550 \mu\text{m}$,
 a) pohled shora na předlohu vytištěnou pomocí metody FDM, převzato z [5],
 b) pohled z čela na předlohu vytištěnou pomocí metody FDM, převzato z [5],
 c) pohled shora na předlohu vytištěnou pomocí metody MSLA,
 d) pohled z čela na předlohu vytištěnou pomocí metody MSLA.

Na obr. 7.6 je uvedeno schéma optické rozbočnice 1x2Y s přiřazenými detailními fotografiemi jednotlivých sekcí předlohy rozbočnice s šířkou vlnovodného kanálu $550 \mu\text{m}$ z fotocitlivého resinu Prusament Resin Tough Grey vytištěné pomocí technologie MSLA. Na obr. 7.6a je uvedena fotografie předlohy pro vstupní vlnovod shora, na obr. 7.6b je uvedena fotografie předlohy pro výstupní vlnovody shora, na obr. 7.6c je uvedena fotografie předlohy pro vstupní vlnovod z čela, na obr. 7.6d je uvedena fotografie střední části předlohy rozbočnice, kde dochází k dělení optického signálu a na obr. 7.6e je uvedena fotografie předlohy pro výstupní vlnovody rozbočnice z čela.

Z fotografií je patrné, že předloha neobsahuje žádné defekty a má odpovídající rozměry vlnovodného kanálu. Na obr. 7.6c a obr. 7.6e jsou vidět jednotlivé vrstvy, které vznikly postupným vytvrzováním jednotlivých vrstev při tisku předlohy. Při porovnání s fotografiemi prezentovanými na obr. 7.5b a obr. 7.5d je vidět výrazný rozdíl ve velikosti nerovností způsobených vrstvením materiálu. Zatímco u technologie FDM jsou vrstvy viditelné i okem, pro vzorky připravené pomocí technologie MSLA je nutné pro pozorování vrstev použít mikroskop.



Obr. 7.6: Schéma optické rozbočnice 1x2Y s vyznačenými sekcemi, ke kterým jsou přiřazeny detailní fotografie jednotlivých sekcí vytištěné negativní předlohy rozbočnice z fotocitlivého resinu s šířkou drážky pro vlnovodný kanál 550 μm vyrobené technologií MSLA (Masked Stereolithography),

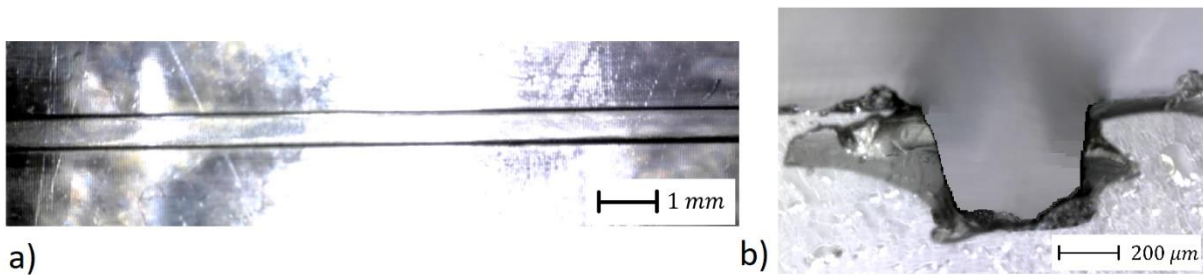
- a) fotografie předlohy pro vstupní vlnovod shora,
- b) fotografie předlohy pro výstupní vlnovody shora,
- c) fotografie předlohy pro vstupní vlnovod z čela,
- d) fotografie střední části předlohy rozbočnice, kde dochází k dělení optického signálu,
- e) fotografie předlohy pro výstupní vlnovody rozbočnice z čela.

7.4 Optická kontrola kvality vzorků

Vzorky byly po vytvrzení každé vrstvy kontrolovány, aby byly odhaleny případné defekty a vzorky mohly být případně vyřazeny. Nejčastějším problémem bylo špatně zalité vstupní nebo výstupní vlákno (pigtail) připojované do kanálkového vlnovodu, čímž nedocházelo k optické vazbě a vzorek nevedl světlo, nebo docházelo k zvýšeným optickým vazebním ztrátám.

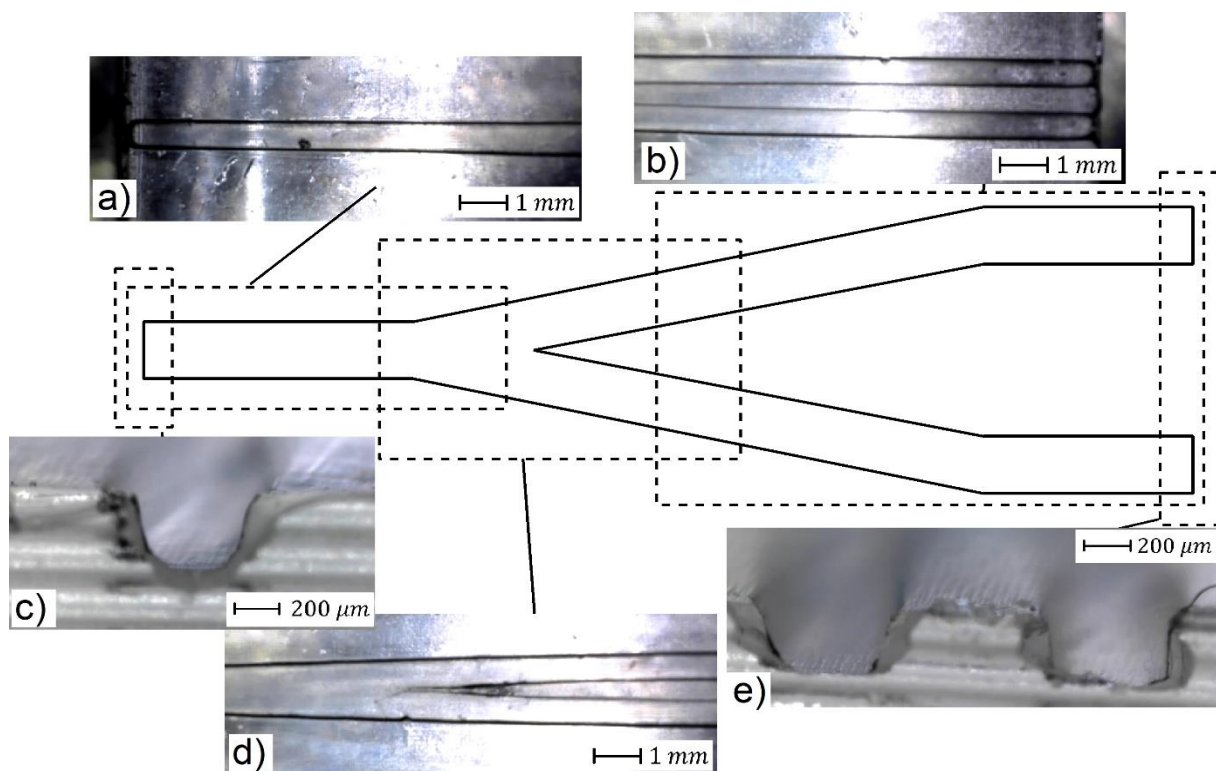
Optická kontrola vzorků vyrobených pomocí metody 3D tisku před zalitím vlnovodné drážky

Po odseparování spodní krycí vrstvy elastomeru od negativní předlohy byly zkontrolovány rozměry vlnovodného kanálu. Na obr. 7.7a je uvedena fotografie rovného vlnovodu při pohledu shora, na které nejsou patrné žádné defekty a drážka pro vlnovodný kanál má požadované rozměry. Na obr. 7.7b je uvedena fotografie rovného vlnovodu z čela, na které lze opět vidět, že drážka má požadované rozměry. Na kraji vlnovodu je patná mírná deformace, která vznikla při odtržení vzorku od formy, která ale nemá vliv na kvalitu vzorku, protože na kraj bylo vloženo optické vlákno, které tyto deformace překlenulo a ve větší vzdálenosti od hrany vzorku již deformace nejsou.



Obr. 7.7: Fotografie plášťové vrstvy z elastomeru PDMS (Sylgard 184) vlnovodného kanálu rovného vzorku s rozměrem $550 \mu\text{m}$ před zalitím vlnovodné drážky,
 a) pohled shora,
 b) pohled z čela.

Na obr. 7.8 je uvedeno schéma optické rozbočnice 1x2Y s přiřazenými detailními fotografiemi jednotlivých sekcí plášťové vrstvy rozbočnice před zalitím vlnovodného kanálu s šířkou $550 \mu\text{m}$. Na obr. 7.8a je uvedena fotografie plášťové vrstvy s drážkou pro vstupní vlnovod shora, na obr. 7.8b je uvedena fotografie plášťové vrstvy s drážkou pro výstupní vlnovody shora, na obr. 7.8c je uvedena fotografie plášťové vrstvy s drážkou pro vstupní vlnovod z čela, na obr. 7.8d je uvedena fotografie střední části plášťové vrstvy s drážkou pro rozbočnici, kde dochází k dělení optického signálu a obr. 7.8e je uvedena fotografie plášťové vrstvy s drážkou pro výstupní optické vlnovody rozbočnice z čela.

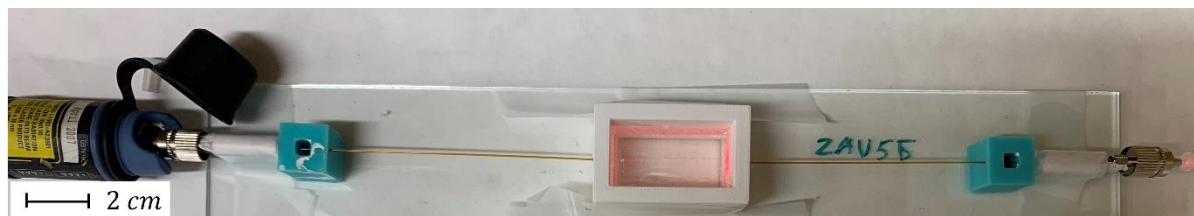


Obr. 7.8: Schéma optické rozbočnice 1x2Y s vyznačenými sekcemi s přiřazenými detailními fotografiemi jednotlivých sekcí plášťové vrstvy rozbočnice z biokompatibilního PDMS MED-6210 drážkou pro vlnovodný kanál o šířce $550 \mu\text{m}$,
 a) fotografie plášťové vrstvy s drážkou pro vstupní vlnovod shora,
 b) fotografie plášťové vrstvy s drážkou pro výstupní vlnovody shora,
 c) fotografie plášťové vrstvy s drážkou pro vstupní vlnovod z čela,
 d) fotografie střední části plášťové vrstvy s drážkou pro rozbočnici, kde dochází k dělení optického signálu,
 e) fotografie plášťové vrstvy s drážkou pro výstupní vlnovody rozbočnice z čela.

Z fotografií je patrné, že plášťová vrstva neobsahuje žádné defekty a vlnovodné kanály mají požadované rozměry. Na čelech je opět patrná mírná deformace vzniklá při odtržení PDMS vzorku od formy, která nemá vliv na kvalitu vzorku, protože na kraj drážek byla vložena optická vlákna, která tyto deformace překlenula. Na obr. 7.8c a obr. 7.8e je možné vidět vodorovné čáry vzniklé obtištěním vzoru z dvojdílné formy (viz obr. 5.3) vytištěné pomocí metody FDM. Při porovnání s obr. 7.6c a obr. 7.6e lze pozorovat rozdíl ve velikosti nerovností vzniklých při vrstvení materiálu při 3D tisku.

Optická kontrola hotových vzorků vyrobených pomocí metody 3D tisku

Hotové vzorky byly před měřením zkontrolovány pomocí USB mikroskopu, zda neobsahují defekty (především přebytečný vzduch), zda jsou optická vlákna správně zalita do vlnovodů, popřípadě vstupní/výstupní optické vláknové vlnovody nejsou ze struktury vylomeny. Na obr. 7.9a je uvedena fotografie hotového rovného vzorku připojeného na laser tester FLS-240 (vlnová délka 635 nm) v jednorázové formě se zalitými pigtaily umístěnými v podpoře pro vlákna pro zabránění jejich vylomení. Z obrázku je patrné, že vzorek neobsahuje žádné viditelné defekty a že vede optický signál, jak je vidět i na výstupním vlákně, přestože je ferule zakryta plastovou krytkou. Na obr. 7.9b je uvedena fotografie hotové rozbočnice 1x2Y vedoucí optický signál. Z fotografie je opět patrné, že vzorek neobsahuje žádné viditelné defekty.



a)



b)

Obr. 7.9: Fotografie hotových vzorků vedoucích optický signál v jednorázové formě se zalitými pigtaily umístěnými v podpoře pro vlákna pro zabránění jejich vylomení s připojeným laser testerem FLS-240 s vlnovou délkou 635 nm,

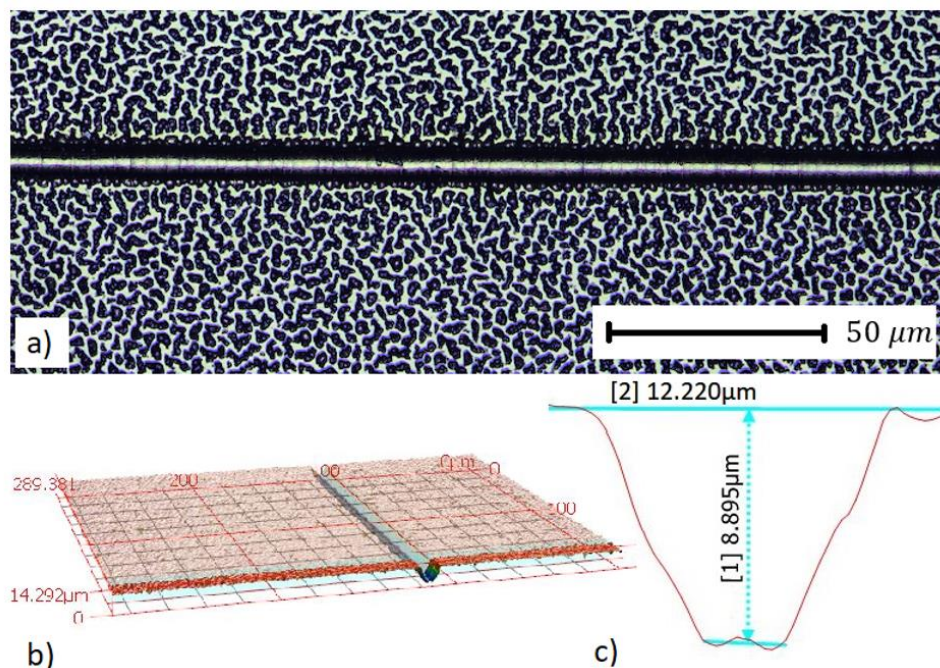
- a) rovný vlnovod,
- b) optická rozbočnice 1x2Y.

Optická kontrola vzorků vyrobených pomocí laserového litografu a hlubokého reaktivního iontového leptání s použitím pozitivního fotorezistu

Pomocí laserového litografu byly vyrobeny vzorky s pozitivními fotorezisty S1805 G2 a S1818 G2. Nejprve bylo nutné stanovit správnou dávku záření laserového zdroje 385 nm tak, aby měla výsledná struktura požadované rozměry. Vzhledem k velmi malým rozměrům vyráběných struktur, které se pohybovaly v jednotkách μm , muselo být nastavení dávky velice přesné. K nastavení dávky byla použita funkce laserového litografu, která umožňuje vytvořit matici obrazců s proměnnou dávkou záření a korekcí zaostření objektivu na vzorek. Výrobce udává dávku v rozmezí 60 – 150 mJ/cm^2 pro vlnovou délku 436 nm [31]. Dávka záření byla proto experimentálně optimalizována a zjištěná optimální hodnota je 75 mJ/cm^2 . Celý proces výroby vzorků je popsán v kap. 5.2.

Optimalizaci vzorků s použitím pozitivního fotorezistu komplikoval fakt, že vzorky nemohly být pozorovány pod mikroskopem. Laboratorní mikroskop Olympus BX60 s kamerou Promicam 3-12C, používaný k prvotní optické kontrole vzorků používá k osvětlení vzorku bílou LED diodu, která porušuje polymerní vazby fotorezistu a způsobuje jeho osvětlení, a tedy odplavení při mokřém leptání, čímž dojde ke zničení vzorku. Až v říjnu 2021 byl mikroskop používaný pro sledování vyrobených vzorků doplněn o filtr, který propouští pouze vlnové délky vyšší než 500 nm. Dalším technickým problémem, jenž ovlivnil prováděné depoziční testy, byl prasklý ventil potřebný pro spuštění zařízení DRIE, kvůli čemuž zařízení nebylo možné používat od začátku srpna 2021 až do listopadu 2021 (zařízení bylo uvedeno do provozu v březnu 2021). Technologické procesy prováděné při řešení diplomové práce tedy nebylo možné z výše uvedených důvodů plně optimalizovat.

Na obr. 7.10a je uvedena fotografie z konfokálního mikroskopu KEYENCE VK-X1000 povrchu Si vzorku s pozitivním fotorezistem S1805 G2 po procesu DRIE (po dobu 300 s). Na fotografii můžeme pozorovat naleptání povrchu Si podložky, protože vzorek byl procesu DRIE vystaven příliš dlouho a v jeho průběhu došlo k odleptání vrstvy fotorezistu. Na obr. 7.10b je uveden 3D sken povrchu s vyznačeným řezem, ze kterého byl vytvořen 2D profil, jehož část zobrazující vyleptanou drážku je uvedena na obr. 7.10c. Na 2D profilu lze pozorovat efekt stranového leptání (drážka se směrem do hloubky od povrchu zužuje). U vzorku byl změřen horizontální rozměr šířky kanálu 12,22 μm a požadovaný rozměr byl 5 μm . Rozměr je tedy výrazně větší, než bylo požadováno. Toto je dáno stranovým leptáním při procesu DRIE i nevhodným nastavením litografu, kde bylo nastaveno špatné rozlišení, dávka záření nebo kvalita zápisu.

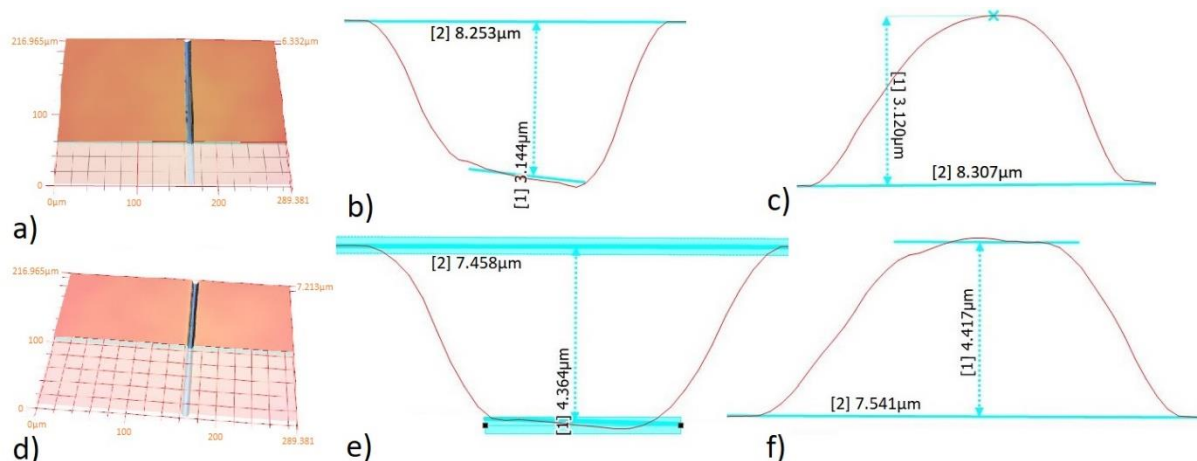


Obr. 7.10: Výsledek optické kontroly rozměrů provedené konfokálním mikroskopem KEYENCE VK-X1000 pro vzorek připravený s pomocí pozitivního fotorezistu S1805 G2 po procesu DRIE po dobu 300s, a) fotografie povrchu vzorku, kde při procesu DRIE došlo k naleptání celého povrchu vzorku, b) 3D sken povrchu s vyznačeným řezem pro zobrazení 2D profilu, c) vyříznutá část profilu podle obr. 7.10b s drážkou a jejími vyznačenými rozměry.

Na obr. 7.11 je uveden výsledek optické kontroly rozměrů vyleptané drážky provedené konfokálním mikroskopem KEYENCE VK-X1000 pro vzorek připravený s pomocí pozitivního fotorezistu S1805 G2 po Bosch procesu. Pro leptací fázi použity plyny SF_6 s průtokem 240 cm^3/s a O_2 s průtokem 20 cm^3/s

a pro depoziční fázi plyn C_4F_8 s průtokem $150 \text{ cm}^3/\text{s}$. Na obr. 7.11a je uveden 3D sken povrchu s vyznačeným řezem pro zobrazení profilu uvedeného na obr. 7.11b pro vzorek leptaný 4 cykly. Doba cyklů byly 3 s pro leptací fázi a 2 s pro depoziční fázi. Na obr. 7.11c je uveden profil obtisku vyleptané drážky z PDMS, ze kterého lze pozorovat, že si předloha a obtisk tvarově a rozměrově odpovídají.

Na obr. 7.11d je uveden 3D sken povrchu s vyznačeným řezem pro zobrazení profilu uvedeného na obr. 7.11e pro vzorek leptaný 6 cyklů. Délka cyklů byla stejná jako v předchozím případě. Na obr. 7.11f je uveden profil obtisku vyleptané drážky z PDMS. Z profilů lze vidět, že si předloha a obtisk tvarově a rozměrově odpovídají. Při porovnání obr. 7.10c s obr. 7.11b a obr. 7.11e lze pozorovat rozdíl v zužování drážky směrem do hloubky. Rozdíl je mnohem větší pro drážku leptanou jednoduchým procesem DRIE než pro drážky leptané pomocí *Bosch processu*, u kterých lze efekt stranového leptání ale také pozorovat. Pro *Bosch process* byla z naměřených hodnot vypočtena přibližná hloubka leptání na jeden cyklus, která odpovídá $0,6 \mu\text{m}/\text{s}$. Pro první cyklus je vyleptaná hloubka větší, protože na povrchu vzorku ještě není přítomen polymer z depoziční fáze *Bosch processu*, který je nutné odleptat před dalším leptacím cyklem *Si* desky.



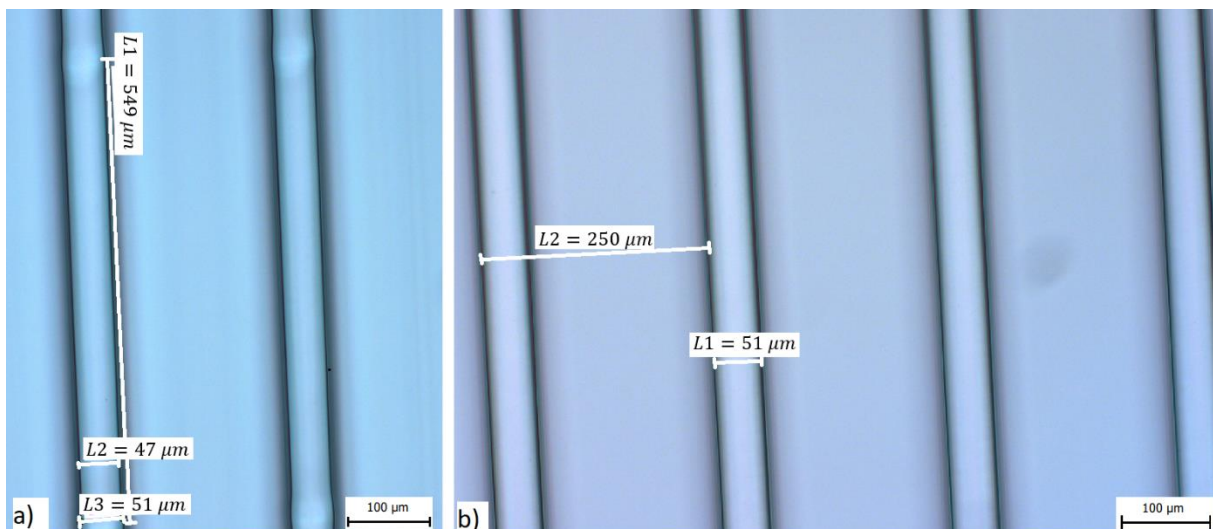
Obr. 7.11: Výsledek optické kontroly rozměrů provedené konfokálním mikroskopem KEYENCE VK-X1000 pro vzorek připravený s pomocí pozitivního fotorezistu S1805 G2 po Bosch processu, a) 3D sken povrchu s vyznačeným řezem pro zobrazení profilu pro vzorek leptaný 4 cykly, b) vyříznutá část profilu podle obr. 7.11a s drážkou a jejími vyznačenými rozměry, c) vyříznutá část profilu obtisku z PDMS z drážky na obr. 7.11a, d) 3D sken povrchu s vyznačeným řezem pro zobrazení profilu pro vzorek leptaný 6 cyklů, e) vyříznutá část profilu podle obr. 7.11d s drážkou a jejími vyznačenými rozměry, f) vyříznutá část profilu obtisku z PDMS z drážky na obr. 7.11d.

Optická kontrola vzorků vyrobených pomocí laserového litografu s použitím negativního fotorezistu

Pomocí laserového litografu byly vyrobeny vzorky z polymerů EpoClad 50 a EpoCore 50, které sloužily jako negativní fotorezisty. Polymer EpoCore 50 byl ozařován v litografu pomocí virtuální masky. Prvním úkolem bylo stanovení správné dávky záření v mJ/cm^2 tak, aby měla výsledná zapsaná struktura požadované rozměry. Výrobce udává dávku záření pro polymery EpoCore 150 – $600 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ na vlnové délce 365 nm . Použitý litograf je osazen laserovou diodou, která pracuje na vlnové délce 385 nm , na kterou je polymer méně citlivý, proto musela být dávka zvýšena a experimentálně stanovena. Při příliš vysoké dávce se vypalované motivy rozpíjí do okolí, výsledný vlnovod je tedy širší, než je zapisován. Při nízké dávce nedojde k dostatečnému vytvrzení a při vyvolávání motivu ve

vyvolávacím roztoku dojde k odplavení i částečně vytvrzených částí. Na vzorku tedy zůstane buď jen část motivu, nebo vůbec nic.

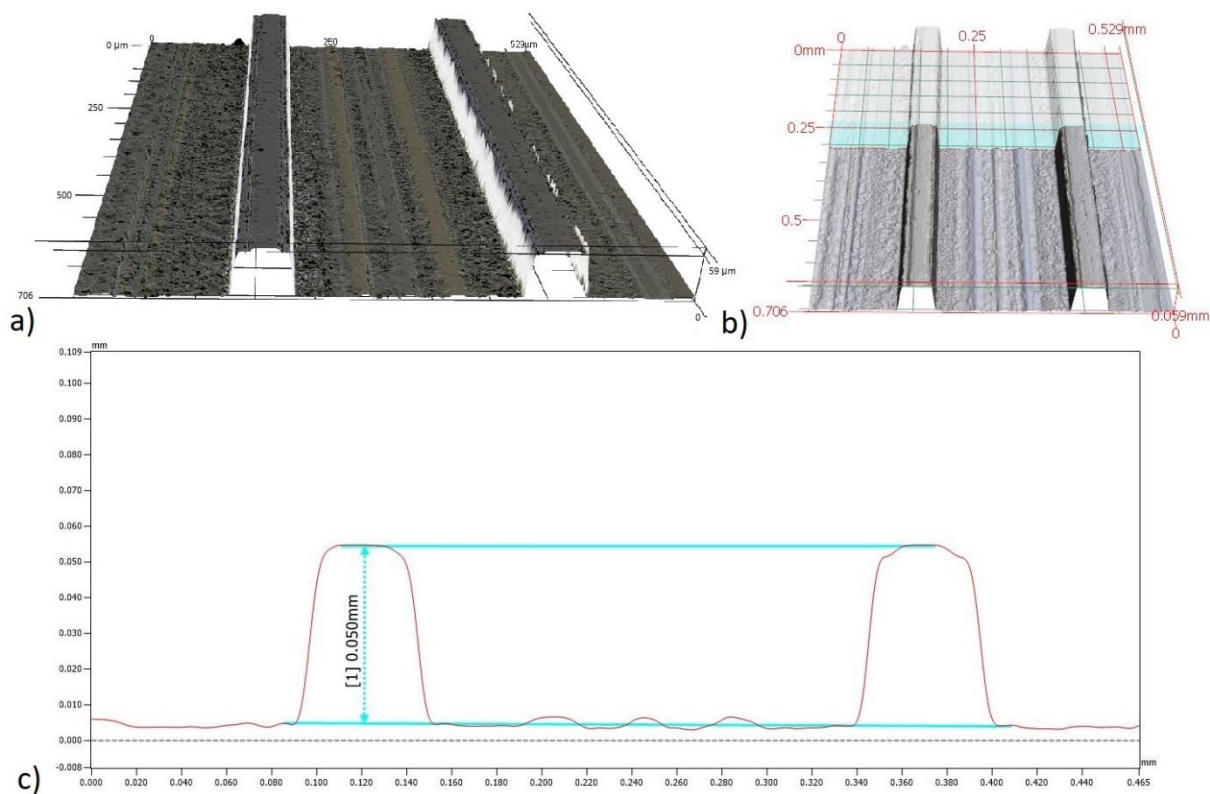
Na obr. 7.12 jsou uvedeny fotografie dvou vzorků z průběhu optimalizace parametrů litografu, kde bylo cílem vyrobit vzorky s výškou a šířkou $50\ \mu\text{m}$ s přesností $\pm 5\ \mu\text{m}$ a s roztečí $250\ \mu\text{m}$. Na obr. 7.12a je uvedena fotografie vzorku připraveného s nižší dávkou záření ($1500\ \text{mJ}/\text{cm}^2$). Rozměr vlnovodu je $47\ \mu\text{m}$. Dále jsou na vzorku patrna pravidelná rozšíření vlnovodu ve vzdálenosti cca $550\ \mu\text{m}$ tzv. chyba sesazování (stitching errors), které vznikají při nevhodném nastavení překryvu laserového svazku. Objektiv litografu při zapisování vzoru vždy osvítí část vzorku a následně je posunut a osvítí další část. Při tomto posuvu je část zapisovaného vzoru osvětlena dvakrát, tzv. překryv. Pokud je překryv nastaven špatně, vznikají na vzorku viditelné defekty například v podobě rozšíření vlnovodu, které jsou pozorovatelné na obr. 7.12a.



Obr. 7.12: Fotografie vzorků EpoCore 50 připravených pomocí laserového litografu LBW pořízené optickým mikroskopem Olympus,
a) nižší dávka záření a nevhodně zvolený sesazovací režim (stitching),
b) optimalizované parametry litografu.

Po konzultaci s výrobcem a dodavatelem litografu byl zvolen jiný objektiv, pro který nejsou sesazovací chyby tak časté a také byla zvolena jiná kvalita zápisu, která obsahuje jiné nastavení překryvu. Na obr. 7.12b je uveden vzorek vyrobený s optimalizovanými parametry. Na litografu byla nastavena dávka záření na $1900\ \text{mJ}/\text{cm}^2$, kvalita zápisu na „High“ a rozlišení $2\ \mu\text{m}$.

Po optimalizaci parametrů litografu, kdy byl rozměr vzorků kontrolován pomocí optického mikroskopu Olympus, byl měřen výškový profil vzorků pomocí 3D profilometru KEYENCE VK-X3000, jak bylo popsáno v kap. 6.3. Na obr. 7.13 je uveden 3D sken a zpracovaná data s využitím laserové konfokální metody pro vzorek EpoClad 50 / EpoCore 50 bez krycí vrstvy. Jedná se o vzorek zobrazený na obr. 7.12b, na němž je vyrobeno 12 kanálů o šířce $50\ \mu\text{m}$ roztečí mezi motivy $250\ \mu\text{m}$. Na obr. 7.13a je uveden originální 3D sken části vzorku, na obr. 7.13b je 3D sken s vyznačeným řezem, jehož profil je uveden na obr. 7.13c.



Obr. 7.13: Výsledek kontroly měření geometrických rozměrů provedené konfokálním mikroskopem KEYENCE VK-X1000 pro vzorek EpoCore 50 / EpoClad 50 s 50 μm kanály,
a) originální 3D sken povrchu vytvořený laserovým konfokálním mikroskopem,
b) 3D sken povrchu s vyznačeným řezem pro zobrazení profilu,
c) 2D profil řezu podle obr. 7.13b s viditelnou výškou vlnovodného kanálu.

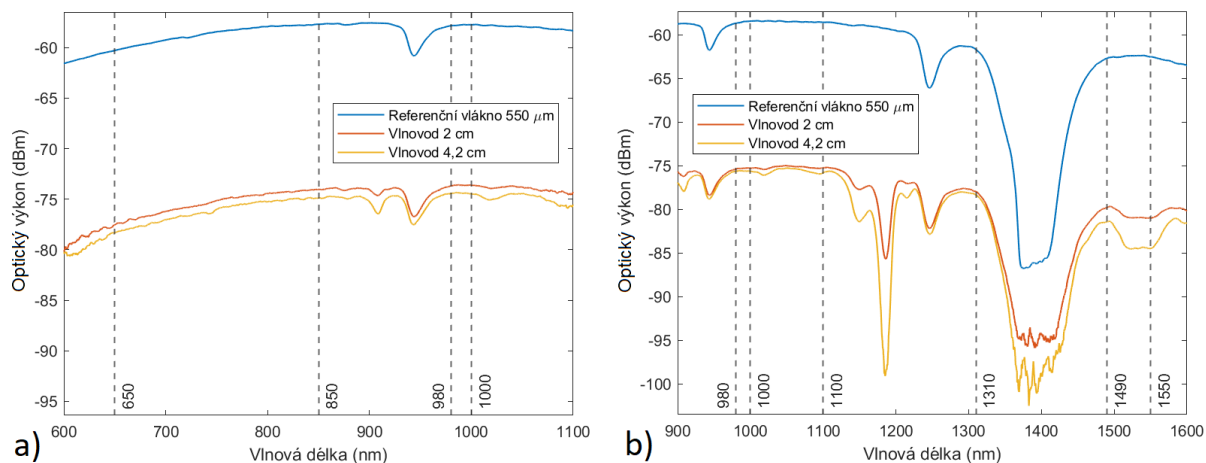
Z obrázku je patrné, že kanály mají výšku 50 μm a skutečné rozměry kanálů tedy odpovídají požadovaným rozměrům. Z obr. 7.13c lze nicméně také vyčíst, že kanál má tvar rovnoramenného lichoběžníku se zaoblenými rohy. To je dáno konečnou hloubkou ostrosti laserového litografu, který byl zaostřen na povrch vzorku, ve spodní části už se obrazec mírně rozpíjí do stran z důvodu nedostatečného zaostření dopadajícího laserové svazku na spodní část osvětovaného objemu rezistu. Vrstva polymeru EpoCore 50 o šířce 50 μm je pro tuto metodu relativně tlustá, což může mít za následek zvýšení optického útlumu.

7.5 Měření spektrálních charakteristik

Měření spektrálních charakteristik bylo provedeno pomocí dvou spektrálních analyzátorů Yokogawa QA6373B a Yokogawa QA6370C na vzorcích vyrobených metodou 3D tisku popsané v kap. 6.4. Nejprve byly změřeny spektrální charakteristiky pro referenční optické vlákno FIP500550590 o délce 30 cm (jedná se o stejné optické vlákno, které je použito jako vstupní/výstupní optické vlákno na vstupu/výstupu vyrobených struktur). Následně byly změřeny vyrobené vlnovody o délce 2 cm a 4,2 cm z certifikovaných biokompatibilních materiálů PDMS. Materiál MED-6215 slouží jako plášťová vrstva a MED-6210 jako vlnovodná vrstva.

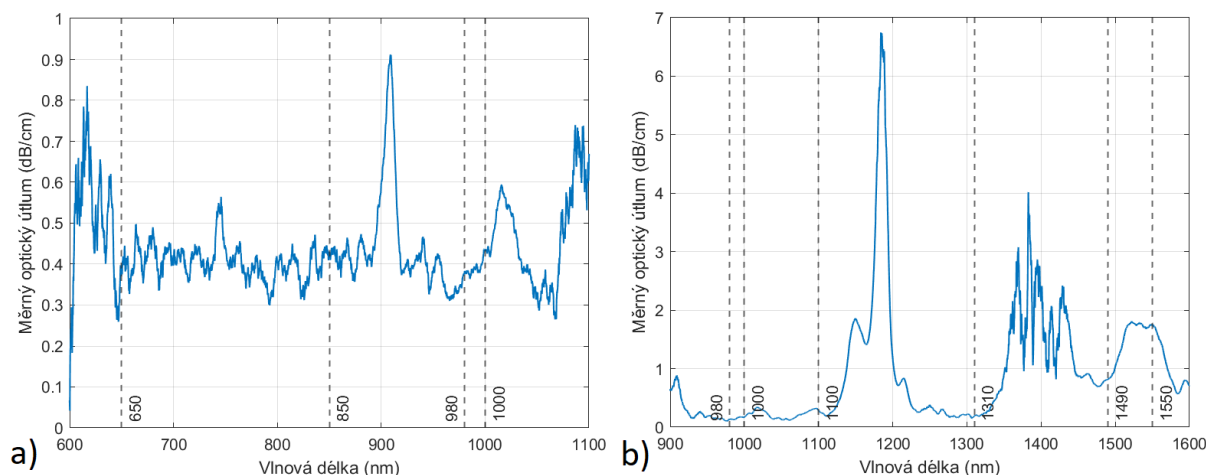
Na obr. 7.14 jsou uvedeny vyhlazené naměřené výkony v měřeném spektru pro referenční optické vlákno (modře) a pro vzorky označené *zav 38* (2 cm, červeně) a *zav 41* (4,2 cm, žlutě). Z naměřených spekter byly odstraněny chybné (nezměřené) hodnoty a poté na ně byl aplikován filtr s klouzavým průměrem pro vyhlazení průběhů. Také musely být ze změřených spekter odstraněny okrajové části,

protože byly příliš zašuměné pro získání relevantních výsledků. Pro spektrální analyzátor Yokogawa QA6373B bylo odstraněno spektrum v rozsahu 350 – 600 nm a 1100 – 1200 nm a pro spektrální analyzátor Yokogawa QA6370C v rozmezí 600 – 900 nm a 1600 – 1700 nm. Při porovnání tvarů křivek referenčního vlákna a vzorků PDMS můžeme pozorovat minima, která jsou způsobena vlastnostmi vstupních/výstupních optických vláken (minima viditelná na modré křivce i na druhých dvou) a zároveň minima způsobená materiálem PDMS (minima viditelná pouze na červené a žluté křivce). Z grafů lze také pozorovat velký rozdíl v přijímaném výkonu mezi referenčním vláknem a PDMS vzorky. To je způsobeno především nesouladem mezi numerickou aperturou použitých pigtailů a vlastních planárních PDMS vzorků a odrazy na rozhraní mezi PDMS vzorkem a vazebním optickým vláknem.



Obr. 7.14: Naměřené hodnoty optického výkonu v dBm změřené pomocí spektrálních analyzátorů,
 a) Yokogawa QA6373B v rozsahu vlnových délek 600 – 1100 nm,
 b) Yokogawa QA6370C v rozsahu vlnových délek 900 – 1600 nm.

Na obr. 7.15 je uvedena závislost měrného optického útlumu v dB/cm na vlnové délce změřená pomocí spektrálních analyzátorů. Měrný optický útlum je vypočten pomocí vzorce (38) ze změřených optických výkonů uvedených na obr. 7.14. Z grafů byly opět oříznuty okrajové části změřených spekter pro přílišné zašumění. V tab. 7.1 jsou pak pro přehlednost uvedeny hodnoty měrného optického útlumu na význačných vlnových délkách zvýrazněných na obr. 7.15.



Obr. 7.15: Závislost optického útlumu v dB/cm na vlnové délce změřené pomocí spektrálních analyzátorů,
 a) Yokogawa QA6373B v rozsahu vlnových délek 600 – 1100 nm,
 b) Yokogawa QA6370C v rozsahu vlnových délek 900 – 1600 nm.

Z tabulky i grafů je patrné, že optický útlum je v rozmezí 650 – 1050 nm téměř konstantní, jeho hodnota se pohybuje v rozmezí 0,3 – 0,4 dB/cm s jedním menším maximem na 910 nm (0,9 dB/cm), kde má zvýšený útlum i přívodní optické vlákno. Následně útlum mírně roste až do výrazných maxim na 1150 (1,85 dB/cm) a především na vlnové délce 1185 nm (6,7 dB/cm). Na vlnové délce 1310 nm je optický útlum opět nízký (0,19 dB/cm) a směrem k delším vlnovým délkám narůstá s občasnými minimy a maximy. Z význačných vlnových délek je nejvyšší útlum na 1550 nm a to 1,75 dB/cm. Rozdíl v naměřených hodnotách optického útlumu pro viditelné a blízké IR spektrum je dán tím, že přívodní křemenné vlákno má pro blízké IR spektrum nižší útlum než pro viditelné světlo a kratší vlnové délky z blízkého IR spektra, proto jsou hodnoty naměřené pro 1000 – 1310 nm nižší než hodnoty naměřené pro 650 – 980 nm.

Tab. 7.1: Shrnutí měrného optického útlumu změřeného pomocí spektrálních analyzátorů Yokogawa na důležitých vlnových délkách.

Spektrální analyzátor	Optický útlum [dB/cm] na vlnové délce [nm]							
	650	850	980	1000	1100	1310	1490	1550
Yokogawa QA6373B ¹ / Yokogawa QA6370C ²	0,38 ¹	0,42 ¹	0,38 ¹	0,17 ²	0,29 ²	0,19 ²	0,8 ²	1,75 ²

7.6 Měření optického útlumu

Měření optického útlumu vzorků vyrobených metodou 3D tisku

Vzorky vyrobené pomocí negativní formy s využitím metody 3D tisku (popsané v kap. 5.1) byly měřeny pomocí metody dvou délek popsaných v kap. 6.4. Byly měřeny dva vzorky, delší a kratší, a ze změřených výkonů byl poté vypočten útlum v dB/cm podle rovnice (38). Vzorky v sobě mají zalité pigtaily zakončené optickými FC/PC konektory, proto je jejich připojení k laserovému zdroji i k detektoru jednoduché. Pigtaily jsou vloženy pouze na kraj vlnovodů, proto při manipulaci se vzorky může dojít k jejich vylomení. Vzorky jsou proto zality do nerozebíratelných forem, připevněny na skleněnou podložku a pro vstupní/ výstupní optická vlákna zakončená FC/PC konektory jsou vytvořeny speciální držáky. Fotografie vyrobeného vzorku je uvedena na obr. 7.9a v kap. 7.4.

V tab. 7.2 jsou uvedeny naměřené hodnoty optického útlumu pro jednotlivé vzorky z biokompatibilních elastomerů PDMS MED-6210 (jádro) a MED-6215 (plášť) s rozměrem jádra 550 μm. Rozdíly v útlumech mezi jednotlivými vzorky jsou dány především tím, jak dobře se povede zalít vstupní/ výstupní optický vláknový vlnovod (pigtail) do vlnovodné drážky. Pokud je vlákno zalito pod úhlem jiným než je 90° vzhledem ke stěně vlnovodu, vzniká na rozhraní zvýšený útlum. Další zvýšení optického útlumu může být způsobeno zbytkovými vzduchovými bublinkami ve vlnovodu, který se nepodaří vždy zcela odstranit, a fakt, že při jeho evakuaci se může část polymeru dostat mimo drážku a tím deformovat vlnovod. Důležitý je proto průběh útlumové křivky pro jednotlivé vzorky, který je pro všechny vzorky podobný. Pro vzorky s označením *zav 38* a *zav 41*, jakožto vzorky s nejnižším útlumem, bylo provedeno opakované měření pro ověření reprodukovatelnosti výsledků. Bylo zjištěno, že měření je prováděno s přesností 0,1 dB/cm. Nepřesnost je způsobena částečně fotodetektořem (nepřesnost měření detektoru udávaná výrobcem je 4 %), částečně opotřebením vzorků při měření (především vliv konektorů). I přes veškerá opatření proti vylamování vláken dochází měřením a manipulací s nimi k poničení vzorku, a tím k rozdílnému naměření hodnot útlumu.

Tab. 7.2: Naměřené hodnoty optického útlumu pro vzorky z biokompatibilních elastomerů PDMS MED-6210 (jádro) a MED-6215 (plášť) s rozměrem jádra 550 μm .

Číslo vzorku	Poznámky	Optický útlum [dB] na vlnové délce [nm]				
		532	650	850	1300	1550
zav 38 zav 41	měření 1	1,01	0,63	0,65	0,83	2,34
zav 38 zav 41	záměna vstupního a výstupního vlákna	0,99	0,48	0,66	0,69	2,10
zav 38 zav 41	měření 2	0,98	0,57	0,60	0,60	1,95
zav 45 zav 46		1,02	0,96	0,94	0,94	1,70
zav 45 zav 46	záměna vstupního a výstupního vlákna	1,16	0,87	0,60	1,00	1,81
zav 47 zav 48		1,81	0,72	0,77	1,04	2,50
zav 47 zav 48	záměna vstupního a výstupního vlákna	1,86	1,07	0,81	1,13	2,69

Nejnižší hodnotu optického útlumu vykazovali vzorky na vlnových délkách 650 a 850 nm , pro které byly hodnoty útlumu srovnatelné. Nejnižší hodnota byla naměřena pro dvojici vzorků *zav 38* a *zav 41* na vlnové délce 650 nm , kde byl změřen optický útlum 0,48 dB/cm . Mírně vyšší hodnotu útlumu vykazovaly vzorky na vlnové délce 1300 nm , ještě vyšší pak na 532 nm . Nejvyšší útlum vykazovaly vzorky na vlnové délce 1550 nm , kde byla naměřena i nejvyšší hodnota optického útlumu 2,69 dB/cm (vzorky *zav 47* a *zav 48*).

Dále byly vyrobeny a měřeny optické rozbočnice 1x2Y s rozměrem jádra 550 μm , opět z biokompatibilních PDMS elastomerů MED-6210 a MED-6215, které se ale nepodařilo vyrobit v dostatečné kvalitě a vzorky nebyly symetrické. Kvůli nedostatku materiálů nebylo možné provést další optimalizační experimenty. Důvodem nedostatku materiálů pro depoziční testy byly dlouhé dodací termíny polymerů (předpokládaný termín dodání polymeru objednaného v červnu 2021 je leden 2022).

Měření optického útlumu vzorků vyrobených laserovým litografem

Vzorky vyrobené pomocí negativních fotorezistů (EpoCore 50 a EpoClad 50) byly měřeny pomocí metody dvou délek popsané v kap. 6.5 s tím rozdílem, že vzorky nebyly přímo připojeny na optická vlákna. Měření probíhalo na optické lavici, kde vstupní a výstupní optická vazba byla provedena pomocí optických vláken jejichž pozice byla nastavována pomocí mikroposuvů, aby došlo k navázání světla do vlnovodu. Optický útlum těchto vzorků přesahoval hodnotu 1 dB/cm , na měřených vlnových délkách.

Optimalizace nebyla dokončena z důvodu, že použité materiály jsou výrobcem optimalizovány na vytvrzování jinou vlnovou délkou, než na jaké pracuje laserový litograf, použitá dávka záření tedy musela být experimentálně stanovena. Výrobce také neudává konkrétní postup teplotního vytvrzování polymeru, jen přibližná doporučení, proto i tento postup musel být experimentálně optimalizován tak, aby došlo k dostatečnému vytvrzení vrstev a odpaření veškerých rozpouštědel. Domnívám se, že po další optimalizaci technologických procesů bude možno vyrobit optické vlnovody s nižším optickým útlumem než 1 dB/cm na vlnových délkách 850 a 1300 nm .

8 Závěr

Diplomová práce navazuje na moji bakalářskou práci [5] a je rozdělena do dvou částí. V první části práce jsem se věnoval návrhu a výrobě velkoprůměrových (rozměr jádra $550 \mu\text{m}$) optických planárních kanálkových vlnodů a rozbočnic 1x2Y z polymerních materiálů, především z elastomeru PDMS (polydimethylsiloxan) s biomedicínskou certifikací. K výrobě byla využita negativní forma vyrobená pomocí technologie 3D tisku MSLA (Masked Stereolithography), která proti technologii FDM (Fused Deposition Modeling), použité v mé bakalářské práci, vyniká výrazně nižší drsností povrchu vytištěných motivů.

U všech použitých materiálů byl nejdříve změřen index lomu a transmisní spektra pro ověření jejich vhodnosti k výrobě optických vlnodů. Z těchto měření vyplynulo, že materiál EpoCore 2 má pro vlnové délky 1308,2; 1549,1 a 1652,1 nm nižší index lomu než materiál EpoClad 10. Tyto materiály měly být využity k výrobě jednovodových planárních optických vlnodů, ale ve zmíněném rozsahu nesplňují podmínku pro vedení světla a vlnod z nich pro tento rozsah vlnových délek nelze použít. Ostatní použité materiály jsou v navržených kombinacích vhodné pro výrobu optických vlnodů.

K depozičním testům byly vybrány struktury z certifikovaných biokompatibilních elastomerů PDMS NuSil MED-6210 a MED-6215 od výrobce Avantor a necertifikovaný elastomer PDMS Sylgard 184 od výrobce DowCorning. Nejprve byly navrženy rovné vlnovody o délce 2 a 4 cm pomocí programu FreeCAD (software pro 3D modelování). Následně byl 3D model přeložen pro software tiskárny a negativní forma využita pro jejich výrobu byla vytištěna na 3D tiskárně Original Prusa SL1, využívající technologii MSLA. Dvoudílné a nerozebíratelné formy, potřebné pro udržení dostatečné vrstvy polymeru na negativní předloze, a podpory vláken, byly vytištěny na 3D tiskárně Original Prusa i3 MK3S+, využívající technologii FDM.

Dále byly navrženy optické rozbočnice 1x2Y pomocí metody šíření optického svazku BPM (Beam Propagation Method), kde bylo využito specializovaného softwaru BeamPROP od firmy RSoft s optimalizačním balíčkem MOST. Byly provedeny celkem čtyři návrhy, ze kterých byl k depozičním testům pro výrobu navržené struktury vybrán návrh z biokompatibilních elastomerů NuSil MED-6215, sloužící jako plášťová vrstva a NuSil MED-6210 sloužící jako vlnodná vrstva. Návrh byl optimalizován pro pracovní vlnovou délku 650 nm. Optimalizovaný návrh rozbočnice byl v programu FreeCad převeden z 2D do 3D, přeložen pro software 3D tiskárny a vytištěn.

Vyrobené vzorky byly nerozebíratelně spojeny se vstupními a výstupními optickými vlákny zakončenými FC/PC konektory. U vzorků byl měřen optický útlum pomocí metody dvou délek na vlnových délkách 532, 650, 850, 1300 a 1550 nm. Nejnižší optický útlum byl změřen 0,99 dB/cm na vlnové délce 532 nm, 0,48 dB/cm na 650 nm, 0,66 dB/cm na 850 nm, 0,69 dB/cm na 1300 nm a 2,10 dB/cm na 1550 nm.

Tato první část méj diplomové práce přímo navazovala na moji bakalářskou práci, kdy se další optimalizací výrobních postupů podařilo zlepšit dosažené hodnoty optického útlumu z hodnot 1,6 – 1,9 dB/cm, prezentované v mé bakalářské práci, až na hodnoty 0,5 – 0,7 dB/cm dosažené při řešení diplomové práce. Největší rozdíl spatřuji ve změně technologie 3D tisku, kdy technologie MSLA je pro výrobu negativní formy vhodnější. Při malých rozdílech indexů lomu pláště a jádra mají nerovnosti způsobené tiskem forem na optický útlum velký vliv. Nižší drsnost forem vyrobených pomocí technologie MSLA tedy umožňuje dosažení lepších výsledků. Dalším významným posunem je, že byly pro výrobu použity certifikované biokompatibilní polymerní materiály. Depoziční testy prokázaly, že

testovanou technologií za použití nových materiálů lze vyrobit biokompatibilní optické vlnovody s nízkým útlumem.

Ve druhé části řešení diplomové práce jsem se věnoval testování možnosti výroby optických vlnodů s využitím laserové litografie s přímým zápisem LBW (Laser Beam Writing) na laserovém litografu MicroWriter ML[®]3 Pro od firmy Durham Magneto Optics Ltd. Depoziční testy jsem prováděl jak s pozitivními, tak i negativními fotorezisty. Vzorky vyrobené pomocí pozitivního fotorezistu byly následně leptány pomocí procesu hlubokého iontového reaktivního leptání DRIE (Deep Reactive Ion Etching) za pomoci zařízení SENTECH ICP-RIE plasma etcher SI 500.

Jako pozitivní fotorezisty sloužily materiály Microposit[™] S1805[™] G2 nebo S1818[™] G2 od firmy micro resist technology GmbH. S jejich využitím byl testován postup pro výrobu jednovidových planárních optických vlnodů (s rozměrem jádra v jednotkách μm), jejichž přesné rozměry byly nejprve vypočteny na základě znalosti indexů lomu materiálů, které měly sloužit k výrobě vlnovodu. Nejdříve byl v litografu zapsán požadovaný motiv na křemíkovou desku s fotorezistem, který byl následně vyvolán ve vývojce. Poté byl vzorek vložen do zařízení DRIE, kde byly do křemíku vyleptány drážky na místech, kde došlo k odplavení fotorezistu. Po odstranění zbytku fotorezistu byla křemíková deska s drážkami použita jako předloha pro výrobu razítka z PDMS (Sylgard 184), které mělo být obtištěno do UV ftopolymeru OVD Varnish 311. Z důvodu technických problémů na používaných zařízeních a nedostatku času nebyl výrobní proces plně optimalizován. Prováděné depoziční testy ale prokázaly, že daný postup je pro výrobu optických jednovidových vlnodů velice nadějný a je předpoklad, že po další optimalizaci technologických kroků se podaří vyrobit jednovidové optické vlnovody s nízkým optickým útlumem.

Jako negativní fotorezisty sloužily epoxidové pryskyřice EpoCore a EpoClad. Klony EpoCore 50 a EpoClad 50 byly využity k výrobě mnohavidových planárních optických vlnodů s rozměrem jádra $50\ \mu\text{m}$. Zjednodušený postup výroby byl následující: na křemíkovou desku s vrstvou PVA (polyvinylalkohol) byl nanesen polymer EpoClad 50, po jeho vytvrzení na něj byl nanesen polymer EpoCore 50, na který byl pomocí laserového litografu zapsán požadovaný motiv. Neosvícený rezist byl odstraněn vývojkou. Nakonec byla nanesena plášťová vrstva polymeru EpoClad 50. Hotový vzorek byl vložen do DEMI vody, kde došlo k rozpuštění PVA a oddělení vzorku od Si podložky. Vzorky byly také řezány pomocí diamantové kotoučové pily (řezání provedeno ve firmě Tesla Blatná).

Výrobní proces se podařilo optimalizovat tak, že bylo dosaženo požadovaných rozměrů vlnodů. Tato optimalizace ale zabrala velké množství času, protože polymery jsou navrženy na vytvrzování jinou vlnovou délkou, než na které pracuje laserový litograf. Výrobce také neuvádí přesný postup teplotního vytvrzování. Pro měření optického útlumu po optimalizaci jednotlivých výrobních kroků byly vyrobeny pouze čtyři vzorky a u žádného se nepodařilo dosáhnout hodnot optického útlumu nižší než $1\ \text{dB}/\text{cm}$.

Podařilo se navrhnout a vyrobit mnohavidové vlnovody s velkým rozměrem jádra z biokompatibilních elastomerů pomocí technologie 3D tisku, kdy je proti výsledkům dosaženým v mojí bakalářské práci dosaženo menších útlumů kvůli optimalizovanému procesu výroby. Dále se podařilo ověřit vhodnost technologie LBW a DRIE v kombinaci s pozitivním fotorezistem pro výrobu jednovidových vlnodů, i když výroba nebyla z časových důvodů plně optimalizována. Podařilo se vyrobit mnohavidové vlnovody s požadovaným rozměrem jádra pomocí negativního fotorezistu s využitím technologie LBW, opět je ale potřeba další optimalizace výrobního postupu, než se podaří připravit vzorky s vysokou kvalitou a nízkým optickým útlumem.

9 Literatura

- [1] AGRELL, E., KARLSSON, M., CHRAPLYVY, A. R., RICHARDSON, D. J., KRUMMRICH, P. M., WINZER, P., ... & GISIN, N., (2016), *Roadmap of optical communications*. Journal of Optics, 18(6), 063002.
- [2] PRAJZLER, V., ZAVREL, J., (2021), *Large core optical elastomer splitter fabricated by using 3D printing pattern*. Opt Quant Electron 53, 337, <https://doi.org/10.1007/s11082-021-02980-2>.
- [3] KRUSE, K. L., (2015), *Multi-Mode And Single Mode Polymer Waveguides And Structures For Short-Haul Optical Interconnects*, disertační práce, Michigan Technological University, <https://doi.org/10.37099/mtu.dc.ets/977>.
- [4] WANG, S., VAIDYANATHAN, V., & BORDEN, B., (2009), *Polymer optical channel waveguide components fabricated by using a laser direct writing system*. Journal of Applied Science & Engineering Technology, 3.
- [5] ZAVREL J., (2019), *Návrh a realizace optických struktur z nových optických elastomerů*, bakalářská práce, Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, katedra mikroelektroniky.
- [6] SHABAHANG, S., KIM, S., & YUN, S. H., (2018), *Light-guiding biomaterials for biomedical applications*, Advanced functional materials, 28(24), 1706635.
- [7] NAZEMPOUR, R., ZHANG, Q., FU, R., & SHENG, X., (2018), *Biocompatible and implantable optical fibers and waveguides for biomedicine*. Materials, 11(8), 1283.
- [8] NOVOTNY, K., (1997), *Optická komunikační technika*, Praha: České vysoké učení technické v Praze. Skriptum, ČVUT, Fakulta elektrotechnická.
- [9] NERUDA M., (2016), *Optické planární vlnovody*, diplomová práce, Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, katedra mikroelektroniky.
- [10] SELVARAJA S. K. & SETHI P., (2018), *Review on optical waveguides*, Emerging Waveguide Technology, 95.
- [11] DLOUHY J. (2018), *Studium možnosti přípravy optických struktur pomocí technologie 3D tisku*, bakalářská práce, Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra mikroelektroniky.
- [12] KLAPUCH J. (2010), *Návrh nového polymerního optického vlnovodu*, bakalářská práce, Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra mikroelektroniky.
- [13] TZE YANG HIN, (2009), *Materials and processes to enable polymeric waveguide integration on flexible substrates*, disertační práce, Loughborough: Loughborough University.
- [14] V. PRAJZLER, P. HYPŠ, R. MASTERA, NEKVINDOVA P.,(2016), *Properties of Siloxane Based Optical Waveguides Deposited on Transparent Paper and Foil*, Radioengineering, VOL. 25, NO. 2.
- [15] DOW CHEMICALS, *Advanced Packaging Polymers*, datasheet, [online] [cit. 15.7.2021], Dostupné z: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjqqv6YieXxAhWR7aQKHZ8MBuIQFjAAegQIAhAD&url=https%3A%2F%2Fwww.micresist.de%2Fen%2F%3Fjet_download%3D4823&usq=AOvVaw1hv4Gxgb5UTfoduFfQ8rwU.

- [16] MICRO RESIST TECHNOLOGY GMBH, *EpoCore & EpoClad - Negative Tone Photoresist Series*, datasheet, [online] [cit. 15.7.2021], Dostupné z: https://kayakuam.com/wp-content/uploads/2019/09/PI_EpoCoreClad-1.pdf.
- [17] MICRO RESIST TECHNOLOGY GMBH, *OrmoClear®FX*, datashet, [online] [cit. 15.7.2021], Dostupné z: <https://www.microresist.de/en/produkt/ormoclearfx/>.
- [18] PRAJZLER, V., JASEK, P., & NEKVINDOVA, P., (2019), *Inorganic–organic hybrid polymer optical planar waveguides for micro-opto-electro-mechanical systems (MOEMS)*, *Microsystem Technologies*, 25(6), 2249-2258.
- [19] MICRO RESIST TECHNOLOGY GMBH, *OrmoCore and OrmoClad*, datasheet, [online] [cit. 15.7.2021], Dostupné z: https://ostecmaterials.ru/upload/iblock/Microresist%20Technology%20OrmoCore%20%2B%20OrmoClad_TDS_Eng.pdf.
- [20] PRAJZLER, V., CHLUPATY, V., (2020), *Epoxy polymer optical waveguide for micro-opto-electro-mechanical systems*, *Microsystem Technologies* 26, 3029–3035.
- [21] PRAJZLER, V., HYPŠ, P., MASTERA, R., & NEKVINDOVA, P., (2016), *Properties of siloxane based optical waveguides deposited on transparent paper and foil*, *Radioengineering*, 25(2), 230-235.
- [22] PRAJZLER, V., CHLUPATY, V., KULHA, P., NERUDA, M., KOPP, S., & MUHLBERG, M., (2021), *Optical Polymer Waveguides Fabricated by Roll-to-Plate Nanoimprinting Technique*, *Nanomaterials*, 11(3), 724.
- [23] NAWATA, H., (2013), *Organic-inorganic hybrid material for on-board optical interconnects and its application in optical coupling*. In 2013 3rd IEEE CPMT Symposium Japan (pp. 1-4). IEEE.
- [24] VICTOR, A., RIBEIRO, J. E., & ARAUJO, F. F., (2019), *Study of PDMS characterization and its applications in biomedicine: A review*, *Journal of Mechanical Engineering and Biomechanics*, 4(1), 1-9.
- [25] BRYDSON J.A., (1999), *26 - Epoxide Resins, Plastics Materials (Seventh Edition)*, Butterworth-Heinemann, ISBN: 9780750641326.
- [26] PRUSA RESEARCH S.R.O., *Original Prusa SL1*, [online] [cit. 19.4.2021], Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/original-prusa-sl1/>
- [27] PRUSA RESEARCH S.R.O., *Original Prusa i3 MK3S+*, [online] [cit. 19.4.2021], Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/original-prusa-i3-mk3/>
- [28] MOLEX, *Polymicro Optical Fiber datasheet*, [online] [cit. 20.4.2021], Dostupné z: https://www.molex.com/webdocs/datasheets/pdf/en-us/1068000063_OPTICAL_FIBER.pdf
- [29] DURHAM MAGNETO OPTICS, *MicroWriter ML®3 Pro*, [online] [cit. 20.4.2021], Dostupné z: <https://www.durhammagnetooptics.com/wp-content/uploads/2019/06/Microwriter- Plošné spoje a povrchová montáž. 1. vyd. Brno: Novotný. ISBN 9788021414990; 8021414995>
- [30] CHMELIK J., (2011), *Expozice negativního fotorezistu s využitím LED prvků*, bakalářská práce, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, ústav elektrotechnologie.
- [31] ROHM AND HAAS ELECTRONICS MATERIALS, *Microposit™ S1800™ G2 series photoresist datasheet*, [online] [cit. 21.4.2021], Dostupné z: https://www.nanophys.kth.se/nanolab/resists/S1813/Microposit_S1800_G2_Serie.pdf.

- [32] SENTECH, *ICP-RIE plasma etcher SI 500*, [online] [cit. 7.11.2021] Dostupné z: https://www.sentech.com/en/ICP-RIE-SI-500__262/.
- [33] DONNELLY, V. M., & KORNBLIT, A., (2013), *Plasma etching: Yesterday, today, and tomorrow*. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 31(5), 050825.
- [34] VASENKOV, A. V., LI, X., OEHRLEIN, G. S., & KUSHNER, M. J., (2004), *Properties of c-C₄F₈ inductively coupled plasmas. II. Plasma chemistry and reaction mechanism for modeling of Ar/c-C₄F₈/O₂ discharges*. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 22(3), 511-530.
- [35] LABELLE, C. B., DONNELLY, V. M., BOGART, G. R., OPILA, R. L., & KORNBLIT, A., (2004), *Investigation of fluorocarbon plasma deposition from c-C₄F₈ for use as passivation during deep silicon etching*. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 22(6), 2500-2507.
- [36] TESLA BLATNA, *Výrobní technologie*, [online] [cit. 14.11.2021], Dostupné z: <http://www.tesla-blatna.cz/cs/vyrobni-technologie.php>.
- [37] METRICON, *Model 2010/M Overview* [online]. [cit. 28.8.2021]. Dostupné z: <http://www.metricon.com/model-2010-m-overview/>.
- [38] ZAZVORKA J. (2018), *Výroba optických polymerních struktur pomocí nových technologií*, diplomová práce, Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektromagnetického pole.
- [39] SHIMADZU. UV-3600 Plus [online]. Kjóto, JP: Shimadzu corporation [cit. 2018-09-10]. Dostupné z: https://www.shimadzu.com/an/molecular_spectro/uv/uv-3600plus.html.
- [40] ALDEBARAN GROUP FOR ASTROPHYSICS, *Glosář Aldebaran – Absorpční koeficient pohlcení*, [online] [cit. 17.11.2021]. Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz/glossary/print.php?id=1566>.
- [41] KEYENCE, *Mikroskop s 3D laserovým skenováním*, [online] [cit. 28.10.2021], Dostupné z: <https://www.keyence.eu/cscz/products/microscope/laser-microscope/vk-x3000/>.