



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra mikroelektroniky

Návrh a realizace optických struktur z nových optických elastomerů

Design and realization of optical structures from new optical elastomers

Bakalářská práce

Jakub Zavřel

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Studijní obor: Aplikovaná elektronika

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

Praha 2019



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zavřel** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **457439**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektronika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh a realizace optických struktur z nových optických elastomerů

Název bakalářské práce anglicky:

Design and Realization of Optical Structures from New Optical Elastomers

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s teoretickými principy optických planárních vlnodů.
- 2) Seznamte se optickými elastomery používanými pro výrobu optických struktur.
- 3) Navrhněte optické vlnodů s velkým rozměrem jádra za použití dostupných nových optických elastomerů.
- 4) Navrhněte optické multivodové rozbočnice 1x2Y a 1x4Y z optických elastomerů.
- 5) Podílejte se na výrobě navržených struktur a jejich diagnostice.
- 6) Dosažené výsledky zhodnotte a shrňte do zprávy o rozsahu cca 50 až 70 stran.

Seznam doporučené literatury:

1. K. Novotný: Optická Komunikační Technika, skripta ČVUT 1998.
2. R. Maštera: Návrh optické planární mnohavidové výkonové 1x2 a 1x3 rozbočnice pro POF vlákna. Bakalářská práce ČVUT 2013.
3. M. Neruda: Návrh optické planární mnohavidové rozbočnice. Bakalářská práce ČVUT 2012.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

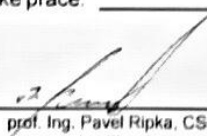
Datum zadání bakalářské práce: **06.09.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**


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


podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Pavel Ripka, C.Sc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

24.10.2018
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, rozbočnic a čas, jenž mi věnoval při konzultacích. Děkuji panu Ing. Jakobovi Hyblerovi za pomoc s vytvářením modelů pro 3D tisk a též paní doc. Ing. Pavle Nekvindové, Ph.D. z Vysoké školy chemicko-technologické v Praze za měření indexů lomu pomocí jednohranolové vidové spektroskopie.

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 2.1.2019

.....
Jakub Zavřel

Název práce: Návrh a realizace optických struktur z nových optických elastomerů

Autor: Jakub Zavřel

Katedra: Katedra mikroelektroniky

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

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

Abstrakt: Tato bakalářská práce je zaměřena na testování nových optických elastomerů a vývoj nových technologických postupů pro výrobu mnohavidových optických planárních vlnodů a 1x2Y výkonových optických rozbočnic s velkým rozměrem vlnovodné vrstvy. V první části práce je popsán princip šíření světla v planárních optických vlnovodech. V další části jsou shrnuty materiály používané k výrobě planárních optických vlnodů. Následuje návrh optických rozbočnic z vybraných nových elastomerů za pomoci specializovaného simulačního programu BeamPROP od firmy RSoft, který využívá k výpočtu metodu šíření optického svazku BPM (Beam Propagation Method). Z provedených návrhů byly vybrány k výrobě tři motivy 1x2Y a jeden 1x4Y motiv se substrátem PDMS (polydimethylsiloxan) a vlnovodnou vrstvou z materiálu PDMDPS (polydimethyldiphenyl-siloxan). Dále byly vyrobeny přímé vlnovody, které měly substrát z elastomeru PDMS a vlnovodná vrstva byla z elastomeru PDMDPS. Byly také prováděny deposiční testy, kde jako jádro byly testovány dva druhy čirého bezbarvého ftopolymeru NOA (Norland Optical Adhesive), které byly vytvrzeny pomocí UV záření. V další části předložené práce je uveden postup výroby planárních optických vlnodů a optických rozbočnic pomocí negativní předlohy vytištěné za pomoci 3D tiskárny. V poslední části jsou uvedeny změřené vlastnosti vyrobených optických struktur.

U přímých vzorků připojených na vstupu a výstupu zalitými POF vlákny (Plastic Optical Fiber) a z polymerů pro plášťovou vrstvu Sylgard 184 a jádro z polymeru NOA73 bylo dosaženo hodnot optického útlumu $0,73 \text{ dB/cm}$ pro vlnovou délku 532 nm , $0,72 \text{ dB/cm}$ pro vlnovou délku 650 nm a $0,93 \text{ dB/cm}$ pro vlnovou délku 850 nm (čísla vzorků 1157 a 1158). Podle provedených optimalizovaných návrhů byly vyrobeny rozbočnice 1x2Y s plášťovou vrstvou Sylgard 184 a vlnovodnou vrstvou LS6943, kde bylo dosaženo nejmenších hodnot vložného optického útlumu $1,63 \text{ dB}$ pro vlnovou délku 532 nm , $1,49 \text{ dB}$ pro vlnovou délku 650 nm a $1,88 \text{ dB}$ pro vlnovou délku 850 nm (pro vzorky číslo 1142 a 1143).

Klíčová slova: optická planární rozbočnice, mnohavidové optické planární vlnovody, optický útlum, 3D tisk, polymery

Title: Design and realization of optical structures from new optical elastomers

Author: Jakub Zavřel

Department: Department of Microelectronics

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

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

Abstract: This bachelor thesis focuses on testing new optical elastomers and developing new technological processes for fabrication of multimode planar optical waveguides and 1x2Y power splitters with large dimensions of waveguide layer. In the first part is described the principle of light propagation in planar structures. In the next part are summarised materials used for fabrication of planar optical waveguides. Next are introduced designs of planar optical splitters from new optical elastomers using specialised simulation software BeamPROP from RSoft company which uses the BPM (Beam Propagation Method) method for calculating. Subsequently three types of simulated 1x2Y and one 1x4Y optical splitters with PDMS (polydimethylsiloxane) substrate and PDMPDS (polydimethyldiphenylsiloxane) waveguide layer were chosen. Direct waveguides were also fabricated with PDMS (polydimethylsiloxane) substrate and PDMPDS (polydimethyldiphenylsiloxane). Measurements was also done for transparent colourless photopolymer NOA (Norland Optical Adhesive) as a waveguide layer which was cured by UV-light. In the next part of the submitted project is described the process of fabrication of planar optical waveguides and optical splitters using negative pattern printed on 3D printer. In the last part are given measured properties of fabricated optical structures.

Direct waveguides fabricated from Sylgard 184 (PDMS) as substrate and NOA73 as waveguide layer with attached input and output plastic optical fibres (POF) had optical loss $0,73 \text{ dB/cm}$ for wavelength 532 nm , $0,72 \text{ dB/cm}$ for wavelength 650 nm and $0,93 \text{ dB/cm}$ for wavelength 850 nm (sample number 1157 and 1158). According to optimized designs, 1x2 splitters with Sylgard 184 as substrate and LS6943 as waveguide layer were fabricated where the lowest optical insertion loss values of $1,63 \text{ dB}$ for wavelength 532 nm , $1,49 \text{ dB}$ for wavelength 650 nm and $1,88 \text{ dB}$ for wavelength 850 nm (sample number 1142 and 1143).

Keywords: optical planar splitter, multimode planar optical waveguides, optical loss, 3D print, polymer

Seznam symbolů a zkratek:

Symbol	Veličina	Jednotka
α	vložný optický útlum	[dB]
α_c	kritický úhel lomu	[°]
α_D	úhel dopadu	[°]
α_L	úhel lomu	[°]
α_O	úhel odrazu	[°]
A	optický útlum	[dB / cm]
A_v	vložný optický útlum	[dB / cm]
c	rychlost světla ve vakuu	[m / s]
h	šířka vlnovodné vrstvy	[m]
j	imaginární jednotka	[-]
Δn	rozdíl indexů lomu	[-]
Ω	úhel ramena od osy rozbočnice	[°]
k	vlnové číslo	[m ⁻¹]
λ	vlnová délka	[nm]
L	délka struktury	[mm]
L_{in}	délka vstupního vlnovodu	[μ m]
L_{out}	délka výstupního vlnovodu	[μ m]
L_p	délka referenčního přímého vlnovodu	[μ m]
L_{SBend}	délka „ohnuté části“ rozbočnice	[μ m]
L_{SBend1}	délka „ohnuté části“ první rozbočnice (1x4Y)	[μ m]
L_{SBend2}	délka „ohnuté části“ druhé rozbočnice (1x4Y)	[μ m]
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	[-]
p	normovaný optický výkon	[-]
p_{out}	normovaný výstupní optický výkon	[-]
P_{in}	vstupní optický výkon	μ W
P_{out}	výstupní optický výkon	μ W
P_{outP}	výstupní optický výkon delšího vzorku	μ W
φ_1	změna fáze 1. paprsku	[rad]
φ_2	změna fáze 2. paprsku	[rad]
R	činitel odrazu	[-]
T	činitel prostupu	[-]
v	rychlost světla v prostředí s indexem lomu n	[m / s]
w_{bet}	šířka mezi výstupními rameny rozbočnice	[μ m]
w_{bet1}	šířka mezi výstupními rameny druhé rozbočnice	[μ m]
w_{bet2}	šířka mezi výstupními rameny dvou sousedních rozbočnic (1x4Y)	[μ m]
w_{in}	šířka vstupního vlnovodu rozbočnice	[μ m]
w_{out}	šířka výstupního vlnovodu rozbočnice	[μ m]

Seznam symbolů a zkratek (pokračování):

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
CVD	Chemical Vapor Deposition	chemická depozice z plynné fáze
NOA	Norland Optical Adhesive	označení UV polymerů
PDMS	Polydimethylsiloxane	polydimethylsiloxan
PDMDPS	Polydimethyldiphenylsiloxane	polydimethyldiphenylsiloxan
PFCB	Perfluorocyclobutyl Aryl Ether Polymer	perfluorocyclobutyl aryl ether polymer
PMMA	Polymethyl methacrylate	polymethyl methakrylát
POF	Plastic Optical Fiber	plastové optické vlákno
UV	Ultraviolet light	ultrafialové světlo

Obsah

1	Úvod	2
2	Princip optických planárních vlnovodů	3
3	Materiály pro optické planární vlnovody	6
3.1	Polovodiče	6
3.2	Optická skla a optické krystaly	7
3.3	Polymerní materiály	9
4	Návrh struktur	13
4.1	Teoretický návrh mnohavidové optické rozbočnice	13
4.2	Metoda šíření optického svazku.....	14
4.3	Návrhy optických rozbočnic	16
4.3.1	Návrhy A: rozbočnice Sylgard 184 / LS6943	16
4.3.2	Návrh B: rozbočnice Sylgard 184 / LS6946	20
4.3.3	Návrh C: rozbočnice LS6941 / LS6943	20
4.3.4	Návrh D: rozbočnice LS6941 / LS6946.....	21
4.3.4	Návrh E: rozbočnice LS6941 / Sylgard 184	22
5	Výroba vybraných struktur	24
6	Diagnostické metody	29
6.1	Měření indexu lomu	29
6.2	Měření transmisních spekter	29
6.3	Měření drsnosti povrchu	30
6.4	Měření optického útlumu	31
7	Výsledky měření	34
7.1	Optická kontrola vytištěných motivů	34
7.2	Optická kontrola realizovaných vzorků	36
7.3	Měření indexů lomu použitých materiálů	42
7.4	Měření transmisních spekter	43
7.5	Měření drsnosti povrchu	44
7.6	Měření optického útlumu	49
8	Závěr	56
9	Literatura	58
	Příloha: Seznam vzorků	60

1 Úvod

V moderních telekomunikačních sítích se používá k přenosu dat optický signál vedený pomocí optických vláken. Jejich výhodou proti metalickému vedení je výrazně vyšší přenosová rychlost a vyšší spolehlivost, protože optický signál je odolný vůči elektromagnetickému rušení. Další nespornou výhodou je nižší hmotnost. Na delší vzdálenosti se pro přenos dat používají především křemenná optická vlákna, na kratší metalická vedení, která jsou v současnosti nahrazována plastovými vlákny POF (Plastic Optical Fiber). Jejich výhodou oproti křemenným vláknům je především snazší manipulace a nižší cena. Nevýhodou je vyšší optický útlum. Na nejkratší vzdálenosti (v řádu centimetrů) mají využití planární optické vlnovody. Ty se používají především v datových centrech, superpočítačích a dalších vysokorychlostních aplikacích.

Jednou ze základních optických struktur je optická rozbočnice, která díky své geometrické stavbě dokáže rozdělit výkon v požadovaném poměru. V integrované optice se používají jako základní konstrukční materiály polovodiče, optická skla a optické krystaly. Technologické procesy používané pro jejich výrobu jsou ale náročné, drahé a neekologické. Z těchto důvodů se hledají jiné materiály pro integrované optické struktury. Jedním z nových perspektivních materiálů jsou polymery, které jsou levnější, mají vhodné vlastnosti a výroba struktur je s nimi výrazně jednodušší. Polymerní vlnovody lze použít nejenom na vlnových délkách, kde jsou dnes běžně provozovány optické komunikační systémy („telekomunikační okna“ 830, 1300, 1500 nm), při nichž mají křemenné vlnovody nejlepší vlastnosti, ale výhodou může být, že se vlnová délka optického signálu může přesunout do viditelného spektra (například na vlnové délky 532 nebo 650 nm), kde lze použít levnější optické vysílače a přijímače.

Tato bakalářská práce navazuje na bakalářskou práci R. Maštery *Návrh optické planární mnohavidové výkonové 1x2 a 1x3 rozbočnice pro POF vlákna, 2013 ČVUT* [1], a diplomovou práci J. Zázvorky *Výroba optických polymerních struktur pomocí nových technologií, 2018 ČVUT* [2], kde byly navrženy rozbočnice 1x2Y především pro polymery NOA (Norland Optical Adhesive), jejichž výroba probíhala pomocí negativní formy, která byla vyrobena pomocí metody CNC gravírování.

Předložená bakalářská práce je zaměřena na návrh a výrobu velkopřůměrových optických vlnovodů a rozbočnic. K výrobě struktur byly použity negativní předlohy vyrobeny pomocí metody 3D tisku. Technologie 3D tisku je nový a jednoduchý přístup k výrobě forem (popřípadě přímo optických struktur), který by mohl být v budoucnu velice výhodně využíván. Jako materiál k výrobě forem byl použit materiál akrylonitrilbutadienstyren (ABS-T). Jako materiály k výrobě optických struktur byly použity nové elastomery ze skupiny polydimethylsiloxanů (PDMS), které mají vyšší mechanickou a tepelnou odolnost než standardně používané polymery pro integrovanou optiku a fotoniku.

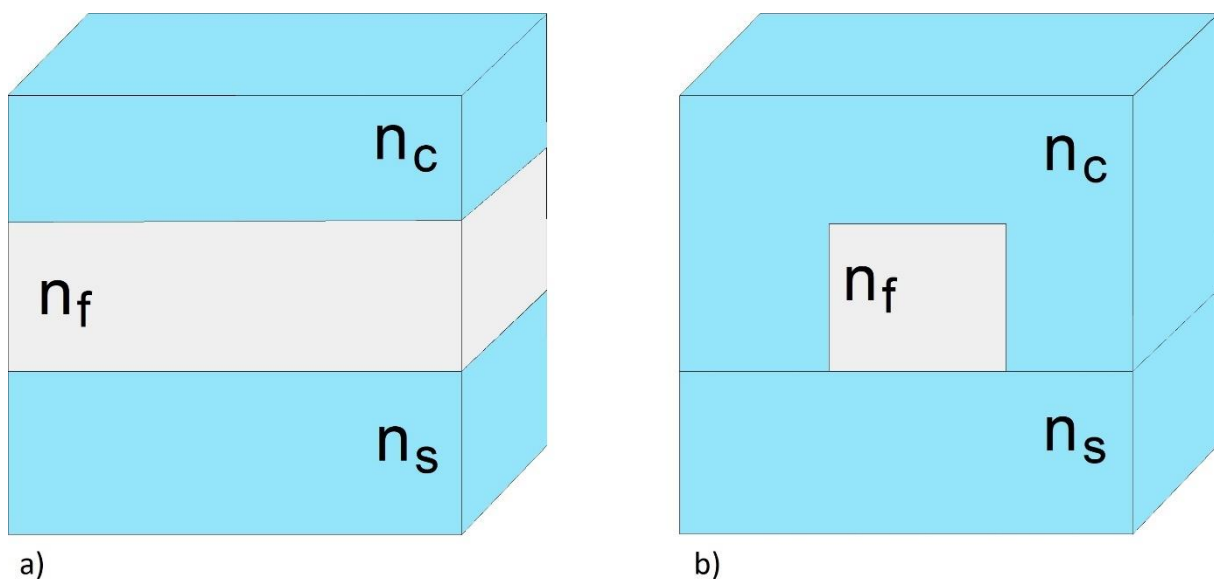
2 Princip optických planárních vlnovodů

Optický vlnovod je prostorové a materiálové uspořádání, které umožňuje vedení elektromagnetických vln v požadovaném směru s minimálními ztrátami. Struktury jsou obvykle tvořeny materiály s různými dielektrickými vlastnostmi (s různými indexy lomu) [3].

Planární vlnovody jsou jedním ze dvou základních typů vlnovodů používaných v optických komunikacích. Používají se pro přenos dat na velmi krátké vzdálenosti, v řádech jednotek centimetrů. Jejich vlnovodná struktura je vytvořena na rovinné plošce. Používají se především v datových centrech, superrychlých počítačích a v prvcích pro ovládání a distribuci optických signálů (modulátory, děliče, atd.).

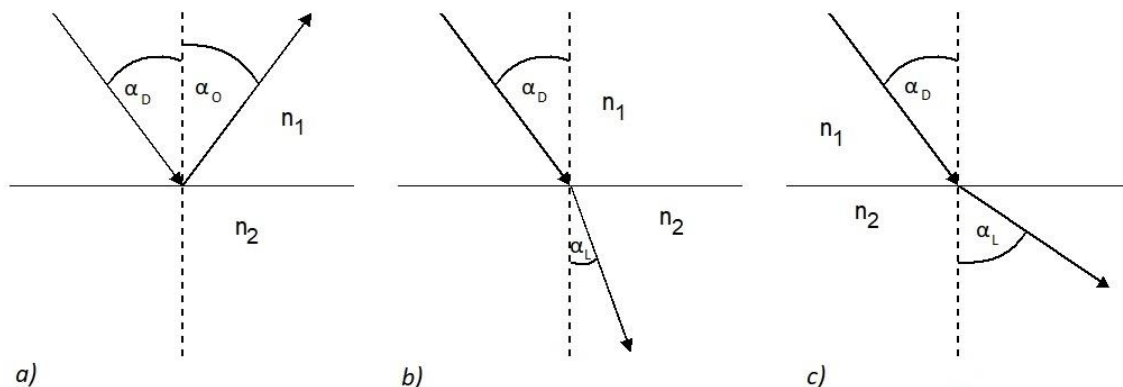
Planární optický vlnovod je tvořen podložkou (destičkou), která je označována jako podložka (substrát), a má index lomu n_s . Na tu se poté nanáší vlnovodná vrstva (jádro vlnovodu) s indexem lomu n_f a na ni obvykle ještě krycí vrstva s indexem lomu n_c , která může mít buď pouze ochrannou funkci, anebo vytváří požadované vlastnosti vlnovodné struktury.

Možné rozložení indexů lomu ve struktuře je znázorněno na obrázku 2.1. 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. Obr. 2.1b znázorňuje rozložení indexů lomu pro 3D strukturu vlnovodu, jehož všechny rozměry jsou omezeny.



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

Vedení světla v optických planárních vlnovodech probíhá na principu totálního odrazu, který lze vyjádřit Snellovým zákonem (viz obr. 2.2) [3, 4, 5]. Ten popisuje chování paprsku na rozhraní dvou prostředí s různými indexy lomu. Může docházet k odrazu (obr. 2.2a), kdy se dopadající paprsek odrazí se stejným úhlem jako dopadl, nebo k lomu, a to takzvaně ke kolmici (obr. 2.2b), 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), kdy paprsek prochází z hustšího do řidšího prostředí.



Obr. 2.2: Snellův 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:

$$\frac{\sin \alpha_D}{\sin \alpha_L} = \frac{n_1}{n_2} \quad (1)$$

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 :

$$n = \frac{c}{v} \quad (2)$$

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 planárních 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.

Fáze paprsků se při průchodu vlnovodem neustále mění: plynule se vzdáleností a skokově při odrazu. Z toho vyplývá druhá podmínka, která se nazývá Fázová podmínka. Tu lze vysvětlit pomocí dvou paprsků ze stejné vlnoplochy [3, 4] (viz obr. 2.3) (vlnoplocha je plocha se stejnou fází ve všech jejích bodech). Paprsek 1 se při průchodu vlnovodem do uvažované vlnoplochy odrazí (vlnoplochy jsou v obrázku vyznačeny čárkovaně, uvažovaná vlnoplocha je mezi body B a D), zatímco paprsek 2 do ní dojde bez odrazu. Aby se vytvořila vlnoplocha, musí být rozdíl jejich fází roven celočíselnému násobku 2π :

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 2\pi m \quad (3)$$

Kde φ_1 a φ_2 jsou změny fáze paprsku 1 a 2 během šíření a m je celé číslo. Fázi prvního paprsku lze zapsat jako:

$$\varphi_1 = kn_f \overline{AB} + \phi_{fc} + \phi_{fs} \quad (4)$$

Kde \overline{AB} je vzdálenost, kterou urazí paprsek 1, ϕ_{fc} je fázový posun způsobený odrazem na rozhraní vlnovodné vrstvy s krycí vrstvou, ϕ_{fs} je fázový posun způsobený odrazem na rozhraní vlnovodné vrstvy se substrátem a k je vlnové číslo:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (5)$$

Kde λ je vlnová délka zdroje záření. Paprsek 2 postupuje přímo, tudíž nedochází k odrazu a změna jeho fáze je tedy:

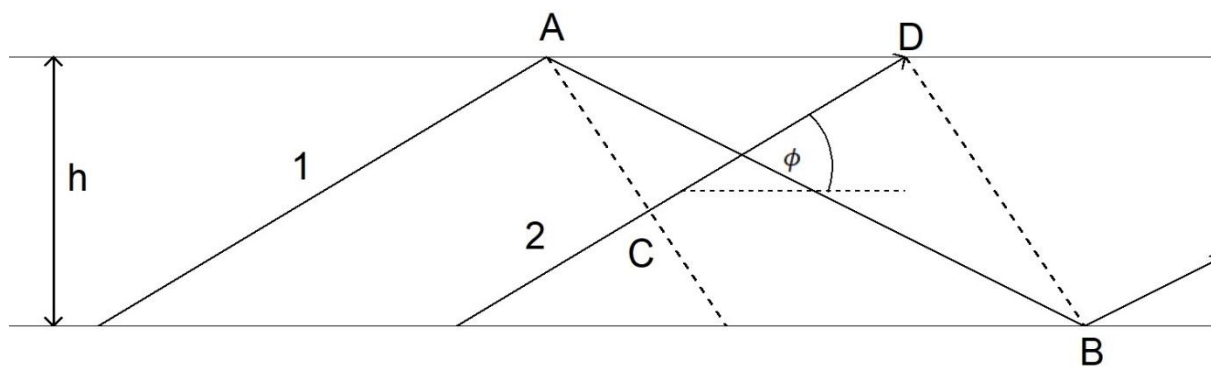
$$\varphi_2 = kn_f \overline{CD} \quad (6)$$

Vzdálenosti \overline{AB} a \overline{CD} spočítáme z geometrie:

$$\overline{AB} = \frac{2h}{\sin\phi} \quad (7)$$

$$\overline{CD} = 2h \left(\frac{1}{\sin\phi} - 2\sin\phi \right) \quad (8)$$

Kde h je šířka vlnovodné vrstvy a ϕ je úhel mezi paprskem a středem vlnovodu.



Obr. 2.3: Fázová podmínka [3].

3 Materiály pro optické planární vlnovody

Pro planární optické vlnovody se používají různé materiály. Hlavními kritérii pro jejich hodnocení jsou jejich optické vlastnosti, které jsou závislé na vlnové délce, což je především optický útlum a index lomu. Dalšími kritérii jsou samozřejmě jejich mechanické vlastnosti, jako je pevnost, hmotnost, pružnost, teplotní a časová stálost a další. Velmi důležitá je také jejich chemická stálost a náročnost výroby, kde se berou v potaz ekonomické i ekologické aspekty.

Konvenční materiály pro optické planární vlnovody jsou na bázi polovodičů, kvůli jednoduché integraci s ostatními optickými prvky a kompatibilním technologickým procesům s ostatními polovodičovými technologiemi na bázi *Si* a dalších polovodičů, jako např. *InP*, *GaAs* nebo *GaN*. Proto je vhodné realizovat planární optické vlnovody především na křemíkových podložkách. Nevýhodou polovodičů je ale komplikovaný postup jejich výroby, křehkost a neohebnost.

Dalším typem materiálů používaným pro optické planární vlnovody jsou optická skla a krystaly. Výroba integrovaných optických struktur z těchto materiálů je, ale také technicky náročná.

Z těchto důvodů jsou hledány nové materiály, které by tyto nedostatky odstranily. Jedním z možných řešení jsou nové polymerní materiály, které mohou mít vhodné vlastnosti, jako nízký optický útlum, dobrou teplotní stálost, skvělou ohebnost a pružnost. Polymerní materiály mohou být použity i ve viditelném spektru, nejen v dnes převážně používaném infračerveném pásmu, kde mají nízký útlum křemenné (*SiO₂*) vláknové optické vlnovody [6, 7].

3.1 Polovodiče

Polovodiče se v optoelektronice používají především jako detektory a zdroje záření. Je u nich důležitá především jejich čistota a pravidelnost krystalové mřížky stejně jako vlnová délka, kterou jsou schopné detekovat nebo emitovat. V planárních technologiích se používají také především jako substráty pro uložení vlnovodu (ve formě desek), ale i přímo jako vlnovody [8, 9].

Mezi polovodiče používané především jako aktivní prvky (zdroje optického signálu, detektory, modulátory, filtry, ...) patří indium fosfid (*InP*). Jeho výroba je složitá a drahá. Další nevýhodou je jeho křehkost. Používá se především tam, kde je kvůli svým vlastnostem nenahraditelný (v aktivních prvcích). Jeho mřížková konstanta je srovnatelná s mřížkovou konstantou materiálů ve složení $In_xGa_{1-x}As_{1-y}P_y$ pro vlnové délky 1000 – 1700 nm. Lasery z tohoto materiálu jsou preferované pro optické komunikace [9].

Další polovodič, používaný především v aktivních prvcích, je galium arsenid (*GaAs*). Používá se pro výrobu laserů o vlnových délkách 750 – 905 nm, společně s *InP*, dále také pro výrobu vysokorychlostních nízkonapěťových modulátorů [9].

Pro planární vlnovody se z polovodičových materiálů používají především materiály na bázi křemíku. Jednou z používaných z technologií je křemíková podložka s vrstvou *SiO₂* (*silica on silicon*). Křemík je použit jako substrát. Na něm se nechají vyrůst krystaly *SiO₂* pomocí chemické depozice z plynné fáze (chemical vapor deposition, CVD), termické oxidace, nebo pomocí hydrolýzy plamenem. Všechny způsoby výroby jsou časově náročné a vyžadují vysoké teploty. Po vytvoření vrstvy *SiO₂* vzniká mezi substrátem a vrstvou mechanické napětí, které může být částečně kompenzováno vytvořením stejné vrstvy *SiO₂* na druhé straně substrátové desky. To ale prodlužuje proces výroby a napětí není úplně vykompenzováno, struktura má poté polarizační závislost a ztráty disperzí, které mohou být zmenšeny vyleptáním drážek (žebrová nebo pásková struktura) [9].

Další technologie pro planární vlnovody využívající křemík je SOI – *silicon on insulator* (česky „křemík na izolátoru“). Je náhradou za technologii *silica on silicon*, má rychlejší proces výroby. Základní surovina je křemíková deska s vrstvou SiO_2 s vyleptaným motivem [9].

Technologie označovaná jako *silicon oxinitride* ($SiON$) využívá jako plášťovou vrstvu SiO_2 a v jádře vlnovodu je možné měnit zastoupení SiO_2 a Si_3N_4 podle požadovaného indexu lomu (rozdíl indexů lomu Δn jde měnit až o 30 %, což je největší přednost této technologie). S rostoucím rozdílem indexů lomu ale roste také útlum (pro jádro z SiO_2 je 0,1 dB/cm). Výroba probíhá pomocí nízkotlaké CVD, nebo CVD s pomocí plazmy [9].

V tabulce 3.1 jsou shrnuty nejdůležitější vlastnosti zmíněných polovodičových materiálů, a to jejich index lomu (pro vlnovou délku 1550 nm), optický útlum, rozsah možné změny rozdílu indexů lomu a jejich využití.

Tab. 3.1: Vlastnosti vybraných polovodičů, indexy lomu jsou pro vlnovou délku 1550 nm [9].

Název materiálu	Chemický vzorec	Optický útlum [dB / cm]	Index lomu [-]	Rozsah Δn [%]	Využití
Indium fosfid	InP	3	3,1	0 - 3	aktivní i pasivní komponenty
Gallium arsenid	$GaAs$	0,5	3,3737	0 - 14	aktivní i pasivní komponenty
silica on silicon	SiO_2/Si	0,1	1,44 - 1,47	0 - 1,5	aktivní i pasivní komponenty
SOI (silicon on insulator)	Si	0,1	3,4757	0	pasivní komponenty
Silicon oxinitride	SiO_xN_y	0,1	SiO_2 : 1,44 - 1,47 Si_3N_4 : 1,9905	0 - 30	pasivní komponenty

3.2 Optická skla a optické krystaly

Optická skla a optické krystaly jsou základní prvky využívané v optice. Optická skla se používají buď objemová, a to jako čočky nebo hranoly, kde lze pomocí jejich geometrického tvaru upravit, jak budou interagovat s dopadajícím světlem (jestli ho odrazí, rozloží, nebo propustí jen určitou vlnovou délku (zde se používá tenkých vrstev), anebo přímo jako optické vlnovody [6, 8].

Optická skla

Optická skla se vyrábí zchlazením roztaveného materiálu. Pro aplikaci jako optická vlákna se využívá při výrobě i plynné fáze pro dosažení maximální čistoty. Nejběžnější jsou silikátová skla, používají se ale také například fosfátová, germanitá nebo chalkogenidová skla. Nejčastěji se ale v optických vlnovodech používá přímo čisté křemenné sklo (jako jádro vlnovodů) [6, 10].

Silikátová skla jsou nejrozšířenější. Jedná se o křemenná skla, jejichž základem je SiO_2 a do kterých se mohou přidávat různé modifikátory jako Na , K , Ca , CaO , MgO , Zn , atd. Tím je možno významně ovlivnit jejich vnitřní strukturu a tím i výsledné fyzikálně chemické vlastnosti. Silikátová skla mají vysokou chemickou odolnost, vysokou transparentnost pro UV záření a silnou tepelnou odolnost [10].

Fosfátová skla mají základ v P_2O_5 a jako modifikátory se používají především Li , Na , Ca , Ba a Pb . Mezi jejich hlavní vlastnosti patří transparence v širokém pásmu vlnových délek a nízké hodnoty indexu lomu a disperze. Dalšími výhodami jsou nízké tavicí teploty, biokompatibilita, dobrá tepelná a mechanická stabilita. Jejich nevýhodou je jejich chemická nestabilita a hygroskopické chování [10].

Germaničitá skla mají jako základní stavební prvek GeO_2 a jako nejčastější příměsi se používají PbO , BaO , GaO nebo BaF_2 . Jejich výhodou je dobrá chemická, mechanická a tepelná odolnost podobně jako u silikátových skel. Germaničitá skla mají ale mnohem nižší fononovou absorpci než skla silikátová, fosfátová či boritá, což zvyšuje efektivitu luminiscence pro prvky vzácných zemin a efektivitu upkonverze z infračervené do viditelné oblasti spektra. Navíc vynikají v porovnání se silikátovými skly mnohem vyšší transmisí v infračervené oblasti, nižší tavicí teplotou a vysokou rozpustností prvků vzácných zemin, díky čemuž je vhodné je použít pro výrobu optických vláken s velmi nízkými ztrátami při přenosu signálu. Další výhodou je vysoký index lomu [10].

Telluričitá skla mají jako základní stavební prvek TeO_2 a jako příměsi se používají B_2O_3 , ZnO nebo Bi_2O_3 . Proti ostatním typům skel mají velmi vysoký index lomu (vyšší než 2), nízkou teplotu skelné transformace, vyšší hustotu, vysokou elektrickou vodivost a velmi dobrou mechanickou a chemickou odolnost. Oproti fosfátovým sklům nejsou hygroskopická [10].

Fluoridová skla mají dobrou transparentci v ultrafialové i infračervené oblasti (až do 8 μm). Jejich výroba je složitější a vyžaduje atmosféru bez přítomnosti kyslíku, aby se zamezilo oxidaci jednotlivých složek. Oproti ostatním druhům skel jsou méně chemicky odolná (nejsou odolná proti atmosférické vlhkosti a vodě) [10].

Chalkogenidová skla obsahují zejména prvky S , Se a Te , do kterých se přidávají Ge , As , Sb , Ga a další. Jsou použitelná v širokém spektru vlnových délek od viditelné až do infračervené oblasti (pro S do 12 μm , Se do 15 μm a pro Te až 20 μm). Chalkogenidová skla mají vysoké hodnoty indexu lomu (mezi 2,2 – 3,0) a velmi nízké optické ztráty. Unikátní vlastností chalkogenidových skel jsou takzvané fotoindukované efekty. Ozáření skla daného složení zářením o vhodných vlnových délkách lze iniciovat v těchto sklech krystalizaci, polymerizaci, rozpouštění kovů, dekompozici a další efekty. Oproti ostatním typům skel mají poměrně náročnou výrobu především kvůli požadavkům na jejich vysokou čistotu [10].

V tabulce 3.2 je uveden přehled typů optických skel společně s jejich nejčastějšími příměsemi a jejich speciálních vlastností.

Tab. 3.2: Přehled typů optických skel, jejich nejčastějších příměsí a jejich speciálních vlastností [10].

Typ skla	Typické příměsi	Speciální vlastnosti
Silikátové	Na , K , Ca , CaO , MgO , Zn	vysoká chemická odolnost, vysoká transparentnost pro UV záření a silná tepelná odolnost
Fosfátové	Li , Na , Ca , Ba a Pb	transparentce v širokém pásmu vlnových délek, nízké hodnoty indexu lomu a disperze, nízké tavicí teploty, biokompatibilita, dobrá tepelná a mechanická stabilita
Germaničité	PbO , BaO , GaO , BaF_2	dobrá chemická, mechanická a tepelná odolnost, vysoká transmise v infračervené oblasti, nižší tavicí teplota a vysoká rozpustnost prvků vzácných zemin
Telluričité	B_2O_3 , ZnO , Bi_2O_3	velmi vysoký index lomu (vyšší než 2), nízká teplota skelné transformace, vyšší hustota, vysoká elektrická vodivost, velmi dobrá mechanická a chemická odolnost
Fluoridové		dobrá transparentce v UV i IR oblasti (až do 8 μm)
Chalkogenidové	Ge , As , Sb , Ga	Použitelnost od viditelné a do IR oblasti, vysoké indexy lomu (2,2 – 3,0), velmi nízké optické ztráty, fotoindukované efekty

Optické krystaly

Optické krystaly jsou velká skupina látek používaných pro optické aplikace. Podle složení krystalů a jejich stavby, především druhu krystalické mřížky, se rozlišují druhy krystalů a jejich použití. Pro optické aplikace mají největší význam krystaly nelineární a magneto-opticky aktivní [8, 9].

Magneto-opticky aktivní materiály zahrnují různé krystaly a některá skla. Jsou používány pro vytváření jednosměrných optických komponentů, například optických izolátorů nebo optických cirkulátorů. Nejpoužívanější jsou krystaly s obsahem kovů, například $Y_3F_5O_{12}$ nebo $Tb_3Ga_5O_{12}$ [9].

Vlastností nelineárních (anizotropních) krystalů je jejich komplikovaná krystalová mřížka, která není ze všech pohledů stejná, tudíž u ní záleží na tom, ze kterého směru na ní dopadá světlo. Pokud světlo dopadá v optické ose krystalu, chová se stejně, jako když interaguje s izotropním krystalem. Pokud ale světlo dopadne ve směru odlišném od optické osy krystalu, nastává dvojlom (úhel řádného a mimořádného paprsku závisí na typu krystalu), který je způsoben různou rychlostí šíření světla v krystalu. Tyto krystaly jsou využívány k dělení světla na základě jeho polarizace. Patří sem například $CaCO_3$, $LiNbO_3$ nebo $LiTaO_3$ [9, 11].

V tabulce 3.3 je uveden přehled optických krystalů s jejich indexem lomu a spektrálním rozsahem, na kterém je možno je použít [8].

Tab. 3.3: Přehled optických krystalů, jejich index lomu s provozní spektrální rozsah [8].

Název	Chemický vzorec	Provozní spektrální rozsah [μm]	index lomu
Lithium niobát	$LiNbO_3$	0,42 - 5,20	2,300
Lithium tantalát	$LiTaO_3$		2,181
Lithium triborát	LiB_3O_5	0,16 - 2,60	1,576
Barium borát	BaB_2O_4	0,19 - 3,50	1,671
Vápenec	$CaCO_3$	0,35 - 2,30	1,658
Safír	Al_2O_3	0,15 - 5,50	1,768
Fluorit	CaF_2		1,434

3.3 Polymerní materiály

Polymerní materiály jsou relativně nová skupina materiálů pro optické aplikace. Jsou levné a snadno vyrobitelné, proto jsou intenzivně zkoumány, a jsou stále vyvíjeny nové polymery s požadovanými vlastnostmi (nízký optický útlum od viditelného do infračerveného pásma, snadná laditelnost indexu lomu, chemická a teplotní stálost, vhodné mechanické vlastnosti). Mezi další výhody patří možnost výroby vrstev, které nezpůsobují mechanické napětí na jakémkoliv substrátu a nízký negativní termo-optický koeficient (nízká výkonová ztráta na teplotně ovládaných prvcích). Rozdíl indexů lomu Δn se dá měnit až o 35 %, a dosahuje tím vysokých hodnot, takže se dá dosáhnout malých rozměrů struktur. Polymery lze dělit podle typu na akryláty, polykarbonáty, cyklo-olefin polymery, siloxany a mnoho dalších [7, 12].

Akryláty

Akryláty jsou polymery z akrylátových monomerů ($CH_2 = CHCOO^-$). Pro optické aplikace jsou nejdůležitější vysoko transparentní polymethyl methylakryláty (PMMA), které se používají především jako materiály pro jádra vlnodů, je možné je ale použít i jako krycí materiály nebo z nich vyrobit čočky. Index lomu PMMA je přibližně 1,49 a optický útlum 1 dB/m. Vazba C – H má velkou absorpci v infračerveném spektru, proto se vodík nahrazuje deuteriem nebo fluorem, což ale zvyšuje cenu polymeru. Výroba má dopad na životní prostředí a fluorované akryláty mají nízkou adhezi k mnoha ostatním materiálům [12].

Cyklo-olefin polymery

Cyklo-olefin polymery jsou určeny pro aplikace, kde je nárok na vysokou kvalitu polymeru. Jejich základem jsou co-polymery z ethylenu (CH_2CH_4) a cyklického olefinu (například nonbornan (C_7H_{10}) nebo cyklopenten ($CH = C_4H_7$)). Díky své struktuře neabsorbuje vlhkost, nezáleží u něj na směru šíření signálu, má vysokou odolnost vůči teplotě a nepodléhá vlivům prostředí [12].

Polyethery

Speciálně formulovaný polyether, který se používá pro vlnovody, je perfluorocyclobutyl aryl ether polymer (PFCB). Je to organická látka obsahující alkyl nebo aryl skupiny (aromatické funkční skupiny). Tento polymer nemá vazby, které výrazně absorbují záření (například $C - H$, $O - H$, $N - H$) [12].

Siloxany

Siloxany jsou polymery, které jsou založeny na vazbě $Si - O$ s uhlodíky. U těchto polymerů lze ovlivňovat vlastnosti změnou poměru atomů navázaných na Si : čím více je navázaných atomů kyslíku, tím více se vlastnosti polymeru blíží sklu a naopak, čím více je navázaných atomů uhlíku, tím více se látka chová jako polymer. Dále se dají vlastnosti jako teplotní koeficient, teplotní roztažnost nebo index lomu ovlivňovat pomocí vedlejších skupin navázaných na hlavní řetězec polymeru [12].

V tabulce 3.4 jsou uvedeny jednotlivé druhy polymerů společně s jejich nejdůležitějšími speciálními vlastnostmi.

Tab. 3.4: Druhy polymerních materiálů s jejich speciálními vlastnostmi [12].

Polymerní materiál	Speciální vlastnosti
Polykarbonáty	optická čistota, vysoká odolnost, nízká viskozita taveniny při vysokých teplotách, vysoký dvojlom
Polyimidy	Teplotní stálost ($300^\circ C$), vysoké ztráty v blízkém IR spektru, vysoký dvojlom
Polystyren	Aromatická struktura, dlouhý uhlodíkový řetězec, vysoký index lomu $n = 1,59$
Akryláty a polymethyl methakryláty (PMMA)	Možnost přizpůsobit vlastnosti, nízká teplotní stálost, nízká T_g , nízký dvojlom, vysoká fotosenzitivita
Polykarbonáty dotované deuteriem nebo halogeny	Výjimečný přenos světla v blízkém IR spektru, nízká T_g
Perfluorocyclobutyl (PFCB) akryl ether polymery	Vysoká teplotní stabilita ($T_g = 120 - 350^\circ C$), nízký optický útlum ($0,25 \text{ dB/cm}$) na 1310 nm a 1550 nm , nízký dvojlom
Cyklo-olefin polymery	Nízký dvojlom pod tlakem, nízká absorpce vlhkosti
Siloxany nebo silikony	Odolnost vůči nízkým i vysokým teplotám, vodě a oxidaci, nízká smrštitivost, bez rozpouštědel
Polydimethylsiloxan (PDMS)	Vysoká teplotní stabilita ($290^\circ C$), teplotní zesíťování

V tabulce 3.5 jsou uvedeny některé 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 fotonice, jako je nízký optický útlum, vysoká transparence pro viditelné a IR spektrum, dobrá časová a teplotní stabilita, jednoduchá výroba a nízká cena [7].

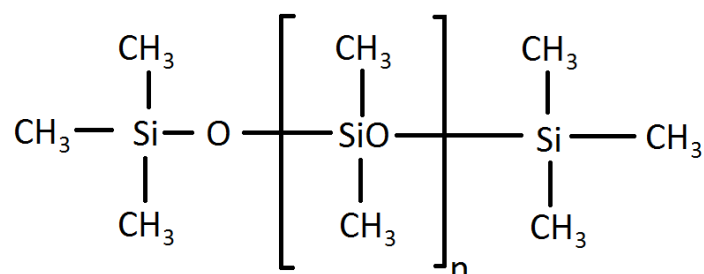
Tab. 3.5: *Druhy komerčně dostupných polymerů, jejich výrobci, optický útlum a index lomu [17].*

Typ polymeru	Výrobce	Optický útlum	Index lomu
Cyclic olefin copolymer	Topas Advanced Polymers company	0,5 dB/cm @830 nm 0,7 dB/cm @1550 nm	1,53
Cyclotone™	DOW Chemical	0,81 dB/cm @1300 nm	1,552 @633nm 1,537 @1310nm 1,535 @1550nm
Deuterated polymethylmethacrylate	NTT	0,02dB/cm @850 nm 0,07dB/cm @1310 nm	1,4886 @830 nm
EpoCore	micro resist technology GmbH	~0,2 dB/cm @850 nm	1,580 @850nm
Exguide™	FOWG series from Chemoptics Inc.	< 0,1 dB/cm @850 nm	1,547 @830nm
GuideLink™	Optical Crosslinks	~0,1 dB/cm @850 nm 0,35 dB/cm @1300 nm	1,505 @850 nm
OE-4140 UV	Dow Corning	0,04 dB/cm @850 nm	1,52 @850 nm
Ormocore	micro resist technology GmbH	0,1 dB/cm @633 nm 0,23 dB/cm @1310 nm 0,6 dB/cm @1550 nm	1,553 @635nm
Polyguide™	DuPont	0,08 dB/cm @800 nm 0,35 dB/cm @1300 nm	1,485 – 1,51
Truemode™	Exxelis	0,04 dB/cm @ 850 nm	1,57 @633nm
Ultradel 9120D	Amoco chemicals	0,34 dB/cm @850 nm 0,43 dB/cm @1300 nm	1,547 @850nm 1,535 @1550nm

Dále je uveden přesnější popis polymerů použitých v této práci k návrhu a výrobě optických struktur. Jedná se o polymery ze skupiny siloxanů, polydimethylsiloxan (PDMS) a jeho derivát polydimethyl-diphenylsiloxan (PDMDPS).

Polydimethylsiloxan (PDMS)

Jedná se o skupinu polymerních silikonů (patřících do skupiny siloxanů), jejich chemická struktura je zobrazena na obrázku 3.1. Tyto materiály jsou zdravotně nezávadné pro člověka i životní prostředí. V optických komunikacích se používají pro svůj nízký optický útlum, snadnou manipulaci a chemickou stálost. Za normálních podmínek jsou bez barvy a zápachu. Mají široké použití v průmyslu, především farmaceutickém, potravinářském, zdravotnictví buď přímo, nebo jako složka ovlivňující konečnou formu produktu (např. emulze) [13].



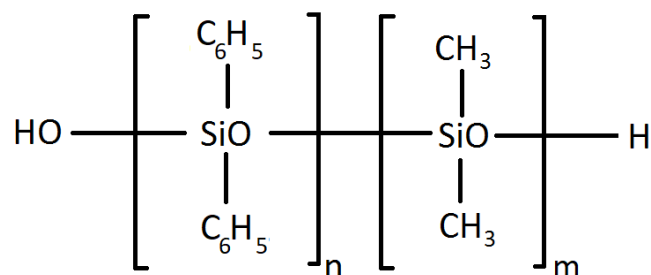
Obr. 3.1: *Chemická struktura polymerů PDMS [13].*

Při výrobě struktur navržených v této práci byl polymer PDMS použit jako krycí vrstva pod označením Sylgard 184 od výrobce Dow Corning dodaný firmou ELCHEMCo. Tento silikon je dodáván ve dvou složkách, které je nutné smíchat v poměru 1:10, vakuovat, čímž se odstraní bubliny vzniklé při smíchání

složek, a následně nechat vytvrdit. Index lomu pro tento materiál už byl měřen v rámci řešení diplomové práce pana Zázvorky *Výroba optických polymerních struktur pomocí nových technologií (2018)* [2] pomocí metody jednohranolové vidové spektroskopie a změřená hodnota indexu lomu je 1,4122 pro 650 nm.

Polydimethyldiphenylsiloxan (PDMDPS)

Jedná se o derivát polymeru PDMS, který vznikne přidáním diphenylsiloxanu do polymerní struktury. Jeho chemická struktura je zobrazena na obrázku 3.2. Přidání této skupiny vede v porovnání s PDMS ke snížení flexibility, ale ke zlepšení odolnosti proti vysoké teplotě, oxidaci, radiaci, zlepšení adheze k některým substrátům a dalších vlastností. Zvýší se také index lomu, který se pohybuje v rozsahu 1,43 – 1,46 [14].



Obr. 3.2: Chemická struktura polymeru PDMDPS [14].

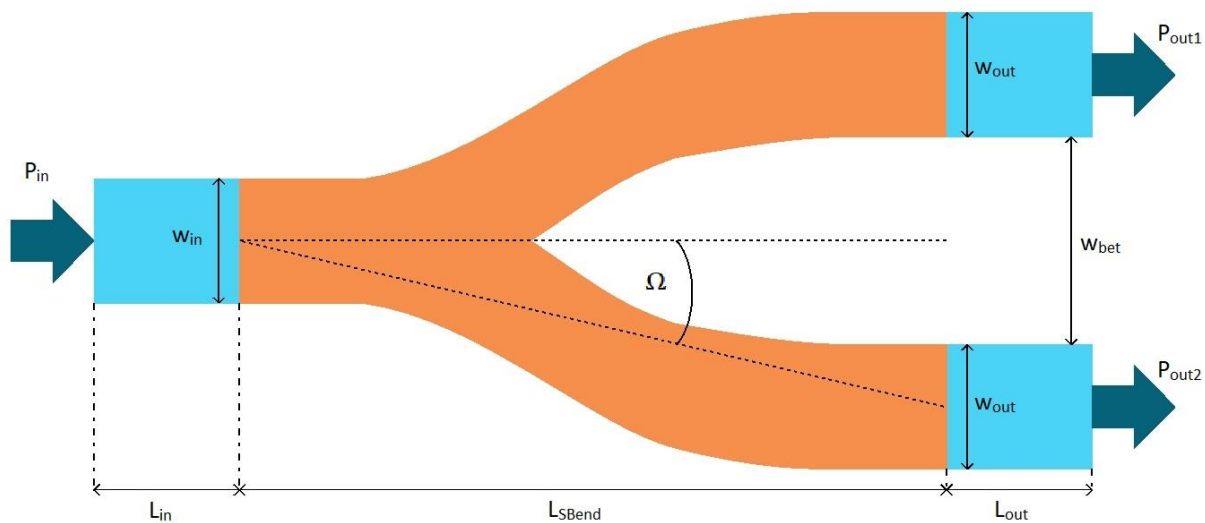
Při výrobě struktur navržených v této práci byl polymer PDMDPS použit jako vlnovodná vrstva pod označením LS6943 od výrobce NuSil dodaný firmou Azelis ČR. Tento silikon je dodáván ve dvou složkách, které je nutné smíchat v poměru 1:10, vakuovat, čímž se odstraní bubliny vzniklé při smíchání složek, a následně nechat vytvrdit. Index lomu pro tento polymer byl změřen v rámci této bakalářské práce a je 1,4289 pro 650 nm.

4 Návrh struktur

Návrh struktur jsem provedl pomocí počítačové simulace v programu BeamPROP od firmy RSoft, který využívá k výpočtům metodu šíření optického svazku (Beam Propagation Method (BPM), viz kap. 4.2). V kapitole 4.1 jsou popsány optimalizované parametry rozbočnice a v kapitole 4.2 je popsána metoda šíření optického svazku. Postup a návrh je uveden v kapitole 4.3 společně se seznamem navržených struktur.

4.1 Teoretický návrh mnohavidové optické rozbočnice

Návrh jsem prováděl pro optické rozbočnice 1x2Y, jejichž schéma je uvedeno na obrázku 4.1. Cílem je, aby se vstupní výkon P_{in} dělil přesně na polovinu ve výstupních vlnovodech, tzn. $P_{out1} = P_{out2}$. Při optimalizaci se hledají optimální rozměry rozbočnice, především úhel odklonu ramene Ω a délka ohnuté části L_{SBend} .

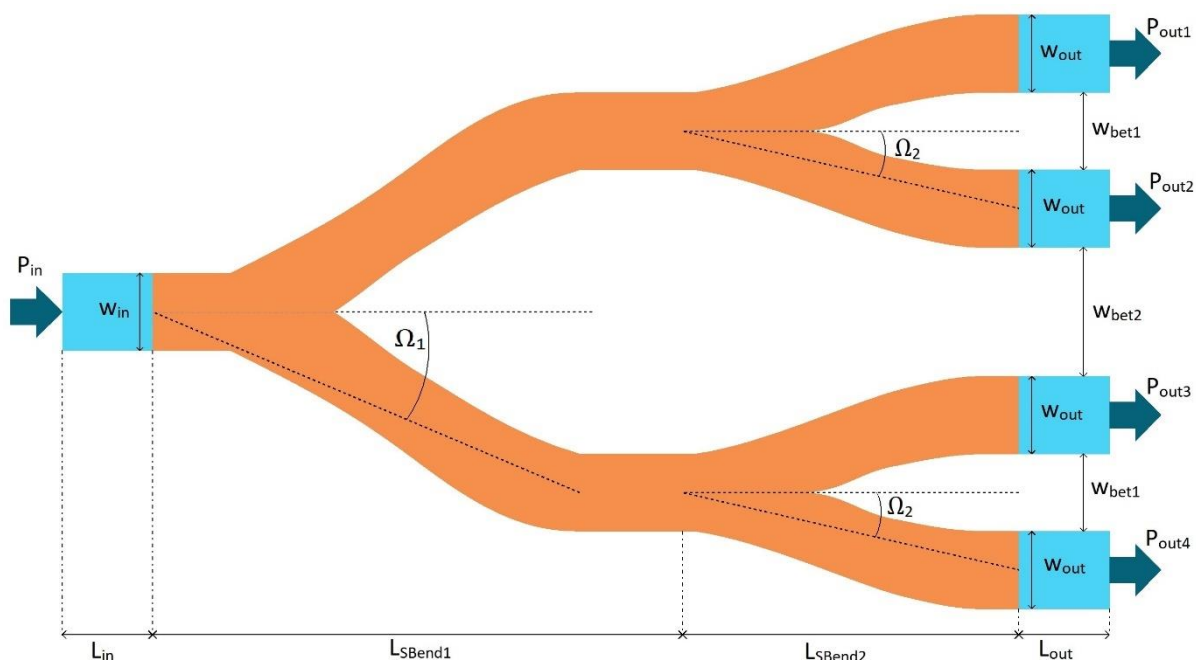


Obr 4.1: Schéma optické rozbočnice 1x2Y.

Na obrázku 4.2 je uvedeno schéma rozbočnice 1x4Y. Jedná se v podstatě o soustavu kaskádně sestavených rozbočnic 1x2Y, kde je samostatně navržena první rozbočnice a druhé dvě jsou identické. Pro tuto rozbočnici je ideální dělení výstupního výkonu přesně na čtvrtiny, tzn. $P_{out1} = P_{out2} = P_{out3} = P_{out4}$. Struktury byly navrženy a optimalizovány pro přívodní a výstupní optická vlákna s velkým průměrem, pro vlákna POF (Plastic Optical Fiber) 550, 660 a 1000 μm .

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2, vedení světla v planárních vlnovodech probíhá na principu totálního odrazu, to znamená, že při návrhu je snaha dosáhnout co nejmenšího úhlu Ω , aby docházelo k co nejmenším ztrátám na ohybu. Zároveň se snažíme dosáhnout co nejmenších rozměrů struktury, přesněji co nejmenší délky ohnuté části L_{SBend} , protože dochází k útlumu signálu na jednotku délky.

Při návrhu musí být brán zřetel na to, že se bude struktura reálně používat, tzn. že se na ní budou připojovat vstupní a výstupní optická vlákna, tudíž šířka mezi výstupními vlnovody w_{bet} (popřípadě w_{bet1} , w_{bet2}) musí být minimálně rovná w_{out} (tj. $w_{bet} \geq w_{out}$), aby bylo možno výstupní vlnovody připojit.



Obr 4.2: Schéma optické rozbočnice 1x4Y.

4.2 Metoda šíření optického svazku

Návrhy rozbočnic byly provedeny pomocí programu BeamPROP od firmy RSoft, který využívá pro simulaci průchodu světla vlnovodem metodu šíření optického svazku (Beam Propagation Method, BPM). Využívá k tomu metodu konečných diferencí pro řešení Helmholtzových vlnových rovnic v paraxiálním nebo parabolickém přiblížení [2, 4, 15].

Ve skalárním poli lze Helmholtzovu rovnici pro monochromatickou vlnu vyjádřit ve tvaru:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + k(x, y, z)^2 \varphi = 0 \quad (9)$$

Kde φ je proměnné elektromagnetické pole šířící se strukturou, x, y, z jsou prostorové souřadnice a k je vlnové číslo.

Pokud budeme uvažovat malé změny pole, lze jeho šíření ve směru osy z vyjádřit jako:

$$\varphi(x, y, z) = u(x, y, z)e^{j\bar{k}z} \quad (10)$$

Kde \bar{k} je referenční vlnové číslo a vyjadřuje střední změnu fáze v poli $\varphi(x, y, z)$.

S použitím rovnic 9 a 10 lze vyjádřit Helmholtzovu rovnici pro pomalu měnící se pole ve tvaru:

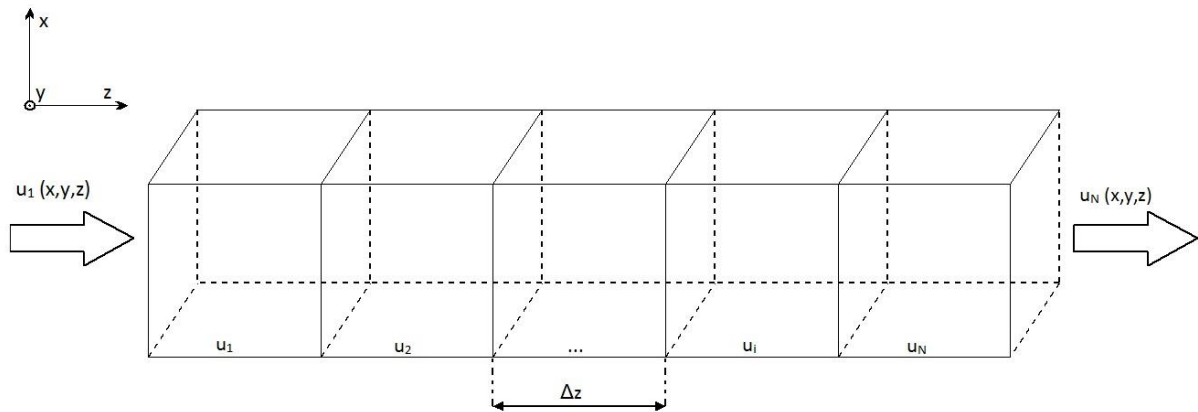
$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + 2jk \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + (k^2 - \bar{k}^2)u = 0 \quad (11)$$

Ke zjednodušení rovnice 11 se využije takzvané parabolické nebo paraxiální přiblížení, kdy můžeme zanedbat druhou derivaci u členu u podle souřadnice z , protože šířící se paprsky svírají s osou šíření velmi malý úhel a jedná se o pomalu měnící se pole. Takto získáme rovnici, která je základem pro metodu BPM ve 3D prostoru (řešení pro 2D prostředí je získáno zanedbáním závislosti na ose y):

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{j}{2k} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + (k^2 - \bar{k}^2)u \right) \quad (12)$$

Tato metoda přináší zjednodušení zejména výpočetní náročnosti (kvůli zanedbání druhé derivace může být rovnice řešena jednoduchou integrací) oproti řešení Helmholtzových rovnic číselně v základním tvaru. Nevýhodou tohoto přístupu je, že v důsledku zanedbání druhé derivace není možné s přijatelnou přesností řešit struktury s významnými odrazy, protože byla ztracena možnost řešit zpětné odrazy.

Program BeamPROP využívá k řešení rovnice 12 metodu konečných diferencí založenou na Crank-Nicholsonově schématu uvedeném na obrázku 4.3. V této metodě se vypočítá pole v následující diskrétní rovině u_{i+1} ze znalosti pole šířícího se ve směru osy z v diskrétní rovině u . Tento elementární krok se opakuje, dokud není vypočteno pole v celé struktuře.



Obr. 4.3: Crank-Nicholsonovo schéma [1, 4].

Crank-Nicholsonovo schéma je možné popsat vztahem:

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta z} = \frac{j}{2k} \left(\frac{\delta^2}{\Delta x^2} + \left(k(x_i, z_{n+1/2})^2 - k^2 \right) \right) \frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{2} \quad (13)$$

Kde δ^2 je standardní diferenční operátor určený vztahem:

$$\delta^2 u_i = (u_{i+1} + u_{i-1} - 2u_i) \quad (14)$$

4.3 Návrhy optických rozbočnic

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

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

$$\Delta n = n_f - n_s \quad (15)$$

Kde n_f je index lomu vlnovodné vrstvy a n_s je index lomu krycí vrstvy (substrátu).

Návrhy byly optimalizovány pro vlnovou délku 650 nm a pro připojení tří typů vláken s rozměrem jádra: $550, 660$ a $1000 \mu\text{m}$.

Seznam provedených návrhů je uveden v tabulce 4.1. Hodnoty indexů lomu použitých materiálů pro co nejpřesnější návrh byly měřeny pomocí metody popsané v kapitole 6.1, pouze index lomu pro materiál Sylgard 184 ($n = 1,4122$) byl převzat z diplomové práce pana Zázvoroky *Výroba optických polymerních struktur pomocí nových technologií (ČVUT 2018)* [2].

Tab. 4.1: Seznam provedených návrhů rozbočnic ($\lambda = 650 \text{ nm}$).

Označení návrhu	Materiál podložky	Materiál jádra	n_s [-]	n_f [-]	Δn [-]	Rozměr jádra [μm]
A1	Sylgard 184	LS6943	1,4122	1,4289	0,0167	550
A2	Sylgard 184	LS6943	1,4122	1,4289	0,0167	660
A3	Sylgard 184	LS6943	1,4122	1,4289	0,0167	1000
A4 (1x4)	Sylgard 184	LS6943	1,4122	1,4289	0,0167	1000
B	Sylgard 184	LS6946	1,4122	1,4631	0,0509	1000
C	LS6941	LS6943	1,4088	1,4289	0,0201	1000
D	LS6941	LS6946	1,4088	1,4631	0,0543	1000
E	LS6941	Sylgard 184	1,4088	1,4122	0,0034	1000

4.3.1 Návrhy A: rozbočnice Sylgard 184 / LS6943

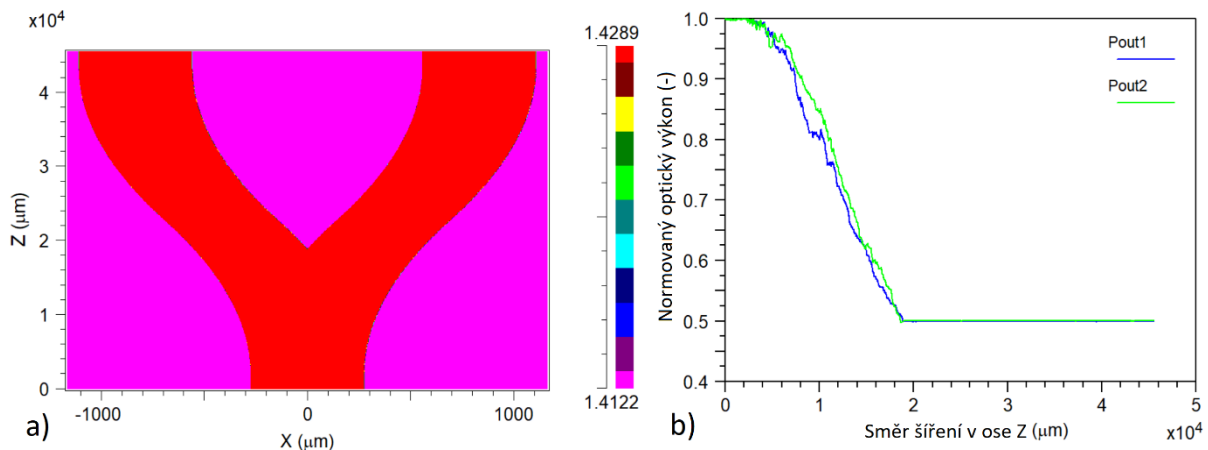
Nejdříve jsem navrhl struktury pro elastomery Sylgard 184 (index lomu $1,4122$ pro vlnovou délku 650 nm) jako krycí vrstvu a LS6943 (index lomu $1,4289$ pro vlnovou délku 650 nm) jako vlnovodnou vrstvu.

Rozdíl indexů lomu pro tuto kombinaci materiálů je relativně malý ($\Delta n = 0,0167$), což má za následek velkou 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 L_{SBend} rozbočnice a poté byl krok zjemněn pro dosažení přesnějšího návrhu a nalezení optimálních rozměrů. Délka vstupního a výstupních vlnovodů byla zvolena 2 mm .

Návrh A1: Rozbočnice 1x2Y Sylgard 184 / LS6943 $w = 550 \mu\text{m}$

Na obrázku 4.4a je uveden profil indexů lomu z programu BeamPROP pro rozbočnici 1x2Y s optimalizovanými rozměry a na obrázku 4.4b je graf závislosti normovaného optického výkonu na vzdálenosti ve směru šíření optického signálu strukturou. Počítačový návrh ukázal, že nejlepší

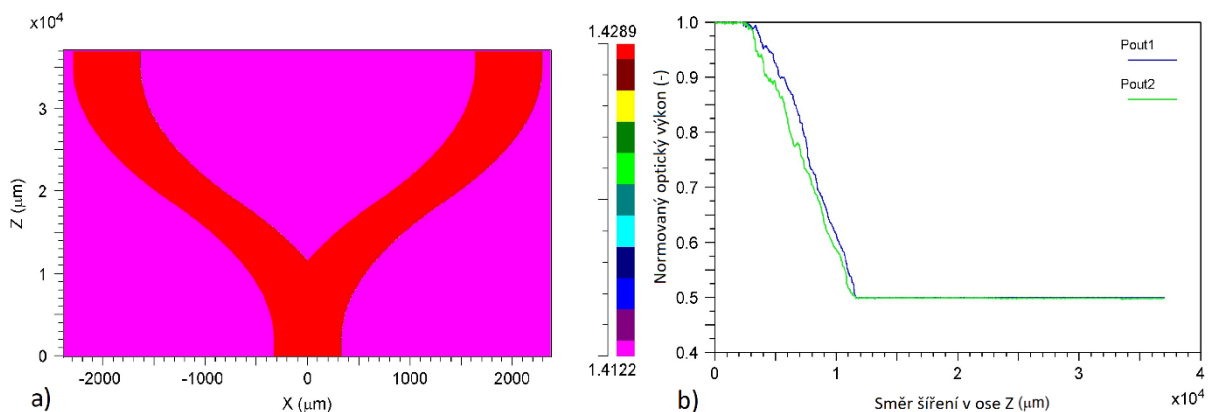
výsledků je dosaženo pro úhel $\Omega = 1,04^\circ$ a délku rozbočnice $L_{SBend} = 38 \text{ mm}$. Výstupní výkon je rozdělen v poměru 50,02 : 49,95 %.



Obr. 4.4: *Návrh rozbočnice 1x2Y Sylgard 184 / LS6943 ($\lambda = 650 \text{ nm}$, $n_f = 1,4289$, $n_s = n_c = 1,4122$)
 $w = 550 \mu\text{m}$
a) rozložení indexu lomu ve 2D struktuře pro optimalizovaný návrh ($\Omega = 1,04^\circ$ a $L_{SBend} = 38 \text{ mm}$),
b) závislost normovaného optického výkonu na vzdálenosti ve směru šíření optického signálu.*

Návrh A2: Rozbočnice 1x2Y Sylgard 184 / LS6943 $w = 660 \mu\text{m}$

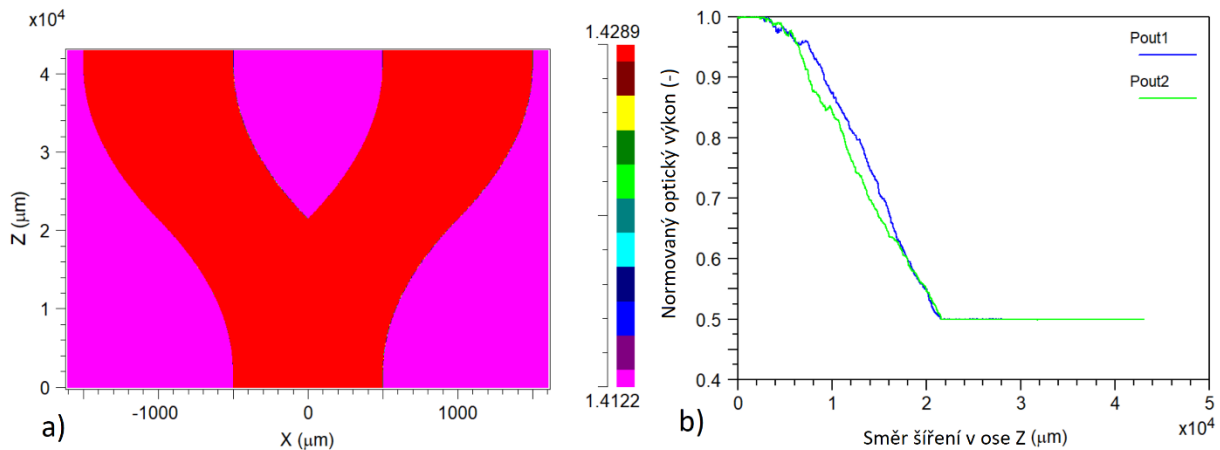
Na obrázku 4.5a je uveden profil indexů lomu z programu BeamPROP pro rozbočnici 1x2Y s optimalizovanými rozměry a na obrázku 4.5b je graf závislosti normovaného optického výkonu na vzdálenosti ve směru šíření optického signálu strukturou. Počítačový návrh ukázal, že nejlepších výsledků je dosaženo pro úhel $\Omega = 3,4^\circ$ a délku rozbočnice $L_{SBend} = 33 \text{ mm}$. Výstupní výkon je rozdělen v poměru 49,96 : 49,84 %.



Obr. 4.5: *Návrh rozbočnice 1x2Y Sylgard 184 / LS6943 ($\lambda = 650 \text{ nm}$, $n_f = 1,4289$, $n_s = n_c = 1,4122$)
 $w = 660 \mu\text{m}$
a) rozložení indexu lomu ve 2D struktuře pro optimalizovaný návrh ($\Omega = 3,4^\circ$ a $L_{SBend} = 33 \text{ mm}$),
b) závislost normovaného optického výkonu na vzdálenosti ve směru šíření optického signálu.*

Návrh A3: Rozbočnice 1x2Y Sylgard 184 / LS6943 $w = 1000 \mu\text{m}$

Na obrázku 4.6a je uveden profil indexů lomu z programu BeamPROP pro rozbočnici 1x2Y s optimalizovanými rozměry a na obrázku 4.6b je graf závislosti normovaného optického výkonu na vzdálenosti ve směru šíření optického signálu strukturou. Počítačový návrh ukázal, že nejlepších výsledků je dosaženo pro úhel $\Omega = 1,466^\circ$ a délku rozbočnice $L_{SBend} = 39 \text{ mm}$. Výstupní výkon je rozdělen v poměru 50,00 : 49,97 %.

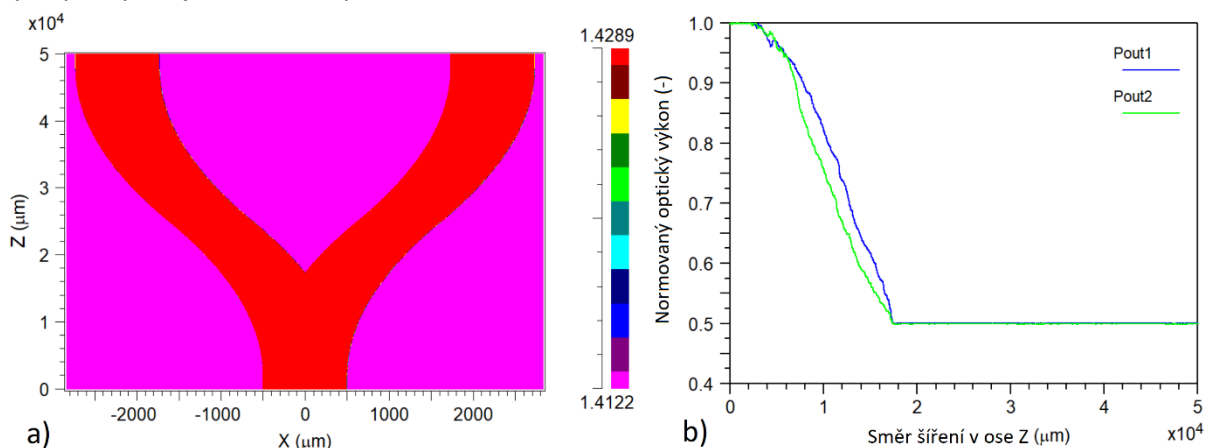


Obr. 4.6: *Návrh rozbočnice 1x2Y Sylgard 184 / LS6943 ($\lambda = 650 \text{ nm}$, $n_f = 1,4289$, $n_s = n_c = 1,4122$) $w = 1000 \mu\text{m}$*
a) rozložení indexu lomu ve 2D struktuře pro optimalizovaný návrh ($\Omega = 1,466^\circ$ a $L_{SBend} = 39 \text{ mm}$),
b) závislost normovaného optického výkonu na vzdálenosti ve směru šíření optického signálu.

Návrh A4 (1x4): Rozbočnice 1x4Y Sylgard 184 / LS6943 $w = 1000 \mu\text{m}$

Jako poslední strukturu pro dvojici materiálů Sylgard 184/ LS6943 jsem navrhl rozbočnici 1x4Y, která je soustavou kaskádně seřazených 1x2Y rozbočnic (skládá se z rozbočnice 1x2Y, na jejíž výstupy jsou připojeny další rozbočnice 1x2Y, viz obr. 4.7a). Návrh jsem provedl tak, aby na výstup první rozbočnice bylo možné na připojit rozbočnice z návrhu A3. Ukázalo se, že toto řešení není dostatečně přesné (normované výstupní výkonu měly příliš velkou odchylku od 0,25), tak jsem geometrické rozměry struktury dále optimalizoval.

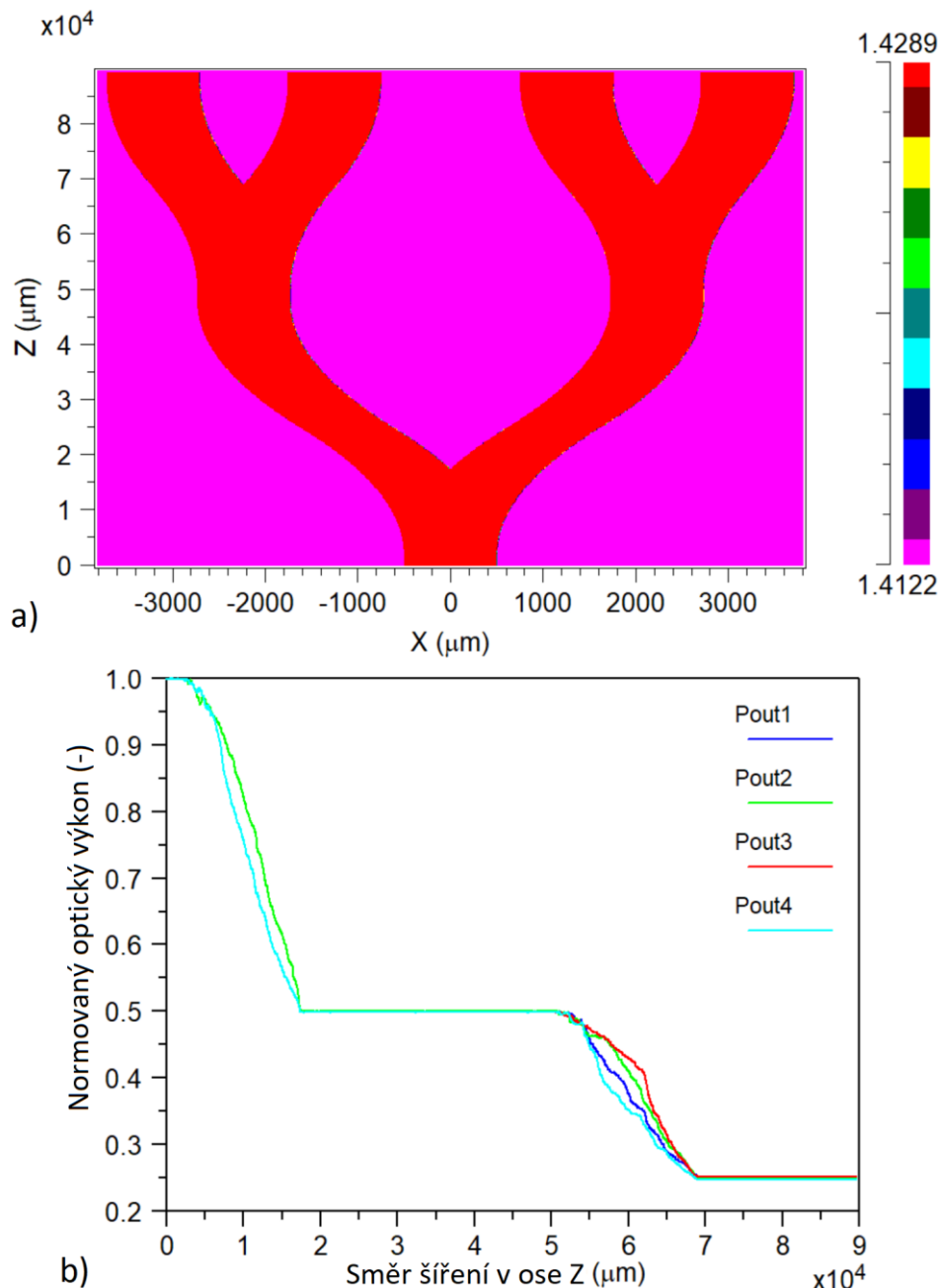
Aby bylo možné zhodnotit přesnost návrhu nejen celé rozbočnice 1x4Y, ale i jejich jednotlivých rozbočnic, byla vyrobena samostatně i první rozbočnice ze soustavy 1x4Y. Její profil indexů lomu z programu BeamPROP je uveden na obrázku 4.7a a na obrázku 4.7b je graf závislosti normovaného optického výkonu na vzdálenosti ve směru šíření optického signálu strukturou. Počítačový návrh ukázal, že nejlepšími výsledky je dosaženo pro úhel $\Omega = 2,775^\circ$ a délku rozbočnice $L_{SBend} = 46 \text{ mm}$. Výstupní výkon je rozdělen v poměru 50,05 : 49,95 %.



Obr. 4.7: *První rozbočnice ze soustavy 1x4Y Sylgard 184 / LS6943, $\lambda = 650 \text{ nm}$, $n_f = 1,4289$, $n_s = n_c = 1,4122$, $w = 1000 \mu\text{m}$*
a) rozložení indexu lomu ve 2D struktuře pro optimalizovaný návrh ($\Omega = 2,775^\circ$ a $L_{SBend} = 46 \text{ mm}$),
b) závislost normovaného optického výkonu na vzdálenosti ve směru šíření optického signálu.

Na obrázku 4.8a je uveden profil indexů lomu z programu BeamPROP pro rozbočnici 1x2Y s optimalizovanými rozměry a na obrázku 4.8b je graf závislosti normovaného optického výkonu na vzdálenosti ve směru šíření optického signálu strukturou. Nejlepší nalezené rozměry podle simulace pro vstupní rozbočnici jsou: úhel $\Omega = 2,775^\circ$ a délka rozbočnice $L_{SBend} = 46 \text{ mm}$ a pro výstupní rozbočnice úhel $\Omega = 1,49^\circ$ a délka $L_{SBend} = 37,5 \text{ mm}$.

Výstupní výkon je rozdělen v poměru 24,72 : 25,20 % (P_{out1} a P_{out2}) pro levou stranu a 24,93 : 25,11 % (P_{out3} a P_{out4}) pro pravou stranu, tj. s odchylkou maximálně 1,12 % od ideální hodnoty 25 %.



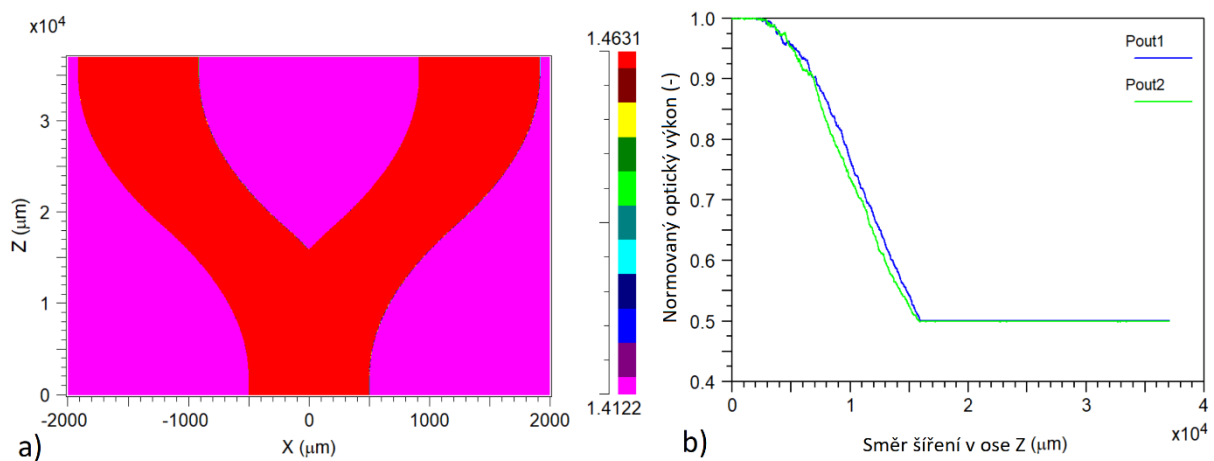
Obr. 4.8: Návrh rozbočnice 1x4Y Sylgard 184 / LS6943 ($\lambda = 650 \text{ nm}$, $n_f = 1,4289$, $n_s = n_c = 1,4122$)
 $w = 1000 \text{ }\mu\text{m}$
 a) rozložení indexu lomu ve 2D struktuře pro optimalizovaný návrh,
 b) závislost normovaného optického výkonu na vzdálenosti ve směru šíření optického signálu.

4.3.2 Návrh B: rozbočnice Sylgard 184 / LS6946

Pro další návrh byl zvolen jako vlnovodná vrstva polymer LS6946 (index lomu 1,4631 pro 650 nm) a krycí vrstva zůstala stejná jako v předešlém případě (Sylgard 184). Šířka vlnovodného kanálu je 1000 μm . Tyto materiály mají větší rozdíl indexů lomu ($\Delta n = 0,0509$), a tudíž je možné dosáhnout menších rozměrů struktur.

Optimalizace geometrických rozměrů byla opět provedena nejprve s hrubším krokem pro nalezení optimálního rozmezí úhlu Ω a délky rozbočnice L_{SBend} a poté byl krok zjemněn pro nalezení co nejlepších rozměrů. Délka vstupního a výstupních vlnovodů byla zvolena opět 2 mm.

Na obrázku 4.9a je uveden profil indexů lomu z programu BeamPROP pro rozbočnici 1x2Y s optimalizovanými rozměry a na obrázku 4.9b je graf závislosti normovaného optického výkonu na vzdálenosti ve směru šíření optického signálu strukturou. Počítačový návrh ukázal, že optimální je úhel $\Omega = 2,45^\circ$ a délka rozbočnice $L_{SBend} = 33 \text{ mm}$. Výstupní výkon je rozdělen v poměru 50,09 : 49,91 %.

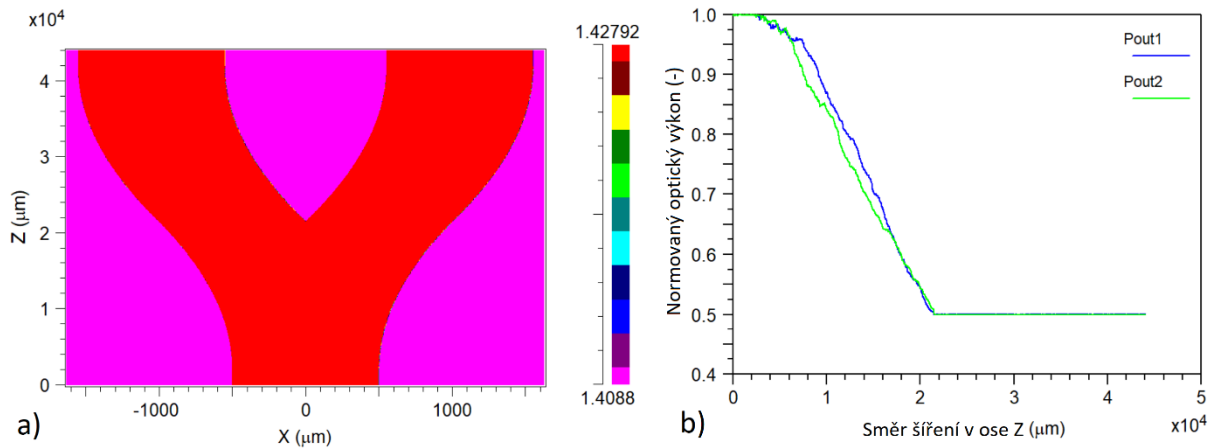


Obr. 4.9: *Návrh rozbočnice 1x2Y Sylgard 184 / LS6946 ($\lambda = 650 \text{ nm}$, $n_f = 1,4631$, $n_s = n_c = 1,4122$), $w = 1000 \mu\text{m}$
a) rozložení indexu lomu ve 2D struktuře pro optimalizovaný návrh ($\Omega = 2,45^\circ$ a $L_{SBend} = 33 \text{ mm}$),
b) závislost normovaného optického výkonu na vzdálenosti ve směru šíření optického signálu.*

4.3.3 Návrh C: rozbočnice LS6941 / LS6943

Pro další navrhované struktury byla zvolena krycí vrstva z elastomeru LS6941 s indexem lomu 1,4088 (pro vlnovou délku 650 nm) a jako vlnovodná vrstva byl použit elastomer LS6943 (index lomu 1,4289 pro vlnovou délku 650 nm). Výhodou elastomeru LS6941 oproti Sylgardu 184 je nižší index lomu, což má za následek větší rozdíl indexu krycí a vlnovodné vrstvy, a mělo by to znamenat menší geometrické rozměry pro výslednou rozbočnici. Šířka vlnovodného kanálu je 1000 μm .

Na obrázku 4.10a je uveden profil indexů lomu z programu BeamPROP pro rozbočnici 1x2Y s optimalizovanými rozměry a na obrázku 4.10b je graf závislosti normovaného optického výkonu na vzdálenosti ve směru šíření optického signálu strukturou. Počítačový návrh ukázal, že nejlepších výsledků je dosaženo pro úhel $\Omega = 1,507^\circ$ a délku rozbočnice $L_{SBend} = 40 \text{ mm}$. Výstupní výkon je rozdělen v poměru 50,01 : 49,97 %.

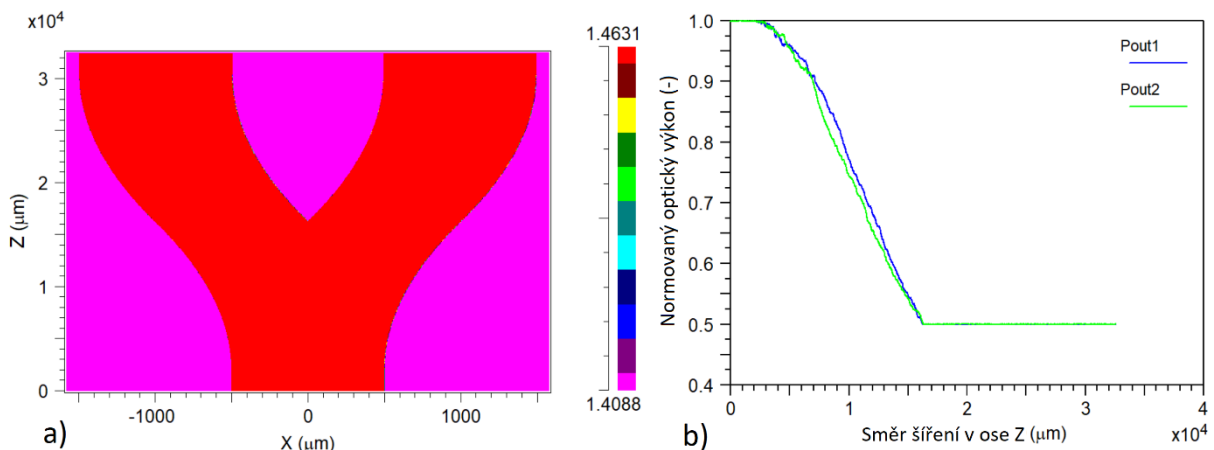


Obr. 4.10: *Návrh rozbočnice 1x2Y LS6941 / LS6943 ($\lambda = 650 \text{ nm}$, $n_f = 1,4289$, $n_s = n_c = 1,4088$), $w = 1000 \mu\text{m}$
 a) rozložení indexu lomu ve 2D struktuře pro optimalizovaný návrh ($\Omega = 1,507^\circ$ a $L_{SBend} = 40 \text{ mm}$),
 b) závislost normovaného optického výkonu na vzdálenosti ve směru šíření optického signálu.*

4.3.4 Návrh D: rozbočnice LS6941 / LS6946

V dalším provedeném návrhu zůstává jako krycí vrstva elastomer LS6941 s indexem lomu 1,4088 (pro vlnovou délku 650 nm) a jako vlnovodná vrstva byl použit elastomer LS6946 (index lomu 1,4631 pro vlnovou délku 650 nm). Výhodou této kombinace materiálů je největší rozdíl indexů lomu ze všech navrhovaných rozbočnic a to je $\Delta n = 0,0543$, proto by tato rozbočnice měla mít nejmenší rozměry ze všech návrhů, čehož se povedlo dosáhnout. Šířka vlnovodného kanálu je opět $1000 \mu\text{m}$.

Na obrázku 4.11a je uveden profil indexů lomu z programu BeamPROP pro rozbočnici 1x2Y s optimalizovanými rozměry a na obrázku 4.11b je graf závislosti normovaného optického výkonu na vzdálenosti ve směru šíření optického signálu strukturou. Počítačový návrh ukázal, že optimální je úhel $\Omega = 2,00^\circ$ a délka rozbočnice $L_{SBend} = 28,5 \text{ mm}$. Výstupní výkon je rozdělen v poměru 50,00 : 49,95 %.

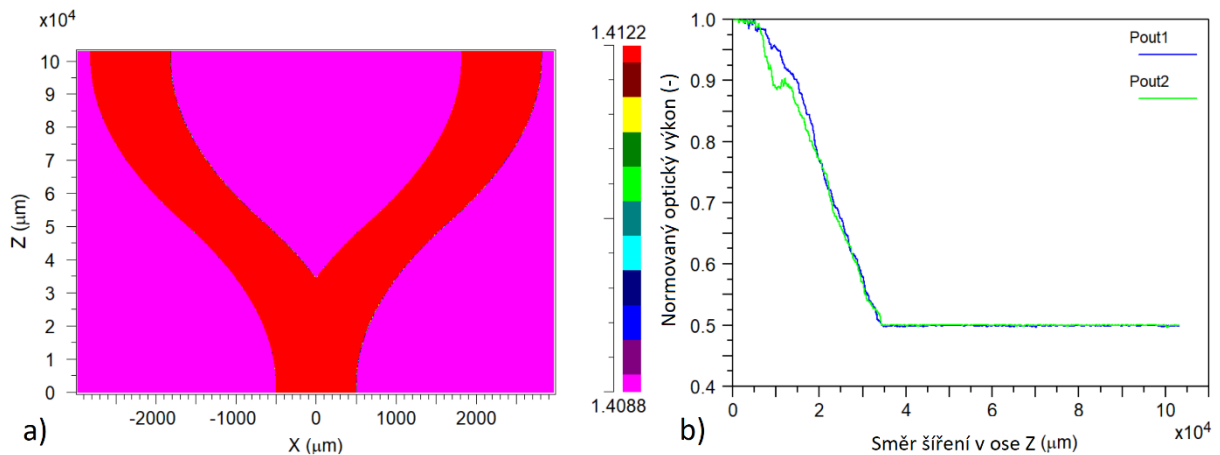


Obr. 4.11: *Návrh rozbočnice 1x2Y LS6941 / LS6946 ($\lambda = 650 \text{ nm}$, $n_f = 1,4631$, $n_s = n_c = 1,4088$), $w = 1000 \mu\text{m}$
 a) rozložení indexu lomu ve 2D struktuře pro optimalizovaný návrh ($\Omega = 2,00^\circ$ a $L_{SBend} = 28,5 \text{ mm}$),
 b) závislost normovaného optického výkonu na vzdálenosti ve směru šíření optického signálu.*

4.3.4 Návrh E: rozbočnice LS6941 / Sylgard 184

Pro poslední návrh byly jako materiál zvoleny dva elastomery, které jsou v předchozích návrzích použity jako krycí vrstvy (Sylgard 184, LS6941) a ten s vyšším indexem lomu (Sylgard 184) byl použit jako jádro vlnovodu. Jejich rozdíl indexů lomu je $\Delta n = 0,0034$, což je výrazně nejméně ze všech použitých dvojic materiálů. Šířka navrženého vlnovodného kanálu je opět $1000 \mu m$.

Na obrázku 4.12a je uveden profil indexů lomu z programu BeamPROP pro rozbočnici 1x2Y s optimalizovanými rozměry a na obrázku 4.12b je graf závislosti normovaného optického výkonu na vzdálenosti ve směru šíření optického signálu strukturou. Počítačový návrh ukázal, že nejlepšími výsledky je dosaženo pro úhel $\Omega = 1,34^\circ$ a délku rozbočnice $L_{SBend} = 99 mm$, což je přesně podle předpokladu výrazně nejdelší struktura. Výstupní výkon je rozdělen v poměru 50,00 : 49,92 %.



Obr. 4.12: *Návrh rozbočnice 1x2Y LS6941 / Sylgard 184, ($\lambda = 650 nm$, $n_f = 1,4122$, $n_s = n_c = 1,4088$), $w = 1000 \mu m$
a) rozložení indexu lomu ve 2D struktuře pro optimalizovaný návrh ($\Omega = 1,34^\circ$ a $L_{SBend} = 99 mm$),
b) závislost normovaného optického výkonu na vzdálenosti ve směru šíření optického signálu.*

V tabulce 4.2 je uveden přehled veškerých navržených rozbočnic s jejich optimalizovanými parametry. V první části tabulky (části tabulky jsou od sebe odděleny silnější čarou) jsou uvedeny návrhy, které mají šířku vlnovodného kanálu $550 \mu m$ a $660 \mu m$, ve druhé části jsou uvedeny údaje pro optimalizovanou rozbočnici 1x4Y (celková délka L_{SBend} obou kaskádně sestavených rozbočnic a nejlepší nalezené úhly Ω pro první i pro druhou rozbočnici soustavy) a v poslední části tabulky jsou uvedeny návrhy rozbočnic 1x2Y s šířkou vlnovodu $1000 \mu m$ seřazené podle rozdílu indexu lomu Δn .

Parametry v tabulce 4.2 jsou definovány v kapitole 4.1. w je šířka vlnovodného kanálu, L_{SBend} délka ohnuté části rozbočnice, Ω úhel odklonu ramena rozbočnice (ramena rozbočnice mezi sebou svírají úhel 2Ω), n_s index lomu krycí vrstvy, n_c index lomu vlnovodné vrstvy a Δn je rozdíl indexů lomu definovaný jako rozdíl n_c a n_s podle rovnice 15. Poslední sloupec v tabulce je poměr výstupních výkonů rozbočnic.

Tab. 4.2: Seznam provedených návrhů rozbočnic ($\lambda = 650 \text{ nm}$) s jejich optimalizovanými parametry a poměry výstupních výkonů.

Označení návrhu	w [μm]	L_{SBend} [mm]	Ω [$^\circ$]	n_s [–]	n_c [–]	Δn [–]	P_{out1}/P_{out2} [–]
A1	550	38,0	1,040	1,4122	1,4289	0,0167	50,02 : 49,95
A2	660	33,0	3,400	1,4122	1,4289	0,0167	49,96 : 49,84
A4 1x4Y	1000	83,5	2,775 1,490	1,4122	1,4289	0,0167	24,72 : 25,20 24,93 : 25,11 ¹
E	1000	99,0	1,340	1,4088	1,4122	0,0034	50,00 : 49,92
A4 1x2Y	1000	46,0	2,775	1,4122	1,4289	0,0167	50,05 : 49,95
A3	1000	39,0	1,466	1,4122	1,4289	0,0167	50,00 : 49,97
C	1000	40,0	1,507	1,4088	1,4289	0,0201	50,01 : 49,97
B	1000	33,0	2,450	1,4122	1,4631	0,0509	50,09 : 49,91
D	1000	28,5	2,000	1,4088	1,4631	0,0543	50,00 : 49,95

Ze třetí části tabulky (návrh E – D) lze vidět, že platí, že s rostoucím rozdílem indexů lomu se snižuje délka výsledné struktury, pouze s jednou výjimkou, a to návrhem C, který má vyšší rozdíl indexů lomu ($\Delta n = 0,0201$) než předchozí návrh A3 ($\Delta n = 0,0167$) a přitom je délka L_{SBend} o milimetr větší. Pravděpodobně by bylo možné rozbočnici z návrhu C dále optimalizovat a dosáhnout tak nižší délky L_{SBend} . Nejmenší rozměr má rozbočnice s plášťovou vrstvou z materiálu LS6941 a s vlnovodnou vrstvou z materiálu LS6946. Tyto materiály mají největší rozdíl indexů lomu Δn roven 0,0543. Délka této rozbočnice L_{SBend} je 28,5 mm a úhel odklonu ramena Ω je 2,0°.

¹ $P_{out1} : P_{out2} : P_{out3} : P_{out4}$

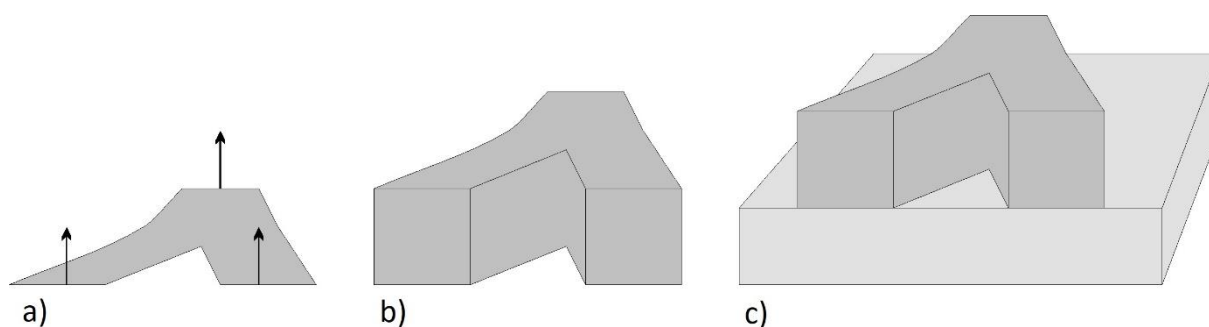
5 Výroba vybraných struktur

Výroba vzorků byla prováděna zaléváním negativního motivu optickými elastomery. Motiv 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, která byla poté vyplněna vlnovodnou vrstvou a po vytvrzení zalita horní plášťovou vrstvou.

Negativní motiv byl před tiskem vymodelován v počítači na základě návrhu rozbočnic z programu BeamPROP. Návrh z programu BeamPROP je 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 byl použit program FreeCAD.

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

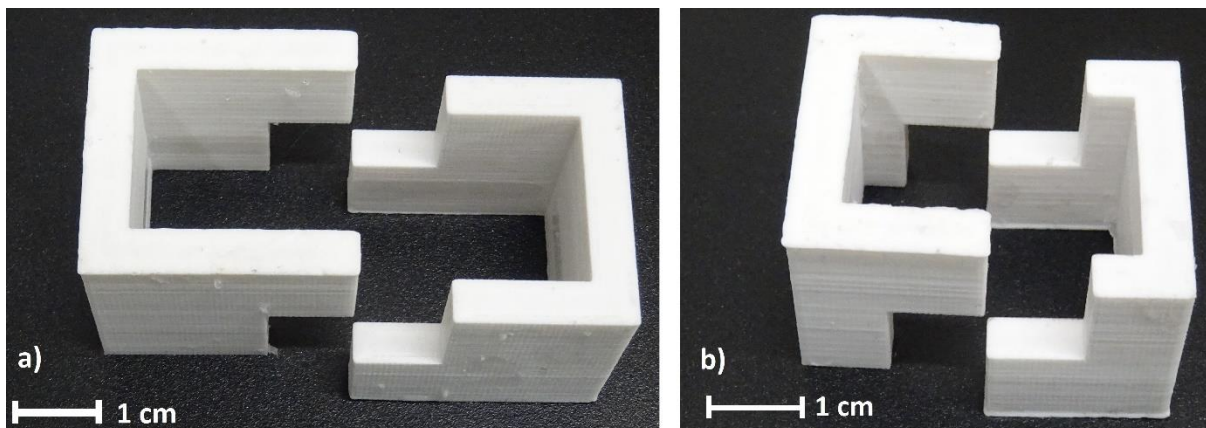
Návrh je exportován z programu FreeCAD ve formě 3D sítě útvaru ve formátu stl. Export z programu BeamPROP je 1000x zvětšený, proto i síť je 1000x větší, než je její skutečná velikost. Síť tedy musí být před finálním přeložením pro software tiskárny zmenšena. K tomu byl použit program MeshLab, který dokáže rozměry sítě stl přepočítat. Nakonec je síť exportována a přeložena v programu Prusa 3D Slic3r MK2 pro software tiskárny a vytištěna. Pro tisk byla použita tiskárna Prusa 3D MK2 od firmy Prusa Research [16].



Obr. 5.1: Postup zpracování 2D modelu z programu BeamPROP na 3D model
a) vysunutí 2D modelu,
b) 3D model jádra vlnovodu po vysunutí,
c) dokreslení podložky pod jádro vlnovodu, model připravený pro tisk.

Tisk probíhá tak, že je nejdříve zahřáta tryska, kterou probíhá nanášení tiskové hmoty, a deska, na kterou je následně vrstva po vrstvě tisková hmota nanášena. Jako tisková hmota je použit materiál ABS-T dodávaný ve formě struny, který je tryskou roztaven a nanášen na desku ve vrstvách v požadovaném tvaru, ve kterém potom ztuhne. Po vychladnutí je forma hotova.

Aby bylo možné negativní motiv zalít tekutým elastomerem, který je nutné do vytvrzení udržet v dostatečné vrstvě na povrchu destičky, byla vyvinuta dvoudílná forma (viz obr. 5.2), do které byl elastomer nalit. Jelikož má každá rozbočnice jinou délku, musela být pro každou z rozbočnic vyrobena forma o její délce. Forma je složena ze dvou stejných dílů, aby bylo možné po vytvrzení vzorek pohodlně vyjmout.



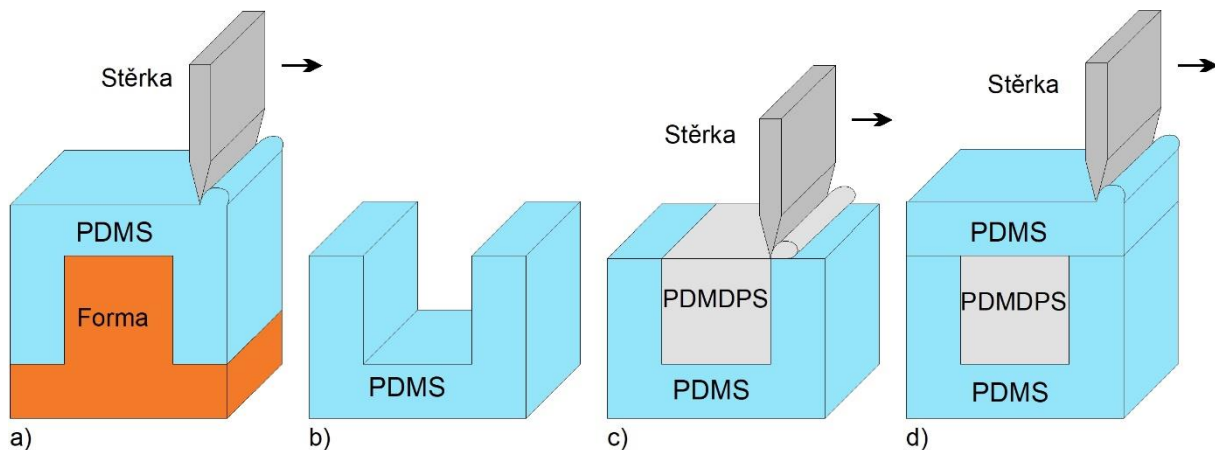
Obr. 5.2 *Fotografie dvoudílných forem pro zalévání vzorků*
 a) *fotografie formy pro delší vzorky, rozbočnice a jejich reference,*
 b) *fotografie formy pro kratší vzorky.*

Vzorky, které byly vyrobeny, mají všechny jako plášťovou vrstvu polymer PDMS prodáváný pod označením Sylgard 184 výrobcem Dow Corning, dodávaný do ČR společností ELCHEMCo. Jako vlnovodnou vrstvu mají vzorky polymer PDMDPS pod označením LS6943 od výrobce NuSil, dodávaný společností Azelis ČR. Čtyři vzorky mají vlnovodnou vrstvu z polymerů NOA (Norland Optical Adhesive) od výrobce Norland Products, dodávaný společností APM Technica, dva z polymeru NOA73 a dva z polymeru NOA83H.

Polymery Sylgard 184 a LS6943 jsou dodávány ve dvou složkách, které je nutné před použitím smíchat v poměru 1:10. Při smíchání se ale do tekutého polymeru dostane vzduch, který pak musí být odstraněn evakuováním. Polymery NOA jsou dodávány jako jednosložkové a po nanesení jsou tvrzeny pod UV světlem. Nanášení tudíž musí probíhat pod žlutým světlem, aby nedošlo k předčasnému ztuhnutí polymeru.

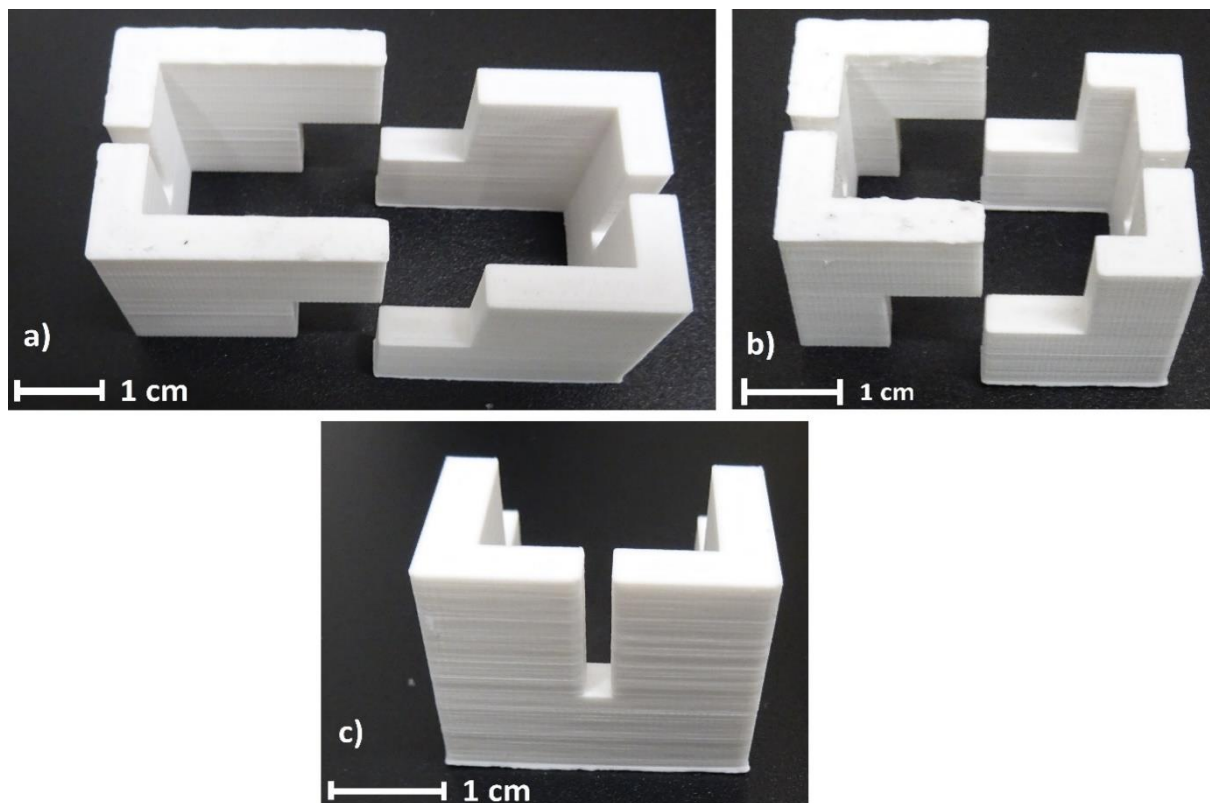
Na formu musí být před zalitím elastomerem nanesen separátor, aby bylo možné hotový vzorek z formy vyjmout. Jako separátor byl použit přípravek Formula 10 od výrobce Ambersil ve formě spreje. Na negativní formu je poté nanesen tekutý silikon PDMS a přebytečný materiál je odstraněn stěrkou (viz obr. 5.3a). Následně je struktura na třicet minut vakuována, aby došlo k homogenizaci a odstranění přebytečného vzduchu (bublinek). Následuje vytvrzení v peci při 65°C po dobu 4 hod. Poté je spodní vrstva (ve které je z negativní formy kanál určený pro jádro vlnovodu) vyjmuta z formy (viz obr. 5.3b). Vytvrzený silikonový motiv lze oddělit od formy díky vrstvě naneseného separátoru.

Kanál je následně vyplněn vlnovodnou vrstvou, kterou tvoří silikon PDMDPS (nebo polymer NOA), a přebytečný materiál je odstraněn stěrkou, podobně jako byla nanášena krycí vrstva (viz obr. 5.3c). Opět jsou odstraněny bublinky pomocí vakuování, tentokrát po dobu 15 min a struktura je vytvrzena po dobu 4 hod při 65°C. Vzorek musí být před aplikací krycí vrstvy PDMS opět vložen do dvoudílné formy, aby nanášený polymer neodtekl ze vzorku před vytvrzením. Nakonec může být opět pomocí stěrky aplikována vrchní vrstva PDMS (viz obr. 5.3d) a vzorek je následně znovu vakuován po dobu 30 min a vytvrzen po dobu 4 hod při 65°C.



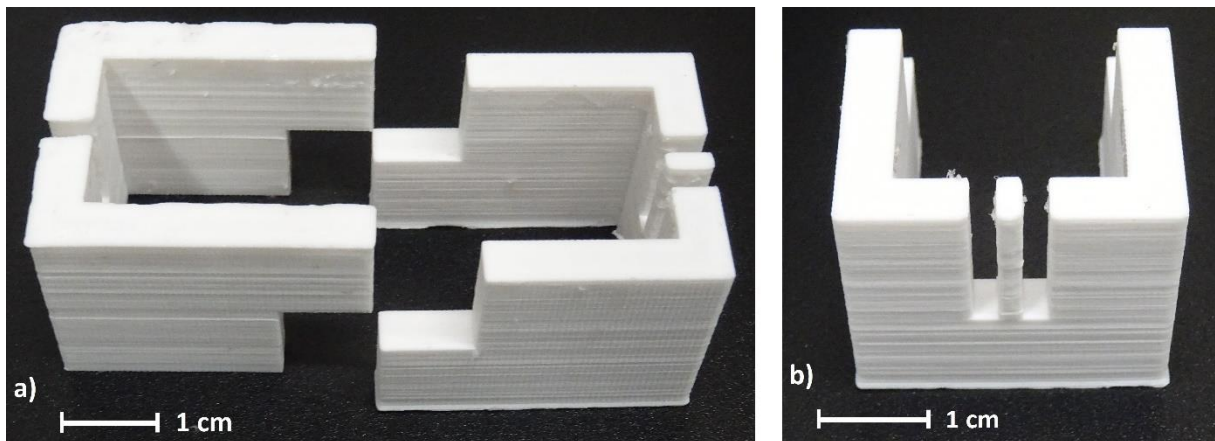
Obr. 5.3: *Postup výroby vzorku s využitím negativní formy*
 a) nanesení spodní vrstvy (podložky) PDMS stěrkou na vytištěnou negativní formu,
 b) vyjmutí spodní vrstvy z formy,
 c) nanesení vlnovodné vrstvy do připravené prohlubně v podložce vzniklé vzorem na negativní vytištěné formě a odstranění přebytečného materiálu stěrkou,
 d) nanesení horní (krycí) vrstvy stěrkou.

Pro vybrané vzorky byla zvolena výroba s nerozebíratelným spojením (nakonektováním) vstupních i výstupních vláken přímo do vzorku (zalití vláken na okraj vlnovodné drážky), aby došlo k minimalizaci optického útlumu na rozhraní přírodního (i výstupního) vlákna a vzorku. Aby mohla být do vzorku vložena vlákna, musela být vyvinuta speciální forma pro zalévání vláken, ze které by šel vzorek následně vyjmout bez vylomení vláken. Fotografie formy je uvedena na obrázku 5.4.



Obr. 5.4 *Fotografie dvoudílných forem pro zalévání vzorků s vlákny*
 a) forma pro delší vzorky/ reference k rozbočnicím se štěrbinami na vlákna,
 b) forma pro kratší vzorky se štěrbinami na vlákna,
 c) detailní fotografie štěrbinu pro vlákno na čele formy.

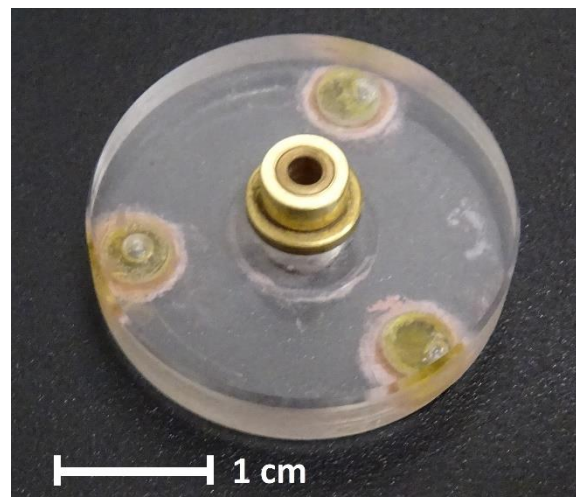
Rozbočnice mají jedno vstupní a dvě výstupní vlákna, proto musela být pro dvouvláknový výstup vytvořena forma se dvěma štěrbinami (viz obr. 5.5)



Obr. 5.5 Fotografie dvoudílné formy pro zalévání vzorků s vlákny
a) forma pro rozbočnice se štěrbinami na vlákna,
b) fotografie štěrbin na vlákna na čele formy.

Do vzorků byly zality dva typy vláken. Prvním byla vlákna POF 1000 μm SH4001 (jádro má rozměr 980 μm , která jsou ohebná, a proto s nimi lze dobře manipulovat). Jádro vláken je z polymeru PMMA, plášť je z polymeru PMMA s obsahem fluoru. Vlákna jsou typu step index (mají skokovou změnu indexu lomu). Jejich provozní teplotní rozsah je od -55°C od 70°C a jejich maximální útlum je 190 dB/km pro vlnovou délku 650 nm [17].

Jejich nevýhodou je potřeba naleštění čel před použitím. Leštění probíhá za pomoci přípravku, jehož fotografie je uvedena na obrázku 5.6. Do díry uprostřed přípravku je vloženo vlákno a pak je s ním pohybováno osmičkovým pohybem po čtyřech různých leštících papírech s postupně se snižující drsností, dokud není čelo vlákna vyleštěno.

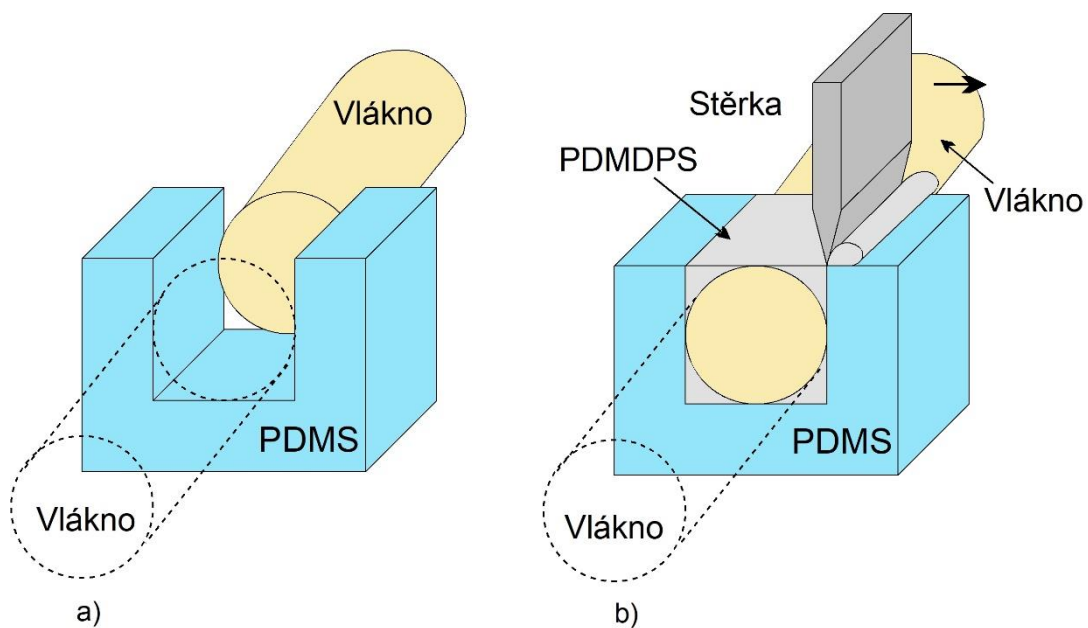


Obr. 5.6 Fotografie přípravku pro leštění POF vláken.

Druhým typem použitých vláken byla křemenná vlákna THORLABS FG910LEC o rozměru 1000 μm (jádro má rozměr 910 μm). Jádro vláken je z SiO_2 a plášť z SiO_2 dotovaného fluorem. Vlákna jsou typu step index (mají skokovou změnu indexu lomu). Jejich provozní teplotní rozsah je od -60°C od 125°C a jejich maximální útlum je 10 dB/km . Jsou určena pro vlnové délky 400 – 2200 nm , proto umožnila změření vzorků i pro lasery o vlnových délkách 1300 a 1550 nm (POF vlákna mají na těchto vlnových délkách příliš velký útlum) [18].

Nevýhodou křemenných vláken byla komplikovanější výroba kvůli jejich nižší ohebnosti, a tudíž obtížnější manipulaci se vzorkem jak během výroby, tak i po ní, protože se vlákna mohou mnohem snáze ze vzorku vylomit. Proto musely být vzorky s křemennými vlákny fixovány na skleněné podložce a ponechány ve formě.

Zalítí vláken je znázorněno na obrázku 5.7. Zalítí probíhalo tak, že vlákna byla vložena na kraj drážky pro vlnovodnou vrstvu (obr. 5.7a), do odlitku z formy vzniklém v prvním kroku výroby. (viz obr. 5.3a, b). Vlnovodná vrstva byla následně nanášena stěrkou (obr. 5.7b) a poté vytvrzena opět při 65°C po dobu 4 hod. Aby nedocházelo k vylamování vláken ze vzorku, musel být vzorek do formy vložen už před zalitím vlnovodné vrstvy a vyjmut mohl být až po zalití krycí vrstvou a jejím vytvrzení, což probíhalo opět stejně, jako u výroby vzorků bez vláken (viz obr. 5.3d).



Obr. 5.7: Postup zalití vláken do vzorku
 a) vložení vláken na kraje odlitku z negativní formy,
 b) nanesení vlnovodné vrstvy do připravené prohlubně v podložce, na jejíchž krajích jsou vložena přívodní a výstupní vlákna a odstranění přebytečného materiálu stěrkou.

6 Diagnostické metody

6.1 Měření indexu lomu

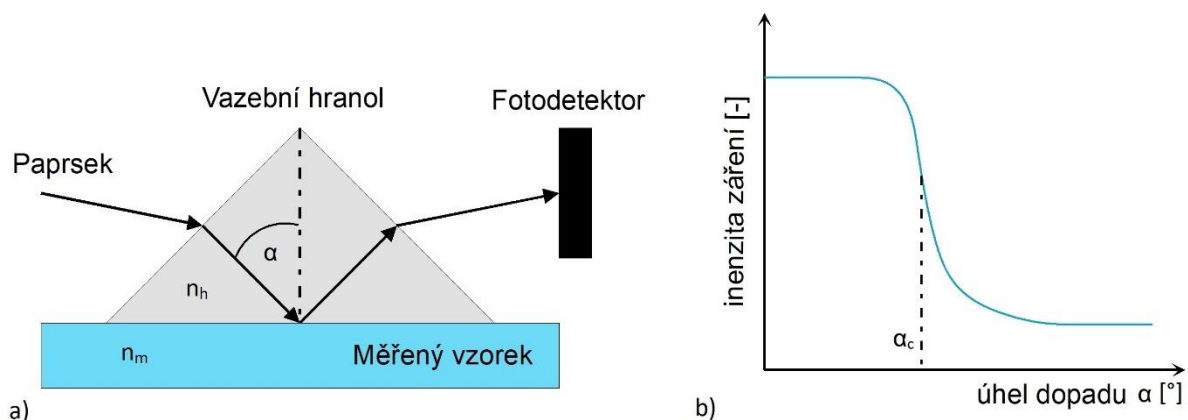
Index lomu byl měřen pomocí jednohranolové vidové spektrometrie (viz obrázek 6.1a). K měření byl použit přístroj Metricon 2010. Měření bylo provedeno na vlnových délkách 532, 654, 846, 1308, 1549 a 1652 nm.

Princip metody spočívá v tom, že je monochromatickým paprskem svíceno do optického vazebního hranolu s indexem lomu n_h , který je přiložen k měřenému vzorku o neznámém indexu lomu n_m (viz obr. 6.1a). Na druhé straně hranolu je fotodetektor, který měří 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 lze následně určit index lomu měřeného vzorku ze vztahu [2, 19]:

$$n_m = n_h \cdot \sin \alpha_c \quad (16)$$

Kde n_m je index lomu měřeného vzorku, n_h je index lomu vazebního hranolu a α_c je kritický úhel dopadu.

Princip určení indexu lomu objemových vzorků z naměřených dat je na obrázku 6.1b.



Obr. 6.1: *Princip jednohranolové vidové spektrometrie, a) vnitřní uspořádání měřicího přístroje, b) závislost intenzity záření dopadajícího na fotodetektor na úhlu dopadu a nalezení kritického úhlu.*

6.2 Měření transmisních spekter

Pro měření transmise použitých materiálů byl použit spektrometr Shimadzu UV-3600 UV-VIS-NIR, který je zobrazen na obrázku 6.2. Přístroj je schopen měřit pro vlnové délky v rozsahu 185 – 3300 nm. Měření bylo provedeno v laboratoři FJFI.

Měření probíhá tak, že je světlo ze širokopásmového zdroje přefiltrováno pomocí dvojitého monochromátoru (Czerného – Turnerova) nastaveného na měřenou vlnovou délku a přes vzorek dopadá 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 štěrbinu o velikosti 0,2 nm.

Přesnost metody ovlivňuje především integrační čas, tj. doba, po kterou se transmise měří. Čím je čas delší, tím je výsledek měření přesnější (pokud není měřená látka fotocitlivá), ale samozřejmě se

prodlužuje časová náročnost měření, především u většího počtu vzorků a širokém rozsahu měřených spekter [8, 20, 21].

Vzorek měřeného polymeru je v tomto případě nanesen na sklo (v našem případě bylo použito podložní sklo pod mikroskop) v tenké vrstvě pomocí metody rotačního lití: na sklo je nanesen polymer, a to je poté vloženo do zařízení, které sklem otáčí po dobu 5 min při 500 otáčkách za minutu. Tím je dosaženo rovnoměrnosti vrstvy na celém povrchu skla. Vzorky byly měřeny pro vlnové délky v rozsahu 300 – 2100 nm.



Obr. 6.2: Měřící pracoviště pro měření absorpčních spekter UV-VIS-NIR Shimadzu UV-3600 [20].

6.3 Měření drsnosti povrchu

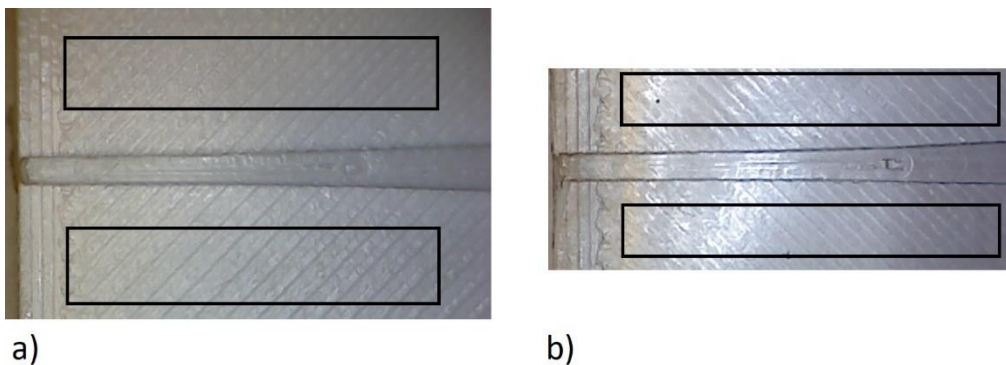
Drsnost povrchu odlévacích forem a následných odlitků z polymeru PDMS byla měřena pomocí digitálního mikroskopu VHX-6000 series od firmy KEYENCE, který je zobrazen na obrázku 6.3. Měření bylo provedeno při prezentaci přístroje na Katedře mikroelektroniky ČVUT FEL.

Měření probíhalo tak, že byl měřený vzorek vložen pod čočku mikroskopu, dále byla pomocí ovládání hlavy mikroskopu zvolena plocha, na které byla drsnost měřena. Následně musela být zvolena minimální a maximální výška, ve které má měřící hlava snímat povrch vzorku a poté bylo zapnuto skenování, ze kterého mikroskop vytvořil v počítači 3D model skenovaného povrchu.



Obr. 6.3: Digitální mikroskop KEYENCE VHX-6000 [22].

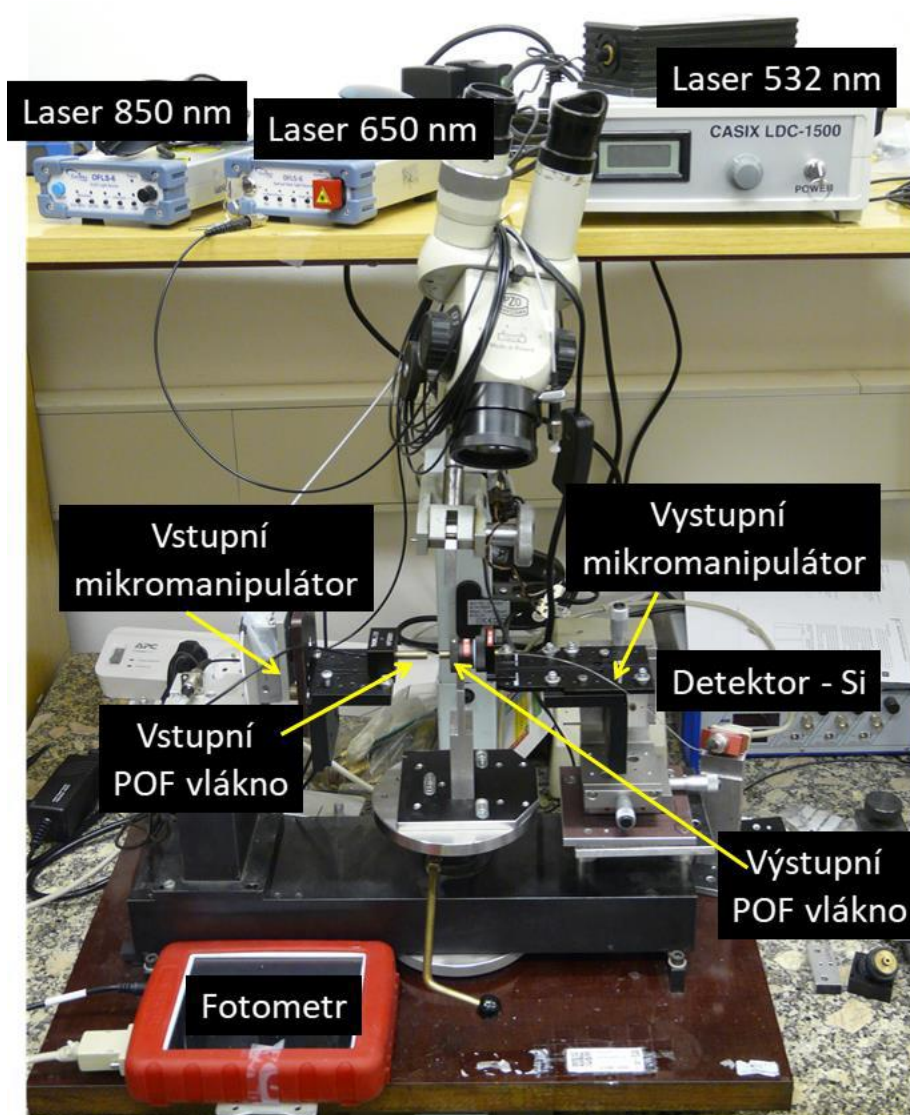
Nakonec byla v počítači (dodávaném společně s mikroskopem, včetně vyhodnocovacího softwaru, viz obr. 6.3) na naskenovaném modelu vybrána oblast, ze které má být změřena drsnost. Na obrázku 6.4a je černým obdélníkem zvýrazněná oblast na vytištěné formě, která byla skenována pro měření a na obrázku 6.4b je stejným způsobem vyznačena oblast měření na odlitku z ní.



Obr. 6.4: Fotografie vytištěné formy a odlitku s vyznačenými oblastmi měření drsnosti,
 a) fotografie vytištěné formy s vyznačenými oblastmi měření drsnosti,
 b) fotografie odlitku (plášťové vrstvy vzorku) s vyznačenými oblastmi měření drsnosti.

6.4 Měření optického útlumu

Fotografie pracoviště pro měření optického útlumu je uvedena na orázku 6.5 [4]. Při měření jsou porovnávány výkony naměřené ze dvou různých vzorků, pro přímé vlnovody mají tyto vzorky různou délku (viz obrázek 6.6), proto se tato metoda měření nazývá *Metoda dvou délek*.



Obr. 6.5: Fotografie měřícího pracoviště [4].

Při měření je používáno následující vybavení: zdroje záření DPGL-2100 Nd:YV04 ($\lambda = 532 \text{ nm}$), Safibra OFLS-650-FA ($\lambda = 650 \text{ nm}$), Safibra OFLS-6 ($\lambda = 850 \text{ nm}$), Safibra OFLS-6CH ($\lambda = 1300 \text{ nm}$), Safibra OFLS-5-DFB-1550 ($\lambda = 1550 \text{ nm}$), laboratorní přípravek s diodami o vlnových délkách 589 a 635 nm, 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.

Měření probíhá tak, že je vzorek vložen do prostoru mezi vstupním a výstupním vláknem (viz obr. 6.5) a poté je nutné posouvat vstupní a výstupní vlákno mikromanipulátory, které umožňují měnit pozici vláken ve směru všech třech os, aby se světlo ze vstupního vlákna správně navázalo do vlnovodu. Světlo je navázáno, když je nalezeno maximum přenášeného výkonu. Pro vzorky, do kterých jsou přímo zalita vlákna, je měření mnohem jednodušší, protože není potřeba hledat polohy vstupního a výstupního vlákna pro maximální výkon, stačí pouze připojit zdroj záření a detektor na vstupní a výstupní vlákno.

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

$$\alpha = -10 \log \frac{P_{out}}{P_{ref}} \quad (17)$$

Kde P_{ref} je referenční optický výkon naměřený bez vzorku (viz obr 6.6a), P_{out} je výstupní optický výkon vzorku, který se pro přímý vzorek změří přímo a pro rozbočnici se rovná součtu naměřených optických výkonů jednotlivých ramen rozbočnice a je tedy dán vztahem:

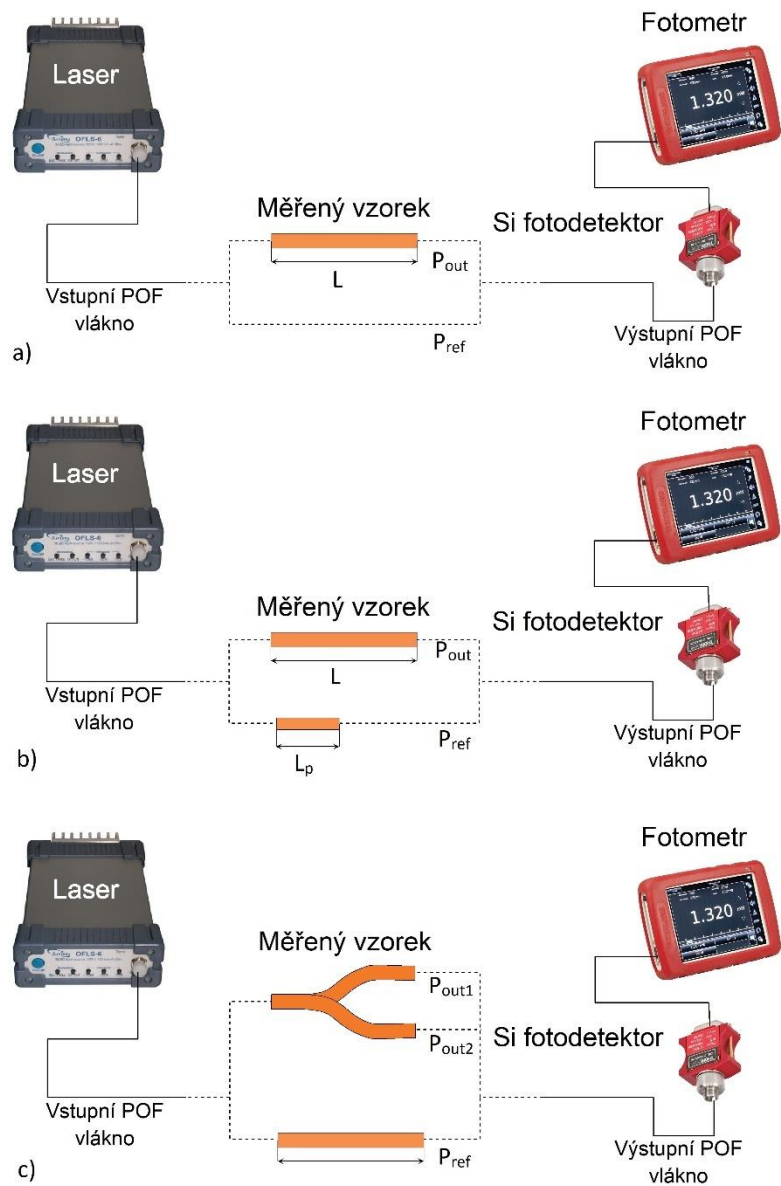
$$\alpha = -10 \log \frac{\sum_{i=1}^n P_{outi}}{P_{ref}} \quad (18)$$

Kde P_{ref} je výkon naměřený na referenčním vzorku k rozbočnici (viz obr. 6.6c) a $\sum_{i=1}^n P_{outi}$ je suma výkonů z jednotlivých výstupních ramen rozbočnice. V této práci bylo $n = 2$ pro rozbočnice 1x2Y nebo $n = 4$ pro rozbočnici 1x4Y.

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

$$A = \frac{-10 \log \frac{P_{out}}{P_{refP}}}{100(L - L_P)} \quad (19)$$

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 obrázku 6.6b.



Obr. 6.6:

Zapojení pro měření optického vložného útlumu

- zapojení pro měření vložného optického útlumu přímého vlnovodu, reference je měřena bez vzorku,
- zapojení pro měření optického útlumu přímého vlnovodu, jako reference je měřen krátký přímý vlnovod,
- zapojení pro měření vložného útlumu optické rozbočnice, jako reference je měřen dlouhý přímý vlnovod.

7 Výsledky měření

7.1 Optická kontrola vytištěných motivů

Každý vytištěný motiv byl před zalitím elastomerem (výrobou) opticky zkontrolován, jestli se vytištěných formách nevyskytují defekty a může být použit pro výrobu vzorků. Na obrázcích jsou fotografie vytištěných motivů rozbočnic a částí přímých vlnovodů.

Na obrázku 7.1 jsou fotografie vytištěné negativní předlohy přímého vlnovodu z materiálu ABS-T o rozměru vlnovodného kanálu $1000\ \mu\text{m}$, který byl používán jako reference. Na obr. 7.1a je pohled shora na vytištěnou drážku a na obr. 7.1b je pohled na čelo formy. Z obrázku vyplývá, že drážka je vytištěna podle požadavků a bez defektů.



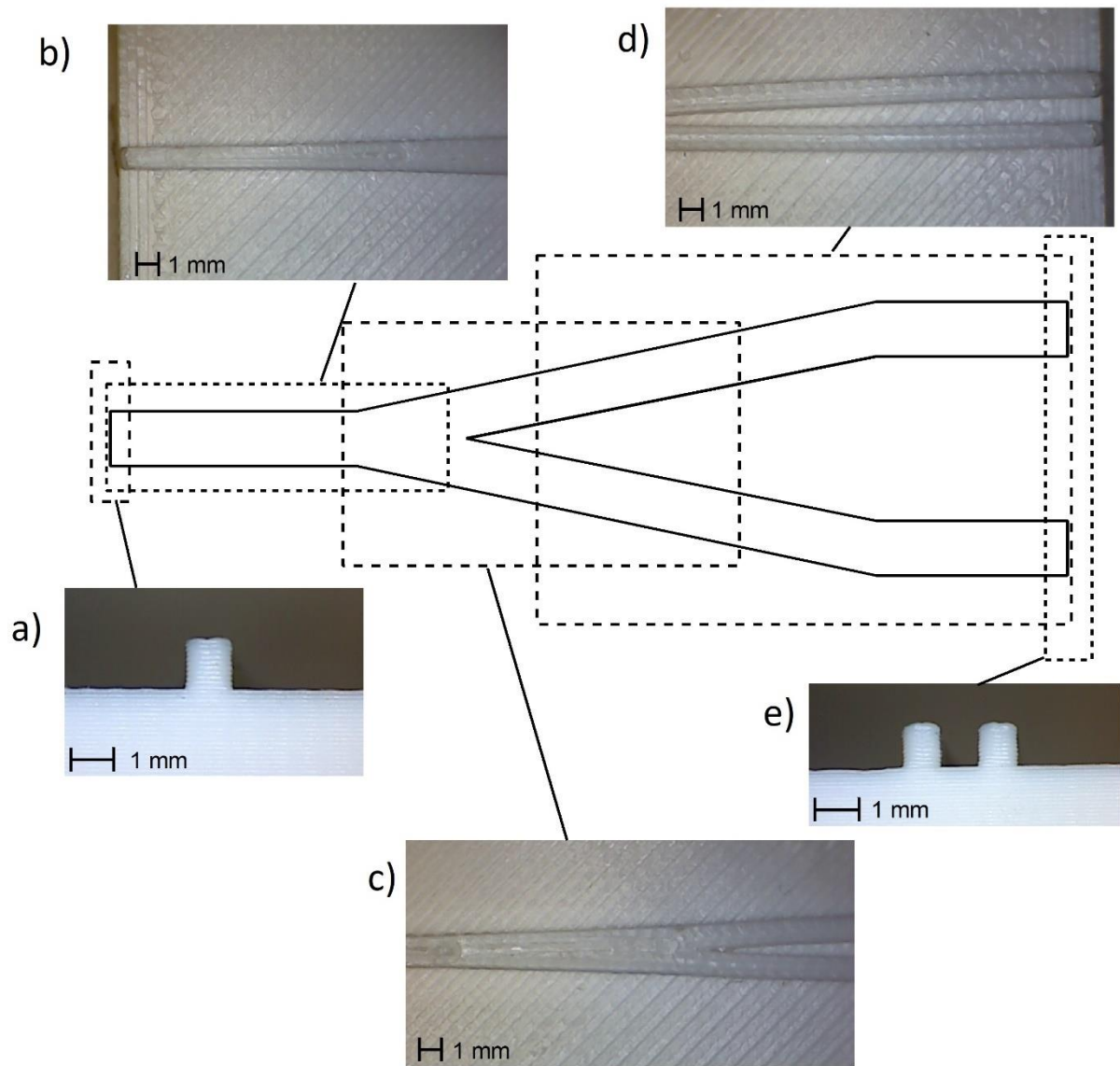
Obr. 7.1: Fotografie negativní předlohy přímého vlnovodu o rozměru drážky $1000\ \mu\text{m}$ z materiálu ABS-T
a) pohled shora,
b) pohled z čela.

Na obrázku 7.2 jsou fotografie vytištěné negativní předlohy přímého vlnovodu z materiálu ABS-T o rozměru vlnovodného kanálu $550\ \mu\text{m}$, který byl taktéž použit jako reference. Na obr. 7.2a je pohled shora na vytištěnou drážku a na obr. 7.2b je pohled na čelo formy. Z fotografií vyplývá, že drážka je vytištěna podle požadavků a bez defektů.



Obr. 7.2: Fotografie negativní předlohy přímého vlnovodu o rozměru drážky $550\ \mu\text{m}$ z materiálu ABS-T
a) pohled shora,
b) pohled z čela.

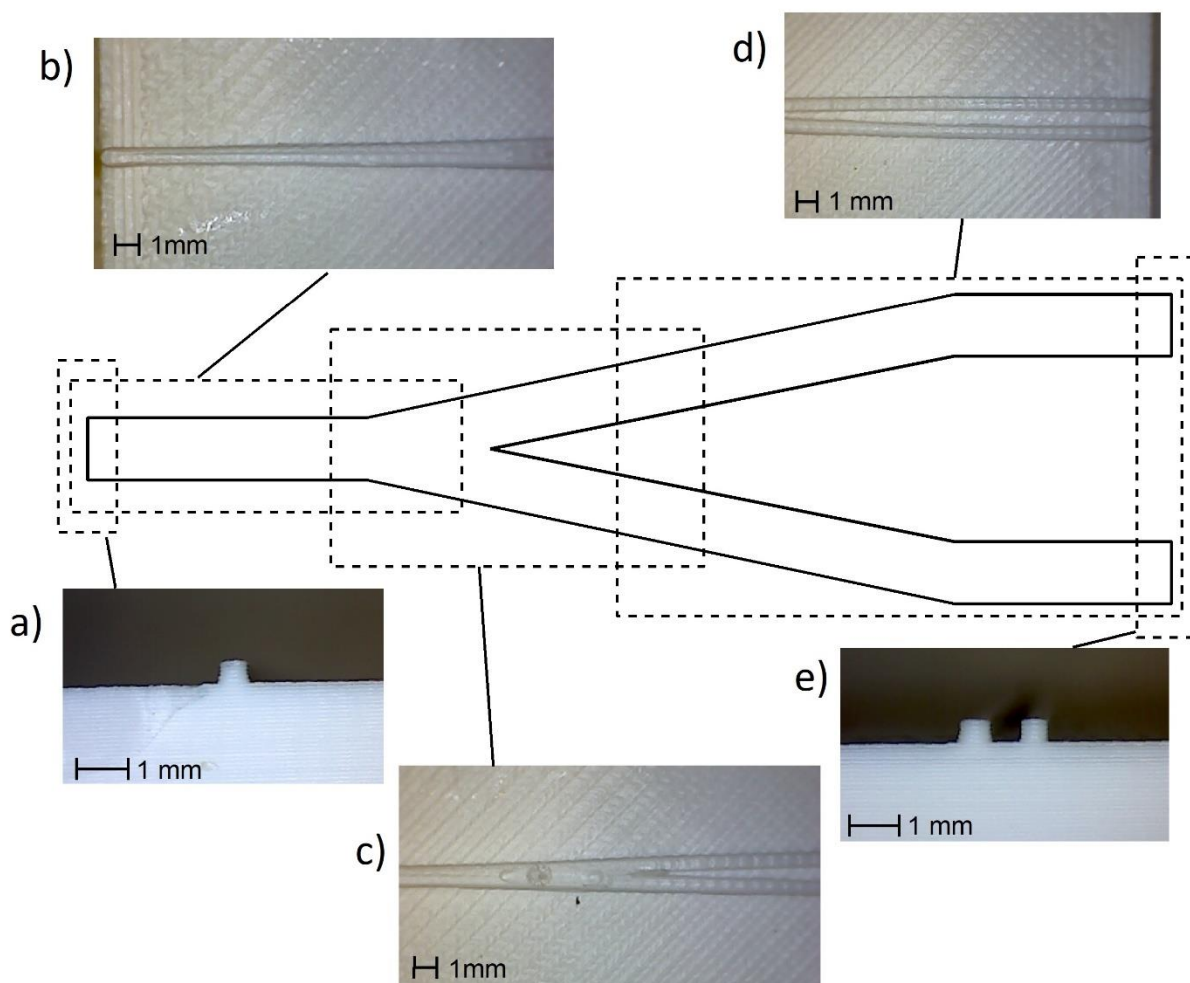
Na obrázku 7.3 je uvedeno schéma optické rozbočnice s vyznačenými sekcemi, které pokrývají přiřazené detailní fotografie vytištěné negativní předlohy rozbočnice z materiálu ABS-T s rozměrem vlnovodného kanálu $1000\ \mu\text{m}$. Na obrázku 7.3a je uveden pohled na čelo předlohy pro vstupní vlnovod rozbočnice, na obrázku 7.3b je pohled shora na předlohu pro vstupní vlnovod. Na obrázku 7.3c je pohled shora na předlohu pro střední část rozbočnice, kde se vstupní vlnovod postupně rozšiřuje, až se rozdělí na dva výstupní vlnovody. Na obrázku 7.3d je pohled shora na předlohu pro výstupní vlnovody rozbočnice a na obrázku 7.3e je pohled na čelo předlohy pro výstupní vlnovody. Z fotografií vyplývá, předloha má požadované rozměry a neobsahuje defekty.



Obr. 7.3: Schéma optické rozbočnice s vyznačenými sekcemi, ke kterým jsou přiřazeny detailní fotografie jednotlivých sekcí vytištěné negativní předlohy rozbočnice z materiálu ABS-T s šířkou drážky pro vlnovodný kanál $1000 \mu\text{m}$

- a) fotografie předlohy pro vstupní vlnovod rozbočnice z čela,
- b) fotografie předlohy pro vstupní vlnovod rozbočnice shora,
- c) fotografie předlohy pro rozbočnici (střední část), kde se vstupní vlnovod postupně rozšiřuje, až se rozdělí na dva výstupní vlnovody,
- d) fotografie předlohy pro výstupní vlnovody rozbočnice shora,
- e) fotografie předlohy pro výstupní vlnovody rozbočnice z čela.

Na obrázku 7.4 je uvedeno schéma optické rozbočnice s vyznačenými sekcemi, které pokrývají přiřazené detailní fotografie vytištěné negativní předlohy rozbočnice z materiálu ABS-T s rozměrem vlnovodného kanálu $550 \mu\text{m}$. Na obrázku 7.4a je uveden pohled na čelo předlohy pro vstupní vlnovod rozbočnice, na obrázku 7.4b je pohled shora na předlohu pro vstupní vlnovod. Na obrázku 7.4c je pohled shora na předlohu pro střední část rozbočnice, kde se vstupní vlnovod postupně rozšiřuje, až se rozdělí na dva výstupní vlnovody. Na obrázku 7.4d je pohled shora na předlohu pro výstupní vlnovody rozbočnice a na obrázku 7.4e je pohled na čelo předlohy pro výstupní vlnovody. Z fotografií vyplývá, že předloha má požadované rozměry a neobsahuje defekty.



Obr. 7.4: Schéma optické rozbočnice s vyznačenými sekciemi, ke kterým jsou přiřazeny detailní fotografie jednotlivých sekcí vytištěné negativní předlohy rozbočnice z materiálu ABS-T s šířkou drážky pro vlnovodný kanál $550 \mu\text{m}$

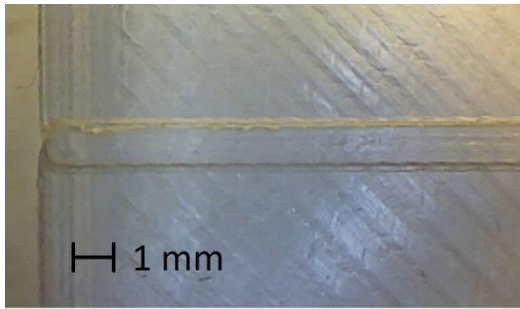
- a) fotografie předlohy pro vstupní vlnovod rozbočnice z čela,
- b) fotografie předlohy pro vstupní vlnovod rozbočnice shora,
- c) fotografie předlohy pro rozbočnici (střední část), kde se vstupní vlnovod postupně rozšiřuje, až se rozdělí na dva výstupní vlnovody,
- d) fotografie předlohy pro výstupní vlnovody rozbočnice shora,
- e) fotografie předlohy pro výstupní vlnovody rozbočnice z čela.

7.2 Optická kontrola realizovaných vzorků

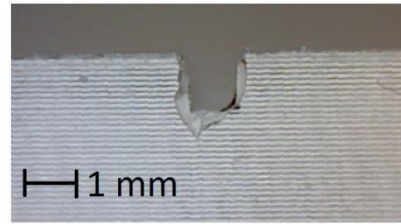
Každý vzorek byl po vytvrzení každé vrstvy opticky zkontrolován, aby byly odhaleny případné defekty a nehomogenity a vzorek mohl být případně vyřazen (například kvůli ztuhnutí před dokončením vakuování a tím pádem zbytkovým bublinám, viz kap. 5).

Optická kontrola vzorků před zalitím vlnovodné drážky

Na obrázku 7.5 je fotografie plášťové vrstvy z polymeru PDMS s drážkou o rozměru $1000 \mu\text{m}$ po vytvrzení a odseparování od formy. Na obrázku 7.5a je pohled shora na drážku v plášťové vrstvě, která byla následně vyplněna polymerem PDMDPS a na obrázku 7.5b je pohled na čelo vzorku. Čelo je deformované, deformace vznikla při vyjímání vzorku z formy a odstraňování přebytečného plášťového polymeru PDMS. Tento defekt ale nemá vliv na měření, protože tato deformovaná část byla před měřením odstraněna pomocí nahřátého skalpelu.



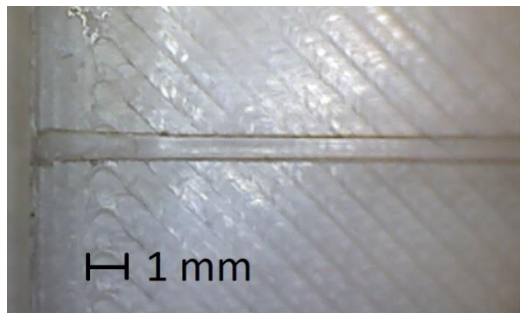
a)



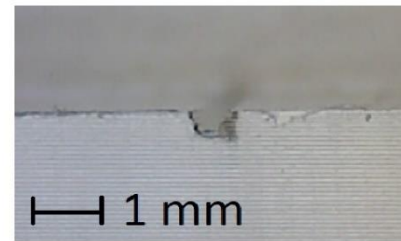
b)

Obr. 7.5: *Fotografie plášťové vrstvy přímého vlnovodu o rozměru drážky 1000 μm z materiálu PDMS*
 a) *pohled shora,*
 b) *pohled z čela.*

Na obrázku 7.6 je fotografie plášťové vrstvy z polymeru PDMS s drážkou o rozměru 550 μm po vytvrzení a odseparování od formy. Na obrázku 7.6a je pohled shora na drážku v plášťové vrstvě, která byla následně vyplněna polymerem PDMDPS a na obrázku 7.6b je pohled na čelo vzorku, kde jde tentokrát vidět přebytečný polymer.



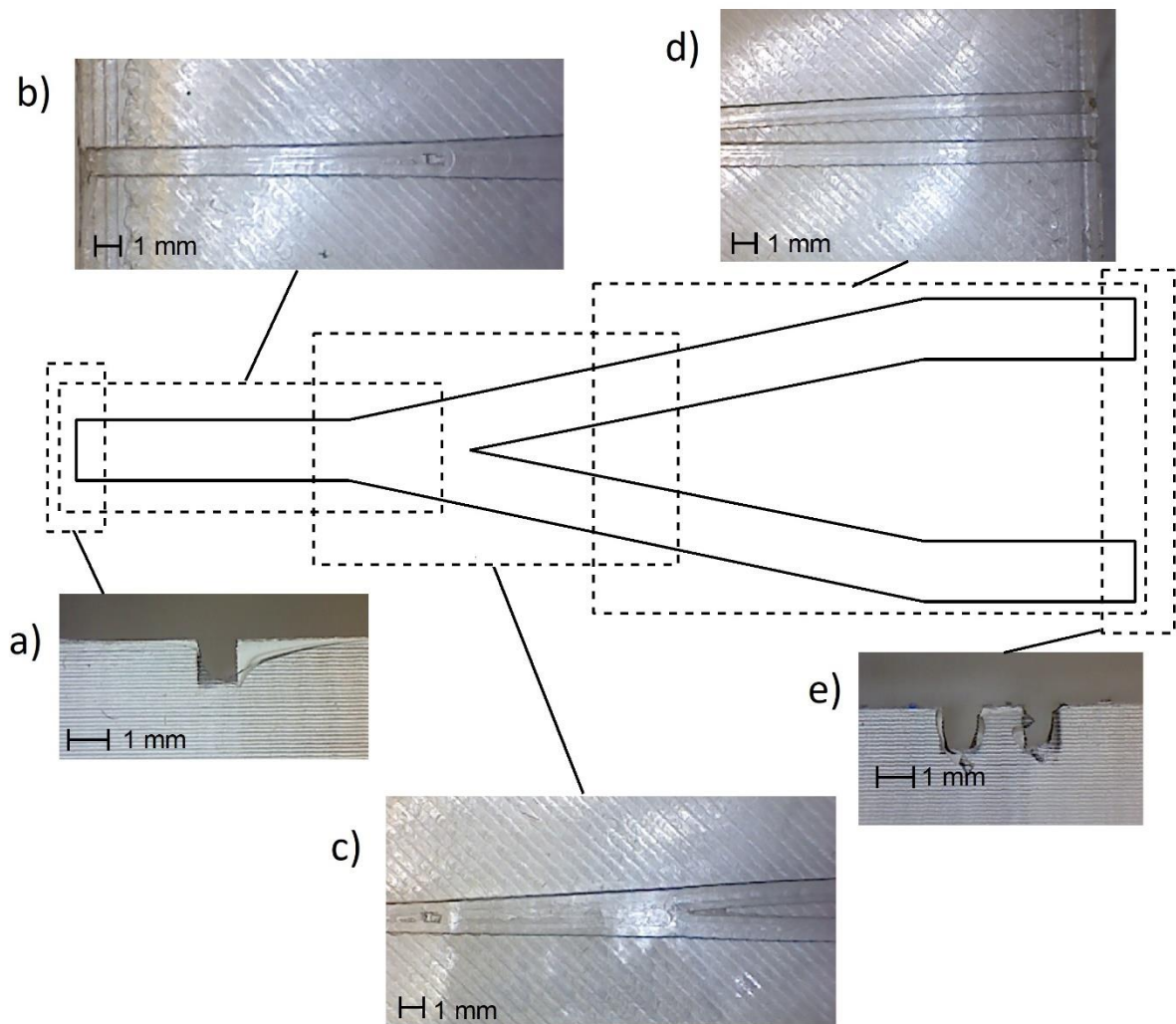
a)



b)

Obr 7.6: *Fotografie plášťové vrstvy přímého vlnovodu o rozměru drážky 550 μm z materiálu PDMS*
 a) *pohled shora,*
 b) *pohled z čela.*

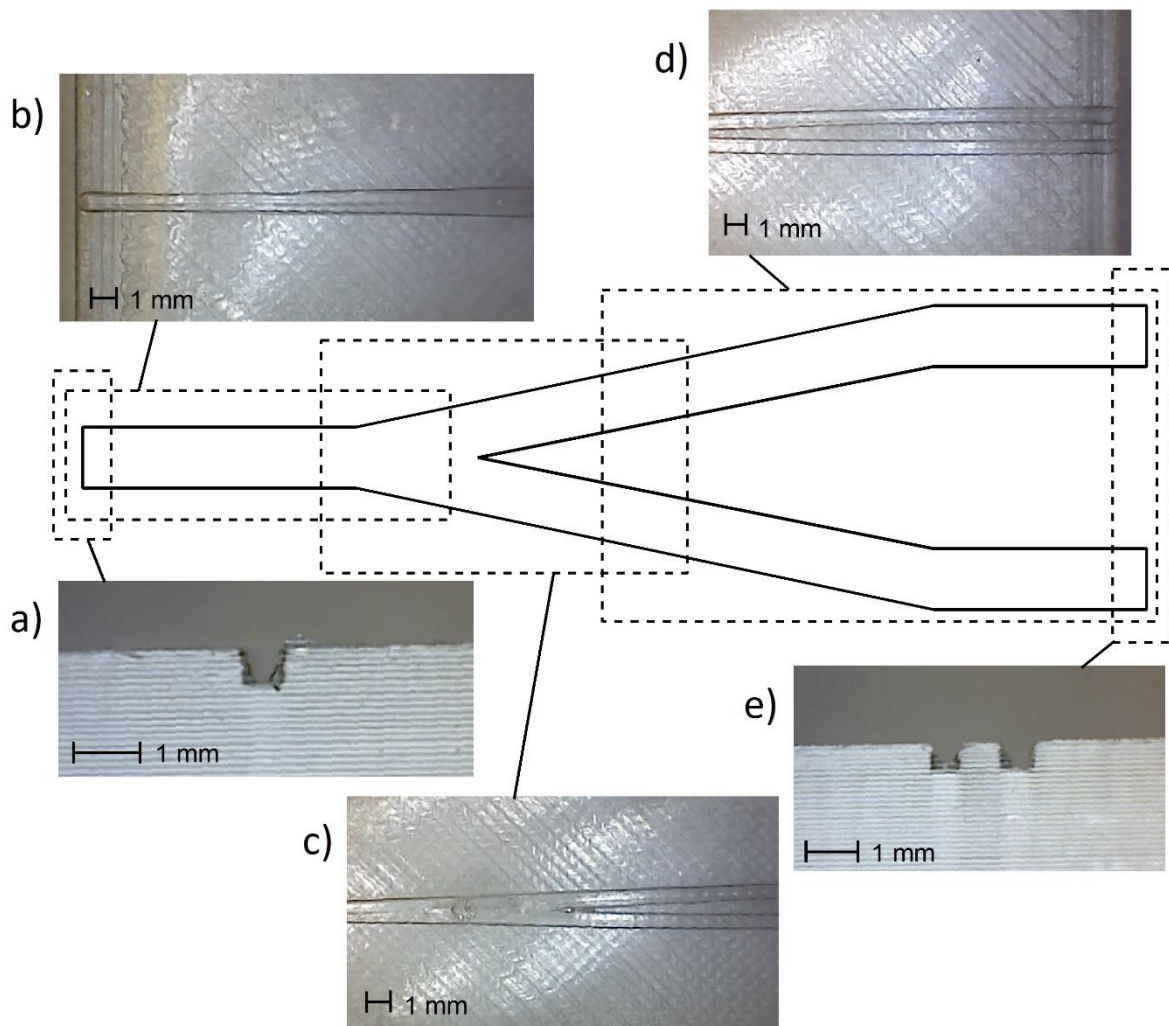
Na obrázku 7.7 je uvedeno schéma optické rozbočnice s vyznačenými sekcemi, které pokrývají přiřazené detailní fotografie plášťové vrstvy z polymeru PDMS s realizovaným nevyplněným vlnovodným kanálem pro optickou rozbočnici s šířkou 1000 μm . Na obrázku 7.7a je uveden pohled na čelo vzorku s kanálem pro vstupní vlnovod rozbočnice, na obrázku 7.7b je pohled shora na vzorek s kanálem pro vstupní vlnovod. Na obrázku 7.7c je pohled shora na střední část vzorku, kde se kanál pro rozbočnici postupně rozšiřuje, až se rozdělí na dva výstupní vlnovody. Na obrázku 7.7d je pohled shora na vzorek s kanály pro výstupní vlnovody rozbočnice a na obrázku 7.7e je pohled na čelo vzorku s kanály pro výstupní vlnovody. Opět lze vidět nepatrné deformace na čelech vzorku (obr. 7.7a a 7.7e), které ale byly po dokončení vzorku před jeho měřením odstraněny pomocí nahřátého skalpelu.



Obr. 7.7: Schéma optické rozbočnice s vyznačenými sekcemi, ke kterým jsou přiřazeny detailní fotografie jednotlivých sekcí plášťové vrstvy rozbočnice z polymeru PDMS s šířkou drážky pro vlnovodný kanál $1000\ \mu\text{m}$, která bude vyplněna vlnovodnou vrstvou

- a) fotografie vzorku z čela s nevyplněným kanálem pro vstupní vlnovod rozbočnice,
- b) fotografie vzorku shora s nevyplněným kanálem pro vstupní vlnovod rozbočnice,
- c) fotografie střední části vzorku shora s nevyplněným kanálem pro rozbočnici, kde se vstupní vlnovod postupně rozšiřuje, až se rozdělí na dva výstupní vlnovody,
- d) fotografie vzorku shora s nevyplněným kanálem pro výstupní vlnovody rozbočnice,
- e) fotografie vzorku z čela s nevyplněným kanálem pro výstupní vlnovody rozbočnice.

Na obrázku 7.8 je uvedeno schéma optické rozbočnice s vyznačenými sekcemi, které pokrývají přiřazené detailní fotografie plášťové vrstvy z polymeru PDMS s realizovaným nevyplněným vlnovodným kanálem pro optickou rozbočnici s šířkou $550\ \mu\text{m}$. Na obrázku 7.8a je uveden pohled na čelo vzorku s kanálem pro vstupní vlnovod rozbočnice. Na obrázku 7.8b je pohled shora na vzorek s kanálem pro vstupní vlnovod. Na obrázku 7.8c je pohled shora na střední část vzorku, kde se kanál pro rozbočnici postupně rozšiřuje, až se rozdělí na dva výstupní vlnovody. Na obrázku 7.8d je pohled shora na vzorek s kanály pro výstupní vlnovody rozbočnice. Na obrázku 7.8e je pohled na čelo vzorku s kanály pro výstupní vlnovody. Opět lze vidět nepatrné deformace na čelech vzorku (obr. 7.8a a 7.8e), které ale byly po dokončení vzorku před jeho měřením odstraněny pomocí nahřátého skalpelu.



Obr. 7.8: Schéma optické rozbočnice s vyznačenými sekcemi, ke kterým jsou přiřazeny detailní fotografie jednotlivých sekcí plášťové vrstvy rozbočnice z polymeru PDMS s šířkou drážky pro vlnovodný kanál $550 \mu\text{m}$

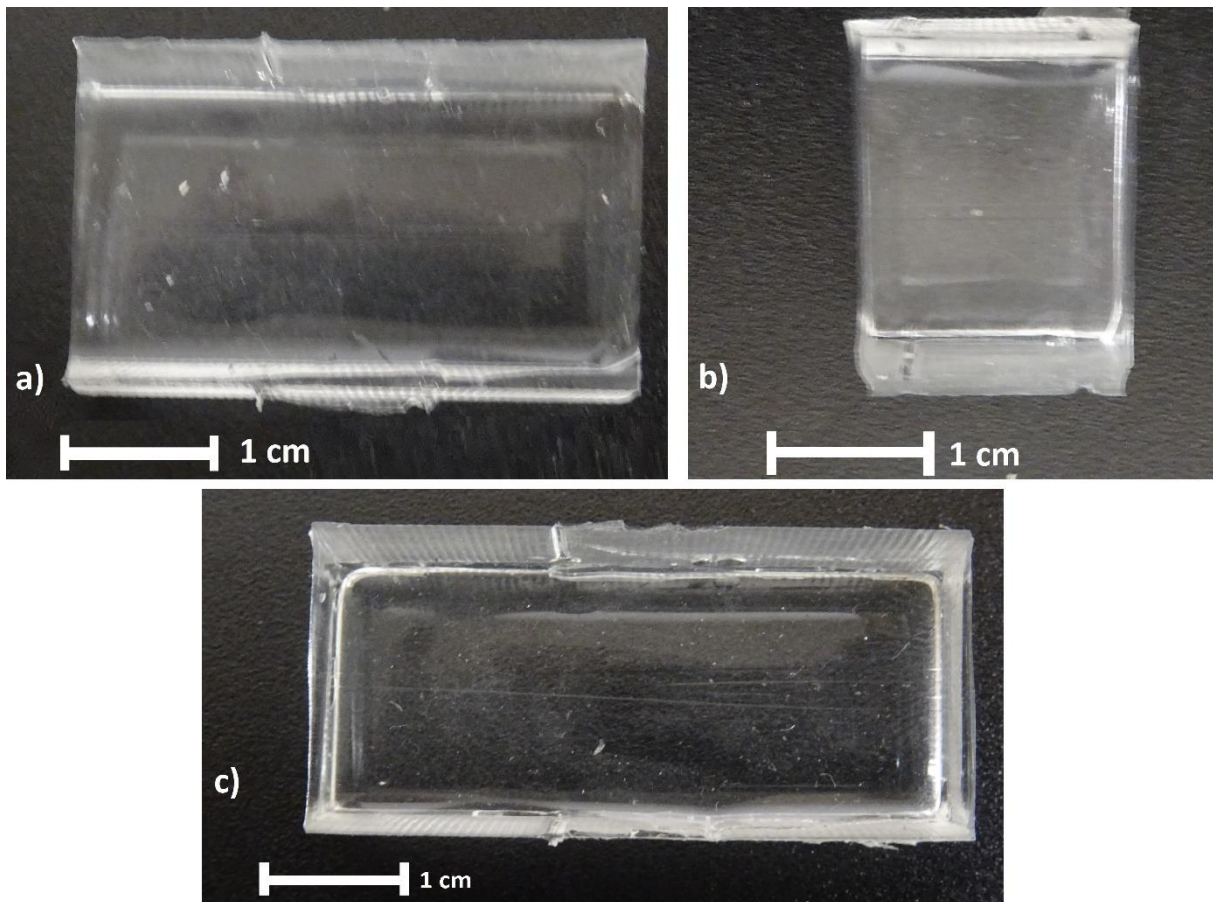
- a) fotografie vzorku z čela s nevyplněným kanálem pro vstupní vlnovod rozbočnice,
- b) fotografie vzorku shora s nevyplněným kanálem pro vstupní vlnovod rozbočnice,
- c) fotografie střední části vzorku shora s nevyplněným kanálem pro rozbočnici, kde se vstupní vlnovod postupně rozšiřuje, až se rozdělí na dva výstupní vlnovody,
- d) fotografie vzorku shora s nevyplněným kanálem pro výstupní vlnovody rozbočnice,
- e) fotografie vzorku z čela s nevyplněným kanálem pro výstupní vlnovody rozbočnice.

Optická kontrola hotových vzorků

Vzorky byly kontrolovány po zalití a vytvrzení všech nanášených vrstev před měřením, aby byly odhaleny případné defekty. Při této kontrole bylo zjištěno, že na čela vzorků před vlnovodnou vrstvou zatekl při výrobě plášťový polymer, takže musely být vzorky zkráceny nahřátým skalpelem, aby mohlo být světlo navázáno přímo do vlnovodné vrstvy. Proto byly později vyrobeny vzorky, do kterých byla přímo zalita vstupní i výstupní vlákna.

Na obrázku 7.9 jsou uvedeny hotové zkrácené vzorky bez připojených optických vláken. Všechny vyfotografované vzorky mají šířku kanálu $1000 \mu\text{m}$. Vlnovodné struktury jsou v transparentních vzorcích špatně dokumentovatelné, nicméně lze na fotografiích 7.9a a 7.9b vidět uprostřed vzorků

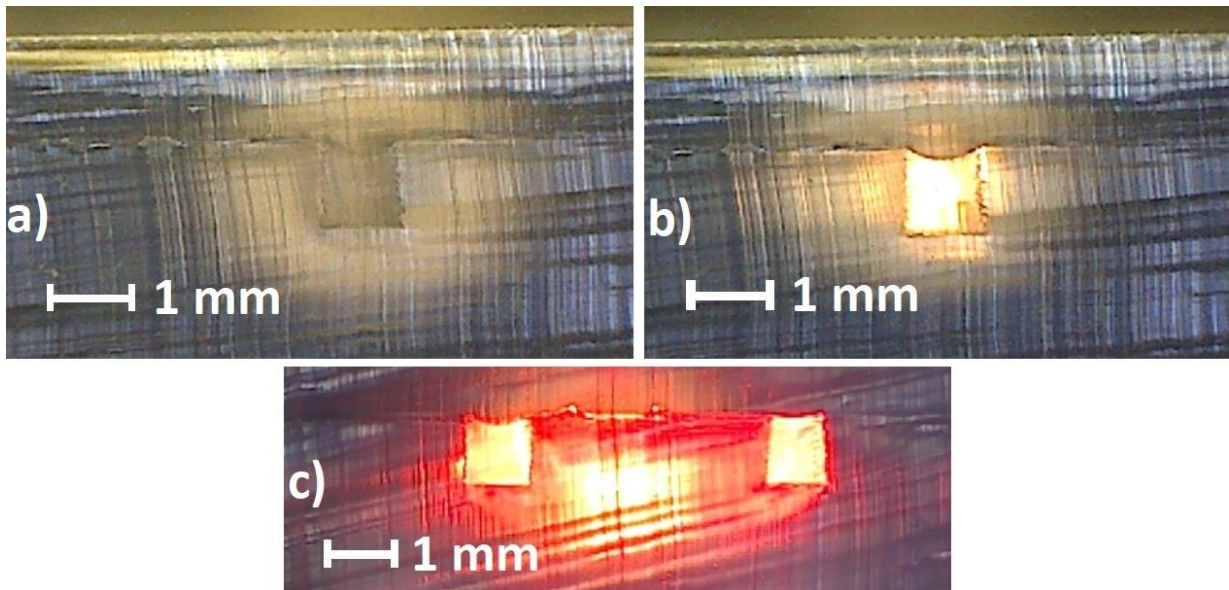
přímé vlnovody a na fotografii 7.9c optickou rozbočnicí 1x2Y. Z fotografií lze vidět, že vzorky nemají žádné viditelné defekty, které by způsobovali nefunkčnost vlnovodů.



Obr. 7.9: Fotografie hotových vzorků bez vláken o šířce vlnovodného kanálu $1000 \mu\text{m}$

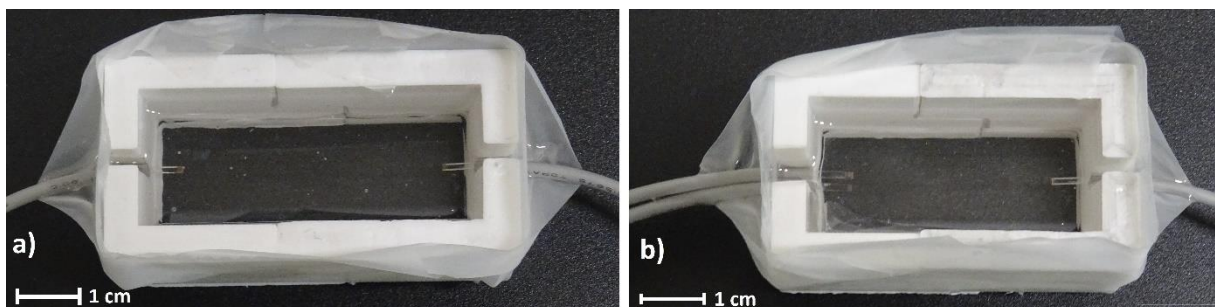
- a) fotografie přímého vzorku o délce 4 cm,
- b) fotografie přímého vzorku o délce 2 cm,
- c) fotografie rozbočnice 1x2Y.

Na obrázku 7.10 jsou uvedeny fotografie čel zkrácených vzorků s šířkou vlnovodného kanálu $1000 \mu\text{m}$. Z obrázků lze vidět, že řez na čelech vzorků není homogenní, a tak vznikají na čelech útlumy. Pro každé čelo je velikost útlumu jiná, protože vzorky byly řezány ručně, a proto nejsou řezy stejné. Na obrázku 7.10a je uvedeno čelo přímého vlnovodu bez navázaného optického signálu, na obrázku 7.10b je uvedeno čelo přímého vlnovodu s navázaným optickým signálem. Z této fotografie je vidět, že na čele vzorku je defekt (tmavší místo vpravo dole ve vlnovodu) vzniklý při ořezávání vzorku. Bohužel se pro vzorky bez přímo zalitých vláken nepodařila vyvinout lepší metoda výroby. Na obrázku 7.10c jsou uvedena čela optické rozbočnice 1x2Y s navázaným optickým signálem. Z obrázku lze vidět, jak rozbočnice vede a dělí vstupní světelný signál, ale opět si lze na čelech všimnout defektů (intenzita světla na čele není všude stejná).



Obr. 7.10: *Fotografie čel hotových vzorků bez vláken o šířce vlnovodného kanálu 1000 μm*
 a) *fotografie čela přímého vzorku bez navázaného optického signálu,*
 b) *fotografie čela přímého vzorku s navázaným optickým signálem,*
 c) *fotografie čel rozbočnice 1x2Y s navázaným optickým signálem.*

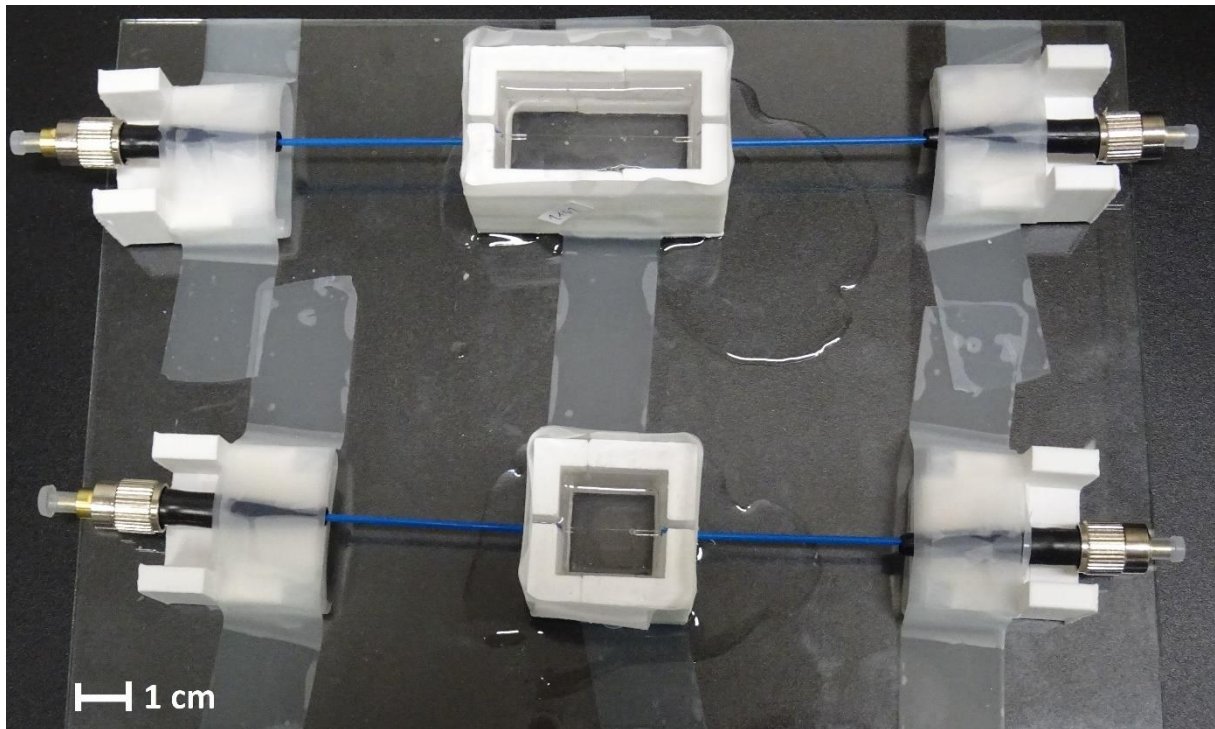
Na obrázku 7.11 jsou uvedeny fotografie vzorků se zalitými POF vlákny. Pro zalévání vláken byly použity pouze vzorky s šířkou vlnovodu 1000 μm . Vzorky jsou stále ve formě, jak byly měřeny, protože při vyjímání vzorků z forem docházelo k vylamování vláken. Na obrázcích lze vidět, že dvoudílné formy byly k sobě stlačeny lepicí páskou, ze které je také podpora pro vlákna vně formy. Vlákna jsou na obrázku ohnutá, protože vzorky byly vakuovány a musely se vejít do exikátoru. Na obrázku 7.11a je uveden vzorek přímého vlnovodu, na obrázku 7.11b je uvedena rozbočnice 1x2Y. Z fotografií nejsou patrné žádné defekty, které by způsobily nefunkčnost struktury.



Obr. 7.11: *Fotografie hotových vzorků se zalitými POF vlákny ve formě, jak byly měřeny*
 a) *fotografie přímého vlnovodu,*
 b) *fotografie optické rozbočnice 1x2Y.*

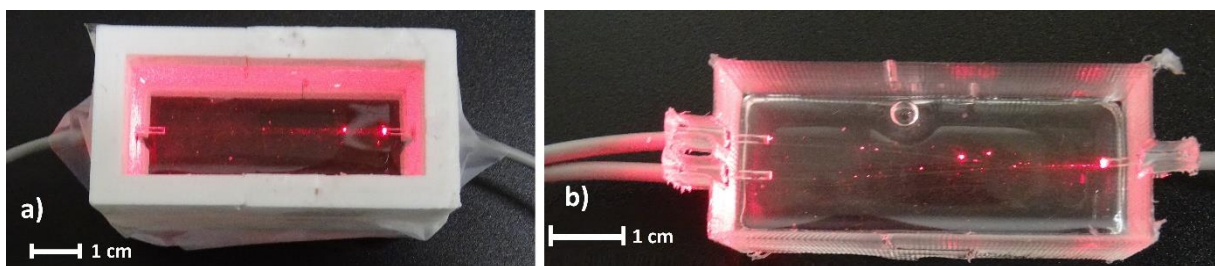
POF vlákna jsou použitelná pouze pro viditelné a velmi blízké infračervené spektrum. Proto byla vyrobena sada vzorků, do které byla zalita velkopřůměrová křemenná vlákna, aby bylo možné vzorky přeměřit i pro další vlnové délky, konkrétně pro 1300 nm a 1550 nm . Fotografie vzorků je uvedena na obrázku 7.12. Vzorky musely být fixovány na skleněné podložce, protože křemenná vlákna jsou neohebná a při neopatrné manipulaci může velice snadno dojít k vylomení vlákna ze vzorku anebo k jeho zlomení. Z obrázku lze vidět, že ve vzorcích jsou zbytkové bubliny, protože se vzorky na této podložce nevejdou do exikátoru a musela být pro vakuování použita jiná vakuová komora, která ale nedokázala udržet dostatečný tlak pro odstranění všech bublin před ztuhnutím polymeru. Dále je na obrázku vidět vytečený plášťový polymer kolem forem se vzorky, který u vzorků bez vláken zatékal

před čelo vlnovodné vrstvy, a proto byly vzorky zkracovány. Z obrázku není patrný žádný defekt, který by způsobil nefunkčnost struktury.



Obr. 7.12: Fotografie přímých vzorků fixovaných na skleněné podložce o šířce vlnovodu $1000\ \mu\text{m}$, délce $4\ \text{cm}$ a $2\ \text{cm}$ se zalitými křemennými vlákny.

Na obrázku 7.13 jsou uvedeny fotografie vzorků vedoucích optický signál se zalitými vlákny. Z obrázků lze vidět, že ve vlnovodné vrstvě jsou bubliny, které ve vzorcích zůstaly, protože vzorky nebyly po nanesení vlnovodné vrstvy vakuovány, jelikož se nevešly do exikátoru. Proces výroby byl dále optimalizován a poslední sada vzorků byla upravena tak, aby ji bylo možné vložit do exikátoru. Ve vlnovodné vrstvě potom nezůstaly bubliny. Na obrázku 7.13a je uveden přímý vlnovod ve formě a na obrázku 7.13b je uvedena optická rozbočnice $1 \times 2Y$ (jeden z mála vzorků, které se podařilo vyjmout z formy bez vylomení vláken), u které je vidět také velká bublina v krycí vrstvě, ta je ale daleko od vlnovodné struktury a tedy neovlivnila výsledky měření.



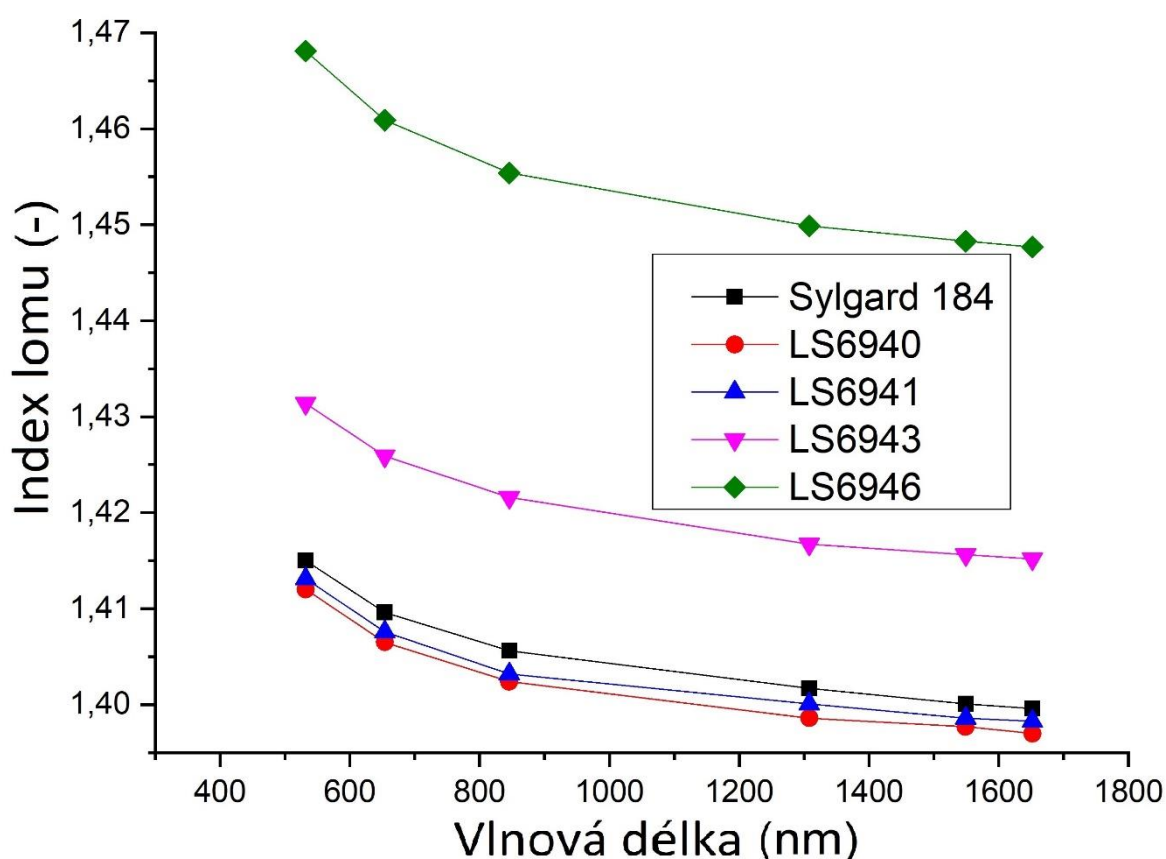
Obr. 7.13: Fotografie vzorků o šířce vlnovodu $1000\ \mu\text{m}$ se zalitými vlákny vedoucí optický signál
a) přímý vlnovod ve formě,
b) optická rozbočnice $1 \times 2Y$ vyjmuta z formy.

7.3 Měření indexů lomu použitých materiálů

K měření indexů lomu použitých materiálů byla použita jednohranolová vidová spektroskopie (viz kapitola 6.1). Naměřené výsledky jsou uvedené na obrázku 7.14. Všechny vzorky, ze kterých byl index lomu měřen, byly vytvrzeny při teplotě 65°C po dobu 4 hodin. Při této teplotě se vytvrzovaly taktéž vzorky se strukturami určené k měření optického útlumu.

Měření bylo provedeno pro vlnové délky 532, 654, 846, 1308, 1549 a 1652 nm. Z obrázku lze vidět, že se zvyšující se vlnovou délkou záření klesá index lomu materiálu. V této bakalářské práci byly navrhovány rozbočnice, které byly optimalizovány pro vlnovou délku 650 nm a proto je hodnota indexu lomu na této vlnové délce nejdůležitější. Nejmenší index lomu byl naměřen pro materiál LS6940, pro 654 nm má hodnotu 1,4065. Naopak nejvyšší index lomu má materiál LS6946, který byl změřen pro vlnovou délku 654 nm a má hodnotu 1,4609. Důležité jsou hodnoty materiálů, které byly použity k realizaci optických struktur, to je Sylgard 184 a LS6943. Indexy lomu těchto materiálů mají hodnotu 1,4096 pro Sylgard 184 a 1,4259 pro LS6943 obojí pro vlnovou délku 654 nm.

Tyto hodnoty byly měřeny až po dodání přístroje Metricon 2010 do laboratoře PLAMO (laboratoř planárních optoelektronických a optických integrovaných struktur) na Katedru mikroelektroniky, FEL ČVUT v Praze v září 2018. Pro počítačové simulace byly tedy použity indexy lomu, které byly měřeny dříve na pracovišti na VŠCHT. Tyto naměřené hodnoty indexů lomu jsou uvedeny v tabulce 4.1 na straně 16.

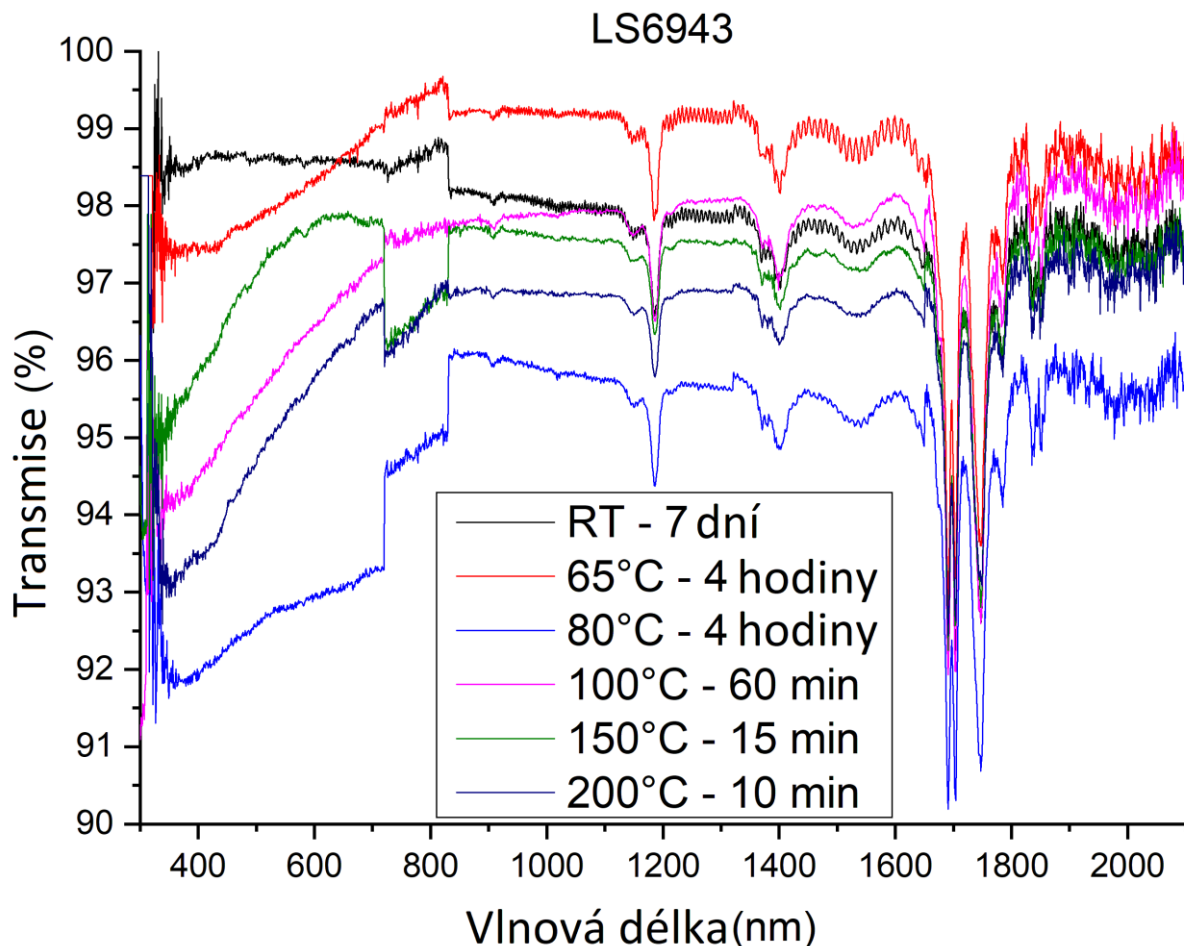


Obr. 7.14: Naměřené indexy lomu použitých materiálů a dopočítané křivky.

7.4 Měření transmisních spekter

Transmisní spektra materiálu LS6943, který byl použit k výrobě vzorků jako vlnovodná vrstva, byla měřena pomocí spektrometru Shimadzu UV-3600 UV-VIS-NIR (viz kapitola 6.2). Graf naměřených výsledků 7.15. Vzorky pro měření byly vytvrzovány při různé teplotě a také po různou dobu, podle doporučení od výrobce polymeru. Z grafu lze vidět, že zhruba platí, že čím rychleji a při vyšší teplotě byl polymer vytvrzen, tím horší pak měl transmisí. Výjimkou je vzorek tvrzený při 80 °C, který vyšel nejhůře. Jako nejlepší vyšel vzorek tvrzený při 65 °C po dobu 4 hodin. Tato teplota a čas tvrzení byla používána při přípravě vzorků z důvodu přijatelné časové náročnosti, nejlepších výsledků transmisních spekter a možnosti používat při této teplotě tištěné formy, které by nevydržely vysoké teploty.

Z grafu lze také vidět, že polymery jsou vhodné pro použití téměř v celém měřeném spektru. S výjimkou 80°C klesne transmise pod 95 % (pro všechny teploty, RT - Room Temperature, pokojová teplota) pouze v intervalu vlnových délek 1600 – 1800 nm a na začátku měřeného spektra, tj. pro vlnové délky pod 500 nm. Menší propad je taky na vlnových délkách 1200 a 1400 nm, ale pouze o 1–2 % a poté se transmise vrátí na původní hodnotu. Nejlepší teplota 65°C má transmisi 99–100 % pro celé měřené spektrum (kromě výše popsaných výjimek), ostatní teploty mají transmisi přibližně 96-98 % s náběhem z nižších hodnot pro viditelné spektrum (viz obr. 7.15), kromě teploty 80 °C, která má většinou hodnotu 95-96 %.

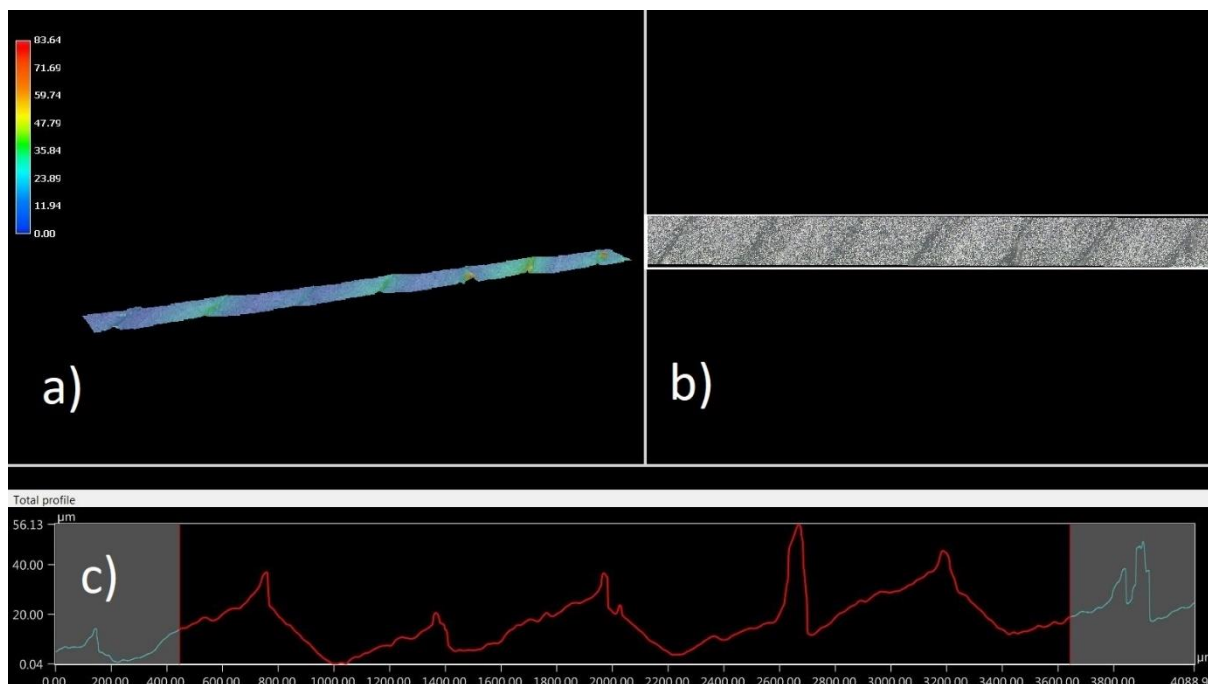


Obr. 7.15: Graf naměřených transmisních spekter pro polymer LS6943 pro různé teploty a časy tvrzení.

7.5 Měření drsnosti povrchu

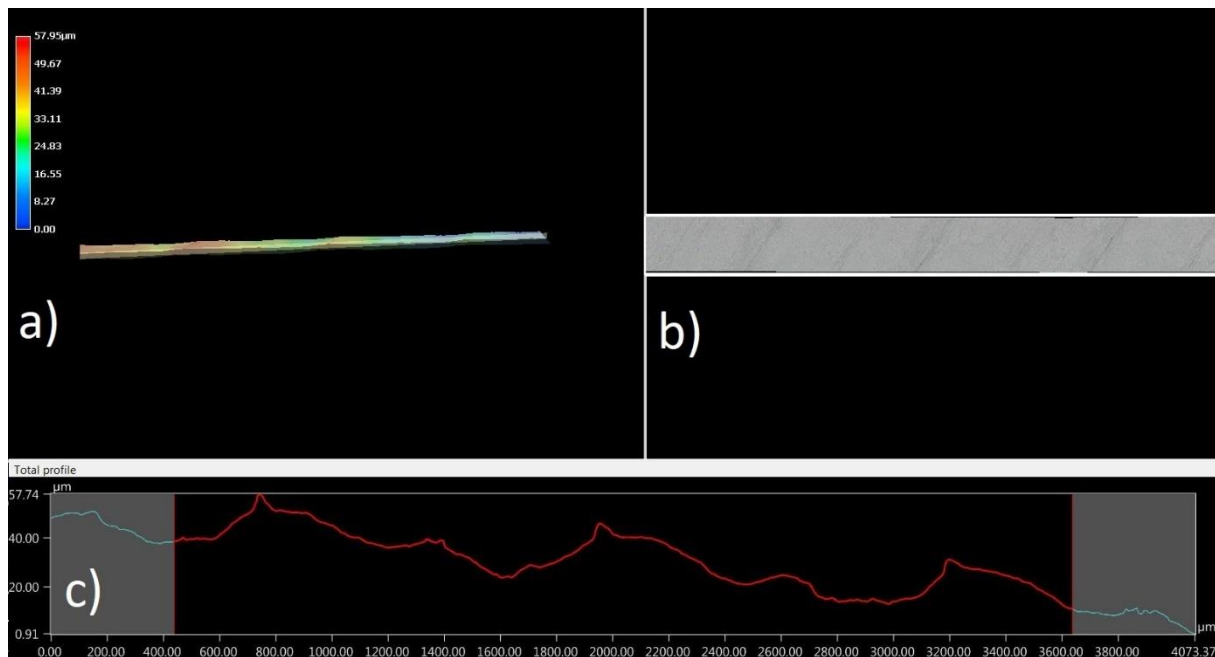
Drsnost byla měřena pomocí digitálního mikroskopu VHX-6000 series (viz kap. 6.3) pro vybrané formy a odlitky z nich. Cílem tohoto měření bylo porovnat, jak se liší drsnost forem vyrobených z dvou různých strun: ABS a ABS-T, dále zhodnotit kvalitu a přesnost rozměrů drážky, do které byla vylévána vlnovodná vrstva a porovnat drsnost formy a odlitky z ní. Materiál ABS-T je proti ABS nepatrně měkčí, má menší smršťivost, takže z něj lze tisknout větší objekty a má lesklé barvy, zatímco ABS má barvy matné [23].

Na obrázku 7.16a je zobrazená 3D vizualizace naskenovaného povrchu formy z materiálu ABS. Zdrojový sken povrchu je zobrazen na obrázku 7.16b. V profilu, zobrazeném na obrázku 7.16c, lze vidět nerovnosti způsobené kladením roztavené tiskové struny na podložku při tisku formy (roztavený materiál se nerozteče rovnoměrně, ale v místě dotyku nanášecí hlavy ho zůstane více). Parametr drsnosti byl změřen z tohoto naskenovaného profilu a je $R_a = 4,25 \mu m$.



Obr. 7.16 *Naskenovaný povrch vytištěné formy z ABS struny*
 a) *3D vizualizace naskenovaného povrchu,*
 b) *naskenovaný povrch formy,*
 c) *profil naskenované formy, ze kterého byla změřena drsnost.*

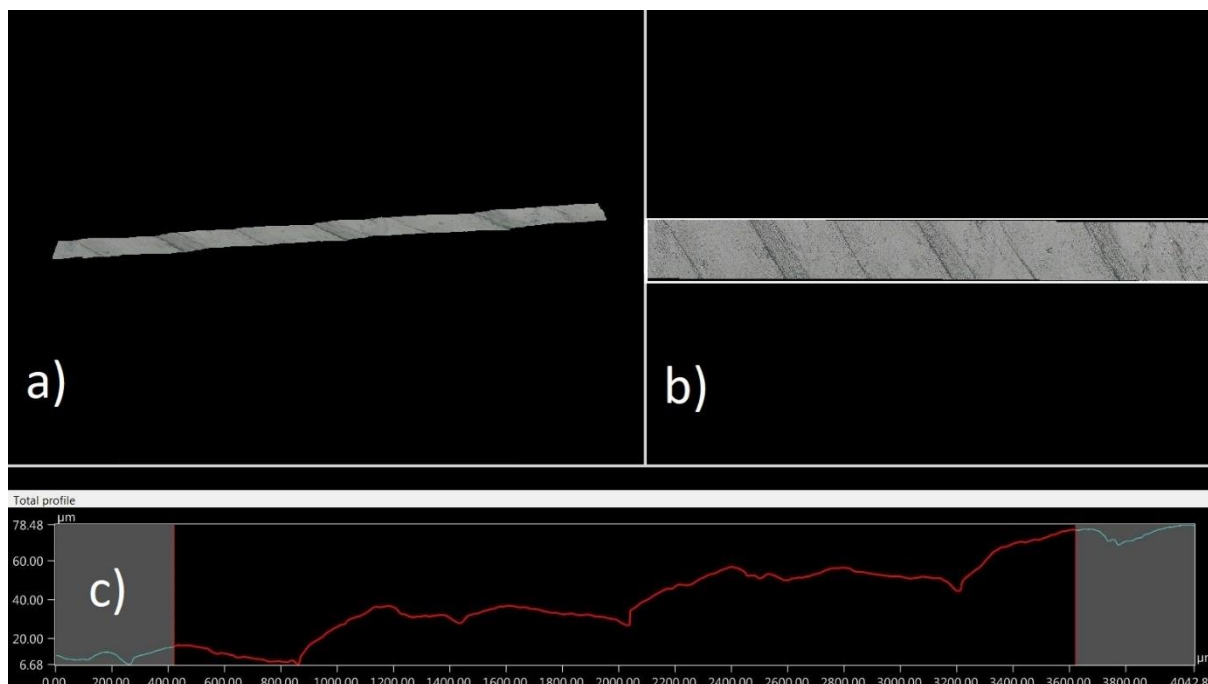
Na obrázku 7.17a je zobrazená 3D vizualizace naskenovaného povrchu formy z materiálu ABS-T. Z obrázku lze vidět, že vzorek nebyl na podložce položen vodorovně (levá strana je výš než pravá, lze vidět i z měřeného profilu, který je zobrazen na obrázku 7.17c), ale na měření drsnosti nemá tato nerovnost vliv. Zdrojový sken povrchu je zobrazen na obrázku 7.17b. V profilu na obrázku 7.17c lze vidět nerovnosti způsobené kladením roztavené tiskové struny na podložku při tisku formy (roztavený materiál se nerozteče rovnoměrně, ale v místě doteku nanášecí hlavy ho zůstane více). Parametr drsnosti byl změřen z tohoto naskenovaného profilu a je $R_a = 2,54 \mu m$.



Obr. 7.17 *Naskenovaný povrch vytištěné formy z ABS-T struny*
 a) *3D vizualizace naskenovaného povrchu,*
 b) *naskenovaný povrch formy,*
 c) *profil naskenované formy, ze kterého byla změřena drsnost.*

Při srovnání profilů naskenovaných forem z materiálu ABS (viz obr. 7.16c) a formy z materiálu ABS-T (viz obr. 7.17c,) můžeme vidět velký rozdíl v drsnosti profilů. Tomu odpovídají i naměřené parametry drsnosti. Parametr drsnosti má pro materiál ABS velikost $R_a = 4,25 \mu m$ a pro materiál ABS-T $R_a = 2,54 \mu m$. Vidíme tedy, že forma z ABS-T je výrazně méně drsná než forma z ABS. Proto byl k výrobě forem používán materiál ABS-T.

Na obrázku 7.18a je zobrazená 3D vizualizace naskenovaného povrchu odlitku z formy z polymeru PDMS (forma je z materiálu ABS-T). Z obrázku lze vidět, že vzorek nebyl na podložce položen vodorovně (pravá strana je výš než levá, lze vidět i z měřeného profilu, který je zobrazen na obrázku 7.18c), ale na měření drsnosti nemá tato nerovnost vliv. Zdrojový sken povrchu je zobrazen na obrázku 7.18b. V profilu na obrázku 7.18c lze vidět nerovnosti, které byly na formě, a proto jsou i v odlitku, a byly způsobeny kladením roztavené tiskové struny na podložku při tisku formy (roztavený materiál se nerozteče rovnoměrně, ale v místě doteku nanášecí hlavy ho zůstane více). Parametr drsnosti byl změřen z tohoto naskenovaného profilu a je $R_a = 2,37 \mu m$.

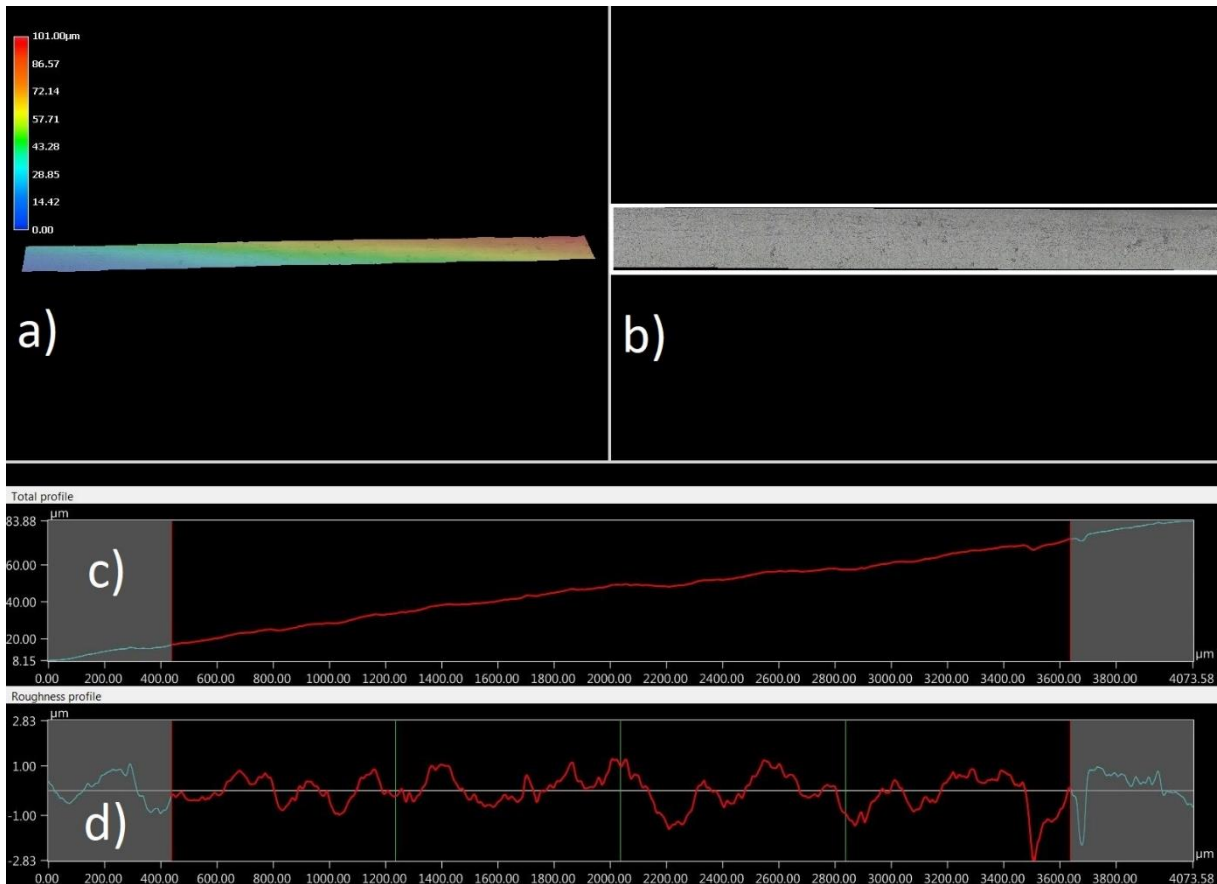


Obr. 7.18 *Naskenovaný povrch odlitku z PDMS z formy z materiálu ABS-T*
 a) *3D vizualizace naskenovaného povrchu,*
 b) *naskenovaný povrch odlitku,*
 c) *profil naskenovaného odlitku ze kterého byla změřena drsnost.*

Při srovnání naskenovaných profilů formy z materiálu ABS-T (viz obr. 7.17c) a odlitku z ní z materiálu PDMS (viz obr. 7.18c lze vidět, že nebyl ani jeden vzorek při skenování ve vodorovné poloze, což na měření drsnosti nemá vliv, ale na vizuální srovnání profilů ano. I přes to lze vidět, že profily odpovídají formě (obr. 7.17c) a odlitku (obr. 7.18c). Naměřené drsnosti jsou také téměř stejné, pro odlitek byl změřen parametr drsnosti $R_a = 2,37 \mu m$ a pro formu $R_a = 2,54 \mu m$.

Na obrázku 7.19a je zobrazená 3D vizualizace naskenovaného povrchu drážky (která bude vyplněna polymerem, který bude tvořit vlnovodnou vrstvu vzorku) odlitku z formy z polymeru PDMS (forma je z materiálu ABS-T). Z obrázku lze vidět, že vzorek nebyl na podložce položen vodorovně (pravá strana je výš než levá, lze vidět i z měřeného profilu, který je zobrazen na obrázku 7.19c), ale na měření drsnosti nemá tato nerovnost vliv. Zdrojový sken povrchu je zobrazen na obrázku 7.19b. Profil na obrázku 7.19c je pro tuto nízkou drsnost málo podrobný, proto je profil na obrázku 7.19d vyrovnaný a přiblížen.

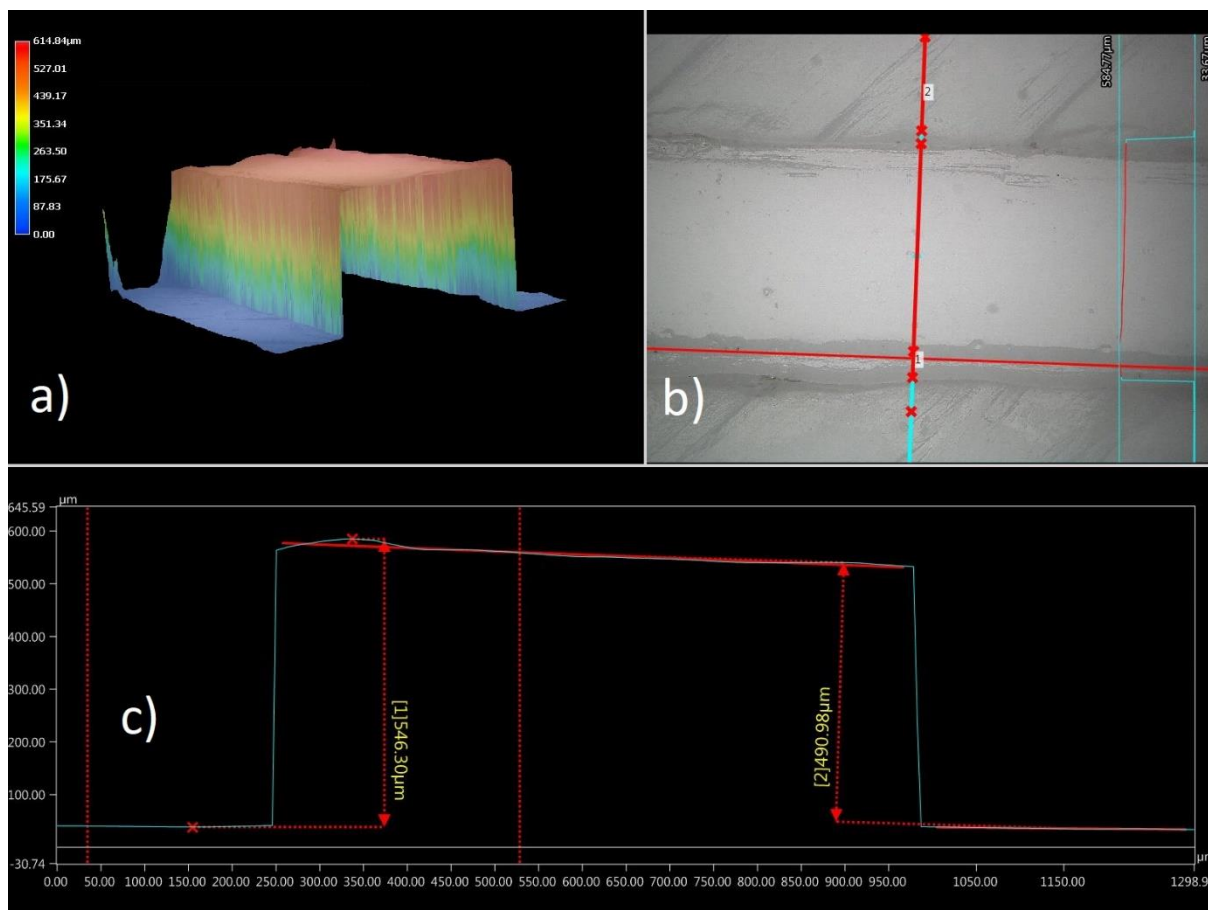
Parametr drsnosti byl změřen z tohoto naskenovaného profilu a je $R_a = 0,52 \mu m$, což téměř dosahuje optické kvality, která je pro parametr drsnosti $R_a \leq 0,35 \mu m$.



Obr. 7.19 *Naskenovaný povrch vlnovodné drážky odlitku z PDMS z formy z materiálu ABS-T*

- a) *3D vizualizace naskenovaného povrchu,*
- b) *naskenovaný povrch vlnovodné drážky odlitku,*
- c) *profil naskenované vlnovodné drážky odlitku,*
- d) *detail profilu naskenované vlnovodné drážky odlitku, ze kterého byla změřena drsnost.*

Na obrázku 7.20a je uvedena 3D vizualizace naskenované drážky s rozměrem $550 \mu\text{m}$ z formy z materiálu ABS-T. Zdrojový sken povrchu je zobrazen na obrázku 7.20b. Na skenu jsou rovněž vyznačena místa měření rozměrů drážky. Na obrázku 7.20c je uveden profil naskenované drážky společně s naměřenými rozměry. Jak lze vidět z obrázku, drážka nemá všude stejné rozměry. Její maximální vertikální rozměr přibližně odpovídá požadovaným rozměrům (naměřeno $546,3 \mu\text{m}$ a požadovaný rozměr je $550 \mu\text{m}$), ale jinak její rozměr klesá v tomto skenu směrem k pravé straně až na hodnotu $490 \mu\text{m}$. Její horizontální rozměr je v tomto případě téměř o polovinu větší, než je požadovaný rozměr.



Obr. 7.20 Naskenovaný profil drážky pro vlnovodný kanál na formě z materiálu ABS-T
 a) 3D vizualizace naskenované drážky,
 b) naskenovaná drážka s vyznačenými oblastmi měření,
 c) profil naskenované drážky, ze které byly změřeny rozměry.

Předloha s drážkou o rozměru $1000 \mu\text{m}$ bohužel nebyla změřena, kvůli omezenému času na měření při prezentaci měřicího přístroje. Nicméně lze předpokládat, že pro větší rozměr drážky dosáhne tiskárna větší přesnosti rozměrů a vyrobit drážku s odchylkou do $50 \mu\text{m}$ bude možné.

7.6 Měření optického útlumu

Optický útlum vzorků byl měřen pomocí metody dvou délek (viz kap. 6.4). Nejdříve byly vzorky měřeny pomocí přípravku s diodami a následně pomocí laserů. Byly vyrobeny vzorky dvojího typu. Prvním byly přímé vlnovody, které měly délku 2 cm (pro výpočty byly použity jako referenční) a 4 cm, ze kterých byl počítán útlum v dB / cm . Jako plášťová vrstva byl použit polymer Sylgard 184 a jako vlnovodná vrstva polymer LS6943. Vzorky byly vyrobeny ve dvou rozměrech jádra (550 a 1000 nm), stejně jako vyrobené optické rozbočnice.

Druhým typem byly optické rozbočnice 1x2Y a 1x4Y (vyrobené podle návrhů uvedených v kap. 4.3). Vyrobeny byly rozbočnice 1x2Y z materiálů Sylgard 184 / LS6943 o šířce vlnovodného kanálu 550 a $1000 \mu\text{m}$ (z kap. 4.3.1), rozbočnice 1x4Y, která byla vyrobena kaskádní řazením 1x2Y rozbočnic. V případě rozbočnice 1x4Y byla vyrobena samostatně i vstupní rozbočnice 1x2Y (viz kap. 4.3.1). Ke každé rozbočnici byl vyroben i rovný referenční vlnovod, aby mohly být počítány její optické ztráty.

Jak již bylo uvedeno v kapitolách 7.1 a 7.2, vzorky musely být na čelech uříznuty, kvůli zatečenému plášťovému polymeru před čelo vlnovodu, aby bylo možné do něj přímo navázat světlo. Tím se ale změnila původní délka vzorků (zkrácení přibližně o $2 - 3 \text{ mm}$), a navíc kvalita takto vyrobených čel

nebyla příliš vysoká a tím pádem na rozhraní vznikaly optické ztráty a rovněž jsou patrné velmi velké rozdíly ve výkonech přenášených jednotlivými vzorky (viz tab. 7.1–7.7). Vzorky proto byly po změření seřazeny od nejlepšího po nejhorší, a tak byly i párovány pro výpočty (nejlepší – nejlepší, ..., nejhorší – nejhorší). U měření rozbočnic se často stávalo, že reference přenášela menší výkon než samotná rozbočnice, proto nemohl být spočítán útlum rozbočnice.

Byl také testován postup přípravy optických vlnodů a rozbočnic, při kterém byly vzorky na vstupu i na výstupu nerozebíratelně spojeny s optickými vlákny z důvodu co největšího snížení optických ztrát na rozhraní vlákna a vzorku. Jejich měření je výrazně jednodušší, protože nemusí být hledáno maximum přenášeného výkonu vzorkem. Jak již bylo zmíněné v kapitole 5, při výrobě se vytvářejí v polymerech bubliny, které je nutné odstranit v exikátoru. Bylo proto nutné vyvinout postup pro jejich odstranění. Proto první sady vzorků, vyrobené před optimalizací výroby, vykazovaly větší počet poruch tvořený právě bublinami.

Měření přímých vlnodů bez zalitých vláken

Naměřené hodnoty přenášeného výkonu a z nich spočítaný útlum pro přímé vlnovody s rozměrem jádra $1000\ \mu\text{m}$ měřené pomocí diod jsou uvedeny v tabulce 7.1. Z tabulky vyplývají velké rozdíly v přenášených výkonech mezi jednotlivými vzorky, které jsou způsobeny pravděpodobně deformacemi na čelech vlnodů vzniklými při jejich řezání. Ze stejného důvodu také vyšel optický útlum relativně vysoký a velmi se liší mezi různými dvojicemi vzorků.

Tab. 7.1: Naměřené hodnoty optického útlumu přímých vlnodů s rozměrem jádra $1000\ \mu\text{m}$ měřené pomocí přípravku s diodami.

Vlnová délka [nm]:			589		635	
Číslo vzorku	Původní délka [mm]	L^1 [mm]	P_{out} [μW]	A [dB/cm]	P_{out} [μW]	A [dB/cm]
1107	20	17,43	5,00	1,93	5,40	1,60
1110	40	36,92	2,10		2,63	
1109	20	18,04	4,60	3,96	4,57	3,43
1112	40	36,93	0,82		1,03	

V tabulce 7.2 jsou uvedeny naměřené hodnoty optického výkonu a z nich spočítaný útlum pro přímé vlnovody s rozměrem jádra $1000\ \mu\text{m}$ měřené pomocí laserů. Opět lze vidět velké rozdíly v přenášených výkonech mezi jednotlivými vzorky a tím pádem i rozdílný (a vysoký) útlum. Nejmenší hodnota optického útlumu byla naměřena pro vlnovou délku $850\ \text{nm}$, kde je optický útlum $0,89\ \text{dB/cm}$.

Tab. 7.2: Naměřené hodnoty optického útlumu přímých vlnodů s rozměrem jádra $1000\ \mu\text{m}$ měřené pomocí laserů.

Vlnová délka [nm]:			532		650		850	
Číslo vzorku	Původní délka [mm]	L^1 [mm]	P_{out} [μW]	A [dB/cm]	P_{out} [μW]	A [dB/cm]	P_{out} [μW]	A [dB/cm]
1107	20	17,43	321,0	2,16	332	1,71	17,6	0,89
1110	40	36,92	122,0		154		11,8	
1109	20	18,04	182,0	1,42	212	1,80	13,7	1,07
1112	40	36,93	98,1		97		8,6	

¹ Délka po vytvoření čel vlnodů umožňující navázání optického signálu z optického vlnovodu.

V tabulce 7.3 jsou uvedeny naměřené hodnoty optického výkonu a z nich spočítaný útlum pro přímé vlnovody s rozměrem jádra $550\ \mu\text{m}$ měřené pomocí diod. Opět lze vidět velké rozdíly mezi jednotlivými vzorky. Nejhorší vzorek přenáší přibližně polovinu výkonu proti nejlepšímu. Vzorky byly měřeny na POF vláknech s průměrem jádra $980\ \mu\text{m}$, proto se do nich nemohl navázat celý výkon přenášený přírodním vláknem. Kvůli nízké kvalitě čel vzorků jsou hodnoty optických útlumů opět vysoké.

Tab. 7.3: Naměřené hodnoty optického útlumu přímých vlnovodů s rozměrem jádra $550\ \mu\text{m}$ měřené pomocí diod.

Vlnová délka [nm]:			589		635	
Číslo vzorku	Původní délka [mm]	L^1 [mm]	P_{out} [μW]	A [dB/cm]	P_{out} [μW]	A [dB/cm]
1130	20	17,35	3,06	3,49	4,02	2,09
1127	40	37,39	0,61		1,53	
1117	20	17,58	2,75	2,77	3,31	2,66
1118	40	37,31	0,78		0,99	
1116	20	18,29	2,51	2,55	2,82	2,44
1128	40	37,14	0,83		0,98	
1129	20	17,48	1,68	1,81	2,04	1,76
1119	40	37,43	0,73		0,91	

V tabulce 7.4 jsou uvedeny naměřené hodnoty optického výkonu a z nich spočítaný útlum pro přímé vlnovody s rozměrem jádra $550\ \mu\text{m}$ měřené pomocí laserů. Vzorky byly opět měřeny pomocí připojení k POF vláknům s průměrem jádra $980\ \mu\text{m}$, takže znovu nemohlo dojít k řádnému navázání přenášeného výkonu do měřeného vzorku.

Tab. 7.4: Naměřené hodnoty optického útlumu přímých vlnovodů s rozměrem jádra $550\ \mu\text{m}$ měřené pomocí laserů.

Vlnová délka [nm]:			532		650		850	
Číslo vzorku	Původní délka [mm]	L^1 [mm]	P_{out} [μW]	A [dB/cm]	P_{out} [μW]	A [dB/cm]	P_{out} [μW]	A [dB/cm]
1130	20	17,35	223	2,77	274,0	3,13	15,9	3,28
1127	40	37,39	62		64,5		3,5	
1117	20	17,58	161	2,40	197,0	2,65	11,9	2,63
1118	40	37,31	54		59,0		3,6	
1116	20	18,29	113	2,07	142,0	1,50	8,9	1,84
1128	40	37,14	46		74,0		4,0	
1129	20	17,48	81	1,18	131,0	2,01	5,2	0,92
1119	40	37,43	47		52,0		3,4	

Měření optických rozbočnic bez zalitých vstupních a výstupních vláken

Naměřené hodnoty optického výkonu rozbočnic s rozměrem jádra $1000\ \mu\text{m}$ a jejich referencí měřené pomocí diod, z nich spočítaný útlum a poměr rozdělení výkonu rozbočnicí jsou uvedeny v tabulce 7.5. Z naměřených výsledků vyplývá, že širší rozbočnice (označená jako „první rozbočnice 1x4Y“) dělí výkon pro měřené vlnové délky přesněji, a to v poměru 51 : 49 %, a má pro tyto vlnové délky nižší útlum.

¹ Délka po vytvoření čel vlnovodů umožňující navázání optického signálu z optického vlnovodu.

Tab. 7.5: Naměřené hodnoty optického útlumu rozbočnic a jejich referencí s rozměrem jádra 1000 μm měřené pomocí diod.

Vlnová délka [nm]:			589			650		
Číslo vzorku	Popis vzorku	L ¹ [mm]	P _{out} [μW]	A [dB]	Poměr výkonů	P _{out} [μW]	A [dB]	Poměr výkonů
1114	reference přímá	41,38	1,26	--- ²	47 : 53	1,57	--- ²	47 : 53
1122	rozbočnice 1000 μm	40,33	0,55					
			0,61					
1142	reference přímá	47,33	1,15	--- ²	51 : 49	1,36	--- ²	51 : 49
1143	první rozbočnice 1x4Y	45,94	0,59					
			0,56					

V tabulce 7.6 jsou uvedeny naměřené hodnoty optického výkonu rozbočnic s rozměrem jádra 1000 μm a jejich referencí měřené pomocí laserů, z nich spočítaný útlum a poměr rozdělení výkonu rozbočnicí. Z naměřených hodnot lze vidět, že pro lasery dělí výkon lépe užší rozbočnice a to v poměru 50 : 50 %, ale referenční vzorek měl příliš velké optické ztráty na čelech, aby mohl být jako reference použit. Nejmenší vložný optický útlum byl naměřen pro vlnovou délku 650 nm, pro kterou byla rozbočnice optimalizována a je 1,49 dB.

Tab. 7.6: Naměřené hodnoty optického útlumu rozbočnic a jejich referencí s rozměrem jádra 1000 μm měřené pomocí laserů.

Vlnová délka [nm]:			532			650		
Číslo vzorku	Popis vzorku	L ¹ [mm]	P _{out} [μW]	A [dB]	Poměr výkonů	P _{out} [μW]	A [dB]	Poměr výkonů
1114	reference přímá	41,38	99,0	--- ²	50 : 50	125	--- ²	50 : 50
1122	rozbočnice 1000 μm	40,33	96,0					
			97,0					
1142	reference přímá	47,33	83,0	1,63	43 : 57	108	1,49	46 : 54
1143	první rozbočnice 1x4Y	45,94	34,9					
			46,3					

Vlnová délka [nm]:			850		
Číslo vzorku	Popis vzorku	L ¹ [mm]	P _{out} [μW]	A [dB]	Poměr výkonů
1114	reference přímá	41,38	8,0	--- ²	49 : 51
1122	rozbočnice 1000 μm	40,33	7,1		
			7,3		
1142	reference přímá	47,33	6,5	1,88	47 : 53
1143	první rozbočnice 1x4Y	45,94	2,8		
			3,1		

¹ Délka po vytvoření čel vlnodův umožňující navázání optického signálu z optického vlnodův.

² Optické ztráty na čelech referenčních vzorků byly natolik velké, že vzorky nemohly být použity jako reference, a tak nemohl být spočítán ani optický útlum.

V tabulce 7.7 jsou uvedeny naměřené hodnoty optického výkonu rozbočnic s rozměrem jádra $550 \mu\text{m}$ a jejich referencí měřené pomocí diod, a poměr rozdělení výkonu rozbočnicí. Útlum nebylo možné z naměřených výsledků spočítat, kvůli nízké kvalitě čel vzorků. Výkon dělily oba vzorky ve stejném poměru, a to 51 : 49 %, i když je znovu patrný rozdíl v přenášených výkonech způsobený špatnou kvalitou čel vzorků (obě měřené rozbočnice jsou ze stejné formy, vyrobené a měřené stejně). Vzorky byly měřeny na POF vláknech s průměrem jádra $980 \mu\text{m}$, proto se do nich nemohl navázat celý výkon přenášený přírodním vláknem.

Tab. 7.7: Naměřené hodnoty optického útlumu rozbočnic a jejich referencí s rozměrem jádra $550 \mu\text{m}$ měřené pomocí diod.

Vlnová délka [nm]:			589			635		
Číslo vzorku	Popis vzorku	L ¹ [mm]	P _{out} [μW]	A [dB]	Poměr výkonů	P _{out} [μW]	A [dB]	Poměr výkonů
1120	reference přímá	39,50	0,34	--- ²	51 : 49	0,53	--- ²	51 : 49
1124	rozbočnice 550 μm	38,92	0,51 0,49			0,50 0,48		
1121	reference přímá	39,13	0,37	--- ²	51 : 49	0,49	--- ²	51 : 49
1123	rozbočnice 550 μm	38,80	0,38 0,36			0,38 0,36		

Optické rozbočnice s šířkou jádra $550 \mu\text{m}$ byly taktéž měřeny na laserech, ale při tomto měření se mi nepovedlo správně navázat světlo do vlnovodů a výkon přenášený přes vzorek byl natolik nízký, že nebyl rozdíl v naměřeném výkonu přenášeném optickou rozbočnicí, nebo pouze plášťovou vrstvou mimo rozbočnici, takže se vzorky pro lasery nepodařilo změřit.

Měření přímých vlnovodů se zalitými vlákny

Protože byly velké rozdíly mezi jednotlivými vzorky, které byly způsobeny nízkou kvalitou jejich čel, tak byla do dalších vzorků přímo zalita vstupní a výstupní vlákna, aby došlo k minimalizaci útlumu na rozhraní vazebního optického vlákna a vzorku. Byly použity dva typy vláken: POF vlákna, která byla před použitím naleštěna a křemenná vlákna, která není potřeba leštit. Postupně byl optimalizován proces výroby, takže u části vzorků nebylo vakuováno jádro a u části ano.

Dále byly vyrobeny vzorky s vlákny POF, kde byly jako vlnovodná vrstva použity polymery NOA73 a NOA83H. U těchto vzorků nebylo potřeba vakuovat jádro, protože polymery jsou před ztuhnutím více tekuté než polymery skupiny PDMS, a tak v nich nezůstávají bubliny. Polymery NOA jsou tvrzeny pod UV světlem, a ne teplem v peci.

Naměřené hodnoty přenášeného výkonu a z nich spočítaný útlum pro přímé vlnovody s rozměrem jádra $1000 \mu\text{m}$ se zalitými POF vlákny měřené pomocí laserů jsou uvedeny v tabulce 7.8. Z tabulky lze vidět rozdíly mezi jednotlivými dvojicemi vzorků. Vzorky 1145 a 1146 byly vyrobeny bez vakuování jádra, takže nebyly odstraněny všechny bubliny, a proto mají vyšší útlum. U zbytku vzorků už byla vakuována i jádra, proto je u dvojice 1156 a 1154 útlum nižší. U vzorku 1155 bylo špatně zafixováno vlákno při výrobě, takže jeho čelo nemířilo přímo do vlnovodu, ale částečně mimo něj. Proto nemohl být navázán veškerý přenášený výkon vlnovodem do vlákna a vzorek nemohl být použit jako reference. Nejmenší optický útlum byl naměřen pro vlnovou délku 850 nm a je $2,41 \text{ dB/cm}$.

¹ Délka po vytvoření čel vlnovodů umožňující navázání optického signálu z optického vlnovodu.

² Optické ztráty na čelech referenčních vzorků byly natolik velké, že vzorky nemohly být použity jako reference, a tak nemohl být spočítán ani optický útlum.

Tab. 7.8: Naměřené hodnoty optického útlumu přímých vlnovodů se zalitými POF vlákny s rozměrem jádra 1000 μm měřené pomocí laserů.

Vlnová délka [nm]:		532		650		850	
Číslo vzorku	L ¹ [mm]	P _{out} [μW]	A [dB/cm]	P _{out} [μW]	A [dB/cm]	P _{out} [μW]	A [dB/cm]
1145	20	548	4,02	620	3,53	80,0	3,74
1146	40	86		122		14,3	
1156	20	332	2,79	385	2,50	43,0	2,41
1154	40	92		122		14,2	
1155	20	73	--- ²	90	--- ²	11,2	--- ²
1153	40	92		120		12,9	

Naměřené hodnoty přenášeného výkonu a z nich spočítaný útlum pro přímé vlnovody s rozměrem jádra 1000 μm se zalitými křemennými vlákny měřené pomocí laserů jsou uvedeny v tabulce 7.9. Křemenná vlákna mohou přenášet i vlnové délky spadající do IR pásma, proto byly vzorky měřeny i pro vlnové délky 1300 nm a 1550 nm . Vzorky se kvůli nutnosti fixace na podložce nevešly do exikátoru, proto ve vzorcích zůstali zbytkové bubliny, které způsobují přídatný útlum. Nejmenší optický útlum byl naměřen pro vlnovou délku 1300 nm ($A = 1,62 \text{ dB/cm}$).

Tab. 7.9: Naměřené hodnoty optického útlumu přímých vlnovodů se zalitými křemennými vlákny s rozměrem jádra 1000 μm měřené pomocí laserů.

Vlnová délka [nm]:		532		650		850	
Číslo vzorku	L ¹ [mm]	P _{out} [μW]	A [dB/cm]	P _{out} [μW]	A [dB/cm]	P _{out} [μW]	A [dB/cm]
1150	20,00	547	1,83	1143	1,88	159,8	2,00
1151	40,00	235		480		63,5	
Vlnová délka [nm]:		1300		1550			
Číslo vzorku	L ¹ [mm]	P _{out} [μW]	A [dB/cm]	P _{out} [μW]	A [dB/cm]		
1150	20,00	654	1,62	97	3,22		
1151	40,00	310		22			

Naměřené hodnoty přenášeného výkonu a z nich spočítaný útlum pro přímé vlnovody, kde byly jako vlnovodná vrstva použity polymery NOA s rozměrem jádra 1000 μm se zalitými POF vlákny měřené pomocí laserů jsou uvedeny v tabulce 7.10. U vzorků 1157 a 1158 byl jako vlnovodná vrstva použit polymer NOA73. Vzorky vykazují nízký optický útlum pod 1 dB/cm , nejmenší útlum je pro vlnovou délku 650 nm a to 0,72 dB/cm . Pro vzorky 1159 a 1160 byl jako vlnovodná vrstva použit polymer NOA83H. U těchto vzorků se nepovedl kvalitně vyrobit dvoucentimetrový vzorek, proto nemohl být spočítán útlum. Nízká kvalita vzorku byla pravděpodobně způsobena tím, že bylo jádro nejprve vytvrzováno v peci, ale tam se polymer odpařil a až poté bylo jádro nanášeno znovu a vytvrzeno pod UV světlem. U krátkého vzorku zůstala ve vlnovodné vrstvě po prvním vytvrzení díra, která musela být znovu zaplněna polymerem vlnovodné vrstvy a vzorek byl tvrzen podruhé.

¹ Délka vzorku.

² Špatně zafixované vlákno u vzorku 1155, proto byl špatně navázán optický signál do vlnovodu, a tak nemohl být spočítán optický útlum.

Tab. 7.10: Naměřené hodnoty optického útlumu přímých vlnodů z polymerů NOA se zalitými POF vlákny s rozměrem jádra 1000 μm měřené pomocí laserů.

Vlnová délka [nm]:		532		650		850	
Číslo vzorku	L ¹ [mm]	P _{out} [μW]	A [dB / cm]	P _{out} [μW]	A [dB / cm]	P _{out} [μW]	A [dB / cm]
1157	20	423	0,73	504	0,72	67,0	0,93
1158	40	302		361		43,6	
1159	20	297	--- ²	322	--- ²	40,3	--- ²
1160	40	320		378		48,0	

Měření rozbočnic se zalitými vlákny

Rozbočnice a jejich reference byly taktéž vyrobeny se zalitými vlákny, ale byla použita pouze POF vlákna. Naměřené hodnoty přenášeného optického výkonu a poměry dělení výkonu jsou uvedeny v tabulce 7.11. Rozbočnice byly vyrobeny ještě bez vakuování jádra, proto v jádře zůstaly bubliny a naměřené hodnoty jsou jimi výrazně ovlivněny. Například u vzorku 1147 byly v pravém rameni rozbočnice (horní hodnota výkonu) dvě velké bubliny, proto toto rameno přenáší menší výkon než levé. Útlum nemohl být spočítán, protože reference přenáší menší výkon, než je součet výkonů přenášených rameny rozbočnice.

Tab. 7.11: Naměřené hodnoty optického útlumu rozbočnic a jejich referencí s rozměrem jádra 1000 μm se zalitými POF vlákny měřené pomocí laserů.

Vlnová délka [nm]:		532			650			
Číslo vzorku	Popis vzorku	L ¹ [mm]	P _{out} [μW]	A [dB]	Poměr výkonů	P _{out} [μW]	A [dB]	Poměr výkonů
1148	reference přímá	50,00	79	--- ³	36 : 64	78	--- ³	39 : 61
1147	první rozbočnice 1x4Y	50,00	37,4			42		
			66			66		
1152	reference přímá	43,00	115	--- ³	38 : 62	86	--- ³	49 : 51
1131	rozbočnice 1000 μm	43,00	63			69		
			102			71		

Vlnová délka [nm]:		850			
Číslo vzorku	Popis vzorku	L ¹ [mm]	P _{out} [μW]	A [dB]	Poměr výkonů
1148	reference přímá	50,00	12,9	--- ³	37 : 63
1147	první rozbočnice 1x4Y	50,00	5		
			1152	reference přímá	43,00
1131	rozbočnice 1000 μm	43,00	7,5	8,5	

¹ Délka vzorku.

² Nepovedený vzorek 1159, proto nemohl být spočítán optický útlum.

³ Vzorky vyrobeny bez vakuování jádra, ve kterém zůstaly bubliny, které způsobovali přidavný optický útlum náhodné velikosti. Proto nebyl spočítán optický útlum.

8 Závěr

Cílem této bakalářské práce byl návrh planárních velkopřůměrových optických vlnodů a optických rozbočnic 1x2Y a 1x4Y za použití nových optických elastomerů, které mají vyšší teplotní odolnost než standardně používané polymery v optických vlnovodech. Jádra vlnodných vrstev byla zvolena s rozměry 550, 660 a 1000 μm . Pro výrobu navržených optických vlnodů a rozbočnic byly prováděny depoziční testy, které využívaly nové postupy a byly zaměřeny na výroby negativních forem pomocí technologie 3D tisku. Pro realizaci vlnodných struktur byly také testovány nové optické elastomery ze skupiny siloxanů, a to polydimethylsiloxan (PDMS) jako plášťová vrstva a polydimethyldiphenylsiloxan (PDMDPS) jako vlnodná vrstva. Dále byly jako vlnodná vrstva testovány čiré, UV světlem tvrditelné polymery Norland Optical Adhesive (NOA).

Tyto materiály byly zvoleny z důvodu větší odolnosti, než je u polymerních materiálů běžné (vyšší provozní teplota, vyšší odolnost při mechanickém namáhání). Pro realizaci struktur jsem měl k dispozici elastomer Sylgard 184 od firmy DOW Corning, elastomery LS6940, LS6941, LS6943 a LS6946 od firmy NuSil a polymery NOA73 a NOA83H od firmy Norland Products.

Návrh struktur probíhal ve dvou krocích. Nejprve byly navrženy přímé vlnodvy s délkami 2 a 4 *cm*. Tyto vlnodvy byly navrhovány pomocí specializovaného programu FreeCAD (software pro 3D modelování) ve formátu stl a naimportovány do programu Prusa 3D Slic3r MK2, kde byly nákresy přeloženy pro software 3D tiskárny a následně vytištěny z materiálu akrylonitrilbutadienstyren (ABS-T). Také byly navrženy dvoudílné formy, které byly vyrobeny pomocí technologie 3D tisku.

Ve druhé fázi návrhů byly navrhovány optické rozbočnice 1x2Y a 1x4Y pomocí metody šíření optického svazku BPM (Beam Propagation Method), kde bylo využito specializovaného softwaru BeamPROP od firmy RSoft s optimalizačním balíčkem MOST. Nejprve jsem provedl návrhy rozbočnic s plášťovou vrstvou z polymeru Sylgard 184 a vlnodnou vrstvou z polymeru LS6943. Z těchto materiálů byly navrženy celkem tři rozbočnice 1x2Y s různými rozměry jádra (550, 660 a 1000 μm) a rozbočnice 1x4Y s rozměrem jádra 1000 μm .

Další čtyři návrhy rozbočnic 1x2Y byly provedeny pro rozměr jádra 1000 μm . V prvním návrhu byl jako plášťová vrstva použit polymer Sylgard 184 a jako vlnodná vrstva polymer LS6946, ve druhém návrhu byla plášťová vrstva navržena z polymeru LS6941 a vlnodná vrstva z polymeru LS6943, u třetího návrhu byl jako plášťová vrstva použit polymer LS6941 a jako vlnodná vrstva polymer LS6946 a poslední návrh byl proveden pro plášťovou vrstvu z polymeru LS6941 a vlnodnou vrstvu z polymeru Sylgard 184.

Pro vybrané struktury byly prováděny depoziční testy, které vedly k realizaci struktur. Návrhy s optimalizovanými geometrickými rozměry z programu BeamPROP byly vyexportovány ve formátu dxf a upraveny v programu FreeCAD (převedení 2D návrhu do 3D), ze kterého byla vyexportována síť útvaru ve formátu stl. Tato síť musela být následně zmenšena v programu MeshLab, aby mohla být vytištěna negativní forma na 3D tiskárně.

Pro výrobu byly vybrány motivy, kde byl jako plášťová vrstva použit polymer Sylgard 184 a jako vlnodná vrstva polymer LS6943. Celkem bylo vyrobeno 52 vzorků, z toho 14 dvojic přímých vlnodů (2 a 4 *cm*) (4x 550 μm , 10x 1000 μm), 2x rozbočnice a 4x její reference s rozměrem jádra 550 μm , 5x rozbočnice a 7x její reference s rozměrem jádra 1000 μm . Byla také vyrobena jedna rozbočnice 1x4Y a jedna její reference, jedna dvojice vzorků 2 a 4 *cm* z materiálů Sylgard 184 a NOA73 a jedna dvojice vzorků 2 a 4 *cm* z materiálů Sylgard 184 a s vlnodným jádrem z polymeru NOA83H.

První výroba vzorků byla prováděna tak, že vzorky nebyly nerozebíratelně připojeny na vstupu a na výstupu k optickým vláknům. Vzorky byly vyrobeny z polymerů Sylgard 184 a LS6943. U vzorků bylo

prováděno měření optického útlumu pomocí metody dvou délek a měření bylo provedeno na vlnových délkách 532, 650 a 850 nm. Pro přivedení optického signálu k vzorkům byla použita POF vlákna, proto nemohly být vzorky měřeny pro vyšší vlnové délky. Pro přímé vlnovody o rozměru jádra 1000 μm bylo dosaženo nejmenšího optického útlumu pro vzorky s vlnovodným jádrem z polymeru LS6943 (vzorky číslo 1107 a 1110), kde byl optický útlum 2,16 dB/cm pro vlnovou délku 532 nm, 1,71 dB/cm pro vlnovou délku 650 nm a 0,89 dB/cm pro vlnovou délku 850 nm.

U vzorků se zalitými vlákny z polymerů Sylgard 184 a LS6943 bylo dosaženo nejmenších hodnot optického útlumu 1,83 dB/cm pro vlnovou délku 532 nm, 1,88 dB/cm pro vlnovou délku 650 nm, 2,00 dB/cm pro vlnovou délku 850 nm, 1,62 dB/cm pro vlnovou délku 1300 nm a 3,22 dB/cm pro vlnovou délku 1550 nm (pro vzorky číslo 1150 a 1151).

Nakonec byly vyrobeny přímé vzorky se zalitými POF vlákny z polymerů Sylgard 184 a NOA73. U těchto vzorků bylo dosaženo vůbec nejnižších hodnot optického útlumu a to 0,73 dB/cm pro vlnovou délku 532 nm, 0,72 dB/cm pro vlnovou délku 650 nm a 0,93 dB/cm pro vlnovou délku 850 nm (pro vzorky číslo 1157 a 1158).

Podle provedených optimalizovaných návrhů byly vyrobeny rozbočnice 1x2Y, kde bylo dosaženo nejmenších hodnot vložného optického útlumu 1,63 dB pro vlnovou délku 532 nm, 1,49 dB pro vlnovou délku 650 nm a 1,88 dB pro vlnovou délku 850 nm (pro vzorky číslo 1142 a 1143).

Podařilo se experimentálně ověřit nový technologický postup pro výrobu optických vlnodů a rozbočnic z nových polymerních elastomerů za použití výroby forem pomocí 3D tisku. Prováděné depoziční testy prokázaly vhodnost dané technologie a předpokládáme, že po optimalizaci bude možné takto připravit optické vlnovody s jádrem z nových optických elastomerů a s velkým rozměrem jádra s optickým útlumem nižším než 1 dB/cm. Již se podařilo vyrobit kvalitní optické struktury, kdy byl použit pro jádro vlnovodu polymer NOA73. Byl také testován polymer NOA83H, u kterého je předpoklad nízkého útlumu, a má vyšší teplotní odolnost než polymer NOA73.

9 Literatura

- [1] MAŠTERA R. 2013. *Návrh optické planární mnohavidové výkonové 1x2 a 1x3 rozbočnice pro POF vlákna*, bakalářská práce, Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra mikroelektroniky
- [2] ZÁZVORKA J. 2018. *Výroba optických polymerních struktur pomocí nových technologií*, diplomová práce, Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektromagnetického pole
- [3] NOVOTNÝ, K. 1997. *Optická komunikační technika*, Praha: ČVUT. Skriptum, ČVUT, Fakulta elektrotechnická.
- [4] DLOUHÝ J. 2018. *Studium možnosti přípravy optických struktur pomocí technologie 3D tisku*, bakalářská práce, Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra mikroelektroniky
- [5] KLAPUCH J. 2010. *Návrh nového polymerního optického vlnovodu*, bakalářská práce, Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra mikroelektroniky
- [6] DAKIN John P., BROWN Robert G. W., *Handbook of optoelectronics Volume 1*, Boca Raton: CRC Press, 2006, ISBN 0-7503-0646-7
- [7] V. PRAJZLER, P. HYPŠ, R. MAŠTERA, NEKVINDOVÁ P., Properties of Siloxane Based Optical Waveguides Deposited on Transparent Paper and Foil, RADIOENGINEERING, VOL. 25, NO. 2, JUNE 2016
- [8] STASTNY M. 2018. *Studium vlastností polymerních materiálů pro fotonické aplikace*, bakalářská práce, Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra mikroelektroniky
- [9] LOUAY E. 2004, *Optical communication components*, Review of Scientific Instruments, American institute of Physics,
- [10] STANĚK S. 2018, *Matematické modelování mísení práškových směsí v bubnovém mísiči*, disertační práce, Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze
- [11] Principles of Birefringence, [online] Nikon instruments inc. [Cit. 13.11.2018]. Dostupné z: <https://www.microscopyu.com/techniques/polarized-light/principles-of-birefringence>
- [12] TZE YANG HIN 2009, *Materials and processes to enable polymeric waveguide integration on flexible substrates*, disertační práce, Loughborough: Loughborough University
- [13] ECETOC AISBL: JACC Report 55 – Linear Polydimethylsiloxanes second edition [online] [cit. 2018-08-12], dostupné z: <http://www.ecetoc.org/publications/jacc-reports/>
- [14] MORARIU S., BRUNCHI C.E., CAZAU M. BERCEA M., *Influence of the Solvent Quality on the Thermodynamic Behavior of Polymethylphenylsiloxane Solutions*, Industrial & Engineering Chemistry Research 2010 49 (24), 12740-12746, DOI: 10.1021/ie1015238
- [15] OKAMOTO K. Books24x7, l.: *Fundamentals of Optical Waveguides*, 2nd Edition, Amsterdam, Boston, Academic Press, 2010, 2006, ISBN 9780125250967
- [16] Prusa 3D, Prusa Research s.r.o., [online] [cit. 31.12.2018], Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz>
- [17] Specification Sheet SH 4001, Mitsubishi Rayon CO., LTD. Eska Optical Fiber Division, 2001

- [18] 0.22 NA TECS Double-Clad, Step-Index, High Power Multimode Fiber, [online] Thorlabs, Inc. [cit. 16.12.2018]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/drawings/d316f0b3e7d4de7f-1F58E69F-A678-B49F-5A91B53C0DDA4C7A/FG910LEC-SpecSheet.pdf>
- [19] Metricon, Model 2010/M Overview [online]. [cit. 2018-09-10]. Dostupné z: <http://www.metricon.com/model-2010-m-overview/>
- [20] 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
- [21] GREXA J. 2010. *Teoretický návrh optické odbočnice*, diplomová práce, Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra mikroelektroniky
- [22] KEYENCE VHX-6000 digital microscope [online] KEYENCE CORPORATION [Cit. 3.10.2018]. Dostupné z: <https://www.keyence.com/ss/products/microscope/vhx-6000/index.jsp>
- [23] Materiálový slovník – ABS, [online] Materialpro3d.cz [cit. 30.11.2018]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/abs/>

Příloha: Seznam vzorků

Seznam vzorků pro měření indexů lomu a transmisních spekter

Číslo vzorku	Typ polymeru	Teplota tvrzení [°C]	Doba tvrzení
1080	LS6943	RT	7 dní
1081	LS6943	65	4 hod
1082 AB	LS6943	100	60 min
1082 CD	LS6943	150	15 min
1083	LS6941	RT	7 dní
1084	LS6941	65	4 hod
1085	LS6941	100	60 min
1086	LS6941	150	15 min
1087	LS6943	80	4 hod
1088	LS6943	200	10 min
1094	LS6946	RT	7 dní
1096	LS6940	150	15 min
1103	LS6940	65	4 hod
1104	LS6940	150	15 min

Seznam vzorků pro měření optického útlumu

Číslo vzorku	Polymer pláště	Polymer jádra	Popis vzorku	Poznámka
1107	Sylgard 184	LS6943	Přímý 1000 μm 2 cm	
1108	Sylgard 184	LS6943	Přímý 1000 μm 2 cm	
1109	Sylgard 184	LS6943	Přímý 1000 μm 2 cm	
1110	Sylgard 184	LS6943	Přímý 1000 μm 4 cm	
1111	Sylgard 184	LS6943	Přímý 1000 μm 4 cm	
1112	Sylgard 184	LS6943	Přímý 1000 μm 4 cm	
1113	Sylgard 184	LS6943	Reference rozbočnice 1000 μm	
1114	Sylgard 184	LS6943	Reference rozbočnice 1000 μm	
1115	Sylgard 184		PDMS objemový vzorek	
1116	Sylgard 184	LS6943	Přímý 550 μm 2 cm	
1117	Sylgard 184	LS6943	Přímý 550 μm 2 cm	
1118	Sylgard 184	LS6943	Přímý 550 μm 4 cm	
1119	Sylgard 184	LS6943	Přímý 550 μm 4 cm	
1120	Sylgard 184	LS6943	Reference rozbočnice 550 μm	
1121	Sylgard 184	LS6943	Reference rozbočnice 550 μm	
1122	Sylgard 184	LS6943	Rozbočnice 1000 μm	
1123	Sylgard 184	LS6943	Rozbočnice 550 μm	
1124	Sylgard 184	LS6943	Rozbočnice 550 μm	
1125	Sylgard 184	LS6943	Reference rozbočnice 550 μm	
1126	Sylgard 184	LS6943	Reference rozbočnice 550 μm	
1127	Sylgard 184	LS6943	Přímý 550 μm 4 cm	
1128	Sylgard 184	LS6943	Přímý 550 μm 4 cm	
1129	Sylgard 184	LS6943	Přímý 550 μm 2 cm	
1130	Sylgard 184	LS6943	Přímý 550 μm 2 cm	

Číslo vzorku	Polymer pláště	Polymer jádra	Popis vzorku	Poznámka
1131	Sylgard 184	LS6943	Rozbočnice 1000 μm	Vlákna POF
1132	Sylgard 184	LS6943	Reference rozbočnice 1000 μm	Bublíny
1133	Sylgard 184	LS6943	Reference rozbočnice 1000 μm	Bublíny
1134	Sylgard 184	LS6943	Přímý 1000 μm 4 cm	Bublíny
1135	Sylgard 184	LS6943	Přímý 1000 μm 4 cm	Bublíny
1136	Sylgard 184	LS6943	Přímý 1000 μm 4 cm	Bublíny
1137	Sylgard 184	LS6943	Přímý 1000 μm 2 cm	Bublíny
1138	Sylgard 184	LS6943	Přímý 1000 μm 2 cm	Bublíny
1139	Sylgard 184	LS6943	Přímý 1000 μm 2 cm	Bublíny
1140	Sylgard 184	LS6943	Reference rozbočnice 1x4Y	
1141	Sylgard 184	LS6943	Rozbočnice 1x4Y	
1142	Sylgard 184	LS6943	Reference první rozbočnice 1x4Y	
1143	Sylgard 184	LS6943	První rozbočnice 1x4Y	
1144	Sylgard 184		PDMS bulk	
1145	Sylgard 184	LS6943	Přímý 1000 μm 4 cm	Vlákna POF
1146	Sylgard 184	LS6943	Přímý 1000 μm 2 cm	Vlákna POF
1147	Sylgard 184	LS6943	První rozbočnice 1x4Y	Vlákna POF
1148	Sylgard 184	LS6943	Reference první rozbočnice 1x4Y	Vlákna POF
1149	Sylgard 184	LS6943	Rozbočnice 1000 μm	Vlákna POF
1150	Sylgard 184	LS6943	Přímý 1000 μm 2 cm	Vlákna sklo
1151	Sylgard 184	LS6943	Přímý 1000 μm 4 cm	Vlákna sklo
1152	Sylgard 184	LS6943	Reference rozbočnice 1000 μm	Vlákna POF
1153	Sylgard 184	LS6943	Přímý 1000 μm 4 cm	Vlákna POF
1154	Sylgard 184	LS6943	Přímý 1000 μm 4 cm	Vlákna POF
1155	Sylgard 184	LS6943	Přímý 1000 μm 2 cm	Vlákna POF
1156	Sylgard 184	LS6943	Přímý 1000 μm 2 cm	Vlákna POF
1157	Sylgard 184	NOA72	Přímý 1000 μm 2 cm	Vlákna POF
1158	Sylgard 184	NOA72	Přímý 1000 μm 4 cm	Vlákna POF
1159	Sylgard 184	NOA83H	Přímý 1000 μm 2 cm	Vlákna POF
1160	Sylgard 184	NOA83H	Přímý 1000 μm 4 cm	Vlákna POF