

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

---

Fakulta elektrotechnická  
Katedra mikroelektroniky

**Studium možnosti přípravy optických struktur pomocí technologie 3D tisku**

**Studying of the Possibility of Fabrication Optical Structures Using 3D Printing Technology**

Bakalářská práce

**Jakub Dlouhý**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Studijní obor: Aplikovaná elektronika

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





## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dlouhý** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **411215**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**  
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektronika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Studium možnosti přípravy optických struktur pomocí technologie 3D tisku**

Název bakalářské práce anglicky:

**Studying of the Possibility of Fabrication Optical Structures Using 3D Printing Technology**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s teoretickými principy optických planárních vlnovodů.
- 2) Seznamte se s technologií 3D tisku a možností výroby struktur pomocí této technologie.
- 3) Proveďte návrh struktur pomocí metody BPM.
- 4) Navrhněte postup výroby struktur a spolupracujte při výrobě vzorků.
- 5) Proveďte měření vyrobených struktur.
- 6) Dosažené výsledky shrňte do zprávy o rozsahu cca 50 až 70 stran.

Seznam doporučené literatury:

1. M. Kniel: Optické planární struktury s možností připojení polymerních optických vláken, Diplomová práce ČVUT 2017.
2. K.D.D. Willis, E. Brockmeyer, S.E. Hudson, I. Poupřev: Printed Optics: 3D Printing of Embedded Optical Elements for Interactive Devices. UIST'12, October 7-10, 2012, Cambridge, Massachusetts, USA.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.06.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání bakalářské práce: **28.02.2019**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## Poděkování

Rád bych poděkoval hlavně vedoucímu práce, panu doc. Ing. Václavovi Prajzlerovi, Ph.D., za vzácné rady při návrhu a výrobě optických vlnodů, rozbočnic a čas, jehož se mi dostalo v průběhu tří semestrů. Děkuji panu Herbertovi z Institute for Microelectronics and Microsensors, Johannes Keplerovi University z Linze, Rakouska za výrobu vzorků planárních struktur pomocí 3D tisku polymerem VeroClear, profesoru Jyrki Saarinen, MBA a Markku Pekkarinen z Institute of Photonics, University of Eastern Finland, Joensuu, Finland za výrobu vzorků planárních struktur pomocí 3D tisku z polymeru Luxexcel VisionClear, panu Ing. Jakubovi Hyblerovi za opravu modelů pro 3D tisk a též paní Ing. Pavle Nekvindové, Ph.D. z Vysoké školy chemicko-technologické v Praze za měření indexů lomu pomocí jednohranolové vidové spektroskopie.



Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně v souladu s Metodickým pokynem č. 1/2009 O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací. Nemám důvod pro použití tohoto díla ve smyslu Zákona č. 121/2000 Sb. § 60, o právu autorském, o právu souvisejícím s právem autorským a o změně některých zákonů.

V Praze dne 1.1.2018    Jakub Dlouhý

Název práce: Studium možnosti přípravy optických struktur pomocí technologie 3D tisku

Autor: Jakub Dlouhý

Katedra (ústav): Katedra mikroelektroniky

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

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

**Abstrakt:** Tato bakalářská práce se zabývá návrhem, simulací, výrobou a měřením planárních mnohavidových optických struktur. Struktury jsou připravovány pomocí 3D tisku a jsou určeny k připojení k velkopřůměrovým polymerním vláknům POF (Plastic Optical Fiber). Předložená bakalářská práce navazuje na diplomovou práci autora M. Knieta Optické planární struktury s možností připojení polymerních optických vláken. V první části práce je shrnut princip šíření světla v planárních strukturách. Dále jsou pak uvedeny tři návrhy velkopřůměrových optických rozbočnic. První návrh je pro optickou rozbočnici s vlnovodnou vrstvou NOA (Norland Optical Adhesive) a pláštěm z polymeru VeroClear. Druhý návrh je tvořen vlnovodnou vrstvou z polymeru VeroClear a plášť je tvořen elastomerem Polydimethylsiloxane (PDMS). Třetí návrh je pro optickou rozbočnici, kde vlnovodná vrstva je tvořena polymerem Luxexcel VisionClear a pláštěm opět z polymeru PDMS. První dva návrhy byly prováděny tak, aby bylo možno optické rozbočnice připojit k vláknům POF s rozměrem 1000  $\mu\text{m}$  a 750  $\mu\text{m}$ . Třetí návrh byl pro připojení k vláknům s rozměrem jádra vláknového vlnovodu 750  $\mu\text{m}$  a 400  $\mu\text{m}$ . Na základě těchto návrhů byly vyrobeny optické rozbočnice a na závěr bakalářské práce jsou popsány vlastnosti vyrobených optických vlnovodů a rozbočnic.

**Klíčová slova:** Optické mnohavidové struktury, Polymerní optické vlnovody, 3D tisk, Optické rozbočnice

Title: Studying of the Possibility of Fabrication Optical Structures Using 3D Printing Technology

Author: Jakub Dlouhý

Department: Microelectronics department

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

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

Abstract: This bachelor thesis deals with design, simulation, construction and measurement of planar multimode optical structures. Structures are fabricated using 3D print and designed for use with large core plastic optical fibers. Submitted bachelor thesis follow up on work that done in diploma thesis Optical Planar Structures with Connection of Plastic Optical Fibers by M. Knieta. In the first part is described the principle of light propagation in planar structures. Next are introduced three designs of large core optical splitters. First design was optical splitter with waveguide layer NOA (Norland Optical Adhesive) and substrate from polymer VeroClear. For second design polymer VeroClear as waveguide layer and elastomer Polydimethylsiloxane (PDMS) as substrate were chosen. As third splitter with waveguide layer Luxexcel VisionClear and substrate from polymer PDMS was designed. First two designs were for connection of plastic optical fibers with dimensions of 1000  $\mu\text{m}$  and 750  $\mu\text{m}$ . Third design was for connection of plastic optical fibers with dimension of 750  $\mu\text{m}$  and 400  $\mu\text{m}$ . Based on these designs were fabricated optical splitters. At the end of bachelor thesis are described properties of fabricated splitters.

Key words: Optical multimode structures, Polymer optical waveguides, 3D print, Optical splitters



## Seznam symbolů a zkratek

symbol	veličina	jednotka
$\alpha$	vložný optický útlum	dB
$\alpha_c$	kritický úhel lomu	-
$\alpha_D$	úhel dopadu	-
$\alpha_L$	úhel lomu	-
$\alpha_O$	úhel odrazu	-
A	měrný optický útlum	dB/cm
$A_V$	měrný vložený optický útlum	dB/cm
c	rychlost světla ve vakuu	m/s
d	délka podélně se rozšiřované části vlnovodu	$\mu\text{m}$
h	tloušťka vlnovodné vrstvy planárního vlnovodu	m
j	imaginární jednotka	-
$\Delta$	relativní kontrast indexu lomu	-
$\theta$	úhel mezi rameny rozbočnice	$^\circ$
$\Omega$	úhel ramena od osy rozbočnice	$^\circ$
k	vlnové číslo	$\text{m}^{-1}$
$\lambda$	vlnová délka	nm
L	délka struktury (u rozbočnice: $L = L_{\text{in}} + L_{\text{SBend}} + L_{\text{out}}$ )	$\mu\text{m}$
$L_{\text{in}}$	délka vstupního vlnovodu	$\mu\text{m}$
$L_{\text{out}}$	délka výstupního vlnovodu	$\mu\text{m}$
$L_P$	délka referenčního přímého vlnovodu	$\mu\text{m}$
$L_{\text{SBend}}$	délka ramena rozbočnice	$\mu\text{m}$
NA	numerická apertura	-
n	index lomu materiálu	-
$n_1$	index lomu materiálu rozhraní (nahore)	-
$n_2$	index lomu materiálu rozhraní (dole)	-
$n_f$	index lomu vlnovodu	-
$n_p$	index lomu hranolu	-
$n_s$	index lomu substrátu	-
p	normovaný optický výkon	-
$p_{\text{out}}$	výstupní normovaný optický výkon ( $p_{\text{out}} = P_{\text{out}}/P_{\text{in}}$ )	-
$P_{\text{in}}$	vstupní optický výkon	$\mu\text{W}$
$P_{\text{out}}$	výstupní optický výkon	$\mu\text{W}$
$P_{\text{outP}}$	výstupní optický výkon referenčního přímého vlnovodu	$\mu\text{W}$
$\varphi_1$	změna fáze 1.paprsku	-
$\varphi_2$	změna fáze 2.paprsku	-
R	činitel odrazu	-
T	propustnost rozhraní	-
$v$	rychlost světla v prostředí s indexem lomu n	m/s
$\theta_c$	kritický úhel lomu	$^\circ$

## Seznam symbolů a zkratk (pokračování)

<b>symbol</b>	<b>veličina</b>	<b>jednotka</b>
w	šířka vstupní a výstupní části rozbočnice	μm
W <sub>mezi</sub>	šířka mezery mezi výstupními vlnovody rozbočnice	μm
<b>zkratka</b>	<b>význam zkratky</b>	<b>český popis</b>
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene	akrylonitrilbutadienstyren
BPM	Beam Propagation Method	Metoda šíření optického svazku
NOA	Norland Optical Adhesive	označení UV polymerů
PDMS	Polydimethylsiloxane	pryskyřice
PMMA	Polyethyl methacrylate	polymethylmetakrylát
POF	Plastic optical fibre	polymerní optické vlákno
UV	Ultraviolet light	ultrafialové světlo

## Použité značení

<b>popis</b>	<b>způsob značení</b>	<b>příklad</b>
Značení sady materiálů	materiál vlnovodné vrstvy/materiál substrátu	VeroClear/PDMS

## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Optické planární mnohavidové vlnovody</b>	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>Návrh struktur</b>	<b>15</b>
3.1	<i>Použité materiály</i>	15
3.2	<i>Teoretický návrh mnohavidové optické rozbočnice</i>	17
3.3	<i>Metoda šíření optického svazku</i>	20
3.4	<i>Návrh optické mnohavidové rozbočnice pomocí metody BPM</i>	21
<b>4</b>	<b>Výroba vzorků</b>	<b>29</b>
4.1	<i>Výroba vzorků z materiálu VeroClear</i>	29
4.2	<i>Výroba vzorků z materiálu VisionClear</i>	32
<b>5</b>	<b>Diagnostické metody</b>	<b>34</b>
5.1	<i>Optická kontrola vzorků</i>	34
5.2	<i>Jednohranolová vidová spektroskopie - Index lomu</i>	34
5.3	<i>Měření absorpce</i>	35
5.4	<i>Měření optického útlumu - metoda 2 délek</i>	35
<b>6</b>	<b>Výsledky</b>	<b>38</b>
6.1	<i>Optická kontrola vzorků</i>	38
6.2	<i>Měření optického útlumu</i>	43
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>49</b>
<b>8</b>	<b>Použitá literatura</b>	<b>50</b>
	<b>Příloha A - Seznam použitých materiálů</b>	<b>52</b>
	<b>Příloha B - Seznam vzorků</b>	<b>53</b>

# 1 Úvod

V moderních telekomunikačních sítích se běžně používají optická vlákna. Zatímco v dálkových spojích jasně dominují křemenná vlákna, na kratší vzdálenosti převládají metalická vedení, jež jsou v nových aplikacích nahrazovány plastovými vlákny POF (Plastic Optical Fibers). POF vlákna se používají v automobilech, v datových komunikacích (data centra a FTTH (Fiber To The Home)), v osvětlování (značení, textilie a solektory) a pro senzorové aplikace [1, 2].

Cílem práce je návrh a realizace planární rozbočnice pro připojení pomocí velkopřůměrových vláken.

POF vlákna mají nejčastěji skokovou změnu indexu lomu s jádrem z polymeru PMMA (Polyethyl methacrylate) a pláštěm z fluorovaného polymeru. Plášť má průměr 1 mm a jádro 980  $\mu\text{m}$  (dále POF 1 mm). V této práci byly také použity POF vlákna s průměrem pláště 750  $\mu\text{m}$  a jádra 738  $\mu\text{m}$  (dále POF 750  $\mu\text{m}$ ).

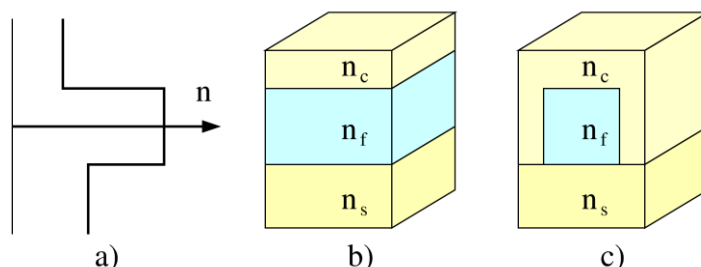
Optické rozbočnice jsou jedním ze základních struktur, a přestože byly vyvinuty technologické postupy pro jejich výrobu jsou hledány nové technologie pro jejich realizaci. V posledních letech byly vyvinuty nové typy 3D tiskáren pro aplikace v různých odvětvích (modelářství, šperkařství, stavebnictví, potravinářství a další) [3]. Technologie 3D tisku pro optické struktury je teprve na počátku a dá se v budoucnosti očekávat její velký rozvoj.

Tato bakalářská práce navazuje na diplomovou práci autora M. Knieta Optické planární struktury s možností připojení polymerních optických vláken [4], v níž byly navrženy optické rozbočnice 1x2Y s vytištěným substrátem (VeroClear) a jako vlnovodná vrstva byl aplikován materiál NOA vytvrzený UV zářením. Předložená práce je zaměřená na vlnovodné vrstvy vyrobené pomocí 3D tisku, kde plášť je tvořen polymerem Polydimethylsiloxane (PDMS). V rámci této práce byly realizovány dva typy struktur. První typ využíval vlnovodnou vrstvu VeroClear a byl navrhován pro připojení k velkopřůměrovým vláknům POF s rozměrem 1000 a 750  $\mu\text{m}$ . Druhý návrh využíval polymer Luxexcel VisionClear a byl navrhován pro připojení k velkopřůměrovým vláknům POF s rozměrem 750 a 400  $\mu\text{m}$ .

## 2 Optické planární mnohavidové vlnovody

Optický vlnovod je prostorově nehomogenní struktura určená k vedení světla. Struktury jsou obvykle tvořeny transparentními dielektrickými materiály, jimiž se dále budu zabývat.

Specifickým typem optického vlnovodu je planární optický vlnovod (viz Obr. 2.1), který je obvykle tvořen substrátem s indexem lomu  $n_s$ , vlnovodnou vrstvou s indexem lomu  $n_f$  a krycí vrstvou s indexem lomu  $n_c$ . Optický signál je navázán do vlnovodné vrstvy (jádra). Krycí vrstva chrání vlnovodnou vrstvu před vnějšími vlivy a spolu se substrátem vytváří vlnovodný efekt struktury. Pokud je velikost jednoho z příčných rozměrů vlnovodné struktury neomezená, jedná se o dvojrozměrný vlnovod. Rozložení pole vlny je v tomto případě funkcí dvou proměnných – jedné příčné a podélné vzhledem k směru šíření vlny. Pokud je vlna v obou příčných rozměrech omezená jedná se o trojrozměrný vlnovod [5]. Příklad planárního dvourozměrného (2D) vlnovodu se skokovou změnou indexu lomu je uveden na Obrázku 2.1b, jeho možné rozložení indexu lomu je uvedeno na Obrázku 2.1a. Na Obrázku 2.1c je uveden příklad planárního trojrozměrného (3D) vlnovodu.



Obr. 2.1: a) Příklad planárního optického dvourozměrného vlnovodu, b) možné rozložení indexu lomu planárního optického dvourozměrného vlnovodu, c) příklad planárního optického trojrozměrného vlnovodu.

Pro vedení světla v planárních vlnovodech je potřeba splnit následující podmínky: Podmínku totální odrazu danou Snellovým zákonem, jež je nezbytná, avšak nikoli postačující, a fázovou podmínku.

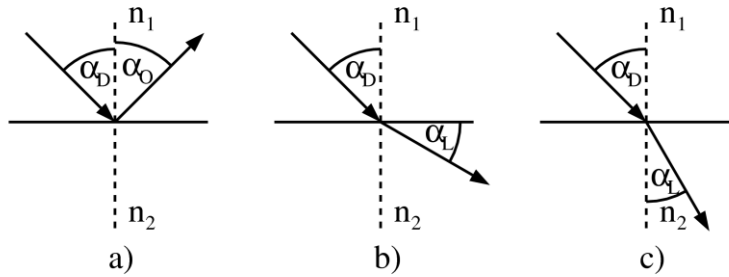
Snellův zákon popisuje chování paprsku na rozhraní dvou prostředí (viz Obr. 2.2). Na rozhraní může docházet k odrazu (viz Obr. 2.2a), kdy se dopadající paprsek odrazí od rozhraní pod odrazu úhlem  $\alpha_o$  stejným jako je úhel dopadu  $\alpha_D$  (vztaženo ke kolmici rozhraní), a k lomu (viz Obr. 2.2b, resp. Obr. 2.2c), kdy paprsek při přechodu z hustšího (resp. řidšího) prostředí do řidšího (resp. hustšího) prostředí se láme směrem od kolmice (resp. ke kolmici):

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

kdy  $\alpha_L$  je úhel lomu a prostředí jsou popsána indexy lomu  $n_1$  a  $n_2$ . Index lomu prostředí  $n$  je definován jako poměr rychlosti světla ve vakuu  $c$  k rychlosti světla v prostředí  $v$ :

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

Zvláštní případ lomu od kolmice nastává, pokud je  $\alpha_L = \pi/2$ . Paprsek by se tedy šířil rovnoběžně s rozhraním. V takovém případě lom nenastává a veškerá energie dopadajícího paprsku se přetransformuje v energii paprsku odraženého [6]. Úhlu dopadajícího paprsku se říká úhel kritický  $\alpha_c$ . K totálnímu odrazu dochází i pro úhly větší, než je úhel kritický ( $\alpha_D \geq \alpha_c$ ).



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

Fázovou podmínku lze vysvětlit pomocí dvou paprsků patřících ke stejné vlnoploše [7], kde vlnoplocha je plocha stejnou fází ve všech jejích bodech. Paprsky se šíří vlnovodem, kdy první se dvakrát odrazí na rozhraní, zatímco první paprsek se putuje bez odrazu. Paprsky následně tvoří novou vlnoplochu. Aby se tak stalo, rozdíl změny jejich fáze musí být právě celočíselným násobkem  $2\pi$ :

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

kde  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$  jsou změny fáze prvního a druhého paprsku během šíření,  $m$  je celé číslo. Fáze prvního paprsku  $\varphi_1$  se dá zapsat jako:

$$\varphi_1 = kn_f l_1 + \Phi_{fc} + \Phi_{fs} \quad (4)$$

kde  $l_1$  je vzdálenost, kterou urazí první paprsek (z bodu A do bodu B),  $\Phi_{fc}$  je fázový posun způsobený při odrazu na rozhraní vlnovodné vrstvy ( $n_f$ ) s krycí vrstvou ( $n_c$ ),  $\Phi_{fs}$  je fázový posun způsobený při odrazu na rozhraní vlnovodné vrstvy ( $n_f$ ) se substrátem ( $n_s$ ) a  $k$  je vlnové číslo:

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

a  $\lambda$  je vlnová délka záření zdroje. Protože u prvního paprsku nedochází k odrazu dá se jeho změna fáze zapsat jednodušeji:

$$\varphi_2 = kn_f l_2 \quad (6)$$

kde  $l_2$  je vzdálenost, kterou urazí první paprsek (z bodu C do bodu D).

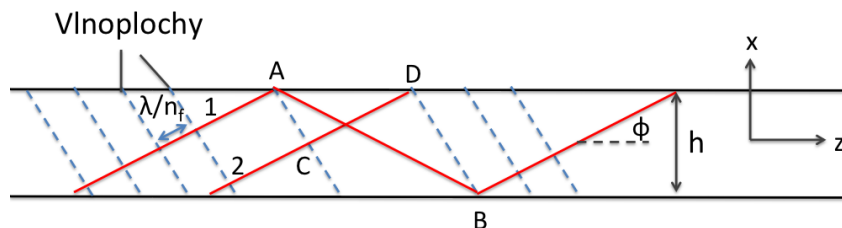
Vzdálenosti  $l_1$  a  $l_2$  lze spočítat z geometrie:

$$l_1 = \frac{2h}{\sin \phi} \quad (7)$$

$$l_2 = 2h \left( \frac{1}{\sin \phi} - 2 \sin \phi \right) \quad (8)$$

kde  $h$  je šířka vlnovodné vrstvy a  $\phi$  je úhel mezi paprskem a středem vlnovodu.

Šíření dvou paprsků vlnovodem o s vlnovodnou vrstvou o šířce  $h$  je uvedeno na Obrázku 2..



Obr. 2.3: Šíření dvou paprsků patřících ke stejné vlnoploše.





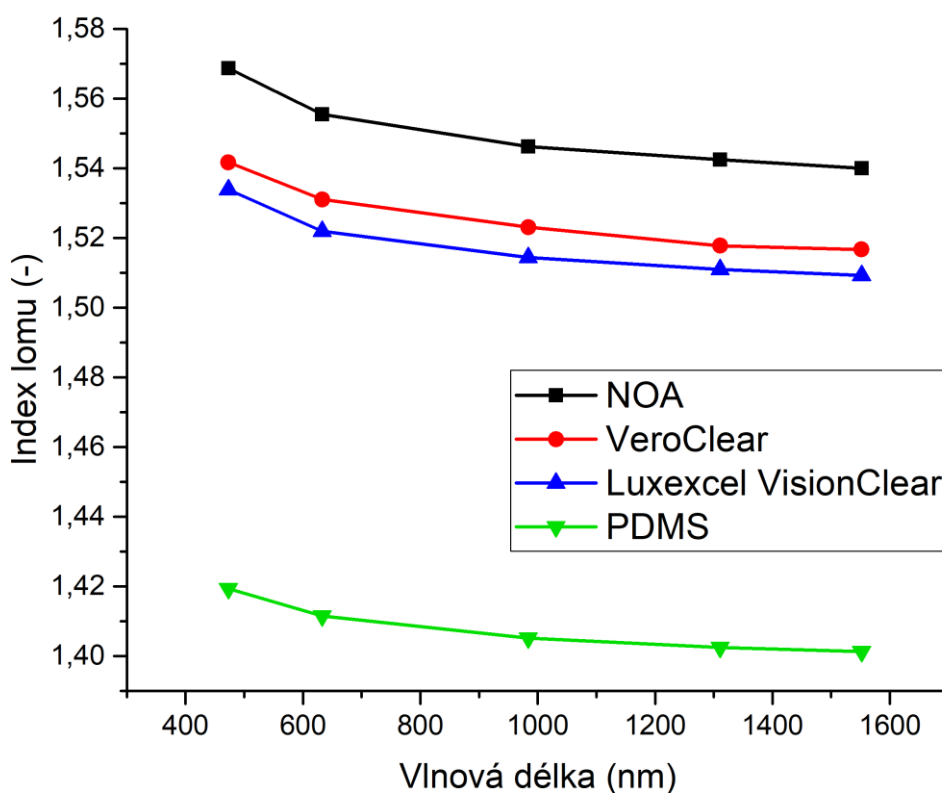
### 3 Návrh struktur

Návrh optických rozbočnic jsem nejprve provedl pomocí matematického popisu, které vytvořil pan Beltrami [8]. Popis a návrh je uveden v kapitole 3.2. Potom jsem provedl přesnější návrh pomocí specializovaného softwaru, kdy tento návrh je uveden v kapitole 3.4.

#### 3.1 Použité materiály

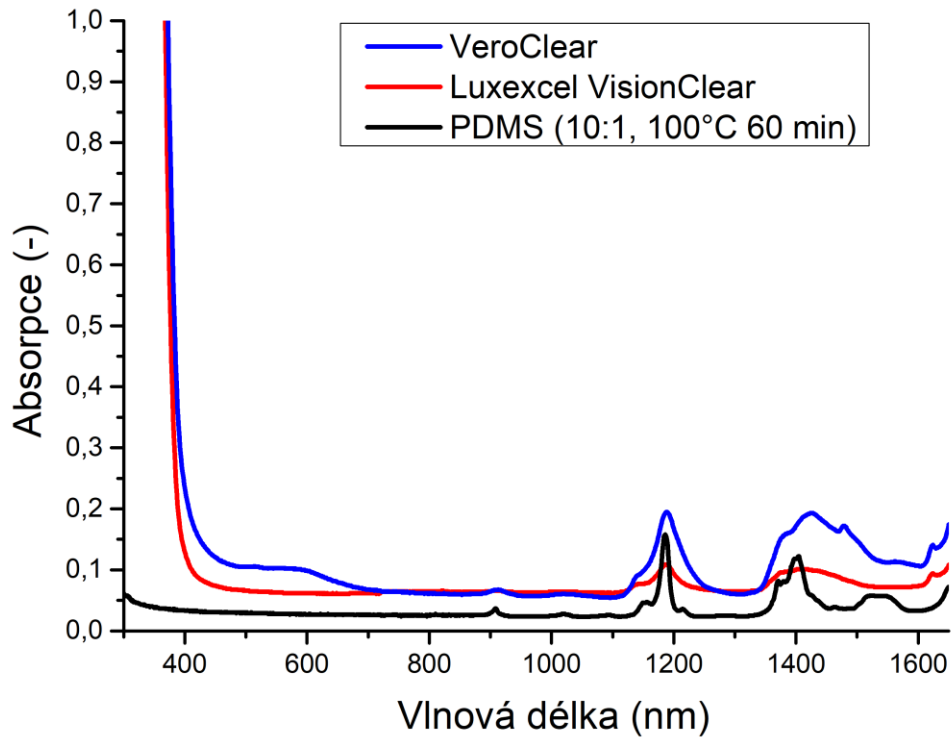
Návrh rozbočnice 1x2Y jsem provedl pro tři typy vlnovodných materiálů. První typ je tvořen substrátem a krycí vrstvou z polymeru VeroClear a vlnovodnou vrstvou tvoří polymer Norland Optical Adhesive (NOA). Druhý typ optických rozbočnic je tvořen vlnovodnou vrstvou VeroClear, která se připravuje pomocí technologie 3D tisku, a plášť je tvořen elastomerem PDMS, Třetí typ používá vlnovodnou vrstvu z polymeru Luxexcel VisionClear a plášť je opět tvořen elastomerem PDMS. Návrh optických rozbočnic byl proveden pro šířku vlnovodu 750  $\mu\text{m}$  a pro šířku vlnovodu 1000  $\mu\text{m}$  (první a druhý typ), nebo 400  $\mu\text{m}$  (třetí typ).

Pro co nejpřesnější návrh byly nejdříve změřeny indexy lomu použitých materiálů pomocí jednohranolové vidové spektroskopie. Měření bylo provedeno pro pět vlnových délek 473; 632,8; 964; 1311 a 1552 nm a výsledek měření je uveden na Obrázku 3.1. Z těchto měření byly interpolovány hodnoty indexu lomu pro vlnové délky 532; 650 a 850 nm, které byly následně použity pro návrh optických rozbočnic (viz Tab. 3.1, Tab. 3.3 a Tab. 3.5). Princip metody je popsán v kapitole 5.2.



Obr. 3.1: Změřené hodnoty indexů lomu pomocí jednohranolové vidové spektroskopie.

U použitých materiálů VeroClear, Luxexcel VisionClear a PDMS (připravena při 100°C po 1 hodinu), byly změřeny absorpční spektra (princip metody je popsán v kapitole 5.3). Výsledek měření je uveden na Obrázku 3.2. Ze změřených spekter vyplývá, že materiály jsou vhodné pro použití v rozmezí vlnových délek 500 až 1100 nm.



Obr. 3.2: Absorpce materiálů VeroClear, Luxexcel VisionClear a PDMS (vytvrzena při 100°C po 1 hodinu, A:B 10:1).

### 3.2 Teoretický návrh mnohavidové optické rozbočnice

Před počítačovými simulacemi jsem provedl výpočet geometrických rozměrů optické rozbočnice podle metody publikované D. Beltrami [8], kde byl odvozen popis pro optickou symetrickou mnohavidovou rozbočnici se dvěma výstupními vlnovody. Nejdříve jsem provedl výpočet pro maximální úhel  $\theta$  (viz Obr. 3.3) při němž ještě dochází k totálnímu odrazu [3, 7, 8]:

$$\theta \leq \sin^{-1} \frac{\sqrt{n_f^2 - n_s^2}}{n_f} \quad (9)$$

kde  $n_f$  je index lomu vlnovodné vrstvy a  $n_s$  index lomu substrátu. Úhel  $\theta$  jsem následně použil pro výpočet úhlu  $\Omega$  (viz Obr. 3.3):

$$\Omega \leq \frac{\theta D}{D + 1} = \frac{\theta}{2} \quad (10)$$

a minimální délky podélně se rozšiřující se části rozbočnice  $d$ :

$$D = \frac{d \cdot \sin \Omega}{\rho \cdot (2 - \cos \Omega)} \quad (11)$$

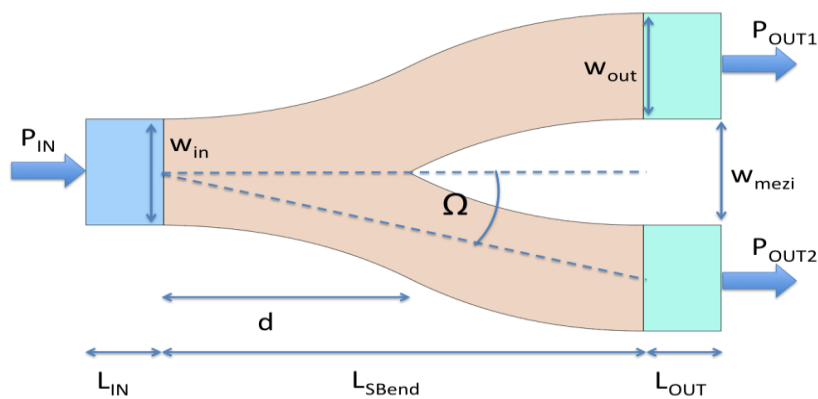
kde  $w$  je šířka vlnovodu,  $\rho = w / 2$  a normovaná délka  $D$  značí poměr mezi šířkou výstupního vlnovodu  $w_{out}$  a vstupního vlnovodu  $w_{in}$ . Protože navrhované rozbočnice mají stejnou šířku vstupních i výstupních vlnovodů ( $w_{in} = w_{out} = w$ ), normovaná délka  $D$  se rovná jedné.

Dále jsem vypočítal další parametry pro použité materiály, a to numerickou aperturu  $NA$  [7, 8]:

$$NA = \sqrt{n_f^2 - n_s^2} \quad (12)$$

a relativní kontrast indexů lomu  $\Delta$ :

$$\Delta = \frac{n_f^2 - n_s^2}{2n_f^2} \quad (13)$$



Obr. 3.3: Schéma navrhované rozbočnice 1x2Y.

Výpočet byl proveden pro vlnové délky 532, 650, 850, 1310 a 1550 nm. Indexy lomu pro jednotlivé vlnové délky byl získán aproximací naměřených dat z Obrázku 2.1. Další použité hodnoty byly  $D = 1$ ,  $w = 1000 \mu\text{m}$  (Tab. 3.1 a Tab. 3.3),  $w = 750 \mu\text{m}$  (Tab. 3.2, Tab. 3.4 a Tab. 3.5) nebo  $w = 400 \mu\text{m}$  (Tab. 3.6). Výsledky výpočtů jsou uvedeny v Tabulkách 3.1 až 3.6.

Tab. 3.1: Vypočítané parametry rozbočnice 1x2Y (w = 1000  $\mu$ m) při použití materiálů: NOA73/VeroClear.

$\lambda$ (nm)	$n_f$ (-) NOA73	$n_s$ (-) VeroClear	$\Theta$ (°)	$\Omega$ (°)	$d$ (mm)	$L_{SBend}$ (mm)	NA (-)	$\Delta$ (-)
532	1,5638	1,5378	10,47	5,24	5,50	11,00	0,284	0,0165
650	1,5550	1,5307	10,15	5,08	5,67	11,34	0,274	0,0155
850	1,5498	1,5262	10,02	5,01	5,75	11,50	0,270	0,0151
1310	1,5425	1,5178	10,27	5,13	5,61	11,22	0,275	0,0159
1550	1,5400	1,5167	9,98	4,99	5,77	11,54	0,267	0,0150

Tab. 3.2: Vypočítané parametry rozbočnice 1x2Y (w = 750  $\mu$ m) při použití materiálů: NOA73/VeroClear.

$\lambda$ (nm)	$n_f$ (-) NOA73	$n_s$ (-) VeroClear	$\Theta$ (°)	$\Omega$ (°)	$d$ (mm)	$L_{SBend}$ (mm)	NA (-)	$\Delta$ (-)
532	1,5638	1,5378	10,47	5,24	4,13	8,26	0,284	0,0165
650	1,5550	1,5307	10,15	5,08	4,26	8,52	0,274	0,0155
850	1,5498	1,5262	10,02	5,01	4,31	8,62	0,270	0,0151
1310	1,5425	1,5178	10,27	5,13	4,21	8,42	0,275	0,0159
1550	1,5400	1,5167	9,98	4,99	4,33	8,66	0,267	0,0150

Tab. 3.3: Vypočítané parametry rozbočnice 1x2Y (w = 1000  $\mu$ m) při použití materiálů: VeroClear/PDMS<sup>1</sup>.

$\lambda$ (nm)	$n_f$ (-) VeroClear	$n_s$ (-) PDMS	$\Theta$ (°)	$\Omega$ (°)	$d$ (mm)	$L_{SBend}$ (mm)	NA (-)	$\Delta$ (-)
532	1,5378	1,4165	22,91	11,45	2,57	5,14	0,599	0,0758
650	1,5307	1,4112	22,79	11,40	2,58	5,16	0,593	0,0750
850	1,5262	1,4076	22,73	11,37	2,59	5,18	0,590	0,0747
1310	1,5178	1,4025	22,48	11,24	2,61	5,22	0,580	0,0731
1550	1,5167	1,4013	22,49	11,25	2,61	5,22	0,580	0,0732

Tab. 3.4: Vypočítané parametry rozbočnice 1x2Y (w = 750  $\mu$ m) při použití materiálů: VeroClear/PDMS.

$\lambda$ (nm)	$n_f$ (-) VeroClear	$n_s$ (-) PDMS	$\Theta$ (°)	$\Omega$ (°)	$d$ (mm)	$L_{SBend}$ (mm)	NA (-)	$\Delta$ (-)
532	1,5378	1,4165	22,91	11,45	1,93	3,86	0,599	0,0758
650	1,5307	1,4112	22,79	11,40	1,94	3,88	0,593	0,0750
850	1,5262	1,4076	22,73	11,37	1,94	3,88	0,590	0,0747
1310	1,5178	1,4025	22,48	11,24	1,96	3,92	0,580	0,0731
1550	1,5167	1,4013	22,49	11,25	1,96	3,92	0,580	0,0732

Tab. 3.5: Vypočítané parametry rozbočnice 1x2Y (w = 750  $\mu$ m) při použití materiálů: VisionClear/PDMS-RT<sup>2</sup>.

$\lambda$ (nm)	$n_f$ (-) VisionClear	$n_s$ (-) PDMS-RT	$\Theta$ (°)	$\Omega$ (°)	$d$ (mm)	$L_{SBend}$ (mm)	NA (-)	$\Delta$ (-)
532	1,5295	1,4169	22,12	11,06	1,99	3,98	0,576	0,0709
650	1,5216	1,4114	21,94	10,97	2,01	4,02	0,569	0,0698
850	1,5173	1,4078	21,90	10,95	2,01	4,02	0,566	0,0696
1310	1,5110	1,4025	21,85	10,92	2,01	4,02	0,562	0,0692
1550	1,5093	1,4012	21,82	10,91	2,02	4,04	0,561	0,0691

<sup>1</sup> PDMS - vrstva připravovaná při 100°C po dobu 60 min.

<sup>2</sup> PDMS-RT – vrstva PDMS připravená při pokojové teplotě (RT – room temperature) po dobu 7 dní

Tab. 3.6: Vypočítané parametry rozbočnice 1x2Y ( $w = 400 \mu\text{m}$ ) při použití materiálů: VisionClear/PDMS-RT<sup>1</sup>.

$\lambda$ (nm)	$n_f$ (-) VisionClear	$n_s$ (-) PDMS-RT	$\Theta$ (°)	$\Omega$ (°)	$d$ (mm)	$L_{\text{SBend}}$ (mm)	NA (-)	$\Delta$ (-)
532	1,5295	1,4169	22,12	11,06	1,06	2,12	0,576	0,0709
650	1,5216	1,4114	21,94	10,97	1,07	2,14	0,569	0,0698
850	1,5173	1,4078	21,90	10,95	1,07	2,14	0,566	0,0696
1310	1,5110	1,4025	21,85	10,92	1,07	2,14	0,562	0,0692
1550	1,5093	1,4012	21,82	10,91	1,08	2,16	0,561	0,0691

Z vypočtených dat uvedených v Tabulce 3.1 až 3.6 vyplývá, že návrhy optických rozbočnic, u kterých jsou použity materiály s menším kontrastem indexu lomu  $\Delta$ , vyžadují větší podélné rozměry při zachování stejných příčných rozměrů optických rozbočnic.

Dále jsem určil činitele odrazu  $R$  a propustnosti  $T$  na rozhraní mezi vstupními/výstupními optickými vlákny a planárními vlnovody [9]:

$$R = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (14)$$

$$T = \frac{4n_1n_2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (15)$$

Kde  $n_1$  je index lomu vlnovodné vrstvy planárního vlnovodu (NOA73, VeroClear, VisionClear) a  $n_2$  je index lomu jádra vláknového vlnovodu (PMMA). Pro výpočet byly použity tabulkové hodnoty indexu lomu PMMA [10].

V následující Tabulce 3.7 a 3.8 jsou spočítány činitele odrazu  $R$  a propustnosti  $T$  na rozhraní použitých materiálů (NOA, VeroClear, VisionClear a PDMS) s vlnovodným materiálem polymerního vlákna (PMMA). Z vypočtených hodnot vyplývá, že ztráty činitelem odrazu  $R$  jsou zanedbatelné.

Tab. 3.7: Vypočítané činitele odrazu ( $R$ ) a propustnosti ( $T$ ) na rozhraní použitých materiálů NOA a VeroClear s PMMA [10].

$\lambda$ (nm)	$n_2$ (-) PMMA	$n_1$ (-) NOA	$R$ (-)	$T$ (-)	$n_1$ (-) VeroClear	$R$ (-)	$T$ (-)
532	1,4953	1,5638	0,000501	0,9995	1,5378	0,000196	0,9998
650	1,4903	1,5550	0,000451	0,9995	1,5307	0,000179	0,9998
850	1,4859	1,5498	0,000443	0,9996	1,5262	0,000179	0,9998
1310	1,4820	1,5425	0,000400	0,9996	1,5178	0,000142	0,9999
1550	1,4809	1,5400	0,000383	0,9996	1,5167	0,000143	0,9999

Tab. 3.8: Vypočítané činitele odrazu ( $R$ ) a propustnosti ( $T$ ) na rozhraní použitých materiálů VisionClear a PDMS s PMMA [10].

$\lambda$ (nm)	$n_2$ (-) PMMA	$n_1$ (-) VisionClear	$R$ (-)	$T$ (-)	$n_1$ (-) PDMS	$R$ (-)	$T$ (-)
532	1,4953	1,5295	0,000128	0,9999	1,4165	0,000732	0,9993
650	1,4903	1,5216	0,000108	0,9999	1,4112	0,000743	0,9993
850	1,4859	1,5173	0,000109	0,9999	1,4076	0,000732	0,9993
1310	1,4820	1,5110	0,000094	0,9999	1,4025	0,000760	0,9992
1550	1,4809	1,5093	0,000090	0,9999	1,4013	0,000763	0,9992

<sup>1</sup> PDMS-RT – vrstva PDMS připravená při pokojové teplotě (RT – room temperature) po dobu 7 dní

### 3.3 Metoda šíření optického svazku

Po návrhu dle rovnic odvozených D. Beltramim jsem provedl přesnější návrh pomocí specializovaného programu BeamPROP™ od firmy RSoft pomocí metody šíření optického svazku (BPM – Beam Propagation Method).

Jedná se o metodu založenou na simulaci šíření světla ve vlnovodných strukturách. Využívá metodu konečných diferencí pro řešení Helmholtzových vlnových rovnic v parabolickém anebo paraxiálním přiblížení [8, 9].

pokud je pole skalár, má Helmholtzova rovnice pro monochromatickou vlnu tvar:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + k(x, y, z)^2 \varphi = 0 \quad (16)$$

kde  $\varphi$  je proměnné elektromagnetické pole šířící se strukturou,  $x$ ,  $y$ ,  $z$  jsou prostorové souřadnice a  $k$  je vlnové číslo.

Pokud uvažujeme malé změny pole, jeho šíření v směru osy  $z$  vyjádříme jako:

$$\varphi(x, y, z) = u(x, y, z)e^{j\bar{k}z} \quad (17)$$

kde  $k$  je referenční vlnové číslo, které vyjadřuje střední změnu fáze v poli  $\varphi(x, y, z)$ . Helmholtzovu rovnici můžeme pro pomalu se měnící pole vyjádřit rovnicí:

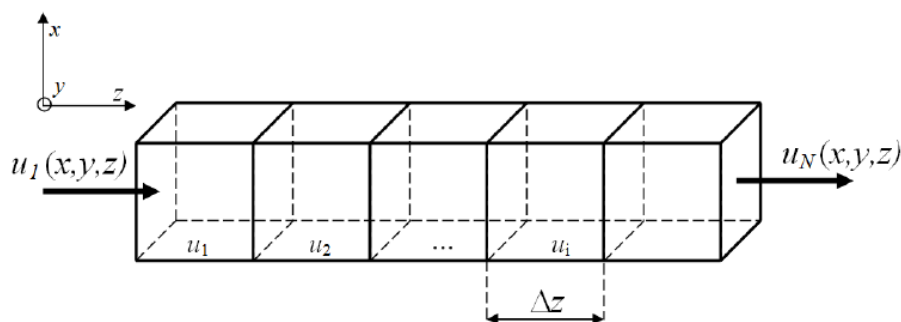
$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + 2j\bar{k} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + (k^2 - \bar{k}^2)u = 0 \quad (18)$$

Za předpokladu, že paprsky svírají s osou šíření velmi malý úhel a při splnění podmínky pomalu se měnícího elektromagnetického pole, může být zanedbána druhá derivace podle  $z$  a získáme rovnici, která je základem metody BPM pro 3D prostředí:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{2}{j\bar{k}} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + (k^2 - \bar{k}^2)u \right) \quad (19)$$

Tato metoda je výhodná z hlediska nižší výpočetní náročnosti. Šíření optického svazku je řešené pomocí jednoduché integrace, zavedením předpokladu pomalu se měnícího elektromagnetického pole podél osy  $z$  je zmenšený počet vstupních hodnot. Nevýhodou této metody je to, že v důsledku zanedbání druhé derivace neumožňuje řešit šíření elektromagnetického pole v strukturách, kde je nevyhnutné brát v úvahu zpětné šíření a odrazy

Integraci parabolické parciální rovnice je možno vyřešit např. metodou konečných diferencí, která je založená na Crank-Nicholsonově schématu. Cílem této metody je najít numerické rovnice, z kterých se vypočítá elektromagnetické pole  $u_i^{n+1}$  v následující diskrétní rovnici. Tento postup se opakuje až do vypočtení šíření elektromagnetického pole v celé struktuře. Princip metody je uveden na Obrázku 3.4.



Obr. 3.4: Crank-Nicholsonova schéma [9].

Crank-Nicholsonovo schéma je možné popsat vztahem:

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta z} = \frac{2}{j\bar{k}} \left( \frac{\delta^2}{\Delta x^2} \left( k \left( x_i, z_{n+\frac{1}{2}} \right)^2 - \bar{k}^2 \right) u \right) \frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{2} \quad (20)$$

kde  $\delta^2$  je standartní diferenciální operátor, který je určený vztahem:

$$\delta^2 u_i = (u_{i+1} + u_{i-1} - 2u_i) \quad (21)$$

### 3.4 Návrh optické mnohavidové rozbočnice pomocí metody BPM

Po výpočtu parametrů rozbočnic 1x2Y (kapitola 3.2) pomocí rovnic odvozených panem Beltramim jsem provedl přesnější návrh simulace v programu BeamPROP<sup>TM</sup> od firmy RSoft využívající metodu BPM [10]. Vzhledem k velkým rozměrům navrhovaných struktur byly simulace provedeny pouze pomocí 2D simulace. Optimalizace rozměrů byla provedena pomocí balíčku MOST (RSoft's, Multi-Variable Optimization and Scanning Tool), který umožňuje simulovat s proměnnými parametry. Toho jsem využil nejdříve k nalezení vhodného rozmezí úhlu  $\Omega$  a následně k jeho optimalizaci v nalezeném rozmezí s jemnějším krokem. Pro symetrické optické rozbočnice se za optimální považuje, když je mezi výstupní vlnovody normovaný optický výstupní výkon rozdělen právě na polovinu.

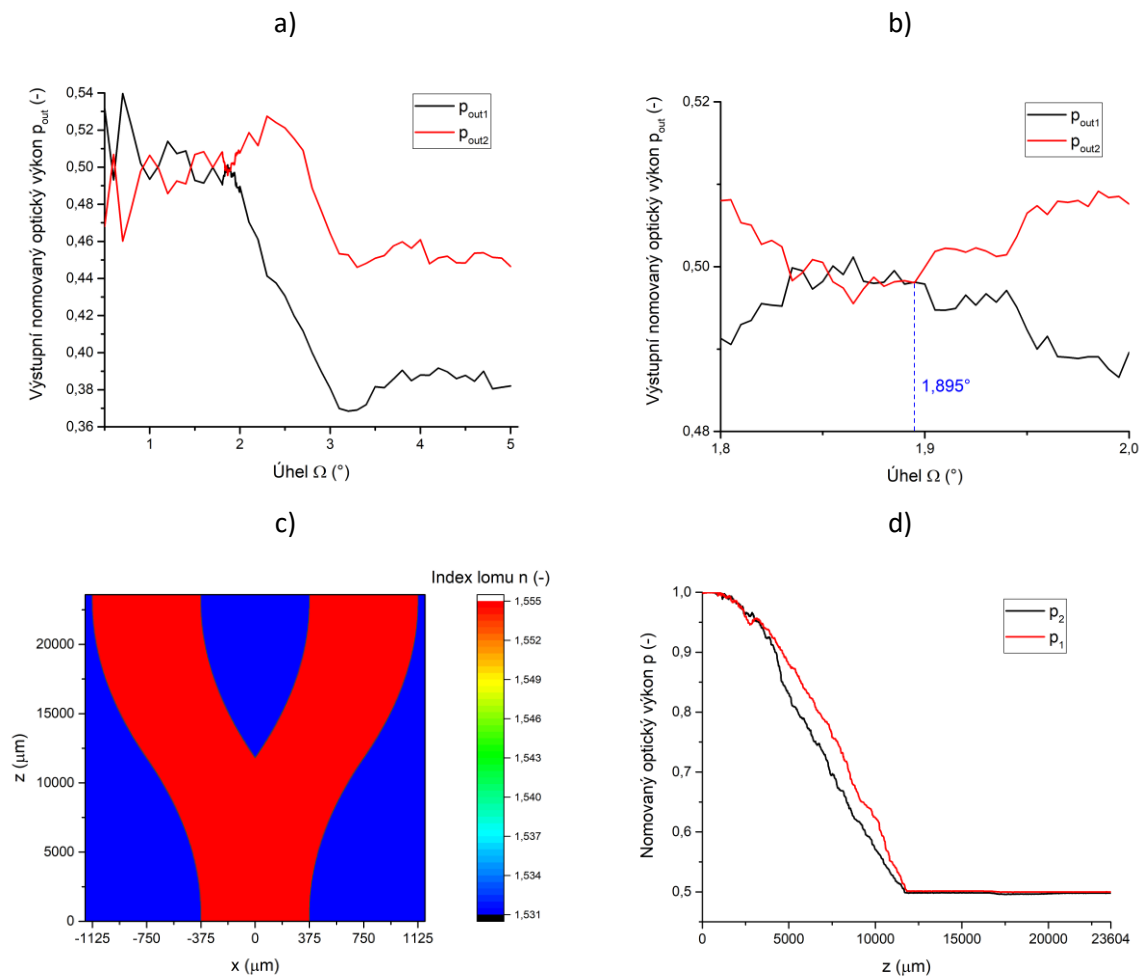
Všechny rozbočnice byly simulovány pro vlnovou délku 650 nm k nalezení optimálního úhlu  $\Omega$  při minimální šířce mezi výstupními vlnovody  $w_{mezi}$ , kde tato šířka nesmí být menší než šířka vlnovodu, aby bylo možno na výstupu připojit POF vlákna s rozměry 400, 750 nebo 1000  $\mu\text{m}$ . Následně jsem testoval, jestli je možné zkrátit délku rozbočnice L, pokud zvětším rozteč mezi výstupními vlnovody ( $w_{mezi}$  – viz Obr. 3.3). Dále jsem simuloval, jak se změní vlastnosti rozbočnice optimálních rozměrů pro vlnovou délku 650 nm a pro další vlnové délky: 532, 850, 1310 a 1550 nm.

#### Návrh struktury optické rozbočnice NOA/VeroClear

Návrh struktury optické rozbočnice pro vlnovodnou vrstvu NOA<sup>1</sup> se substrátem a krycí vrstvou VeroClear pro vlnovody s rozměrem 750  $\mu\text{m}$  a pro vlnovou délku 650 nm ( $n_f = 1,5550$ ,  $n_s = 1,5307$ ) je uveden na Obrázku 3.5. Kde je na Obrázku 3.5a nejprve uvedena závislost výstupního normovaného optického výkonu na velikosti úhlu  $\Omega$ , na Obrázku 3.5b je uveden detail pro návrh úhlu  $\Omega$ . Na Obrázku 3.5c je dále rozložení indexu lomu v rovině xz pro optimalizované rozměry (úhel  $\Omega = 1,895^\circ$ ) (2D návrh) a závislost normovaného optického výkonu na vzdálenosti ve směru šíření z je uveden na Obrázku 3.5d.

<sup>1</sup> Návrh byl proveden pro polymer NOA73 [11].

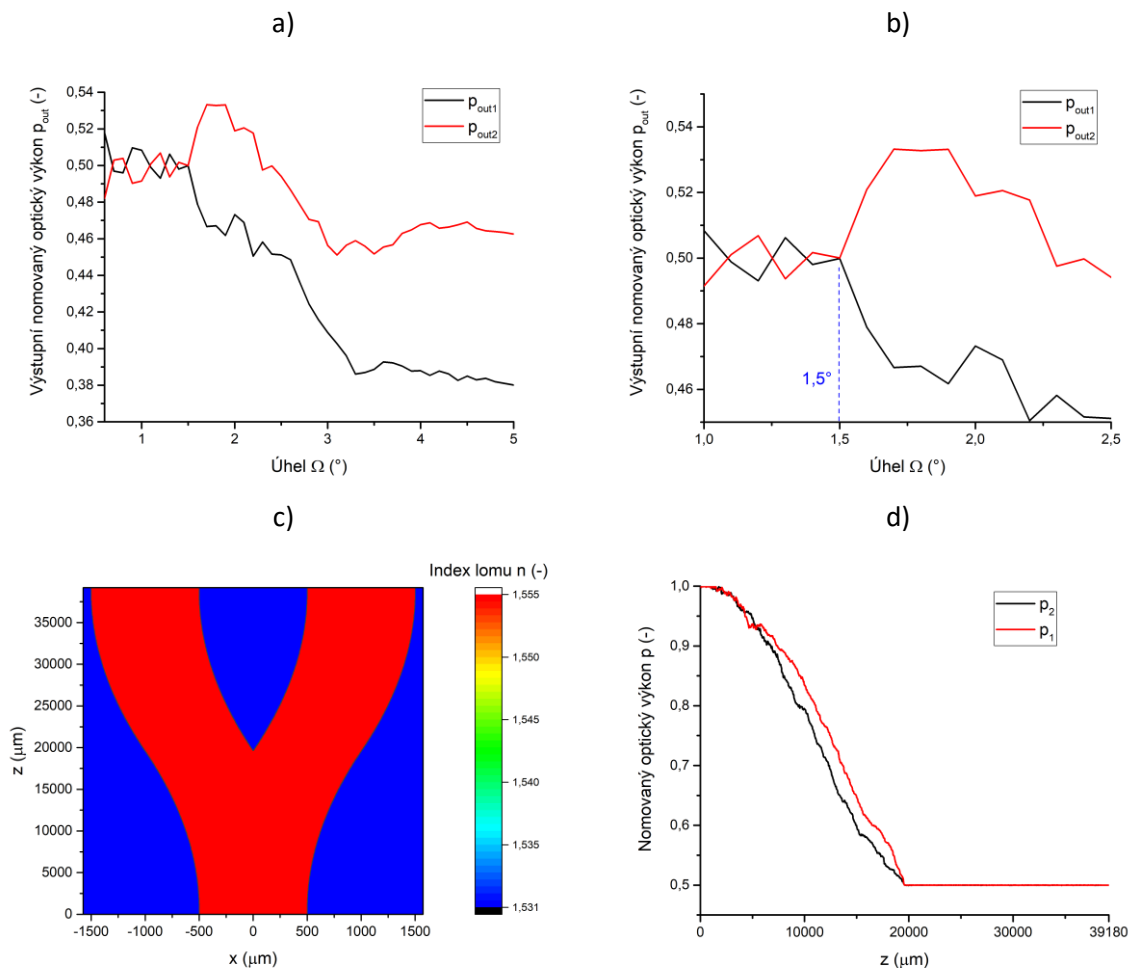




Obr. 3.5: Rozbočnice 1x2Y NOA/VeroClear,  $n_f = 1,5550$ ,  $n_s = 1,5307$ ,  $\lambda = 650$  nm,  $w = 750$   $\mu\text{m}$ .

- a) Závislost výstupního normovaného optického výkonu na velikosti úhlu.
- b) Závislost výstupního normovaného optického výkonu na velikosti úhlu  $\Omega$  (detail oblasti z Obr. 3.5a).
- c) Rozložení indexu lomu v rovině  $xz$  pro optimální úhel  $\Omega = 1,895^\circ$  (2D návrh).
- d) Šíření normovaného optického signálu ve struktuře s optimalizovanými rozměry.

Na Obrázku 3.6 je uveden výsledek simulace s rozměrem vstupního vlnovodu 1000  $\mu\text{m}$  pro vlnovodnou vrstvu NOA se substrátem a krycí vrstvou VeroClear pro vlnovou délku 650 nm ( $n_f = 1,5550$ ,  $n_s = 1,5307$ ). Kde je na Obrázku 3.6a nejprve uvedena závislost výstupního normovaného optického výkonu na velikosti úhlu  $\Omega$ , následně přiblížena v detailu (Obr. 3.6b). Na Obrázku 3.6c je dále rozložení indexu lomu v rovině  $xz$  pro optimální úhel  $\Omega = 1,895^\circ$  (2D návrh) a závislost normovaného optického výkonu na vzdálenosti ve směru šíření  $z$  (Obr. 3.6d).

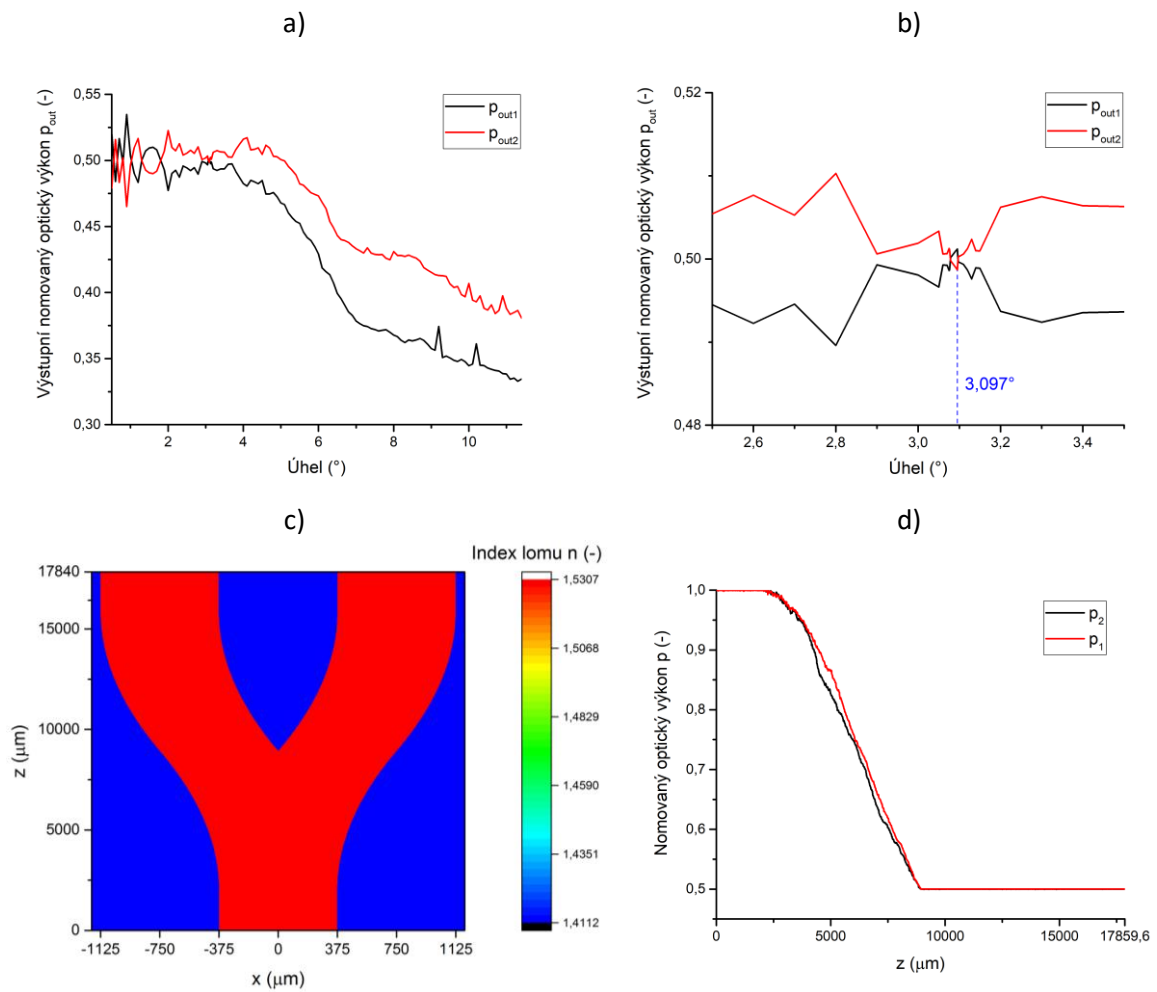


Obr. 3.6: Rozbočnice 1x2Y NOA/VeroClear,  $n_f = 1,5550$ ,  $n_s = 1,5307$ ,  $\lambda = 650$  nm,  $w = 1000$   $\mu\text{m}$ .

- a) Závislost výstupního normovaného optického výkonu na velikosti úhlu.
- b) Závislost výstupního normovaného optického výkonu na velikosti úhlu  $\Omega$  (detail oblasti z Obr. 2.4a).
- c) Rozložení indexu lomu v rovině xz pro optimální úhel  $\Omega = 1,5^\circ$  (2D návrh).
- d) Šíření normovaného optického signálu ve struktuře s optimalizovanými rozměry.

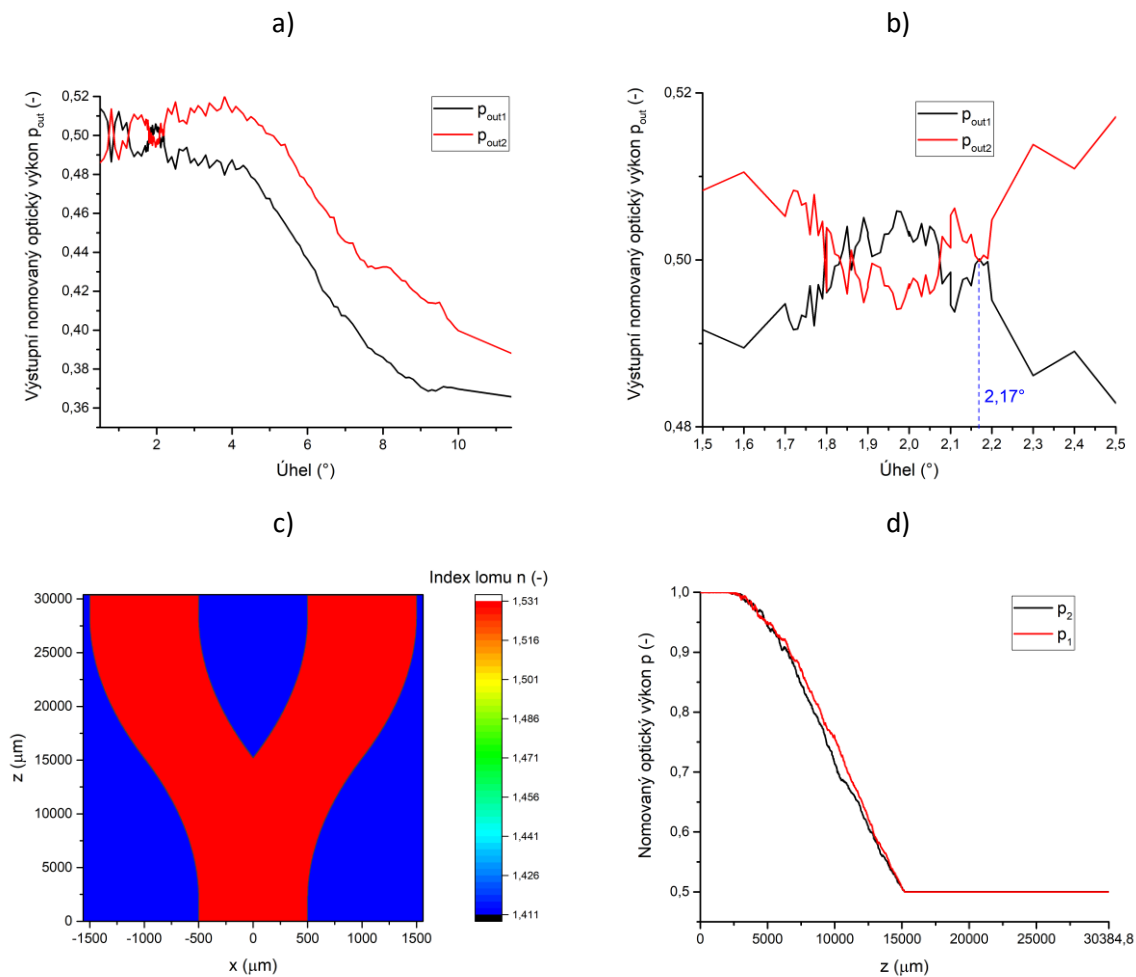
### Návrh struktury optické rozbočnice VeroClear/PDMS

Dále jsem provedl simulace pro strukturu optické rozbočnice VeroClear/PDMS pro vlnovou délku 650 nm ( $n_f = 1,5307$ ,  $n_s = 1,4112$ ). Jejich výsledky pro šířku vlnovodu 750  $\mu\text{m}$  jsou uvedeny na Obrázku 3.7 a pro šířku vlnovodu 1000  $\mu\text{m}$  jsou uvedeny na Obrázku 3.8. Závislosti výstupního normovaného optického výkonu na velikosti úhlu  $\Omega$  (viz Obr. 3.7a a 3.8a) jsou uvedeny v detailu na Obrázcích 3.7b a 3.8b. Na Obrázcích 3.7c a 3.8c je uvedeno rozložení indexu lomu v rovině xz pro optimalizované geometrické rozměry, na Obrázcích 3.7d a 3.8d průběh normovaného optického výkonu rozbočnicí. Optimální úhel  $\Omega$  pro optické rozbočnice se šířkou vlnovodu 750  $\mu\text{m}$  je  $3,097^\circ$  a pro rozbočnice se šířkou vlnovodu 1000  $\mu\text{m}$  je  $2,17^\circ$ . Obrázků 3.7d a 3.8d vyplývá, že se podařilo pro tento návrh struktur optických rozbočnic, tak aby byl optický signál na výstupu struktur symetricky rozdělen v poměru 50:50%.



Obr. 3.7: Rozbočnice 1x2Y VeroClear/PDMS,  $n_f = 1,5307$ ,  $n_s = 1,4112$ ,  $\lambda = 650 \text{ nm}$ ,  $w = 750 \mu\text{m}$ .

- Závislost výstupního normovaného optického výkonu na velikosti úhlu  $\Omega$ .
- Závislost výstupního normovaného optického výkonu na velikosti úhlu  $\Omega$  (detail oblasti z Obr. 3.7a).
- Rozložení indexu lomu v rovině  $xz$  pro optimální úhel  $\Omega = 3,097^\circ$  (2D návrh).
- Šíření normovaného optického signálu ve struktuře s optimalizovanými rozměry.



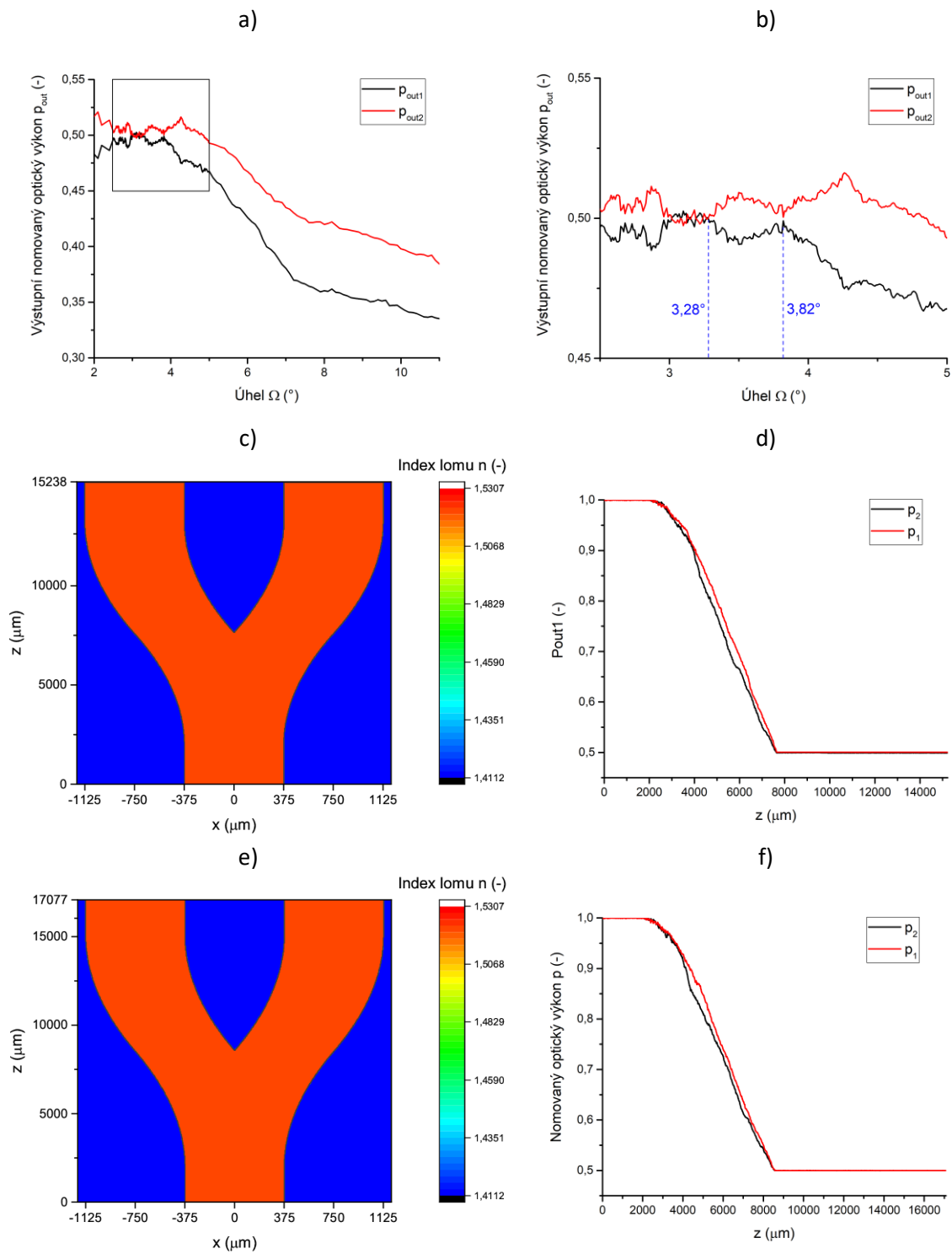
Obr. 3.8: Rozbočnice 1x2Y VeroClear/PDMS,  $n_f = 1,5307$ ;  $n_s = 1,4112$ ,  $\lambda = 650$  nm,  $w = 1000$   $\mu\text{m}$ .

- a) Závislost výstupního normovaného optického výkonu na velikosti úhlu  $\Omega$ .
- b) Závislost výstupního normovaného optického výkonu na velikosti úhlu  $\Omega$  (detail oblasti z Obr. 3.8a).
- c) Rozložení indexu lomu v rovině xz pro optimální úhel  $\Omega = 2,17^{\circ}$  (2D návrh).
- d) Šíření normovaného optického signálu ve struktuře s optimalizovanými rozměry.

### Návrh struktury optické rozbočnice VisionClear/PDMS-RT

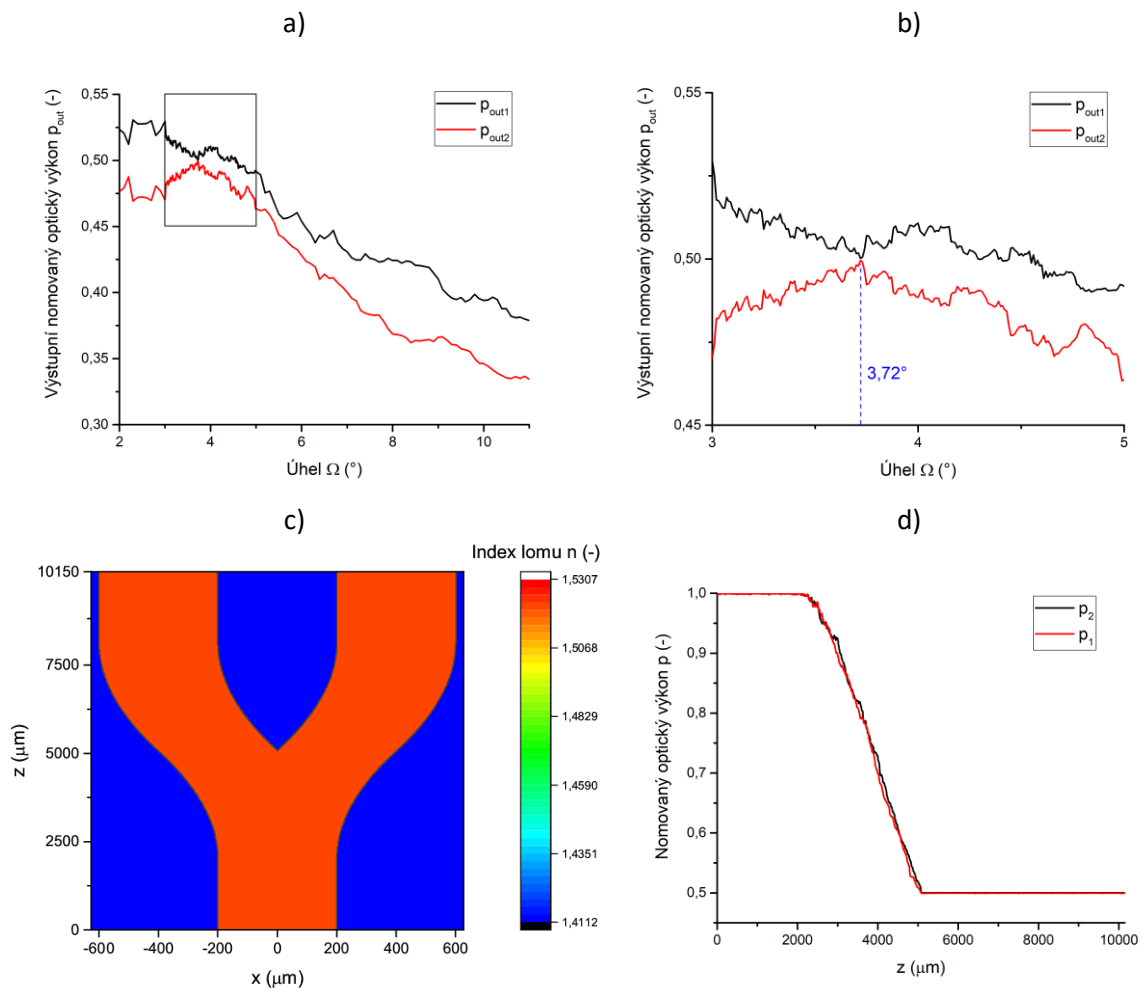
Jako poslední jsem provedl návrh pro struktury s vlnovodnou vrstvou VisionClear. Substrát a krycí vrstvu opět tvořil elastomer PDMS, ale připravený při pokojové teplotě (PDMS-RT). Výsledky jsou uvedeny pro simulace s vlnovou délkou 650 nm ( $n_f = 1,5216$ ;  $n_s = 1,4114$ ). Závislost výstupního normovaného optického výkonu na velikosti úhlu  $\Omega$  je uveden na Obrázku 3.9a. Pro optickou rozbočnici se šířkou vlnovodů 750  $\mu\text{m}$  jsem našel dva optimální úhly  $\Omega$ . Optimální úhly jsou vyznačeny v detailu na Obrázku 3.9b. Průběh normovaného optického výkonu rozbočnicí pro optimální úhel  $\Omega = 3,82^{\circ}$  (respektive  $\Omega = 3,28^{\circ}$ ) je na obrázku 3.9d (resp. 3.9f), rozložení indexu lomu v rovině xz je uvedeno na Obrázku 3.9c (resp. 3.9e).

Na Obrázku 3.10 je uveden výsledek simulace pro šířku vlnovodů 400  $\mu\text{m}$  pro vlnovodnou vrstvu VisionClear se substrátem a krycí vrstvou PDMS-RT pro vlnovou délku 650 nm ( $n_f = 1,5550$ ,  $n_s = 1,5307$ ). Kde je na Obrázku 3.10a nejprve uvedena závislost výstupního normovaného optického výkonu na velikosti úhlu  $\Omega$ , následně přiblížena v detailu (Obr. 3.10b). Na Obrázku 3.10c je dále rozložení indexu lomu v rovině xz pro optimální úhel  $\Omega = 3,72^{\circ}$  (2D návrh). Šíření normovaného optického signálu ve struktuře s optimalizovanými rozměry je uvedeno na Obrázku 3.10d.



Obr. 3.9: Rozbočnice 1x2Y VisionClear/PDMS-RT,  $n_f = 1,5216$ ,  $n_s = 1,4114$ ,  $\lambda = 650$  nm,  $w = 750$   $\mu\text{m}$ .

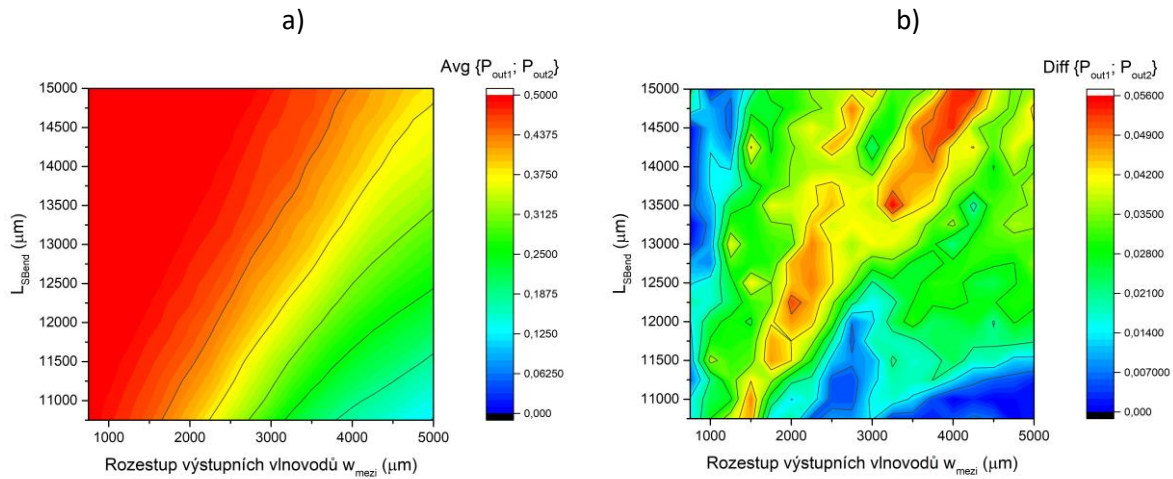
- a) Závislost výstupního normovaného optického výkonu na velikosti úhlu  $\Omega$ .
- b) Závislost výstupního normovaného optického výkonu na velikosti úhlu  $\Omega$  (detail oblasti z Obr. 3.9a).
- c) Rozložení indexu lomu v rovině  $xz$  pro optimální úhel  $\Omega = 3,82^\circ$  (2D návrh).
- d) Šíření normovaného optického signálu ve struktuře s optimalizovanými rozměry (úhel  $\Omega = 3,82^\circ$ ).
- e) Rozložení indexu lomu v rovině  $xz$  pro optimální úhel  $\Omega = 3,28^\circ$  (2D návrh).
- f) Šíření normovaného optického signálu ve struktuře s optimalizovanými rozměry (úhel  $\Omega = 3,82^\circ$ ).



Obr. 3.10: Rozbočnice 1x2Y VisionClear/PDMS-RT,  $n_f = 1,5216$ ,  $n_s = 1,4114$ ,  $\lambda = 650$  nm,  $w = 400$   $\mu\text{m}$ .

- a) Závislost výstupního normovaného optického výkonu na velikosti úhlu  $\Omega$ .
- b) Závislost výstupního normovaného optického výkonu na velikosti úhlu  $\Omega$  (detail oblasti z Obr. 3.10a).
- c) Rozložení indexu lomu v rovině  $xz$  pro optimální úhel  $\Omega = 3,72^\circ$  (2D návrh).
- d) Šíření normovaného optického signálu ve struktuře s optimalizovanými rozměry.

Abych ověřil, zda je možné geometrické rozměry optické rozbočnice dále optimalizovat (zmenšit délku  $L$ ), provedl jsem simulaci pro větší rozestupy mezi výstupní vlnovody  $w_{mezi}$ . Výsledky simulací pro optickou rozbočnici o šířce vlnovodů 750  $\mu\text{m}$  VisionClear/PDMS-RT při vlnové délce 650 nm jsou na Obrázku 3.11. Na Obrázku 3.11a je uvedena průměrná velikost výstupních normovaných optických výkonů  $P_{out1}$  a  $P_{out2}$  (hledáme oblast maximálního výkonu – červená) a na Obrázku 3.11b velikost jejich rozdílu (hledáme oblast minimálního rozdílu – modrá). Z Obrázku 3.11 vyplývá, že s růstem rozestupů mezi výstupní vlnovody  $w_{mezi}$  je třeba prodlužovat délku optické rozbočnice  $L$ .



Obr. 3.11: Rozbočnice 1x2Y VisionClear/PDMS-RT,  $n_f = 1,5216$ ,  $n_s = 1,4114$ ,  $\lambda = 650$  nm,  $w = 750$   $\mu\text{m}$ .

- a) Závislost průměrné velikosti výstupního normovaného optického výkonu na délce optické rozbočnice  $L$  a rozestupu mezi výstupní vlnovody  $w_{\text{mezi}}$ .
- b) Závislost absolutní velikosti rozdílu výstupního normovaného optického výkonu na délce optické rozbočnice  $L$  a rozestupu mezi výstupní vlnovody  $w_{\text{mezi}}$ .

Na závěr provedených simulací jsem provedl porovnání rozměrů navržených struktur dle návrhu podle D. Beltramiho a počítačové simulace. Výsledek tohoto porovnání je uveden v Tabulce 3.9. Z tohoto porovnání vyplývá, že optimalizované úhly  $\Omega$  pomocí počítačové simulace vyšly výrazně menší než při návrhu podle D. Beltramiho. Tento rozdíl může být způsoben jednodušším tvarem optické rozbočnice použitého při odvození rovnic pro výpočet panem Beltrmim

Pan Beltrmi používá při odvození rovnic jednoduššího tvaru rozbočnice (viz [8] str. 310 Obr. 7). Pro zjednodušení rovnic dále předpokládá slabě vedoucí struktury (s malým relativní indexem lomu  $\Delta$ ) a tedy všechny paprsky nesou přibližně stejnou energii (viz [2] str. 310), úhel  $\Theta$  je dostatečně malý pro nahrazení Taylorový rozvojem do prvního stupně. Metoda ray tracing nepočítá fázovými rozdíly (nesymetrie u nekoherentních zdrojů).

Tab. 3.9: Porovnání vypočtených a nasimulovaných úhlů  $\Omega$  rozbočnice 1x2Y pro vlnovou délkou 750 nm.

vlnovod/substrát	w ( $\mu\text{m}$ )	Výpočet $\Omega$ ( $^\circ$ ) <sup>1</sup>	Simulace $\Omega$ ( $^\circ$ )
NOA/VeroClear	750	5,08	1,895
NOA/VeroClear	1000	5,08	1,5
VeroClear/PDMS	750	11,40	3,097
VeroClear/PDMS	1000	11,40	2,17
VisionClear/PDMS	750	10,97	3,82; 3,28
VisionClear/PDMS	400	10,97	3,72

<sup>1</sup> Viz kapitola 3.2 - Teoretický návrh mnohavidové optické rozbočnice



## 4 Výroba vzorků

Vzorky byly vyrobeny tak, že podle návrhu byly vytištěny jádra vlnovodů a optických rozbočnic. Pak u vybraných vytištěných vzorků byla nanášena plášťová vrstva, kterou tvořil elastomer PDMS. Použity byly dva typy 3D tiskáren. První typ vzorků byl proveden pomocí tiskárny Objet30 Pro [12] firmy Stratasys, kde byl pro tisk použit polymer VeroClear RGD810 [13]. Tisk probíhal na pracovišti Institute for Microelectronics and Microsensors, Johannes Keplerovi University z Linze v Rakousku. Jeho výroba je popsána v kapitole 4.1.

Druhý typ využíval 3D tiskárnu Luxexcel VisionEngine 3D [14] a byl použit polymer Luxexcel VisionClear. Tisk probíhal na pracovišti Institute of Photonics, University of Eastern Finland, Joensuu, Finland. Jeho výroba je popsána v kapitole 4.2.

Detailní popis výroby je uveden níže.

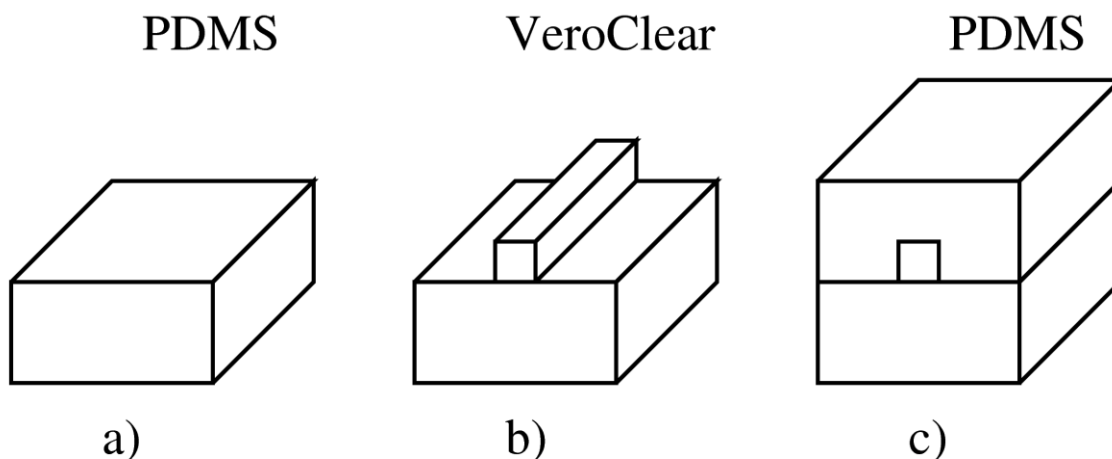
### 4.1 Výroba vzorků z materiálu VeroClear

Postup výroby optické rozbočnice z polymeru VeroClear při použití tiskárny Objet30 Pro byl následující: Nejdříve byla vytištěna struktura optimalizovaných geometrických rozměrů podle návrhu uvedeném v kapitole 3.4.

Postup výroby je následující: Tekutý polymer VeroClear je vstříknutý do vytvořené formy a drobné kapky jsou vytvářeny UV zářením. Postupným ukládáním jemných vrstev polymeru je vytvořen přesný 3D model planární struktury [12]. Při tisku struktur byl použit podpurný materiál Objet Suport SUP 706 [15], jenž byl následně odstraněn máčením v destilované vodě.

U vytištěných motivů, které slouží jako jádra vlnovodů jsou následně manuálně naleštěny čela pro navázání optického signálu. Leštění bylo provedeno pomocí přípravku pro leštění POF vláken. Leštění probíhalo krouživým osmičkovým pohybem, kde byly použity tři drsnosti leštících papírů s hrubostí zrna 3; 0,3 a 0,1  $\mu\text{m}$ . Po naleštění čel vytištěných struktur následovalo nanášení plášťové vrstvy, která byla tvořena elastomerem PDMS.

Elastomer PDMS byl použit dvousložkový termoset Sylgard 184 (ELCHEMCo), kde příprava pláště probíhala následovně: Smíchal jsem složku A a B v poměru 10 : 1 a následně jsem takto připravený polymer vložil do exikátoru. Po evakuaci na tlak přibližně 20 kPa došlo k odplynění polymeru po dobu 60 min. Pomocí 3D tiskárny Prusa I3 MK2 – 2016 [17] byly se strunou z materiálu Akrylonitrilbutadienstyren (ABS) vytištěny formy. Vnitřní stěny forem byly ošetřeny separátorem Formula 10 (ELCHEMCo). Toto ošetření bylo použito z důvodu snazší separace formy a vrstvy PDMS. Poté byl kapalný PDMS polymer nalit do formy a byl vytvrzen pomocí zahřátí na vyšší teplotu. Byly testovány teploty 65, 80 a 100°C s časy vytvrzení 4, 2 a jedna hodina. Vytvrzování proběhlo v peci Memert UF30<sup>PLUS</sup>. Po vytvrzení PDMS polymeru byl do formy vložen vytištěný motiv a byl opět zalit polymerem PDMS. Následovalo vytvrzení této horní krycí vrstvy stejným postupem jako byla vytvrzena podložka. Po vytvrzení byla struktura vyndána z formy a připravena k měření. Výrobní proces je schematicky zobrazen na Obrázku 4.1.



Obr. 4.1: Postup výroby rozbočnice VeroClear/PDMS: smícháme PDMS 10:1, a) vytvoření podložky z elastomeru PDMS, b) vložení vytištěné vlnovodné vrstvy na podložku z PDMS c) nanesení horní krycí vrstvy z elastomeru PDMS.

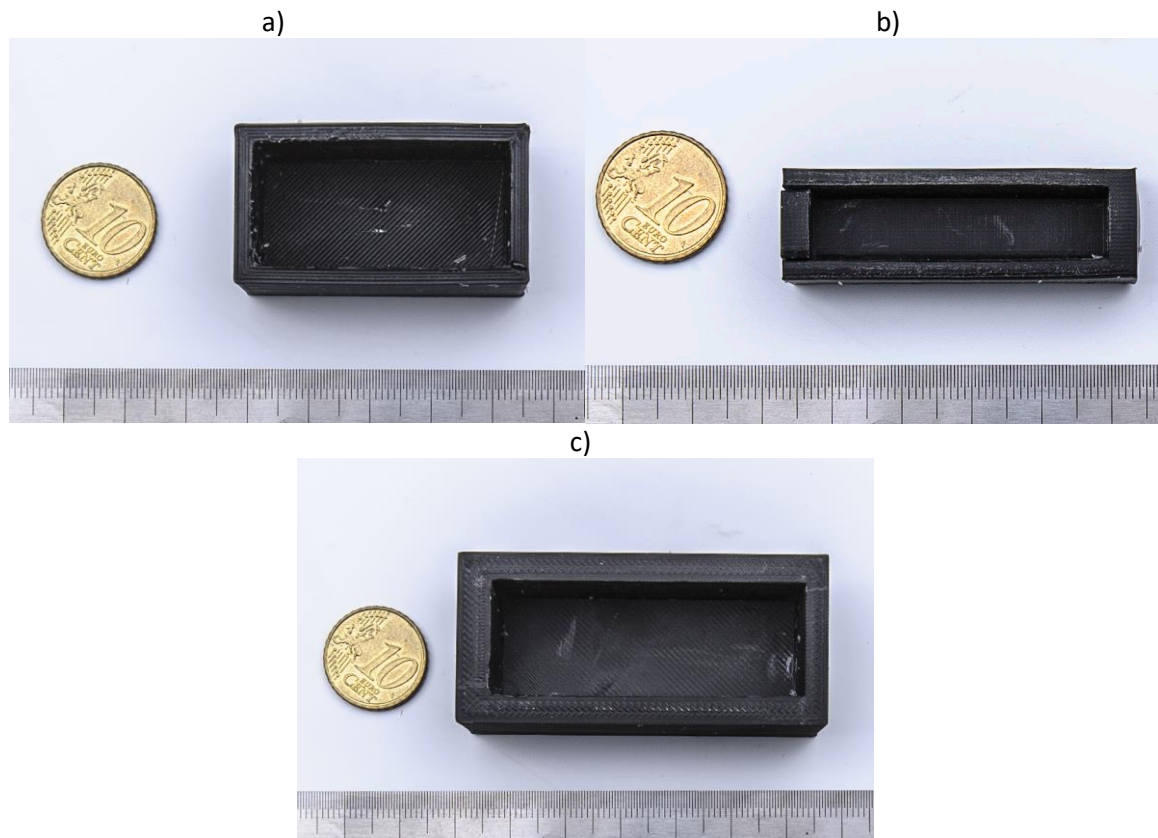
### Depoziční testy/optimalizace

Pro přípravu vzorků bylo třeba optimalizovat výrobní postup. Jedním z kroků byla příprava elastomeru PDMS k vytvrzení. PDMS bylo namícháno v doporučeném poměru 10 : 1, 10 dílů monomeru (PART A) a 1 díl síťovadla (PART B). Síťovadlo muselo být přidáváno bez přítomnosti UV záření. Jak odměřování a míchání, tak odlévání vytváří ve směsi bublinky, které je třeba odstranit, aby PDMS bylo po vytvrzení homogenní v celém svém objemu a mělo konstantní optické vlastnosti. Bublinky jsem odstraňoval pomocí vakuového exikátoru s vývěvou schopnou dosáhnout tlaků pod 20 kPa. Zalité vzorky byly ponechány za sníženého tlaku, dokud na povrch vystupovali bublinky. Čas potřebný k odstranění bublin byl 60 minut.

Dalším krokem bylo testování teploty maximální použitelné teploty pro vytvrzování PDMS. Souběžně byly do PDMS zality vzorky z polymeru VeroClear o šířce 750  $\mu\text{m}$ , které jsem měl k dispozici v dostatečném množství. V datasheetu přiloženému k PDMS [15] byly pro 4 teploty doporučeny vytvrzovací časy. Já jsem se na základě doporučení rozhodl pro teplotu 100°C po dobu jedné hodiny, teplotu 80°C po dobu 2 hodin, teplotu 65°C po dobu 4 hodin a pokojovou teplotu po dobu 7 dní. Aby bylo možno vytvrzovat při teplotě 100°C musely být formy vyrobeny z odolnějšího materiálu. Jako materiál byl zvolen polymer ABS (Akrylonitrilbutadienstyren) (pro teploty do 130°C). Vzorky z VeroClearu nejevily viditelné známky poškození ani při 100°C (nedošlo během vytvrzování ke zkroucení), nicméně se ukázalo, že PDMS není dostatečně viskózní a některé vzorky klesly během procesu na dno formy. Aby se zabránilo tomu, že vzorky budou částečně mimo vrstvu PDMS, bylo v příštím kroku PDMS nanášeno ve dvou vrstvách se vzorkem (nejdříve byla připravena spodní vrstva a po jejím vytvrzení byla do formy vložena struktura a pak zalita elastomerem PDMS a znovu vytvrzena). Během teplotního testu byly také vytvořeny vzorky PDMS pro měření indexů lomu.

Posledním krokem bylo ošetření zakončení zalitých vzorku, aby bylo možné struktury připojit k optickému vláknu a navázat světlo do struktury. Při pokusech o řezání přebytečného polymeru nižší elasticity VeroClearu oproti PDMS docházelo k jeho odchlípnutí PDMS, kde došlo překrytí výstpních čel vlnovodů jsem provedl mechanické odstranění polymeru PDMS pomocí žiletky/skalpelu. Toto se nepodařilo, proto jsem na čela vlnovodů při zalévání vložil kus tvrdé plastové fólie na jeden konec formy a druhý v odměřené vzdálenosti od něj. Aby šlo fólie odlepit byly natřeny separátorem SP3 (ELCHEMCo). Použití fólie se ukázalo spíše nouzovým řešením, jejíž uvolnění během vytvrzování mohlo někdy vést k tenké vrstvě PDMS a někdy ke zkroucení vzorků.

Fotografie forem vytištěných tiskárnou Prusa MK2 - 2016 jsou uvedeny na Obrázku 4.2.



Obr. 4.2: Formy použité pro nanášení PDMS vrstev:

- a) forma – 1.generace,
- b) navrhnutá forma s nastavitelnou délkou pro zjednodušení vyndání vzorku a snížení spotřeby PDMS,
- c) forma použitá pro vzorky VisionClear.

Seznam vzorků VeroClear je uveden v následující Tabulce 4.1 i s jejich rozměry a počty kusů. Jednotlivé vzorky byly pojmenovány názorně ve tvaru LINXY\_Z, kde X zastupuje šířku vzorku v  $\mu\text{m}$ , Z udává druh vzorku, zda se jedná o rozbočnici 1x2Y (Y), přímý vzorek (I), dlouhý (long) nebo krátký (short) vzorek. Y slouží k rozlišení jednotlivých kusů stejného druhu. Z uvedených vzorků byly měřeny pouze vzorky o šířce 750 a 1000  $\mu\text{m}$ . Byly vytištěny i vzorky menších šířek jsou prohnuté a k jejich měření nebyly k dispozici POF vlákna o průměrech 500 a 250  $\mu\text{m}$ .

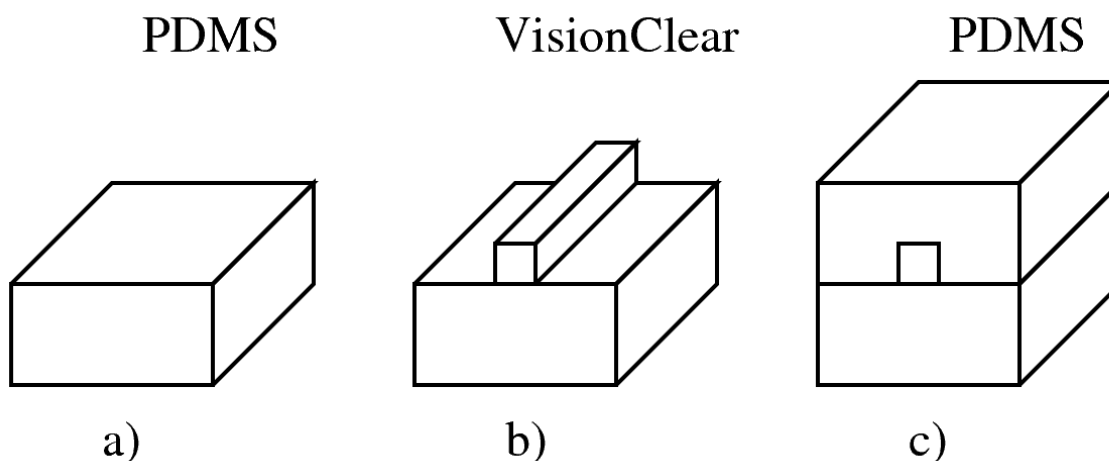
Tab. 4.1: Seznam vzorků VeroClear

Označení	Typ vlnovodu	Šířka vlnovodu w (μm)	Délka struktury L (cm)	Teplota vytvrzení	Počet vytištěných kusů
LIN1000x_long	přímý	1000	4	100°C	4 ks
LIN1000x_short	přímý	1000	2	100°C	3 ks
LIN750n_I	přímý	750	4	100°C	14 ks
LIN750n_Y	rozbočnice	750	4	100°C	15 ks
LIN750x_long	přímý	750	4	100°C	4 ks
LIN750x_short	přímý	750	2	100°C	4 ks
LIN750x_I	přímý	750	4	100°C	2 ks
LIN750x_Y	rozbočnice	750	4	100°C	2 ks
LIN500x_long	přímý	500	4	100°C	4 ks
LIN500x_short	přímý	500	2	100°C	2 ks
LIN250x_long	přímý	250	4	100°C	4 ks
LIN250x_short	přímý	250	2	100°C	4 ks

#### 4.2 Výroba vzorků z materiálu VisionClear

Postup výroby těchto optických vlnodů byl velmi podobný výrobě předchozích vzorků při použití polymeru VeroClear. Nejdříve byly vzorky vytištěny pomocí tiskárny Luxexcel VisionEngine 3D při použití polymeru VisionClear. Tisk pomocí tohoto polymeru probíhal pomocí dvou postupů. Prvním postupem byla tištěna struktura se čtvercovým průřezem, druhý postup tiskl struktury v podobě dvou trojúhelníků, který vytvořil výslednou strukturu optických vlnodů se čtvercovým průřezem.

Poté byly čela vzorků vyleštěna stejným postupem jako v případě vzorků VeroClear a následovalo nanesení plášťové vrstvy, kterou opět tvořil materiál PDMS. V případě plášťové vrstvy pro polymer VisionClear byla použita nižší vytvrzovací teplota 65°C po dobu 4 hodin a poté 7 dnů při pokojové teplotě. Postup přípravy je znázorněn na Obrázku 4.3.



Obr. 4.3: Postup výroby rozbočnice VisionClear/PDMS: smícháme PDMS 1:10, a) do formy nalijeme první vrstvu, odstraníme bublinky, vytvrdíme, b) vložíme vytištěnou vlnodnou vrstvu, c) zalijeme PDMS, odstraníme bublinky, vytvrdíme, vyndáme z formy.

Seznam vzorků s typem, délkou a šířkou vlnovodu a teplotou použitou při jejich výrobě je uveden v Tabulce 4.2.

Tab. 4.2: Seznam vzorků VisionClear.

Označení	Typ vlnovodu	Šířka vlnovodu w (μm)	Délka vlnovodu L (cm)	Teplota vytvrzení	Počet vytištěných kusů
FIN846a_long	přímý	750	5	65°C	1 ks
FIN846a_short	přímý	750	2,5	65°C	1 ks
FIN846b_long	přímý	750	5	pokožová	1 ks
FIN846b_short	přímý	750	2,5	pokožová	1 ks
FIN846c_long	přímý	750	5	nezalito	1 ks
FIN846c_short	přímý	750	2,5	nezalito	1 ks
FIN845a_long	přímý	750	5	65°C	1 ks
FIN845a_short	přímý	750	2,5	65°C	1 ks
FIN845b_long	přímý	750	5	nezalito	1 ks
FIN845b_short	přímý	750	2,5	nezalito <sup>1</sup>	1 ks

---

<sup>1</sup> Neměřena - během leštění se rozlepila.

## 5 Diagnostické metody

### 5.1 Optická kontrola vzorků

U vyrobených vzorků byla prováděna vizuální kontrola kvality. 1. kontrola byla provedena pomocí USB mikrokamery DINO-LITE DIGITAL MICROSCOPE se softwarem DinoCapture 2.0, detailnější kontrola pak byla provedena pomocí digitální kamery ARTCAMI s objektivem ZOOM Optics (Olympus Czech Group Ltd.) s ovládacím softwarem QUICKFOTO. Pro práci jsem zvolil nejmenší možné zvětšení objektivu 0,75. Geometrické rozměry byly kontrolovány pomocí kalibrovaného softwaru.

### 5.2 Jednohranolvá vidová spektroskopie - Index lomu

Index lomu byl měřen jednohranolvou vidovou spektroskopií pomocí přístroje Metricon 2010 [18, 19]. Monochromatický paprsek prochází hranolem, kde dopadá na jeho rozhraní s materiálem/vlnovodem pod úhlem  $\theta$ , který se postupně mění. Na rozhraní může v závislosti na druhu vzorku docházet k následujícím jevům:

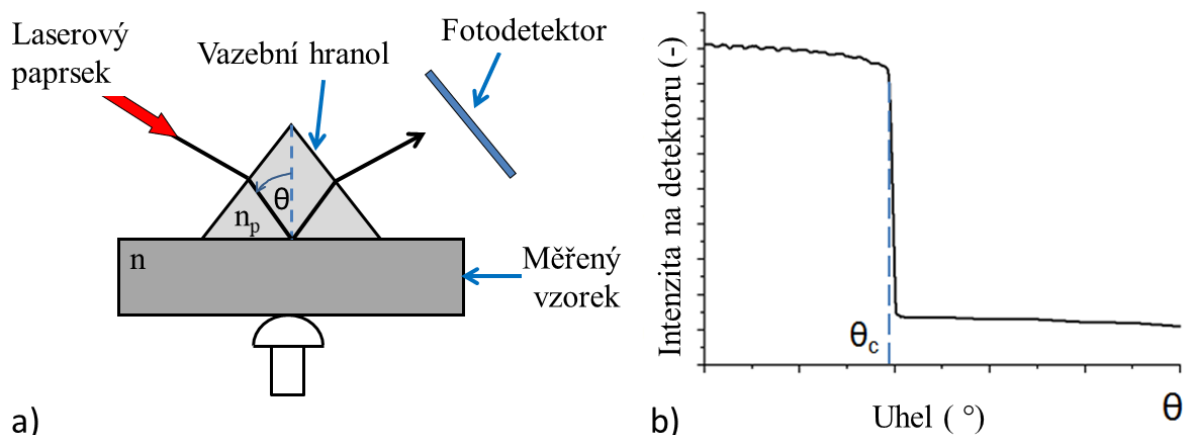
- 1) Jedná se o objemový vzorek:
  - a) Je-li úhel větší než kritický  $\theta_c$ , dochází totálnímu odrazu, paprsek se odrazí a je změřen na detektoru.
  - b) Část paprsku se naváže do materiálu a na detektoru se neobjeví.
- 2) Jedná se o tenkou vrstvu:
  - a) Je-li úhel větší než kritický  $\theta_c$ , dochází totálnímu odrazu, paprsek se odrazí a je změřen na detektoru.
  - b) Úhel odpovídá synchronnímu modu, část paprsku se naváže do vlnovodu a na detektoru se neobjeví.
  - c) Paprsek se do vlnovodu nenaváže.

Výsledkem měření je závislost odraženého světla na úhlu, z níž se dá odečíst kritický úhel nebo vedené módy. U objemového vzorku se dá spočítat index lomu materiálu  $n$  z kritického úhlu  $\theta_c$  a znalosti indexu lomu hranolu  $n_p$ :

$$n = n_p \sin \theta_c \quad (22)$$

Princip měření objemového vzorku je uveden na Obrázku 5.1a. Ukázka výstupu z měření je uvedena na Obrázku 5.1b. U tenké vrstvy se dá spočítat index lomu materiálu vlnovodné vrstvy  $n_f$  z pozice prvního vidu a tloušťku vrstvy z rozestupu vidů.

Měření vyžaduje rovný a čistý povrch vzorku materiálu (čistí se acetonem před měřením). A k dispozici jsou jen lasery některých vlnových délek (473; 632,8; 964, 1311 a 1552 nm).



Obr. 5.1: a) Princip jednohranolové spektroskopie (objemový vzorek). b) Ukázka z výstupu měření objemového vzorku s odečtením kritického úhlu.

### 5.3 Měření absorpce

Absorpce materiálů byla měřena spektrometrem Shimadzu (UV-3600 UV-VIS-NIR Spectrophotometer), ten je zobrazen na Obrázku 5.2. Spektrometr je schopný měřit pro vlnové délky 185 až 3300 nm. Měření probíhá následovně: světla ze zdroje je přefiltrováno pomocí dvojitého monochromátoru (Czrného – Tumerova) v úzko spektrální paprsek, který po průchodu materiálem dopadá na detektor. Jako detektor je použit fotonásobič pro UV záření a viditelné světlo a InGaAs a PbS fotodiody pro blízké infračervené záření. [9, 20].



Obr. 5.2: UV-3600 UV-VIS-NIR Spectrophotometer [20].

### 5.4 Měření optického útlumu - metoda 2 délek

Měrný útlum byl měřen v několika zapojeních dle měřeného vzorku.

A s použitím dvou měřících pracovišť.

#### První měřící pracoviště:

Toto měřící pracoviště využívá jako zdroje pět LED diod, z nichž byly pro měření použity diody vlnových délek 525 a 635 nm. K detekci záření byl použit fotometr OPTOKON s vestavěným detektorem.

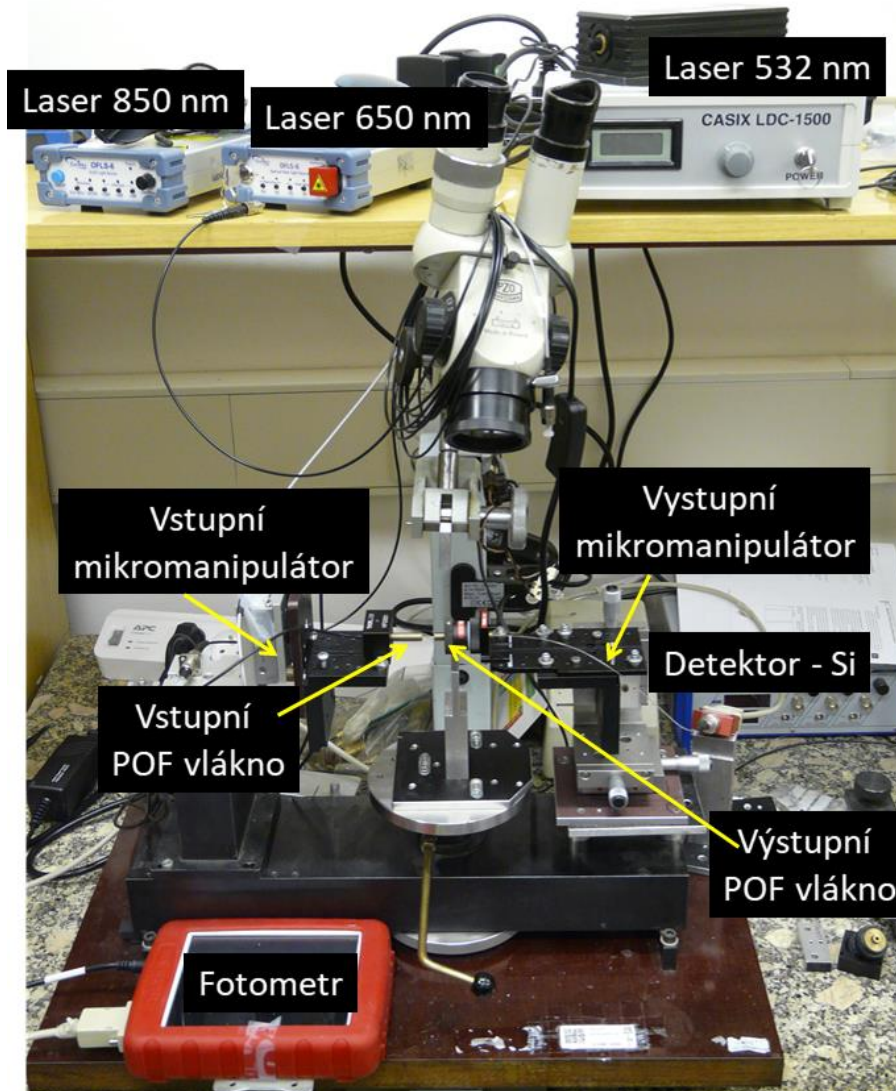
#### Druhé měřící pracoviště:

Druhé měřící pracoviště používá následující zdroje záření: DPGL-2100 Nd:YV04 ( $\lambda = 532$  nm), Safibra OFLS-5FP-650 ( $\lambda = 650$  nm), Safibra OFLS-5 DFB-850 ( $\lambda = 850$  nm), Safibra OFLS-5FP-1300 ( $\lambda = 1300$  nm), Safibra OFLS-5-DFB-1550 ( $\lambda = 1550$  nm). K detekci záření byl použit fotometr



Thorlabs PM200 s připojeným křemíkovým detektorem S151C (určený pro vlnové délky 400 nm až 1100 nm) nebo s připojeným InGaAs detektorem S155C (určený pro vlnové délky 800 nm až 1700 nm).

Ukázka měřicího pracoviště je uvedena na Obrázku 5.3 (druhé měřicí pracoviště).



Obr. 5.3: Fotografie realizovaného měřicího pracoviště.

Před měřením byly pro každou sestavu a vlnovou délku změřeny referenční hodnoty (zapojení beze vzorku, zapojení s krátkým POF vláknem).

Ze změřených výkonů lze vypočítat vložný optický útlum  $\alpha$ :

$$\alpha = -10 \log \frac{P_{out}}{P_{ref}} \quad (23)$$

kde  $P_{ref}$  je naměřený referenční optický výkon bez vzorku a  $P_{out}$  je výstupní optický výkon vzorku, který se pro přímý vlnovod změří přímo (viz Obr. 5.4) a pro rozbočnici se rovná součtu naměřených výstupních optických výkonů  $P_{out1}$  a  $P_{out2}$ . Zapojení pro měření vložného optického útlumu  $\alpha$  je na Obrázku 5.4a pro přímý vzorek. V případě optické rozbočnice se nahradí měření přímého vzorku v zapojení na Obrázku 5.4a součtem výstupních optických výkonu ramen rozbočnice ze zapojení uvedeném na Obrázku 5.4c.

Pro měrný optický útlum  $A$  platí vztah:

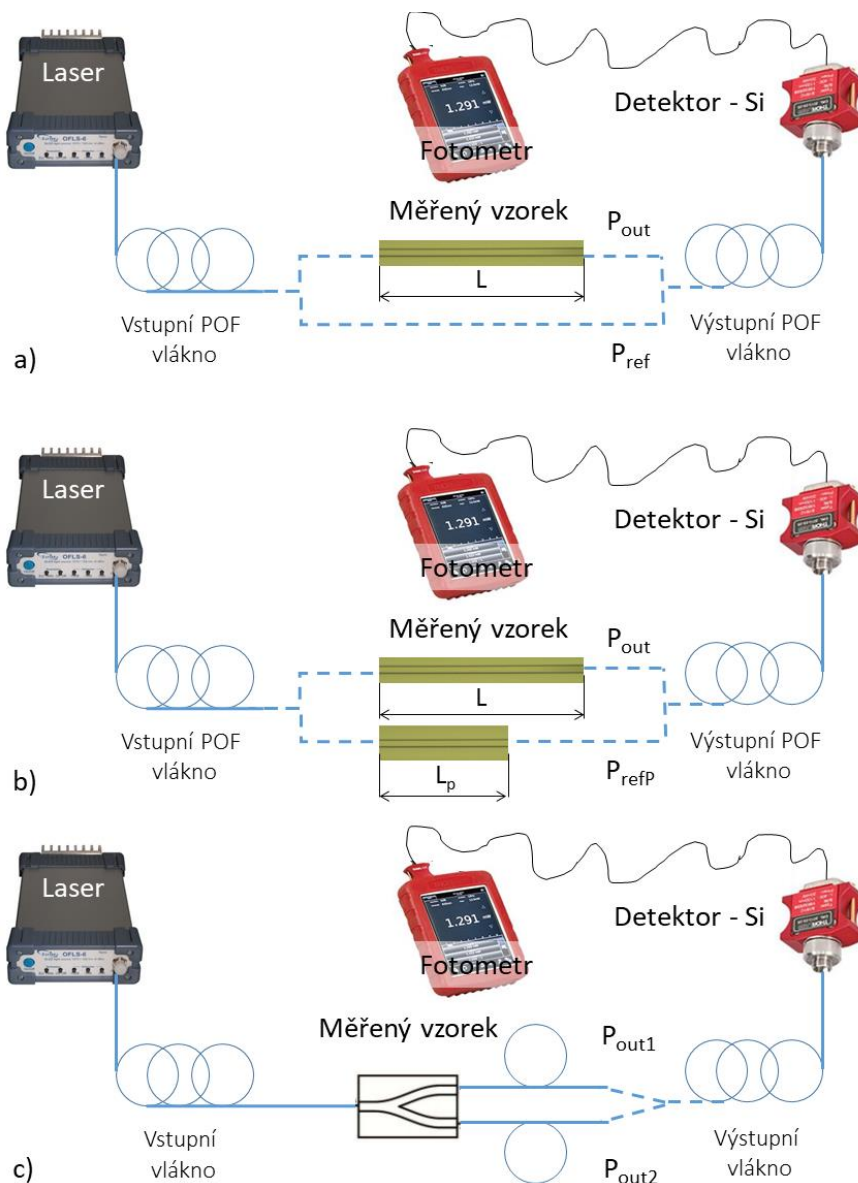
$$A = \frac{-10 \log \frac{P_{out}}{P_{refP}}}{L - L_p} \quad (24)$$

kde  $P_{refP}$  je naměřený optický výkon referenčního přímého vzorku o délce  $L_p$ . A  $L$  je délka vzorku s celkovým výstupním optickým výkonem  $P_{out}$ . Zapojení pro měření měrného útlumu je uvedeno na Obrázku 5.4b.

Měrný vložený optický útlum  $A_v$  se spočítá následovně:

$$A_v = \frac{\alpha}{L} \quad (25)$$

kde  $\alpha$  je vložený útlum vzorku a  $L$  je jeho délka.



Obr. 5.4: a) Zapojení pro měření vloženého optického útlumu přímého vlnovodu, kdy je jako reference měřena bez vzorku.

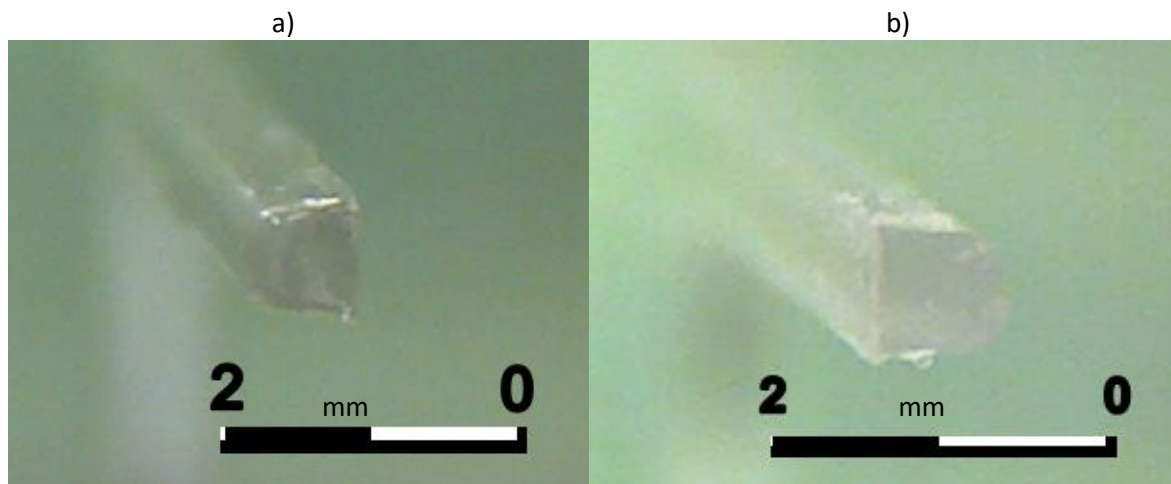
b) Zapojení pro měření měrného optického útlumu přímého vlnovodu, kdy je referencí krátký přímý vlnovod

c) Zapojení měření výstupní optického výkonu rozbočnice.

## 6 Výsledky

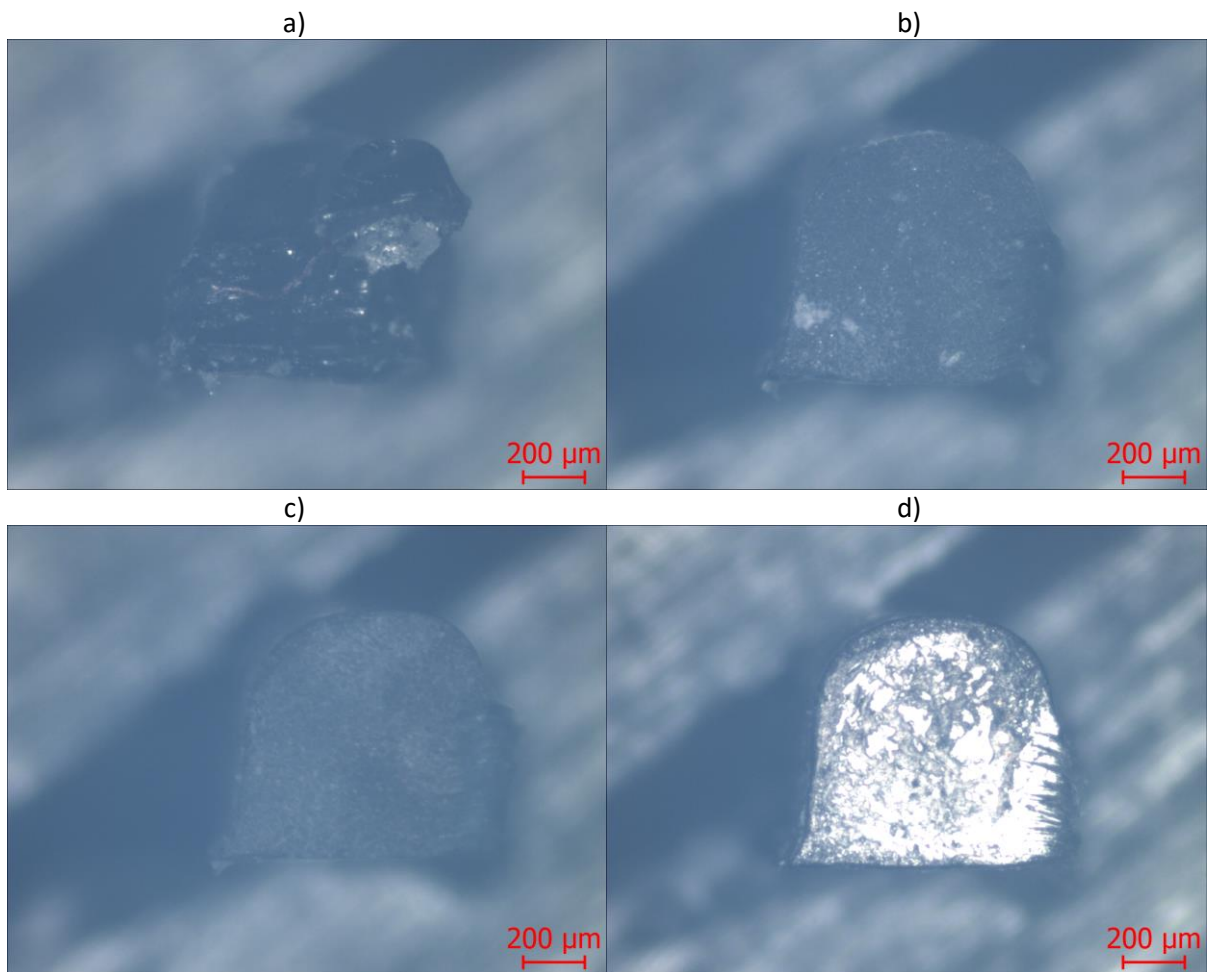
### 6.1 Optická kontrola vzorků

Optická kontrola vzorků pro vlnovody z materiálu VeroClear provedená pomocí USB mikrokamery je uvedena na Obrázku 6.1. Na Obrázku 6.1a je fotografie čela vstupního vlnovodu vzorku LIN750n\_I před leštěním, na Obrázku 6.1b po leštění třemi leštícími papíry.



Obr. 6.1: Fotografie vzorku VeroClear LIN750n\_I: a) před leštěním, b) po leštění všemi leštícími papíry.

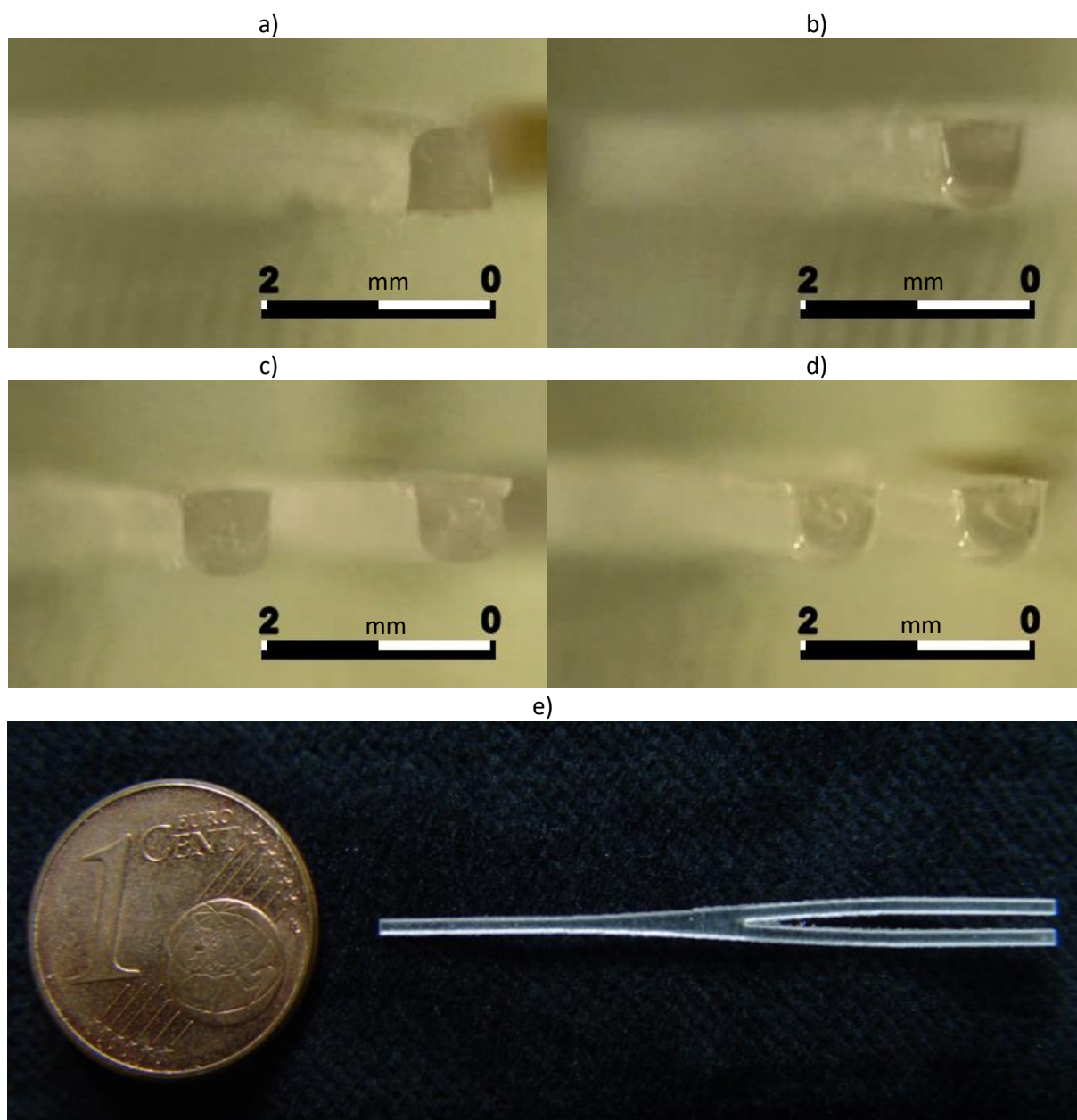
Na Obrázku 6.2 jsou uvedeny fotografie z mikroskopu pro přímý vzorek LIN750a\_I, kde na Obrázku 6.2a je fotografie čela vlnovodu před leštěním, na Obrázku 6.2b je čelo po hrubém leštění, na Obrázku 6.2c po leštění středně hrubým papírem a na Obrázku 6.2d po leštění jemným leštícím papírem.



Obr. 6.2: Konec vzorku VeroClear (LIN750a\_1): a) před leštěním, b) po hrubém leštění, c) po středně hrubém leštění a d) po jemném leštění.

Optická kontrola pomocí USB mikrokamery byla provedena i pro optické rozbočnice z materiálu VeroClear. Na Obrázku 6.3 jsou uvedeny fotografie optické rozbočnice LIN750n\_Y, kde na Obrázku 6.3a je fotografie čela vstupního vlnovodu optické rozbočnice před leštěním a na Obrázku 6.3b je čelo po třetím leštícím kroku. Fotografie čel dvou výstupních vlnovodů je na Obrázku 6.3c (před leštěním) a na Obrázku 6.3d (po třetím leštícím kroku). Na Obrázku 6.3e je fotografie optické rozbočnice VeroClear (LIN750n\_Y) po vyleštění bez plášťové vrstvy, pohled z vrchu (LIN750n\_Y).

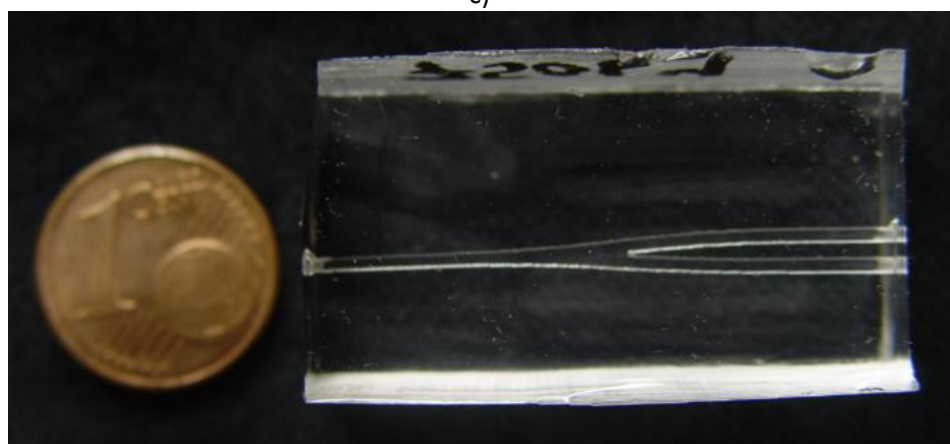
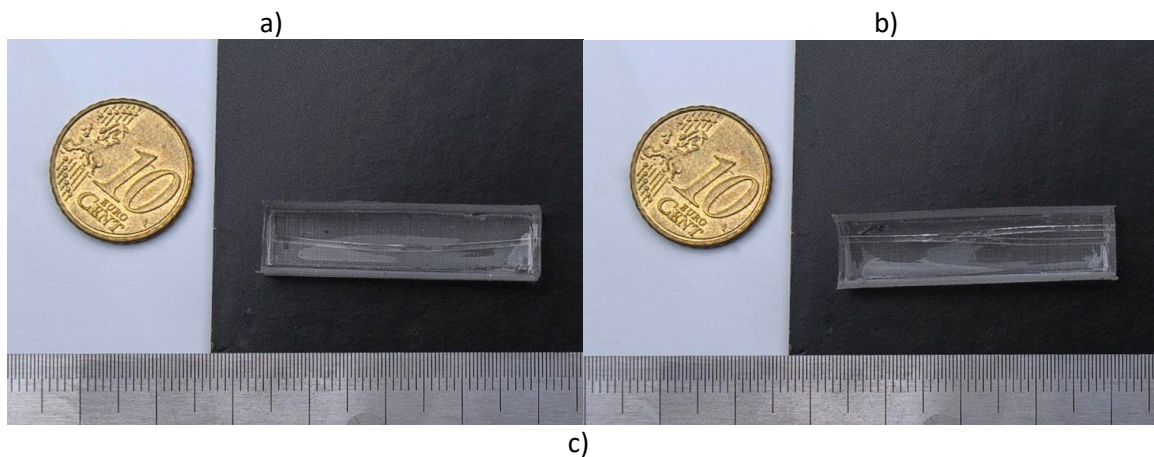




Obr. 6.3: Fotografie vzorku VeroClear LIN750n\_Y: vstupní vlnovody a) před leštěním, b) po leštění všemi leštícími papíry, výstupní vlnovody c) před leštěním, d) po leštění všemi leštícími papíry.  
 f) Fotografie vzorku VeroClear LIN750n\_Y se vyleštěnými čely bez plášťové vrstvy z vrchu

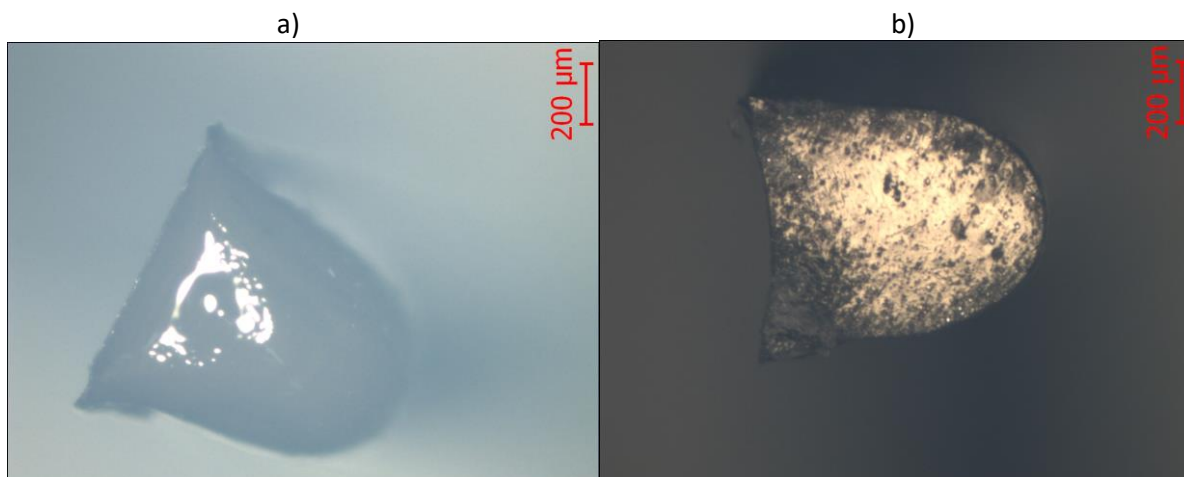
Z uvedených fotografií (Obr. 6.1, 6.2 a 6.3) je patrný rozdíl mezi zaleštěnými a nenaleštěnými konci rozbočnice. Rozbočnice má po vytištění zaoblená čela, která se leštěním zarovnají.

Na Obrázcích 6.4a a 6.4b jsou uvedeny vzorky VeroClear/PDMS, pro jejichž zalití byla použita forma (viz Obr. 4.2b), kterou jsem navrhl pro snížení spotřeby PDMS a zjednodušení vyndávání zalitých vzorků. Zalitý přímý vzorek (LIN750n\_Y) je uveden na Obrázku 6.4a a rozbočnice (LIN750n\_I) na Obrázku 6.4b. Na Obrázku 6.4c je uvedena rozbočnice LIN750b\_Y (VeroClear/PDMS) zalitá ve větší formě (viz Obr. 4.2a).

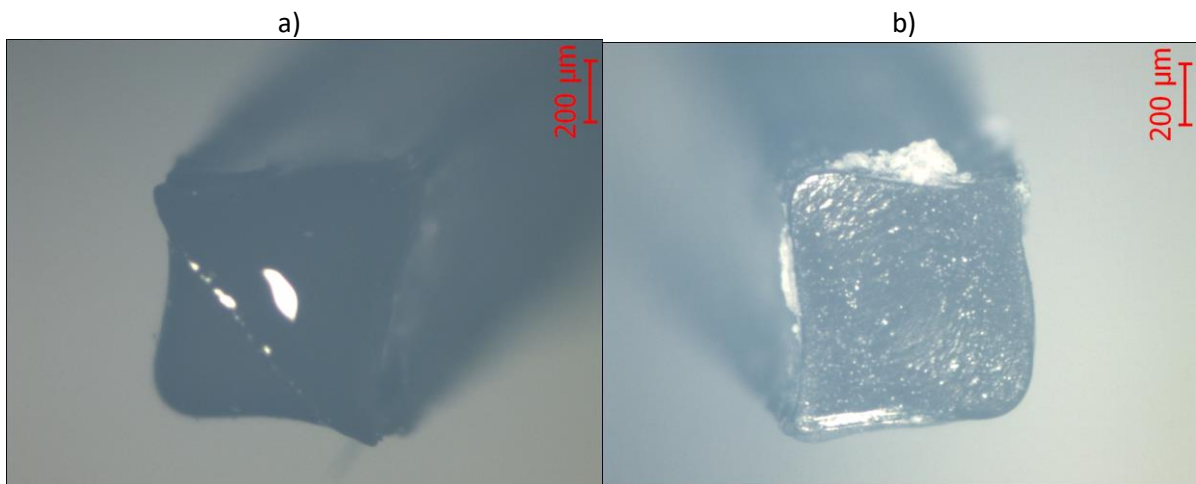


Obr. 6.4: Zalité vzorky z LINZ VeroClear /PDMS při 100°C po 1 hodinu:  
a) přímý vzorek (LIN750, b) rozbočnice.

Fotky vzorků VisionClear mikroskopem jsou uvedeny na Obrázcích 6.5 a 6.6. Na Obrázku 6.5a je čelo čtvercového vzorku FIN846a\_short před leštěním a následně na Obrázku 6.5b po leštění jemným leštícím papírem. Čela trojúhelníkového vzorku FIN845a\_long jsou na Obrázku 6.6a (před leštěním) a 6.6b (po leštění).

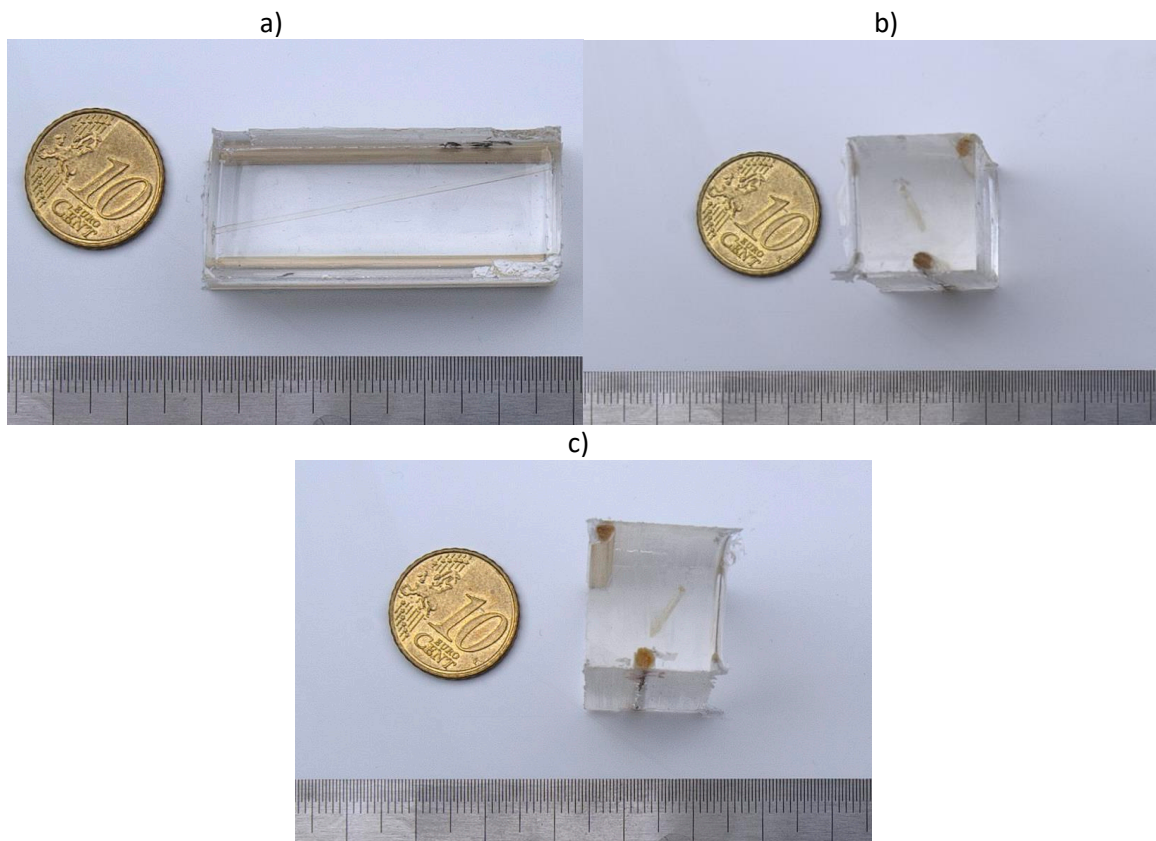


Obr. 6.5: Fotografie čtvercového vzorku VisionClear FIN846a\_short: a) před leštěním, b) po leštění jemným leštícím papírem.



Obr. 6.6: Fotografie trojúhelníkového vzorku VisionClear FIN845a\_long: a) před leštěním, b) po leštění jemným leštícím papírem.

Na Obrázcích 6.7 jsou fotografie pro přímé vzorky VisionClear/PDMS. Vzorky byly delší, a proto k jejich zalití byla použita větší forma (Obr. 4.2c). Vzorky zalité při 65°C se lehce zahnuly (Obr. 6.7b a 6.7c). Další vzorek byl proto zalit při pokojové teplotě (Obr. 6.7a), čímž jsme se tomu vyhnuly, jejich příprava ale vyžaduje delší čas (přibližně 14 dní).



Obr. 6.7: Fotografie vzorků VisionClear s plášťovou vrstvou PDMS:  
a) dlouhý přímý vzorek zalitý při pokojové teplotě s dobou tvrdnutí 1 týden (FIN846b\_long),  
b, c) vstupní a výstupní strany dlouhého vzorku FIN846a\_long (byl zalit při 65°C po 4 h a prohnul se).

## 6.2 Měření optického útlumu

### Měření přímých vlnovodů VeroClear 1000 $\mu\text{m}$

Nezalité vzorky VeroClear byly zpočátku měřeny přípravkem s LED diodami. Metoda měření byla popsána v kapitole 5.4 (První měřící pracoviště). Při daném měření bylo světlo ze zdroje navázáno pomocí optického vlákna POF 1 mm a to jak u vzorků o šířce 1000  $\mu\text{m}$ , tak i u vzorků o šířce 750  $\mu\text{m}$ .

Výsledky měření pro šířku vlnovodu 1000  $\mu\text{m}$  VeroClear bez nanesení plášťové vrstvy jsou uvedeny v Tabulce 6.1.

Tab. 6.1: Naměřené hodnoty optického útlumu nezalitých přímých vlnovodů VeroClear se šířkou  $w = 1000 \mu\text{m}^{1, 2}$ .

		$\lambda = 525 \text{ nm}$		$\lambda = 635 \text{ nm}$	
Označení vzorků	L (mm)	$P_{\text{out}}$ ( $\mu\text{W}$ )	$A_V$ (dB/cm)	$P_{\text{out}}$ ( $\mu\text{W}$ )	$A_V$ (dB/cm)
LIN1000b_long	37,83	10	3,11	5,4	2,96
LIN1000d_long	37,28	13	2,85	8,1	2,53
LIN1000c_long	35,75	16	2,72	9,5	2,44
LIN1000a_long	36,97	11	3,07	6,2	2,86
LIN1000b_short	17,06	31	4,01	15	3,96
LIN1000a_short	17,56	21	4,86	11	4,61
Průměrný útlum	$A_V$ (dB/cm)	3,44		3,23	

Z Tabulky 6.1 vyplývá, že optický výkon byl nižší pro vlnové délky 635 nm a nejnižší hodnota byla změřena 2,44 dB/cm u vzorku LIN1000c. Útlum pro vlnovou délku 525 nm byl 2,72 dB/cm.

V Tabulce 6.2 je výsledek měření přímých vlnovodů o šířce 1000  $\mu\text{m}$  lasery. Metoda měření byla popsána v kapitole 5.4 (Druhé měřící pracoviště). Vzorky byly měřeny na vlnových délkách 532, 650 a 850 nm.

Tab. 6.2: Naměřený útlum nezalitých vzorků VeroClear o šířce 1000  $\mu\text{m}^3$ .

Označení vzorků	L (mm)	$L_P$ (mm)	$\lambda$ (nm)	$P_{\text{out}}$ ( $\mu\text{W}$ )	$P_{\text{out}P}$ ( $\mu\text{W}$ )	A (dB/cm)
LIN1000a_long LIN1000a_short	36,9	17,7	532	5,95	10,0	1,16
			650	460	705	0,97
			850	68,2	97,8	0,82
LIN1000d_long LIN1000a_short	37,26	17,7	532	6	10,0	1,14
			650	450	705	1,00
			850	74,3	97,8	0,61

Z Tabulky 6.2 vyplývá, že nejnižší hodnoty optického útlumu byly změřeny na vlnové délce 850 nm.

<sup>1</sup> První měřící pracoviště  $P_{\text{ref}}(\lambda = 635 \text{ nm}) = 71 \mu\text{W}$  a  $P_{\text{ref}}(\lambda = 525 \text{ nm}) = 150 \mu\text{W}$  (byly použity 1 mm POF vlákny)

<sup>2</sup> L je délka vzorku,  $A_V$  je měrný vložný útlum,  $P_{\text{out}}$  je výstupní optický výkon a  $\lambda$  je vlnová délka měření.

<sup>3</sup> L je délka vzorku, A je měrný útlum,  $P_{\text{out}}$  je výstupní optický výkon,  $L_P$  je délka referenčního vzorku,  $P_{\text{out}P}$  je výstupní optický výkon referenčního vzorku a  $\lambda$  je vlnová délka měření.



Z Tabulky 6.3 kde jsou uvedeny výsledky pro vzorky VeroClear s pláštěm PDMS vyplývá, že tyto vzorky mají vyšší optický útlum než vzorky bez pláště. Důvodem je pravděpodobně vysoká teplota (100°C po dobu 1 hodiny) použitá při nanášení PDMS vrstvy.

Tab. 6.3: Naměřený útlum zalitých vzorků VeroClear/PDMS o šířce 1000  $\mu\text{m}^1$ .

Označení vzorků	L (mm)	$L_p$ (mm)	$\lambda$ (nm)	$P_{\text{out}}$ ( $\mu\text{W}$ )	$P_{\text{outP}}$ ( $\mu\text{W}$ )	A (dB/cm)
LIN1000c_long LIN1000b_short	34,92	17,18	532	6,18	11,8	1,59
			650	427	710	1,24
			850	72,6	98,1	0,74

### Měření přímých vlnodů VeroClear 750 $\mu\text{m}$

Výsledky měření pro nezalité vzorky VeroClear o šířce 750  $\mu\text{m}$  jsou v Tabulce 6.4. Vzorky byly měřeny na druhém měřicím pracovišti přípravkem s LED diodami (viz kapitola 5.4).

Tab. 6.4: Naměřené hodnoty optického útlumu nezalitých přímých vlnodů VeroClear se šířkou  $w = 750 \mu\text{m}^{2,3}$

Označení vzorků	L (mm)	$\lambda = 525 \text{ nm}$		$\lambda = 635 \text{ nm}$	
		$P_{\text{out}}$ ( $\mu\text{W}$ )	$A_v$ (dB/cm)	$P_{\text{out}}$ ( $\mu\text{W}$ )	$A_v$ (dB/cm)
LIN750n_l	37,05	1,3	5,57	0,79	5,27
LIN750a_long	36,55	6,6	3,72	4,0	3,42
LIN750b_long	36,82	8,1	3,44	4,6	3,23
LIN750c_long	37,07	3,7	4,34	2,2	4,07
LIN750d_long	37,46	8,3	3,36	4,4	3,23
LIN750a_short	16,53	13	6,43	7,1	6,05
LIN750b_short	16,87	11	6,73	5,8	6,45
LIN750c_short	16,77	13	6,34	7,2	5,93
LIN750d_short	15,65	13	6,79	6,5	6,64
LIN750a_l	33,70	3,5	4,86	2,0	4,60
LIN750b_l	34,17	3,3	4,85	1,9	4,60
Průměrný měrný vložný optický útlum $A_v$ (dB/cm)		5,13		4,86	

Z výsledků v Tabulce 6.4 vyplývá, že na vlnové délce 635 nm byl nižší útlum než na vlnové délce 525 nm. Nejnižší hodnoty útlumu vycházejí pro vzorek LIN750d\_long 3,23 dB/cm na vlnové délce 635 nm a 3,36 dB/cm na vlnové délce 525.

V Tabulce 6.5 jsou výsledky vzorků VeroClear bez plášťové vrstvy měřených lasery na druhém měřicím pracovišti (viz kapitola 5.4). Vzorky byly měřeny na vlnových délkách 532, 650 a 850 nm.

<sup>1</sup> L je délka vzorku, A je měrný optický útlum,  $P_{\text{out}}$  je výstupní optický výkon,  $L_p$  je délka referenčního vzorku,  $P_{\text{outP}}$  je výstupní optický výkon referenčního vzorku a  $\lambda$  je vlnová délka měření.

<sup>2</sup> L je délka vzorku,  $A_v$  je měrný vložný optický útlum,  $P_{\text{out}}$  je výstupní optický výkon a  $\lambda$  je vlnová délka měření.

<sup>3</sup> První měřicí pracoviště  $P_{\text{ref}}(\lambda = 635 \text{ nm}) = 71 \mu\text{W}$  a  $P_{\text{ref}}(\lambda = 525 \text{ nm}) = 150 \mu\text{W}$  (byly použity 1 mm POF vlákny)

Tab. 6.5: Naměřený útlum nezalitých vzorků VeroClear o šířce 750  $\mu\text{m}$ <sup>1</sup>.

Označení vzorků	L (mm)	L <sub>p</sub> (mm)	$\lambda$ (nm)	P <sub>out</sub> ( $\mu\text{W}$ )	P <sub>outP</sub> ( $\mu\text{W}$ )	A (dB/cm)
LIN750a	36,55	16,53	532	0,74	2,22	2,38
			650	100	226	1,76
			850	0,86	1,60	1,35
LIN750b	36,82	16,87	532	1,03	2,50	1,94
			650	150	316	1,63
			850	1,48	2,68	1,29
LIN750c	37,07	15,77	532	0,73	2,29	2,46
			650	140	353	1,98
			850	1,51	3,08	1,52
Průměrný měrný optický útlum			532			2,46
			650			1,98
			850			1,52

Z výsledků v Tabulce 6.5 vyplývá, že nejmenší útlum je na vlnové délce 850 nm. Nejnižší útlum vychází 1,94 dB/cm na vlnové délce 532 nm, 1,63 dB/cm na vlnové délce 650 nm a 1,29 dB/cm na vlnové délce 850 nm.

V Tabulce 6.6 jsou výsledky měření vzorků VeroClear s nanosenou plášťovou vrstvou PDMS. Vzorky byly měřeny pomocí laserů na vlnových délkách 532, 650 a 850 nm.

Tab. 6.6: Naměřený útlum zalitých vzorků VeroClear/PDMS o šířce 750  $\mu\text{m}$ <sup>1</sup>.

Označení vzorků	L (mm)	L <sub>p</sub> (mm)	$\lambda$ (nm)	P <sub>out</sub> ( $\mu\text{W}$ )	P <sub>outP</sub> ( $\mu\text{W}$ )	A (dB/cm)
LIN750a	36,55	16,53	532	0,58	1,43	1,96
			650	64,8	140	1,67
			850	0,72	1,14	1,01

Z Tabulky 6.6 vyplývá, že hodnoty optického útlumu jsou podle očekávání u vzorku bez plášťové vrstvy PDMS.

### Měření optické rozbočnice VeroClear 750 $\mu\text{m}$

Výsledky měření pro nezalité optické rozbočnice VeroClear se šířkou vlnovodu 750  $\mu\text{m}$  jsou v Tabulce 6.7. Vzorky byly měřeny na druhém měřícím pracovišti přípravkem s LED diodami (viz kapitola 5.4).

<sup>1</sup> L je délka vzorku, A je měrný optický útlum, P<sub>out</sub> je výstupní optický výkon, L<sub>p</sub> je délka referenčního vzorku, P<sub>outP</sub> je výstupní optický výkon referenčního vzorku a  $\lambda$  je vlnová délka měření.

Tab. 6.7: Vložný optický útlum nezalitých rozbočnic 1x2Y VeroClear se šířkou  $w = 750 \mu\text{m}^{1,2}$ .

Označení vzorků	L (mm)	$\lambda$ (nm)	$P_{\text{ref}}$ ( $\mu\text{W}$ )	$P_{\text{out1}}$ ( $\mu\text{W}$ )	$P_{\text{out2}}$ ( $\mu\text{W}$ )	$P_{\text{out1}}:P_{\text{out2}}$ (%)	$\alpha$ (dB)
LIN750a_Y	35,37	525	150	1,8	1,9	48,6:51,4	16,1
		635	71	1,0	0,98	50,5:49,5	15,5
LIN750b_Y první měření	35,20	525	150	1,9	2,3	45,2:54,8	15,5
		635	71	1,1	1,3	45,8:54,2	14,7
LIN750b_Y	34,88	525	150	1,3	0,76	63,1:36,9	18,6
		635	71	0,74	0,45	62,2:37,8	17,8

Výsledky měření optických rozbočnic VeroClear o šířce vlnovodu  $750 \mu\text{m}$  bez plášťové vrstvy jsou v Tabulce 6.8. Hodnoty byly měřeny pomocí laseru na druhém měřicím pracovišti (viz kapitola 5.4) pro vlnové délky 532, 650 a  $850 \text{ nm}$ .

Tab. 6.8: Naměřený útlum nezalitých rozbočnic VeroClear o šířce  $750 \mu\text{m}^1$ .

Označení vzorků	L (mm)	$\lambda$ (nm)	$P_{\text{ref}}$ ( $\mu\text{W}$ )	$P_{\text{out1}}$ ( $\mu\text{W}$ )	$P_{\text{out2}}$ ( $\mu\text{W}$ )	$P_{\text{out1}}:P_{\text{out2}}$ (%)	$\alpha$ (dB)
LIN750a_Y	35,37	532	15,9	0,138	0,093	59,7:40,3	18,4
		650	2600	32,0	21,6	59,7:40,3	16,1
		850	17,0	0,317	0,221	58,9:41,1	15,0
LIN750b_Y	34,88	532	15,9	0,236	0,237	49,9:50,1	15,3
		650	2600	44,5	44,8	49,8:50,2	14,6
		850	17,0	0,436	0,435	50,1:49,1	12,9

V Tabulce 6.9 jsou uvedeny výsledky měření optické rozbočnice VeroClear o šířce vlnovodu  $750 \mu\text{m}$  s nanosenou plášťovou vrstvou PDMS.

Tab. 6.9: Naměřený útlum zalité rozbočnice VeroClear/PDMS o šířce  $750 \mu\text{m}^1$ .

Označení vzorků	L (mm)	$\lambda$ (nm)	$P_{\text{ref}}$ ( $\mu\text{W}$ )	$P_{\text{out1}}$ ( $\mu\text{W}$ )	$P_{\text{out2}}$ ( $\mu\text{W}$ )	$P_{\text{out1}}:P_{\text{out2}}$ (%)	$\alpha$ (dB)
LIN750b_Y	34,88	532	10,9	0,126	0,129	49,4:50,6	16,3
		650	153	2,89	2,91	49,8:50,2	14,2
		850	4,60	0,134	0,257	51,9:48,1	12,5

Z porovnání vzorků optických rozbočnic, u kterých byla nanosená plášťová vrstva byl pro vlnové délky 650 a  $850 \text{ nm}$  naměřen nižší útlum.

### Měření přímých vlnovodů VisionClear

Pro měření jsem měl k dispozici 2 typy vzorků o šířce  $750 \mu\text{m}$  z materiálu VisionClear (viz kapitola 4.2). Jednalo se 3 dlouhé (5 cm) a 3 krátké (2,5 cm) vlnovody se čtvercovým průřezem (čtvercové)

<sup>1</sup> L je délka vzorku,  $P_{\text{out1}}$  a  $P_{\text{out2}}$  jsou výstupní optické výkony z jednotlivých ramen,  $\lambda$  je vlnová délka měření. Vložný optický útlum rozbočnice  $\alpha$  je vztážen referenčním výkonu  $P_{\text{ref}}$  měřenému bez vzorku.

<sup>2</sup> První měřicí pracoviště  $P_{\text{ref}}(\lambda = 635 \text{ nm}) = 71 \mu\text{W}$  a  $P_{\text{ref}}(\lambda = 525 \text{ nm}) = 150 \mu\text{W}$  (byly použity 1 mm POF vlákny).

a 2 dlouhé (5 cm) a 2 krátké (2,5 cm) vlnovody s jádrem složeným ze dvou trojúhelníkových vrstev (trojúhelníkové), jehož postup výroby byl popsán v kapitole 4.2.

Nezalité vzorky VisionClear byly změřeny lasery na třech vlnových délkách 650, 532 a 850 nm. Měření na vlnových délkách 1310 a 1550 nm nebylo z důvodu vysokého útlumu POF vlákna provedeno. Metoda měření byla popsána v kapitole 5.4 (2. sada). Pro připojení byla použita 750  $\mu\text{m}$  POF vlákna. Výsledek měření nezalitých čtvercových vzorků VisionClear je v Tabulce 6.10. Pro nezalité čtvercové vzorky jsem naměřil nejnižší hodnotu optického útlumu 0,90 dB/cm na vlnové délce 650 nm, 0,93 dB/cm na vlnové délce 850 nm a 1,76 dB/cm na vlnové délce 532 nm.

Tab. 6.10: Naměřený útlum nezalitých čtvercových vzorků VisionClear<sup>1</sup>.

Označení vzorků	L (mm)	L <sub>p</sub> (mm)	$\lambda$ (nm)	P <sub>out</sub> ( $\mu\text{W}$ )	P <sub>outP</sub> ( $\mu\text{W}$ )	A (dB/cm)
FIN846a_long FIN846a_short	49,21	24,06	532	1,4	3,8	1,74
			650	233	401	0,94
			850	1,7	3,0	0,97
FIN846b_long FIN846b_short	47,53	23,17	532	0,3	0,8	1,76
			650	77,0	128	0,90
			850	0,6	1,0	0,93
FIN846c_long FIN846c_short	49,31	23,08	532	0,57	2,01	2,08
			650	130	282	1,27
			850	1,04	2,05	1,13

Naměřené hodnoty útlumů pro nezalité trojúhelníkové vzorky VisionClear jsou v Tabulce 6.11. Pro ně jsem naměřil nejnižší hodnotu útlumu 2,47 dB/cm na vlnové délce 850 nm, 2,53 dB/cm na 650 nm a 3,52 dB/cm na vlnové délce 532 nm 3,52 dB/cm.

Tab. 6.11: Naměřený útlum nezalitých trojúhelníkových vzorků VisionClear<sup>1</sup>.

Označení vzorků	L (mm)	L <sub>p</sub> (mm)	$\lambda$ (nm)	P <sub>out</sub> ( $\mu\text{W}$ )	P <sub>outP</sub> ( $\mu\text{W}$ )	A (dB/cm)
FIN845a_long FIN845a_short	46,78	23,29	532	0,170	1,14	3,52
			650	33,0	130	2,53
			850	0,253	0,960	2,47
FIN845b_long FIN845a_short	43,95	23,29	532	0,153	1,14	4,23
			650	22,7	130	3,66
			850	0,180	0,960	3,52

Z Tabulek 6.10 a 6.11 je vyplývá, že čtvercové vzorky mají o 1,5 dB nižší útlum než trojúhelníkové.

Vzorky VisionClear byly následně měřeny s nanesenou plášťovou vrstvou, kde vzorky FIN846a a FIN845a byly zality elastomerem PDMS při 65°C po dobu 4 hodin, FIN846b byly zality při pokojové teplotě a vytvrzení trvalo 7 dní. Nejlépe vyšly normální vzorky připravované při pokojové teplotě, s 0,49 dB/cm na 650 nm, 0,72 dB/cm na 850 nm a 0,84 dB/cm na 532 nm. U vzorků připravovaných při 65°C byly naměřeny vyšší útlumy, s 1,94 dB/cm na vlnové délce 650 nm, 1,90 dB/cm na vlnové délce 850 nm a 2,62 dB/cm na vlnové délce 532 nm u čtvercových vzorků (FIN846a) a 4,65 dB/cm

<sup>1</sup> L je délka vzorku, A je měrný optický útlum, P<sub>out</sub> je výstupní optický výkon, L<sub>p</sub> je délka referenčního vzorku, P<sub>outP</sub> je výstupní optický výkon referenčního vzorku a  $\lambda$  je vlnová délka měření.

na vlnové délce 650 nm, 5,09 dB/cm na vlnové délce 850 nm a 5,50 dB/cm na vlnové délce 532 nm u trojúhelníkovitých vzorků (FIN845a). Hodnoty útlumů čtvercových vzorků jsou uvedeny v Tabulce 6.12 a hodnoty útlumů trojúhelníkových vzorků v Tabulce 6.13.

Tab. 6.12: Naměřený útlum zalitých čtvercových (FIN846) vzorků<sup>1</sup>.

Označení vzorků	L (mm)	L <sub>p</sub> (mm)	λ (nm)	P <sub>out</sub> (μW)	P <sub>outP</sub> (μW)	A (dB/cm)
FIN846a_long <sup>2</sup> FIN846a_short	49,21	24,06	532	0,118	0,535	2,62
			650	28,3	87,3	1,94
			850	0,630	0,630	1,90
FIN846b_long <sup>3</sup> FIN846b_short	47,53	23,17	532	0,240	0,385	0,84
			650	48,0	63,2	0,49
			850	0,350	0,525	0,72

Tab. 6.13: Naměřený útlum zalitých finských trojúhelníkových (FIN845) vzorků<sup>1</sup>.

Označení vzorků	L (mm)	L <sub>p</sub> (mm)	λ (nm)	P <sub>out</sub> (μW)	P <sub>outP</sub> (μW)	A (dB/cm)
FIN845a_long <sup>4</sup> FIN845a_short	46,78	23,29	532	0,014	0,265	5,50
			650	4,3	53,1	4,65
			850	0,10	1,57	5,09

Při porovnání vzorků VisionClear bez pláště (Tab. 6.10 a Tab. 6.11) a vzorků VisionClear s plášťovou vrstvou z PDMS (Tab. 6.12 a Tab. 6.13) je vidět, že v případě použití plášťové vrstvy dojde ke snížení optického útlumu na vlnové délce 850 nm o 0,21 dB/cm a na vlnové délce 532 nm až 0,9 dB/cm u vzorků FIN846b zalitých při pokojové teplotě. Oproti vzorkům FIN846a a FIN845a, kdy nastalo aplikací plášťové vrstvy při 65°C zvýšení útlumu o 0,65 až 2,5 dB/cm.

Je potřeba poznamenat, že vyšší útlumy trojúhelníkových vzorků VisionClear/vzduch a vzorků FIN846a a FIN845a zalitých při 65°C bude alespoň z části ohnutím vzorků, ke kterému došlo během vytvrzování PDMS. Trojúhelníkové vzorky byly mírně ohnuté už před zalitím a při vytvrzování při 65°C došlo k dalšímu ohnutí.

<sup>1</sup> L je délka vzorku, A je měrný optický útlum, P<sub>out</sub> je výstupní optický výkon, L<sub>p</sub> je délka referenčního vzorku, P<sub>outP</sub> je výstupní optický výkon referenčního vzorku a λ je vlnová délka měření.

<sup>2</sup> FIN846a byly zality při 65°C po 4 hodiny.

<sup>3</sup> FIN846b byly zality při pokojové teplotě po 7 dní.

<sup>4</sup> FIN845a byly zality při 65°C po 4 hodiny.

## 7 Závěr

Cílem práce byl návrh mnohavidových planárních optických vlnodů a optických rozbočnic 1x2Y, jejichž geometrické rozměry jsou s POF vlákny. Struktury jsou určeny pro výrobu pomocí technologie 3D tisku. Návrh jsem provedl pro 3 typy struktur. První typ měl vlnovodnou vrstvu z polymeru NOA a podložka s horní krycí vrstvou je tvořena z polymeru VeroClear. Druhý typ struktur má vlnovodnou vrstvu z polymeru VeroClear a plášť je tvořen z elastomeru PDMS. U třetího typu struktur je vlnovodná vrstva tvořená polymerem VisionClear a plášť je z polymeru PDMS.

Návrh jsem nejdříve provedl pomocí rovnic, které publikoval pan Beltrami, a pak jsem provedl přesnější návrh pomocí počítačových simulací. Pro počítačový návrh jsem použil program BeamPROP™ s optimalizačním balíkem MOST.

Podle návrhu byly vyrobeny struktury pomocí 2 typů 3D tiskáren. Pro tisk vlnovodných struktur z materiálu VeroClear byla použita tiskárna Objet30 Pro od firmy Stratasys. Vlnovodné struktury z materiálu VisionClear byly vyrobeny pomocí tiskárny Luxexcel VisionEngine. U vybraných vytištěných vzorků byla nanášena plášťová vrstva, kterou tvořil elastomer PDMS.

U vzorků byl změřen optický útlum pomocí metody dvou délek a bylo zjištěno, že nejnižší optický útlum pro vzorky VeroClear s rozměrem jádra 1000  $\mu\text{m}$  byl 0,61 dB/cm pro vlnovou délku 850 nm. Pro vzorky VeroClear, u kterých byla nanášena plášťová vrstva PDMS při vyšší teplotě (100°C), byl změřen optický útlum 0,74 dB/cm (850 nm)

Vzorky VisionClear s plášťovou vrstvou PDMS připravenou při teplotě 65°C po dobu 4 hodiny byla změřena hodnota optického útlumu 1,90 dB/cm (850 nm). Vlnovod bez plášťové vrstvy PDMS měl hodnotu optického útlumu nižší (0,97 dB/cm při 850 nm). Zvýšení optického útlumu pro vzorky s plášťovou vrstvou PDMS připisují vyšší teplotě (65°C při nanášení plášťové vrstvy PDMS).

Nejllepších výsledků bylo dosaženo u vzorků VisionClear s plášťovou vrstvou PDMS, která byla nanášena při pokojové teplotě, kde byl optický útlum 0,49 dB/cm při vlnové délce 650 nm, 0,84 dB/cm při vlnové délce 532 nm a 0,72 dB/cm při vlnové délce 850 nm.

Optické vlnovody z polymeru VisionClear bez plášťové vrstvy měly hodnoty optického útlumu vyšší. Například vzorek FIN846b měl optický útlum 0,9 dB/cm (650 nm) a 0,93 dB/cm (850 nm).

Na základě provedených návrhů byly také vyrobeny rozbočnice 1x2Y z polymeru VeroClear. Protože tento polymer má vyšší optický útlum, také změřené ztráty optických rozbočnic jsou vyšší. Předpokládám ale, že vyrobené struktury (optické rozbočnice 1x2Y) podle mého návrhu z polymeru VisionClear dosáhnou lepších parametrů.

## 8 Použitá literatura

- [1] T. Schaal, T. Kibler, E. Zeeb: *Optical Communication Systems for Automobiles* [online]. Dostupné z: [http://pofto.com/downloads/040528\\_ecoc.pdf](http://pofto.com/downloads/040528_ecoc.pdf)
- [2] Applications of POF, [online]. [cit. 2017-12-19]. Dostupné z: <http://www.pofac.info/en/homepage/what-are-pof/applications-of-pof.html>
- [3] Willis, K.D.D., Brockmeyer, E., Hudson, S.E., Poupyrev, I.: *Printed Optics: 3D Printing of Embedded Optical Elements for Interactive Devices*. UIST 12, October 7-10, 2012, Cambridge, Massachusetts, USA.
- [4] Knietael, M.: *Optické planární struktury s možností připojení polymerních optických vláken*, Praha: ČVUT 2017. Diplomová práce, ČVUT, Fakulta elektrotechnická
- [5] Novotný, K.: *Optická komunikační technika*, Praha: ČVUT 1997. Skriptum, ČVUT, Fakulta elektrotechnická.
- [6] Boháč, L., Lucki, M.: *Optické komunikační systémy*, Praha ČVUT 2010. Skriptum, ČVUT, Fakulta elektrotechnická.
- [7] Okamoto, K. Books24x7, I.: *Fundamentals of Optical Waveguides*, 2nd Edition, Amsterdam, Boston, Academic Press, 2010, 2006, ISBN 9780125250967.
- [8] Beltrami, D.R., Love, J.D., Ladouceur, F.: *Multimode planar devices*, Optical and Quantum Electronics, Vol. 31, 1999, s. 307–326.
- [9] Knietael, M.: *Optické planární mnohavidové výkonové rozbočnice*, Praha: ČVUT 2015. Bakalářská práce, ČVUT, Fakulta elektrotechnická, s. 24-29
- [10] Tabulkové indexy lomu PMMA [online]. Dostupné z: [https://refractiveindex.info/?shelf=organic&book=poly%28methyl\\_methacrylate%29&page=Beadie](https://refractiveindex.info/?shelf=organic&book=poly%28methyl_methacrylate%29&page=Beadie)
- [11] Norland Products, UV adhesives, Norland Optical Adhesive 73 [online]. [cit. 2017-06-12]. Dostupné z: <https://www.norlandprod.com/noa%2073adhesives/noa%2073.html>
- [12] Stratasys: 3D tiskárna Objet30 Pro, specifikace. [online]. [cit. 2017-02-14]. Dostupné z: [http://www.stratasys.com/-/media/files/printer-spec-sheets/pss\\_pj\\_objet30pro.pdf](http://www.stratasys.com/-/media/files/printer-spec-sheets/pss_pj_objet30pro.pdf)
- [13] Stratasys: VeroClear RGD810, bezpečnostní list [online]. [cit. 2017-10-18]. Dostupný z: <http://global72.stratasys.com/~media/main/files/sds/transparent-materials/sds-06119-veroclear-rgd810-cz.ashx>
- [14] Luxexcel, <http://www.luxexcel.com>
- [15] Stratasys: Object Support SUP 706, bezpečnostní list [online]. [cit. 2017-10-18]. Dostupné z: [http://global72.stratasys.com/~media/main/files/sds/support-materials/sds\\_objet-support-sup706-eu.ashx](http://global72.stratasys.com/~media/main/files/sds/support-materials/sds_objet-support-sup706-eu.ashx)
- [16] ELCHEMCo: PDMS Sylgard 184 [online]. [cit. 2017-10-18]. Dostupný z: <http://www.elchemco.cz/zbozi/25/sylgard-184-a-sylgard-182/>
- [17] Prusa Research s.r.o.: 3D tiskárna Prusa I3 MK2, manuál. [online]. [cit. 2017-10-05]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/downloads/manual/Prusa-i3-manual-mk2-cz.pdf?5>

[18] Metricon Corporation: Metricon 2010, přehled [online]. [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www.metricon.com/model-2010-m-overview/>

[19] Nekvindová, P. a kol.: *Návody pro laboratoře oboru anorganická chemie*, Praha 2007. Dostupné z: <http://photonicsmaterialslaboratory.weebly.com/uploads/3/7/2/9/3729880/navod.pdf>

[20] UV-3600 UV-VIS-NIR Spectrophotometer. [online]. [cit. 2017-12-21]. Dostupné z: <http://www.barascientific.com/products/shimadzu/analytical/spectro/eng/UV/UV-3600.php>



## Příloha A - Seznam použitých materiálů

### **Polydimethylsiloxane (PDMS)**

Pryskyřice Sylgard 184 (PDMS) byla namíchána v poměru 1:10, exikovaná 50-70 minut a následně vytvrzena v peci. V peci se vytvrzovala 4h při 65°C, 2h při 80°C nebo 1h při 100°C. Exikace (ponechání za nízkého tlaku) se provádí z důvodu odstranění bublinek, které jsou do směsi zavedeny při míchání, rozlévání. Smíchaná pryskyřice se dá dočasně skladovat v mrazáku, ale ne déle než 3 měsíce (po třech měsících už byla převážně ztuhlá).

Použita jako substrát.

### **Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)**

Černý neprůhledný polymer použitý pro tisk forem 3D tiskárnou Prusa MK2 - 2016 schopný odolat teplotám až 130°C.

### **VeroClear RGD810 (VeroClear)**

Čirý polymer je používán 3D tiskárnou od firmy Stratasys typu Object30 Pro. Tiskárna se nachází v Linz. Použit lze jako substrát i jako vlnovodná vrstva.

### **Norland Optical Adhesive 73 (NOA)**

NOA73 (Norland Optical Adhesive) je materiál vlastnostmi podobající se čírému lepidlu, lze vytvrdit aplikací UV záření. Použit jako vlnovodná vrstva.

### **Object Support SUP 706**

Object Support SUP 706 [21] je podpůrný materiál používaný 3D tiskárnou Object30 Pro od firmy Stratasys. Odstraňován byl v lázni s destilovanou vodou, kde měkne. Materiál má lehce nažloutlou barvu.

### **Luxexcel VisionClear (VisionClear)**

Struktury z Finska byly vyrobeny ve 3D tiskárně LUXEXCEL z čírého polymeru Luxexcel VisionClear (VisionClear).

## Příloha B - Seznam vzorků

### Seznam vzorků VeroClear – staré značení

zn.	Popisek	Datum	Množství
JD001	z Linz, "I", "Y", 750x750 µm	zbylé vzorky po studentovi	15"Y", 14"I"
JD002L	dlouhé vlákno, 1 konektor	2016	1ks
JD003L	dlouhé vlákno, bez konektoru	2016	1ks
JD004	zalitá JD001L, FOSIK 1 h, pec 80°C 2 h	24.2.2017	1"Y", 1"I"
JD005	zalitá JD001L, (FOSIK 1 h, pec 100°C 1 h) x2	28.2.2017(Sylgard 24.2.2017)	1"Y", 1"I"
JD010	"I", 750x750 µm, 4 cm	3D tisk 1.2017	2ks
JD011	"I", 1x1 mm, 2 cm	3D tisk 1.2017	3ks
JD012	"I", 750x750 µm, 2 cm	3D tisk 1.2017	4ks
JD013	"I", 500x500 µm, 2 cm	3D tisk 1.2017	2ks
JD014	"I", 250x250 µm, 2 cm	3D tisk 1.2017	4ks
JD015	"Y", 750x750 µm	3D tisk 1.2017	2ks
JD016	"I", 1x1 mm, 4 cm	3D tisk 1.2017	4ks
JD017	"I", 750x750 µm, 4 cm	3D tisk 1.2017	4ks
JD018	"I", 500x500 µm, 4 cm	3D tisk 1.2017	4ks
JD019	"I", 250x250 µm, 4 cm	3D tisk 1.2017	4ks

\* JDXXXL - označuje přípravek po leštění zakončení

### Seznam vzorků VeroClear – nové značení

zn.	Popisek	Datum	Množství
LIN750n_I	z Linz, "I", 750x750 µm	vzorky po studentovi	14"I"
LIN750n_Y	z Linz, "Y", 750x750 µm	vzorky po studentovi	15"Y"
POF1000BK	dlouhé vlákno, 1 konektor	2016	1ks
POF1000BB	dlouhé vlákno, bez konektoru	2016	1ks
LIN750na_(Y,I)	zalitá LIN750n, exik. 1 h, pec 80°C 2 h	24.2.2017	1"Y", 1"I"
LIN750nb_(Y,I)	zalitá LIN750n, (exik. 1 h, pec 100°C 1 h) x2	28.2.2017 (Sylgard 24.2.2017)	1"Y", 1"I"
LIN750x_I	"I", 750x750 µm, 4 cm	3D tisk 1.2017	2ks
LIN1000x_short	"I", 1x1 mm, 2 cm	3D tisk 1.2017	3ks
LIN750x_short	"I", 750x750 µm, 2 cm	3D tisk 1.2017	4ks
LIN500x_short	"I", 500x500 µm, 2 cm	3D tisk 1.2017	2ks
LIN250x_short	"I", 250x250 µm, 2 cm	3D tisk 1.2017	4ks
LIN750x_Y	"Y", 750x750 µm	3D tisk 1.2017	2ks
LIN1000x_long	"I", 1x1 mm, 4 cm	3D tisk 1.2017	4ks
LIN750x_long	"I", 750x750 µm, 4 cm	3D tisk 1.2017	4ks
LIN500x_long	"I", 500x500 µm, 4 cm	3D tisk 1.2017	4ks
LIN250x_long	"I", 250x250 µm, 4 cm	3D tisk 1.2017	4ks

\* Kde x je číslování vzorků stejného druhu (a, b, c, d, ...)

### Seznam vzorků PDMS

zn.	Popis	Datum
VP777a	Sylgard 184 10:1, 80°C 2 h	24.2.2017
VP777b	Sylgard 184 10:1, exik. 1 h, 80°C 2 h	24.2.2017
VP778	Sylgard 184 10:1, exik. 1 h, 100°C 1 h	28.2.2017 (Sylgard 24.2.2017)
VP855	Sylgard 184 10:1, exik. 1 h, pokojová teplota - týden	

## Seznam vzorků VisionClear

zn.	Popisek	Datum	l (mm)
FIN846a_long	2x (sp3, exik. 1 h, pec 65°C 4 h)	9.10.2017	50
FIN846a_short	2x (sp3, exik. 1 h, pec 65°C 4 h)	9.10.2017	25
FIN846b_long	2x (sp3, exik. 1 h, pokojová teplota - týden)	9.10.2017	50
FIN846b_short	2x (sp3, exik. 1 h, pokojová teplota - týden)	9.10.2017	25
FIN846c_long	nezalito	9.10.2017	50
FIN846c_short	nezalito	9.10.2017	25
FIN845a_long	2x (sp3, exik. 1 h, pec 65°C 4 h)	9.10.2017	50
FIN845a_short	2x (sp3, exik. 1 h, pec 65°C 4 h)	9.10.2017	25
FIN845b_long	nezalito	9.10.2017	50
FIN845b_short	během leštění se rozlepila	9.10.2017	25

\* FIN845 - dva slepené trojúhelníkové profily (3 páry); FIN846 čtvercový (2 páry)

## Postup prováděných depozičních testů

Datum	Činnost
24.2.2017	namícháno 110 ml PDMS
	první test přípravy vzorků: FOSIK 0,5 h, přidány LIN750n_(Y, I), exik. 0,5h, ("Y" - plave, "I" - ke dnu), PEC 80°C 2 h
28.2.2017	namícháno 55 ml PDMS
	test tepelné odolnosti formy a vzorků: FOSIK 48 min, PEC 100°C 1 h, ("Y", "I"), 2. vrstva, exik. 1 h, PEC 100°C (PDMS z 24.2.2017)
	odloučení nových vzorků JD010, JD011, JD012, JD013, JD014, JD015, JD016, JD017, JD018, JD019 od obalů v deionizované vodě, 6x 20 min JD019 se silně zkroutily, JD014 se zkroutily méně
4.4.2017	příprava vzorků na řezání: 4 formy (PDMS z 24.2.2017) + 1 forma, 1 medaile, 2 kruhové, znovu zalitý starý vzorek v kruhové("I") (PDMS z 28.2.2017). exik. 1 h, PEC 100°C 1 h
	3D tisk nového návrhu formy se posuvnou délkou, později zbrúšeny nerovnosti vzniklé při tisku
21.4.2017	namícháno 110 ml PDMS
	řezání: řezáno pomocí 2 skalpelů (A, B - zubaté ostří) při různé teplotě ostří (50-70°C) vzorek z formy a kruhové řezán při pokojové teplotě, vzorek z formy řezán po zahřátí na 50°C v PECE nejlepší výsledky poskytuje řezání skalpelem A při konstantním tlaku tenčí vzorky vypadají lépe (na skalpel se lepí méně materiálu)
	test 2 nových forem a 1 původní s použitím plastových čel potažených separátorem SP3 (snaha vyhnout se řezání): 2 nové formy: SP3, exik. 1 h, PEC 100°C 1 h, ("Y", "I"), FOSIK 1 h, ("Y" - se lehce posunula), PEC 100°C 1 h (PDMS z 21.4.2017) 1 původní forma: SP3, exik. 1 h, PEC 100°C, (plasty odpadly a zkroutily se) aplikace SP3: natáhneme SP3 do pipety, kápneme na ustříhnutý kus plastu, rozetřeme špejlí do ucha, opakujeme
23.11.2017	Zaliti vzorků LINZ: první vrstva - 6 forem: SP3, exik. 1 h, PEC 100°C Zbytek PDMS nebyl zabalen do alobalu a pravděpodobně vystavením světlu (UV ze zářivky) během 3 hodin částečně ztuhl -> nutno připravit nový
27.11.2017	Namícháno 110 ml PDMS Sylgard 184. druhá vrstva (první vrstva z 23.11.2017): pro 750 μm krátká, dlouhá, "I", "Y", pro 1000 μm krátká, dlouhá (LIN750a_short, LIN750a_long, LIN750b_I, LIN750b_Y, LIN1000b_short, LIN750c_long) FOSIK 1 h, PEC 1h