



**České  
vysoké  
učení technické  
v Praze**

**Katedra mikroelektroniky**

## **Výroba optických polymerních vlnodů pomocí technologie mikrodávkování**

**Lukáš Veigl**

**Vedoucí: doc. Ing. Václav Prajzler, Ph.D.  
Obor: Elektronika a komunikace  
Květen 2024**





## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Veigl**

Jméno: **Lukáš**

Osobní číslo: **498852**

Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**

Zadávací katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**

Studijní program: **Elektronika a komunikace**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Výroba optických polymerních vlnovodů pomocí technologie mikrodávkování**

Název bakalářské práce anglicky:

**Fabrication of Optical Polymer Waveguides Using Microdosing Technology**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s teoretickými principy optických planárních vlnovodů.
- 2) Seznamte se s množstvím přípravy polymerních optických kanálkových vlnovodů pomocí mikrodávkače a dalšími dostupnými technologiemi.
- 3) Proveďte depoziční testy pro výrobu polymerních struktur pomocí dostupných technologií. Pro výrobu vlnovodů použijte biokompatibilní polymerní materiály.
- 4) Změřte vlastnosti vyrobených vzorků.
- 5) Dosažené výsledky shrňte do zprávy v rozsahu 15-20 stran.

Seznam doporučené literatury:

1. V. Chlupatý: Příprava a měření vlastností optických polymerních vlnovodů pro fotonické aplikace, ČVUT 2021, diplomová práce.
2. V. Prajzler, V. Chlupatý, M. Neruda: Circular large core optical elastomer waveguides fabricated by using direct microdispense fabrication method. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* 250 (2022) 168348.
3. 6. F. Kranert, A.S. Finkenbrink, M. Hinkelmann, J. Neumann, D. Kracht: Multi-material additive manufacturing based on  $\mu$ -dispenser technology for tailored polymer micro-optics. *Proc. SPIE 12433, Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics XVI*, 124330D (15 March 2023), San Francisco, California, United States. doi: 10.1117/12.2649849

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: **23.01.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

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

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
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

Chtěl bych poděkovat panu doc. Ing. Václavu Prajzlerovi, Ph.D. za pomoc a čas, který mi věnoval při řešení bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Miloši Nerudovi, DiS. za ukázkou měření optického útlumu.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.

V Praze, 24. května 2024

## Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá výrobou optických polymerních kanálkových vlnodů pomocí technologie mikrodávkování. V bakalářské práci je pro výrobu kanálkových vlnodů využito biokompatibilních PDMS (polydimethylsiloxane) polymerů Sylgard 184, LS 6943, KER 4690, MED 6210, MED 6215 a MED 6233. U všech výše uvedených polymerních materiálů je provedeno měření indexu lomu, transmisních spekter, absorpčního koeficientu a šířky zakázaného pásu. V další části bakalářské práce jsou posány depoziční testy pro výrobu optických polymerních kanálkových vlnodů s cílem optimalizace geometrických rozměrů jádra vlnodů. Dále jsou vyrobena čela optických vlnodů a je změřen optický útlum vlnodů. Na závěr jsou měřeny spektrální charakteristiky kanálkových vlnodů a vyhodnoceny naměřené výsledky.

**Klíčová slova:** Polymerní optické vlnovody, mikrodávkování, biokompatibilní polymery, polydimethylsiloxane, optický útlum

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

## Abstract

This bachelor thesis deals with the fabrication of optical polymer channel waveguides using microdosing technology. For fabrication of channel waveguides in this bachelor thesis are used biocompatible PDMS (polydimethylsiloxane) polymers Sylgard 184, LS 6943, KER 4690, MED 6210, MED 6215 and MED 6233. For all polymer materials above is done measurement of refraction index, transmission spectra, absorptive coefficient and bandgap width. In the next part of the bachelor thesis are described deposition tests for fabrication of optical polymer channel waveguides with a goal of optimization of geometric dimensions of waveguides core. Further, the optical waveguides faces are made and optical attenuation of the waveguides is measured. Finally, the spectral characteristics of channel waveguides are measured.

**Keywords:** Optical polymer waveguides, microdosing, biocompatible polymers, polydimethylsiloxane, optical attenuation

**Title translation:** Fabrication of optical polymer waveguides using microdosing technology

# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Optické kanálkové planární vlnovody</b>	<b>3</b>
<b>3 Technologie pro optické kanálkové vlnovody</b>	<b>5</b>
<b>4 Měřicí metody</b>	<b>7</b>
4.1 Měření indexu lomu .....	7
4.2 Měření transmisních spekter .....	8
4.3 Měření tloušťky materiálu .....	9
4.4 Kontrola optické kvality - mikroskopie .....	10
4.5 Měření optického útlumu .....	11
4.6 Měření spektrálních charakteristik .....	13
<b>5 Polymerní materiály</b>	<b>15</b>
<b>6 Výroba polymerních vzorků a optických kanálkových vlnovodů</b>	<b>19</b>
<b>7 Naměřené výsledky</b>	<b>33</b>
7.1 Index lomu .....	33
7.2 Transmisní spektra.....	34
7.3 Optický útlum .....	38
7.4 Spektrální charakteristiky .....	41
<b>8 Závěr</b>	<b>43</b>
<b>Literatura</b>	<b>45</b>

## Obrázky

2.1 Šíření vln v planárním optickém vlnovodu [5]. . . . .	4
2.2 Druhy optických 3D vlnovodů: a) páskový vlnovod, b) kanálkový vlnovod, c) difúzní kanálkový vlnovod, d) zanořený kanálkový vlnovod, e) zanořený difúzní kanálkový vlnovod [4]. . . . .	4
3.1 Princip výroby optických polymerních vlnovodů pomocí fotolitografie a) nanosení PVA mezivrstvy, b) nanosení plášťové vrstvy EpoClad, c) nanosení vrstvy jádra EpoCore, d) proces fotolitografie, e) mokré leptání, f) nanosení krycí vrstvy EpoClad [7]. . . . .	6
3.2 Princip výroby optických polymerních vlnovodů pomocí technologie mikrodávkování a) silikonová forma vyplněná plášťovým polymerem na skleněné podložce, b) nanášení jádra do pláště, c) proces UV vytvrzení a vytvrzení teplem [2].	6
4.1 Princip měření indexu lomu [8]. . . . .	7
4.2 Fotografie pracoviště pro měření indexu lomu v laboratoři PLANIO (Laboratoř planárních optoelektronických a optických integrovaných struktur) na Katedře mikroelektroniky, FEL, ČVUT v Praze. . . . .	8
4.3 Fotografie pracoviště pro měření transmisních spekter (laboratoř na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze). . . . .	9
4.4 Fotografie pracoviště pro měření tloušťky pomocí úchylkoměru KINEX IP 54, 0-12,7 mm. . . . .	10
4.5 Fotografie pracoviště pro kontrolu optické kvality vzorků - mikroskop OLYMPUS BX60 v laboratoři NANOLAB, Katedra mikroelektroniky, FEL, ČVUT v Praze. . . . .	10
4.6 Fotografie pracoviště pro měření optického útlumu - metoda dvou délek (Laboratoř PLANIO, Katedra mikroelektroniky, FEL, ČVUT v Praze.) . . . . .	11
4.7 Schéma měření optického útlumu metodou dvou délek a) před zkrácením vzorku, b) po zkrácení vzorku [10]. . . . .	12
4.8 Schéma měření spektrálních charakteristik. . . . .	13
6.1 Fotografie zařízení pro výrobu optických polymerních vlnovodů v laboratoři NANOLAB, Katedra mikroelektroniky, FEL ČVUT v Praze. . . . .	19



6.2 Princip výroby optických polymerních vlnovodů pomocí technologie mikrodávkování a) zařízení pro mikrodávkování, b) forma vyplněná tekutým polymerem Sylgard 184, c) nanášení polymeru LS 6943 (jádro) do polymeru Sylgard 184 (plášť), d) vystavení polymerních materiálů UV světlu, e) vytvrzení polymerních materiálů v laboratorní peci [13]. . . . .	20
6.3 Fotografie příslušenství pro technologii mikrodávkování a) šnekové čerpadlo, b) externí dávkovač. . . . .	21
6.4 Fotografie optických kanálkových vlnovodů pořízená mikroskopem pro průřez kanálků pro kombinaci materiálů LS 6943 (jádro) Sylgard 184 (plášť) s rozestupem mezi kanálky $x - 2$ mm, tlakem $p - 1$ bar, tloušťkou jehly $D - 0,33$ mm a rychlostí posuvu $v - 210$ mm/min a) kanálek 1, b) kanálek 2, c) kanálek 3, d) kanálek 4, e) kanálek 5. . . . .	24
6.5 Fotografie optických kanálkových vlnovodů pořízená mikroskopem pro průřez kanálků pro kombinaci materiálů LS 6943 (jádro) a KER 4690 (plášť) s rozestupem mezi kanálky $x - 2$ mm, tlakem $p - 1$ bar, tloušťkou jehly $D - 0,33$ mm a rychlostí posuvu $v - 500$ mm/min a) kanálek 1, b) kanálek 2, c) kanálek 3, d) kanálek 4, e) kanálek 5. . . . .	25
6.6 Fotografie optických kanálkových vlnovodů pořízená mikroskopem pro průřez kanálků pro kombinaci materiálů MED 6210 (jádro) a Sylgard 184 (plášť) s rozestupem mezi kanálky $x - 2$ mm, tlakem $p - 1$ bar, tloušťkou jehly $D - 0,41$ mm a rychlostí posuvu $v - 80$ mm/min a) kanálek 1, b) kanálek 2, c) kanálek 3, d) kanálek 4, e) kanálek 5. . . . .	27
6.7 Fotografie optických kanálkových vlnovodů pořízená mikroskopem pro průřez kanálků pro kombinaci materiálů MED 6210 (jádro) a KER 4690 (plášť) s rozestupem mezi kanálky $x - 2$ mm, tlakem $p - 1$ bar, tloušťkou jehly $D - 0,41$ mm a rychlostí posuvu $v - 100$ mm/min a) kanálek 1, b) kanálek 2, c) kanálek 3, d) kanálek 4, e) kanálek 5. . . . .	28
6.8 Fotografie optických kanálkových vlnovodů pořízená mikroskopem pro průřez kanálků pro kombinaci materiálů MED 6210 (jádro) a MED 6215 (plášť) s rozestupem mezi kanálky $x - 2$ mm, tlakem $p - 1$ bar, tloušťkou jehly $D - 0,41$ mm a rychlostí posuvu $v - 80$ mm/min a) kanálek 1, b) kanálek 2, c) kanálek 3, d) kanálek 4, e) kanálek 5. . . . .	29
6.9 Fotografie optických kanálkových vlnovodů pořízená mikroskopem pro průřez kanálků pro kombinaci materiálů MED 6210 (jádro) a MED 6233 (plášť) s rozestupem mezi kanálky $x - 2$ mm, tlakem $p - 1,6$ bar, tloušťkou jehly $D - 0,41$ mm a rychlostí posuvu $v - 400$ mm/min a) kanálek 1, b) kanálek 2, c) kanálek 3, d) kanálek 4, e) kanálek 5. . . . .	30

6.10 Defekty kanáلكových vlnovodů: a) odlišný průměr jádra na různé vzdálenosti, b) vznik malých bublin uvnitř jádra, c) ohnutí kanálku při změně směru pohybu osy x disperzeru, d) defekt rychlého vyjmutí jehly. ....	30
6.11 Princip výroby objemových vzorků a) nalití polymerních materiálů do silikonové formy, b) odstranění vzduchových bublin pomocí exsikátoru, c) vytvrzení UV světlem (aplikováno pouze u vzorků UV-PDMS), d) vytvrzení teplem. ....	31
7.1 Indexy lomu PDMS vzorků a) Sylgard 184, LS 6943 a KER 4690, b) MED 6210, MED 6215 a MED 6233. ....	34
7.2 Naměřená transmisní spektra PDMS materiálů a), c) v rozmezí vlnových délek 200 nm až 2050 nm, b), d) detail transmisní hrany. ....	35
7.3 Závislost absorpce na vlnové délce materiálů a) Sylgard 184, LS 6943 a KER 4690, b) MED 6210, MED 6215 a MED 6233. ....	36
7.4 Závislost $h\nu$ na $h\nu\alpha$ materiálů a) Sylgard 184, LS 6943 a KER 4690, b) MED 6210, MED 6215 a MED 6233. ....	37
7.5 Fotografie pro výrobu čel vlnovodů pro vytvoření vstupní a výstupní optické vazby a) řez skalpelem, b) řez žiletkou, c) řez CO <sub>2</sub> laserem, d) řez horkým nožem. ....	38
7.6 Změřené spektrální charakteristiky optického vlákna, kanáلكových vlnovodů s jádrem LS 6943 a MED 6210. ....	41

## Tabulky

5.1 Doba vytvrzení materiálu Sylgard 184 při určité teplotě. ....	16
5.2 Index lomu materiálu Sylgard 184 na různých vlnových délkách [12]. ....	16
5.3 Index lomu materiálu LS 6943 na různých vlnových délkách [14].....	16
6.1 Kombinace materiálů pro jádro a plášť určených na základě hodnot indexu lomu na vlnové délce 650 nm. ....	22
6.2 Kombinace materiálů pro jádro a plášť určených na základě hodnot indexu lomu na vlnové délce 650 nm, které byly experimentálně zkoušeny v rámci řešení této bakalářské práce. ....	23
6.3 Průměry vyrobených optických kanálků pro kombinaci materiálů LS 6943 (jádro) a Sylgard 184 (plášť) pro nastavení parametrů: rozestup kanálků $x$ - 2 mm, průměr jehly $D$ - 0,33 mm, tlak dávkovače $p$ - 1 bar a rychlost posuvu jehly $v$ - 210 mm/min. 24	
6.4 Průměry vyrobených optických kanálků pro kombinaci materiálů LS 6943 (jádro) a KER 4690 (plášť) pro nastavení parametrů: rozestup kanálků $x$ - 2 mm, průměr jehly $D$ - 0,33 mm, tlak dávkovače $p$ - 1 bar a rychlost posuvu jehly $v$ - 100 mm/min, 300 mm/min a 500 mm/min. ....	25
6.5 Průměry vyrobených optických kanálků pro kombinaci materiálů LS 6943 (jádro) a KER 4690 (plášť) pro nastavení parametrů: rozestup kanálků $x$ - 2 mm, průměr jehly $D$ - 0,33 mm, tlak dávkovače $p$ - 1 bar a rychlost posuvu jehly $v$ - 500 mm/min. 25	
6.6 Průměry vyrobených optických kanálků pro kombinaci materiálů MED 6210 (jádro) a Sylgard 184 (plášť) pro nastavení parametrů: rozestup kanálků $x$ - 2 mm, průměr jehly $D$ - 0,41 mm, tlak dávkovače $p$ - 1 bar a rychlost posuvu jehly $v$ - 100 mm/min, 200 mm/min a 300 mm/min. ....	26
6.7 Průměry vyrobených optických kanálků pro kombinaci materiálů MED 6210 (jádro) a Sylgard 184 (plášť) pro nastavení parametrů: rozestup kanálků $x$ - 2 mm, průměr jehly $D$ - 0,41 mm, tlak dávkovače $p$ - 1 bar a rychlost posuvu jehly $v$ - 80 mm/min. 26	
6.8 Průměry vyrobených optických kanálků pro kombinaci materiálů MED 6210 (jádro) a KER 4690 (plášť) pro nastavení parametrů: rozestup kanálků $x$ - 2 mm, průměr jehly $D$ - 0,41 mm, tlak dávkovače $p$ - 1 bar a rychlost posuvu jehly $v$ - 100 mm/min.....	27

6.9 Průměry vyrobených optických kanálků pro kombinaci materiálů MED 6210 (jádro) a MED 6215 (plášť) pro nastavení parametrů: rozestup kanálků $x$ - 2 mm, průměr jehly $D$ - 0,41 mm, tlak dávkovače $p$ - 1 bar a rychlost posuvu jehly $v$ - 80 mm/min.	28
6.10 Průměry vyrobených optických kanálků pro kombinaci materiálů MED 6210 (jádro) a MED 6233 (plášť) pro nastavení parametrů: rozestup kanálků $x$ - 2 mm, průměr jehly $D$ - 0,41 mm, tlak dávkovače $p$ - 1,6 bar a rychlost posuvu jehly $v$ - 400 mm/min.	29
7.1 Indexy lomu PDMS materiálů.	34
7.2 Naměřené hodnoty tloušťek vzorků.	36
7.3 Šířka zakázaného pásu vzorků.	37
7.4 Optický útlum vzorku s jádrem LS 6943 a pláštěm KER 4690.	39
7.5 Optický útlum vzorku s jádrem MED 6210 a pláštěm Sylgard 184.	39
7.6 Optický útlum vzorku s jádrem MED 6210 a pláštěm MED 6215.	40
7.7 Optický útlum vzorku s jádrem MED 6210 a pláštěm KER 4690.	40
7.8 Optický útlum vzorku s jádrem MED 6210 a pláštěm MED 6233.	41

# Kapitola 1

## Úvod

Předložená bakalářská práce se zabývá výrobou polymerních optických kanálkových vlnodů vyrobených z biokompatibilních polymerů PDMS (polydimethylsiloxane). Biokompatibilní polymery jsou použity z důvodu vysoké elasticity a možnosti implantace do lidského nebo zvířecího organismu. Příklad použití polymeru je uveden v [1], kde je popsáno využití vlnodů z biokompatibilních materiálů při léčbě řezné rány prasečí kůže.

Práce popisuje postup výroby optických kanálkových vlnodů pomocí mikrodávkače, kde tento postup je inspirován metodou, která byla zveřejněna v publikaci Dr Takaaki Ishigure a kolektivu z Keio University, Yokohama, Japonsko, kde tento postup je označován jako Mosquito method (komáří metoda) [2]. Princip této metody spočívá v nanášení polymeru s vyšším indexem lomu pomocí jehly a mikrodávkače do tekutého polymeru s nižší hodnotou indexu lomu. Polymery jsou následně vytvrzeny pomocí UV světla a tepla. Výhodou této metody je, že je vyroben vlnod s kruhovým tvarem jádra vlnodů, který je možné navázat na optické vlákno. Cílem bakalářské práce bylo optimalizovat postup výroby a vhodné nastavení parametrů jehly a mikrodávkače tak, aby bylo dosaženo průměru jádra vlnodů přibližně 250  $\mu\text{m}$ . Práce navazuje na diplomovou práci Ing. Václava Chlupatého [3] a na bakalářskou práci Bc. Matěje Latečky [4].

Předložená bakalářská práce v porovnání s uvedenými pracemi je rozšířena o výrobu vlnodů z polymerního materiálu PDMS MED 6233, dále byl testován UV-PDMS materiál. V bakalářské práci jsem také testoval postupy pro optimalizaci výroby opticky kvalitního čela vlnodů pro vazbu do optických vláken. Testoval jsem tyto čtyři postupy a to, řezání pomocí skalpelu, žiletky, CO<sub>2</sub> laseru nebo horkého nože. Předpokládám, že dosažené výsledky bude možno využít pro výrobu biokompatibilních optických vlnodů, které můžou sloužit pro ozařování lidské tkáně pro lékařské účely nebo sensorové aplikace.



## Kapitola 2

### Optické kanálkové planární vlnovody

Optické vlnovody vzhledem ke geometrickým rozměrům můžeme rozdělit na jednovidové a mnohavidové. Pro návrh jednovidových optických vlnodů je využito Maxwellových rovnic a je nutné určit rozložení elektromagnetického pole ve struktuře v závislosti na jejích rozměrech, indexech lomů použitých materiálů a provozní vlnové délce. Pro návrh mnohavidových optických vlnodů lze použít jednodušší geometrickou optiku, kde nás zajímá kontrast indexů lomu materiálů jádra a pláště. Mnohavidové optické vlnovody se dále dělí na vlnovody se skokovou a s gradientní změnou indexu lomu [3].

Planární vlnovody jsou jedním ze dvou druhů vlnodů v komunikačních soustavách, tím druhým jsou vláknové vlnovody. Planární vlnovody jsou určeny pro přenos signálu na krátké vzdálenosti maximálně několika centimetrů narozdíl od vláknových, které přenáší signál na vzdálenost až stovek kilometrů. Přenosové vlastnosti planárních vlnodů závisí na materiálu, ze kterého jsou vyrobeny a na geometrickém uspořádání [5].

Optický vlnovod se skládá z oblasti, která má vyšší index lomu než její okolí. Tato oblast se nazývá jádro. Jádrem se šíří většina energie přenášené vlnovodem. Planární vlnovod vzniká tak, že na rovinnou destičku (vrstva substrátu) je nanášena vlnovodná vrstva (jádro), která může být na povrchu opatřena další krycí vrstvou dielektrika. Každá z těchto vrstev má odlišné vlastnosti a pro indexy lomu musí platit

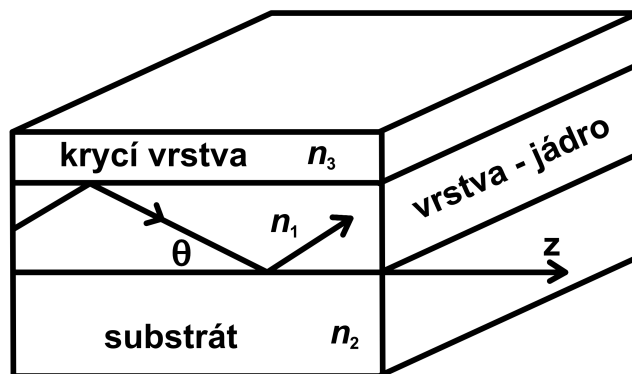
$$n_1 > n_2, \quad (2.1)$$

$$n_1 > n_3, \quad (2.2)$$

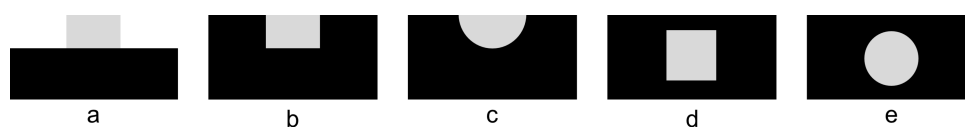
kde  $n_1$  je index lomu jádra,  $n_2$  je index lomu substrátu a  $n_3$  je index lomu krycí vrstvy [4].

Na obr. 2.1 je uveden princip šíření vln v planárním vlnovodu totálním odrazem na rozhraních. Podle konstrukce se vlnovody dělí na dvourozměrné (2D) a trojrozměrné (3D) vlnovody. U 2D vlnodů je jeden z příčných rozměrů velikostně neomezen a v případě těchto vlnodů se jedná o strukturu,

která slouží jen k teoretickému návrhu. Pro praktické použití je nutné použít trojrozměrné vlnovodné struktury, které omezují vlnu v obou příčných rozměrech [5]. Na obr. 2.2 jsou zobrazeny různé typy 3D vlnovodů.



Obrázek 2.1 Šíření vln v planárním optickém vlnovodu [5].



Obrázek 2.2 Druhy optických 3D vlnovodů: a) páskový vlnovod, b) kanálkový vlnovod, c) difúzní kanálkový vlnovod, d) zanořený kanálkový vlnovod, e) zanořený difúzní kanálkový vlnovod [4].



## Kapitola 3

### Technologie pro optické kanálkové vlnovody

Přestože řada používaných technologických procesů pro výrobu optických vlnovodů je známa a běžně používána, stále je věnována pozornost vývoji optických polymerů a technologií pro zjednodušení postupu výroby a dosažení nových zajímavých vlastností. Například jsou známy tyto výrobní postupy: additní technologie, fotolitografie a technologie mikrodávkování. Níže jsou popsány jednotlivé výrobní technologie.

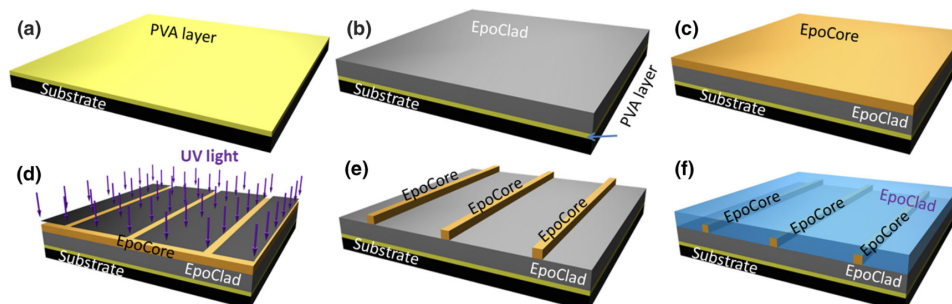
#### *Additní technologie*

Additní technologie je velice moderní a pro výrobu optických členů je tato technologie používána posledních 10 let, kde výzkum v této oblasti je velice intenzivní. Additní výroba využívá FDM (Fused Deposition Modeling) metody 3D tisku. Na 3D tiskárně je vyrobena forma na kanálky z materiálu polyvinylalkohol (PLA - Polyactid Acid), který je vodou rozpustný. Forma je následně naplněna optickým elastomerem PDMS, který slouží jako plášť vlnovodu. Potom se naplněná forma vloží do vody a vytištěná část se nechá rozpustit. Nakonec se vzniklé kanálky vyplní polymerem sloužícím jako jádro vlnovodu [4]. Pro aplikaci v oblasti optiky vede tato metoda na vznik nehomogenních složek a to vede k rozsáhlému rozptylování světla a tedy současné technologie FDM neumožňují výrobu optických polymerních vlnovodů s vysokou optickou kvalitou [6].

#### *Fotolitografie*

Princip výroby flexibilních polymerních vlnovodů pomocí fotolitografie je následující. Nejprve je nanášena vrstva metodou rotačního lití PVA (polyvinylalkohol) na křemíkový substrát (obr. 3.1 a). PVA prášek je rozpuštěn v DEMI vodě na horké podložce při teplotě 60 °C po dobu 60 minut následováním nanesením plášťové polymerní vrstvy EpoClad opět pomocí metody rotačního lití (obr. 3.1 b). Následně je nanášena vrstva jádra EpoCore na plášťovou vrstvu (obr. 3.1 c). Potom je proveden proces fotolitografie (obr. 3.1 d) následováním procesem mokrého leptání (obr. 3.1 e). Nakonec je nanášena krycí vrstva

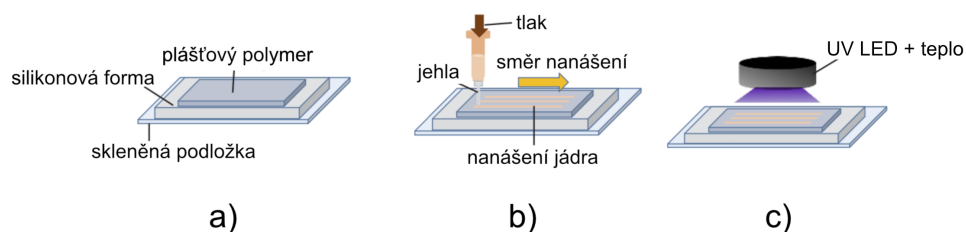
EpoClad (obr. 3.1 f). Výhodou této metody je jednoduchost výroby, kde jsou použity standardní technologické procesy, které jsou běžně využívány v mikroelektronice [7].



**Obrázek 3.1** Princip výroby optických polymerních vlnodů pomocí fotolitografie a) nanesení PVA mezivrstvy, b) nanesení plášťové vrstvy EpoClad, c) nanesení vrstvy jádra EpoCore, d) proces fotolitografie, e) mokré leptání, f) nanesení krycí vrstvy EpoClad [7].

### Technologie mikrodávkování

Technologie mikrodávkování, používaná pro výrobu optických vlnodů je v Japonsku označována jako komáří metoda (mosquito method) [2], je jednou z nových a perspektivních metod výroby optických polymerních vlnodů [2]. Oproti ostatním metodám jako jsou například fotolitografie nebo metoda 3D tisku technologie mikrodávkování umožňuje výrobu optických vlnodů s kruhovým tvarem jádra. Výhodou vlnodů s kruhovým tvarem jádra je rovnoměrné rozložení intenzity světla, což umožňuje efektivní navázání do optického vlákna. Princip metody je uveden na obr. 3.2. Do silikonové formy umístěné na skleněné podložce je vložen plášťový polymer (obr. 3.2 a). Následně je do plášťového polymeru tlakem pomocí jehly nanášeno jádro z jiného polymerního materiálu s vyšším indexem lomu (obr. 3.2 b). Nakonec je vše vytvrzeno kombinací UV záření a tepla nebo jen teplem (obr. 3.2 c) [2].



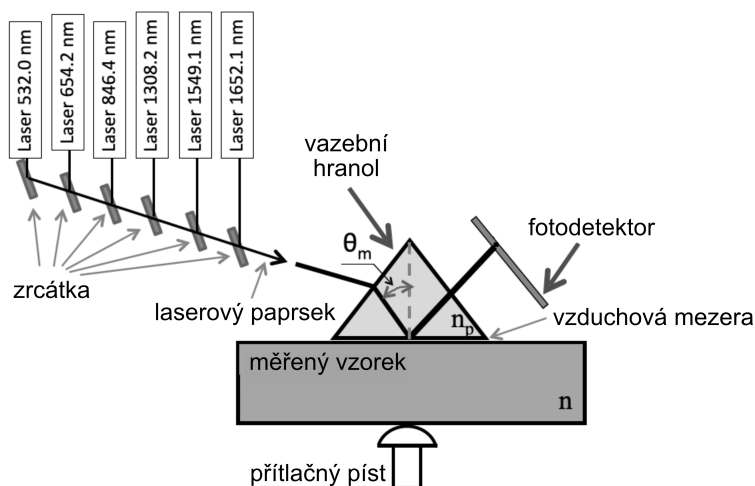
**Obrázek 3.2** Princip výroby optických polymerních vlnodů pomocí technologie mikrodávkování a) silikonová forma vyplněná plášťovým polymerem na skleněné podložce, b) nanášení jádra do pláště, c) proces UV vytvrzení a vytvrzení teplem [2].

## Kapitola 4

### Měřicí metody

#### 4.1 Měření indexu lomu

Měření indexu lomu jsem prováděl pomocí přístroje Metricon 2010/M Prism Coupler. Toto zařízení funguje na principu uvedeném na obr. 4.1. Pneumaticky ovládaný přitlačný píst přitlačí měřený vzorek k vazební hranolu. Tímto vznikne optický kontakt mezi měřeným vzorkem a vazebním hranolem [4]. Laserový paprsek dopadá na hranol, láme se a dopadá pod určitým úhlem na povrch měřeného vzorku. Pokud je tento úhel menší než kritický úhel, dochází k totálnímu odrazu a paprsek dopadá na fotodetektor. Naopak, pokud je tento úhel větší než kritický, část energie prochází do měřeného materiálu a část se odráží na fotodetektor.



Obrázek 4.1 Princip měření indexu lomu [8].

Vazební hranol je spolu s měřeným materiálem umístěn na platformě, která se v průběhu měření otáčí. Tímto dochází ke změně úhlu dopadu paprsku [3].

Index lomu je určen podle rovnice:

$$n = \frac{n_h}{\arcsin(\Phi)} \quad (4.1)$$

V této práci jsem používal vazební hranol Metricon Prism 200-P-4a. Tento hranol je vhodný pro měření indexu lomu v rozsahu 1,20 až 2,02. Na obr. 4.2 je uvedena fotografie pracoviště pro měření indexu lomu.



**Obrázek 4.2** Fotografie pracoviště pro měření indexu lomu v laboratoři PLANIO (Laboratoř planárních optoelektronických a optických integrovaných struktur) na Katedře mikroelektroniky, FEL, ČVUT v Praze.

Měření jsem prováděl na vlnových délkách 532,0 nm, 654,2 nm, 846,4 nm, 1308,2 nm, 1549,1 nm a 1652,1 nm. Přenost měření indexu lomu byla  $\pm 0,0005$ . Protože jsem změřil index lomu jen na šesti různých vlnových délkách, bylo potřeba při zpracování dat použít vhodnou aproximační metodu k určení hodnot indexu lomu pro ostatní vlnové délky. Využil jsem Sellmeierovu aproximaci s infračervenou korekcí z toho důvodu, že se jeví jako nejvhodnější pro použitou sestavu měření. Tato aproximace má tvar [9]:

$$n^2(\lambda) = A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - C} - D\lambda^2, \quad (4.2)$$

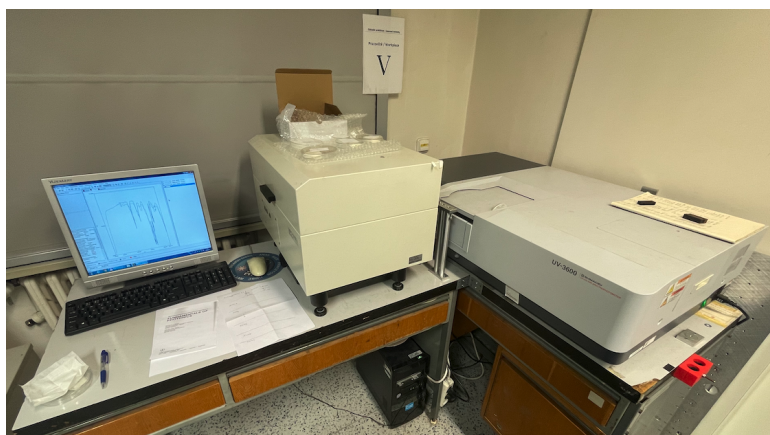
kde  $n$  je index lomu,  $\lambda$  je vlnová délka a  $A$ ,  $B$ ,  $C$  a  $D$  jsou experimentálně stanovené Sellmeierovy koeficienty [9].

## 4.2 Měření transmisních spekter

Transmisní spektra jsem měřil na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze pomocí přístroje UV-VIS-NIR spektrometr Shimadzu 3600.

Princip měření je následující: světlo ze širokopásmového zdroje v přístroji prochází monochromátorem a nastavitelnou štěrbinou, kde vzniká kolimovaný monochromatický svazek. Ten prochází skrz umístěný materiál na fotodetektor. Přístroj umožňuje provádět měření v měřicímu rozsahu 185 až 3300 nm, vzorky byly měřeny pro vlnové délky v rozsahu 200 až 2200 nm. Při měření byly využity tři zdroje a detektory a v průběhu měření dochází k jejich automatickému přepínání.

Měření probíhá postupným přeladováním monochromátoru a zaznamenáváním intenzity světla dopadající na detektor na každé měřené vlnové délce. Před samotným měřením je potřeba provést referenční měření, kdy přístroj změří spektrum bez vloženého materiálu. Z referenčních a naměřených dat řídicí software určí průběh transmisního spektra měřeného materiálu [3]. Na obr. 4.3 je uvedena fotografie pracoviště pro měření transmisních spekter.



**Obrázek 4.3** Fotografie pracoviště pro měření transmisních spekter (laborať na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze).

## 4.3 Měření tloušťky materiálu

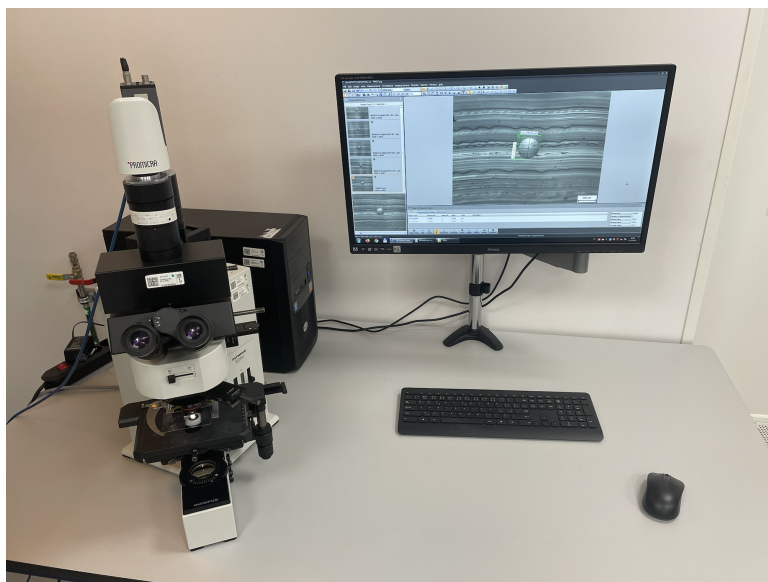
Pro měření tloušťky materiálu jsem použil digitální úchylkoměr KINEX. Přesnost úchylkoměru je 0,001 mm a měřicí rozsah 12,7 mm. Fotografie realizovaného měřicího pracoviště je uvedena na obr. 4.4.



**Obrázek 4.4** Fotografie pracoviště pro měření tloušťky pomocí úchylkoměru KINEX IP 54, 0-12,7 mm.

#### 4.4 Kontrola optické kvality - mikroskopie

Kontrolu optické kvality vyrobených kanálkových vlnodů jsem prováděl v laboratoři NANOLAB na Českém vysokém učení technickém v Praze na Fakultě elektrotechnické na Katedře mikroelektroniky. Ke kontrole jsem používal mikroskop OLYMPUS BX60. Mikroskop je schopen zvětšit objekt 2x, 5x, 10x, 20x a 50x. Fotografie pracoviště je uvedena na obr. 4.5.

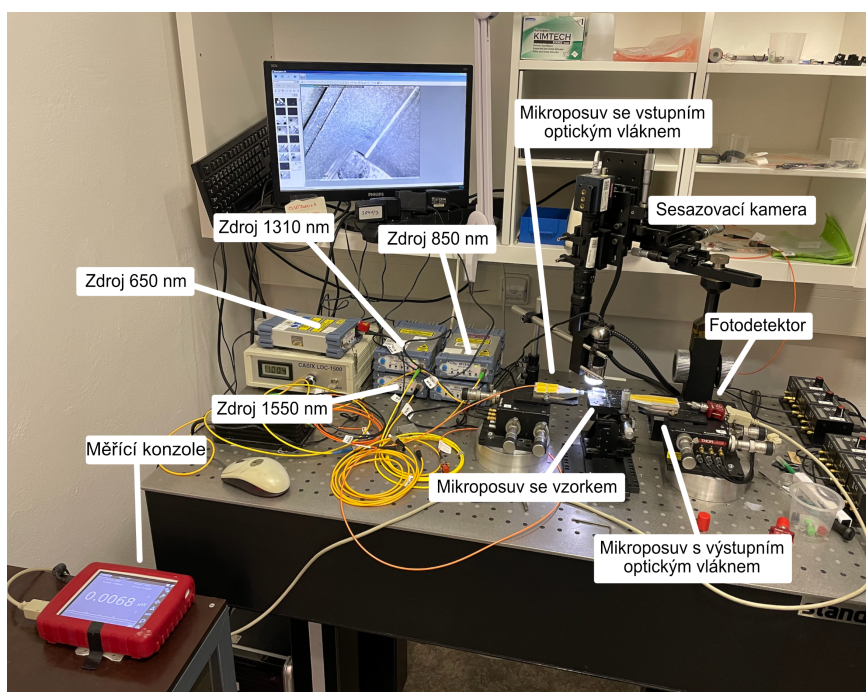


**Obrázek 4.5** Fotografie pracoviště pro kontrolu optické kvality vzorků - mikroskop OLYMPUS BX60 v laboratoři NANOLAB, Katedra mikroelektroniky, FEL, ČVUT v Praze.



## 4.5 Měření optického útlumu

Optický útlum jsem měřil v laboratoři Laboratoř planárních optoelektronických a optických integrovaných struktur (PLANIO) na Českém vysokém učení technickém v Praze na Fakultě elektrotechnické na Katedře mikroelektroniky. Měření optického útlumu jsem prováděl pomocí metody dvou délek. Jedná se o přesnou, ale destruktivní metodu, kdy vzorek je při měření zničen [4]. Fotografie pracoviště je uvedena na obr. 4.6.



**Obrázek 4.6** Fotografie pracoviště pro měření optického útlumu - metoda dvou délek (Laboratoř PLANIO, Katedra mikroelektroniky, FEL, ČVUT v Praze.)

Princip metody je takový, že mám vzorek délky  $l_1$  s kanálkovými vlnovody. Na vstup a výstup kanálku je přivedeno optické vlákno. Použité vstupní optické vlákno má průměr  $200\ \mu\text{m}$  a použité výstupní vlákno průměr  $500\ \mu\text{m}$ . Optické vlákno na vstupu vlnovodu je na druhém konci přivedeno ke zdroji záření. Konkrétně jsem používal zdroje záření  $590\ \text{nm}$ ,  $650\ \text{nm}$ ,  $850\ \text{nm}$ ,  $1310\ \text{nm}$  a  $1550\ \text{nm}$ . Optické vlákno na výstupu vlnovodu je přivedeno k fotodetektoru, který je připojený k měřicí konzoli. Používal jsem dva fotodetektory - Si fotodetektor (detektor použit při měření vlnových délek  $400$  až  $1100\ \text{nm}$ ) a InGaAs fotodetektor (detektor použit při měření vlnových délek  $800$  až  $1700\ \text{nm}$ ). Pomocí fotodetektoru a měřicí konzole jsem určil výstupní výkon  $P_1$ . Každý kanálek jsem měřil zvlášť. Následně jsem vzorek přibližně o  $2\ \text{cm}$  zkrátil a získal jsem nový vzorek délky  $l_2$ . Zopakoval jsem měření a určil jsem výkon  $P_2$ . Měrný optický útlum  $A$  je potom určen podle

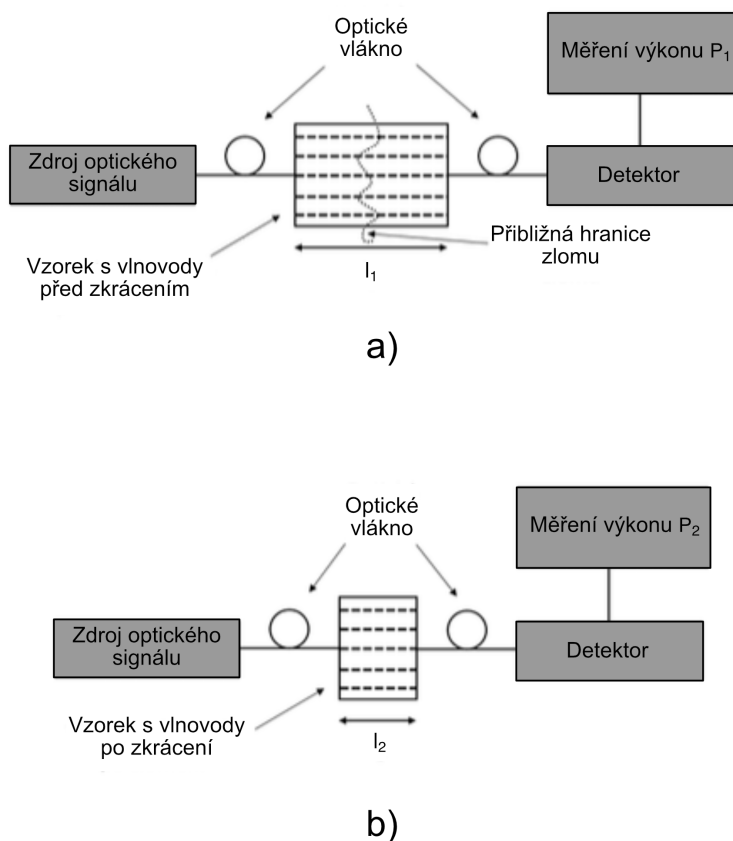
vztahu:

$$A = \frac{P_{2dBm} - P_{1dBm}}{l_1 - l_2}, \quad (4.3)$$

kde  $P_{1dBm}$ ,  $P_{2dBm}$  jsou naměřené hodnoty výkonu na fotodetektoru v jednotce dBm,  $l_1$  je délka vzorku před zkrácením a  $l_2$  je délka vzorku po zkrácení [3]. Vzhledem k tomu, že měřicí konzole zobrazovala hodnoty výkonu ve watech, bylo nutné tyto hodnoty přepočítat na decibely. K tomu bylo využito vztahu:

$$P_{dB} = 10 \log_{10}(P_{watt}), \quad (4.4)$$

kde  $P_{watt}$  je výkon ve watech a  $P_{dB}$  je výkon v decibelech. Schéma měření optického útlumu je uvedeno na obr. 4.7.

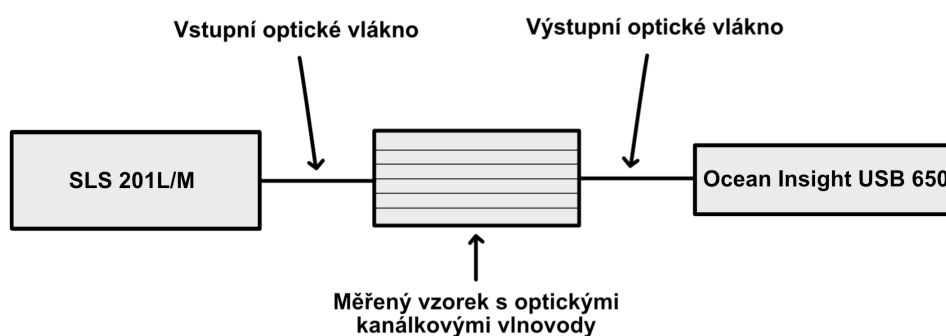


**Obrázek 4.7** Schéma měření optického útlumu metodou dvou délek a) před zkrácením vzorku, b) po zkrácení vzorku [10].



## 4.6 Měření spektrálních charakteristik

Spektrální charakteristiky jsem měřil pomocí analyzátoru Ocean Insight USB 650. Používal jsem optický zdroj SLS 201L/M. Princip měření je takový, že na vstup vlnovodu je přivedeno optické vlákno, které je na druhém konci připojeno ke zdroji záření. Na výstup vlnovodu je přivedeno optické vlákno, které je na druhém konci připojeno ke spektrálnímu analyzátoru. Spektrální analyzátor je následně připojen k počítači, který zobrazí spektrální charakteristiky. Nevýhodou spektrálního analyzátoru Ocean Insight USB 650 je omezený spektrální rozsah 350 nm až 1000 nm. Na obr. 4.8 je uvedeno schéma měření spektrálních charakteristik.



Obrázek 4.8 Schéma měření spektrálních charakteristik.



## Kapitola 5

### Polymerní materiály

V této práci se zabývám výrobou polymerních optických kanálkových vlnodů z biokompatibilních materiálů. Pro výrobu optických kanálkových vlnodů jsem používal silikonové elastomery. Jedná se o dvousložkové polymery, které jsou vytvrzovány pomocí zvýšené teploty nebo kombinací UV záření a zvýšené teploty. Tyto polymery jsou velmi pružné a je možné je malou silou značně deformovat bez poškození [4].

Zajímavým kandidátem biopolymerních materiálů jsou silikonové elastomery polydimethylsiloxane (PDMS). Optickými vlastnostmi jsou PDMS materiály velmi vhodné pro výrobu optických biokompatibilních vlnodů. PDMS materiály mají nízké optické ztráty v rozmezí vlnových délek od UV do NIR (spektrální pásmo v blízké infračervené oblasti) ( $\leq 0.05$  dB/cm na vlnové délce 850 nm) a relativně vysoký index lomu (1,40). Navíc PDMS ukazují vysokou roztlačnost ( $> 100$  %) a pevnost v tahu ( $> 1$  MPa) [11].

PDMS materiály jsou dodávány jako dvě rozdělené složky, které je potřeba smíchat v poměru daném výrobcem. Míchání je možné provést ručně nebo automatickým míchacím přístrojem. Poté je potřeba smíchaný polymer odvzdušnit pomocí exsíkátoru. Následně je možné odvzdušněný polymer vytvrdit. Níže je uveden přehled PDMS materiálů, které jsem používal v rámci řešení této bakalářské práce.

#### *Sylgard 184*

Sylgard 184 je transparentní silikonový elastomer. Mezi jeho vlastnosti patří dobrá odolnost vůči plamenům a vysoká pevnost v tahu. Skládá se ze dvou složek - složky A a složky B. Viskozita základní složky je 5100 cP a viskozita po smíchání je 3500 cP. Pro přípravu elastomeru je nutné tyto složky smíchat v poměru 10:1 a nechat vytvrdit. Doba vytvrzení je závislá na okolní teplotě - uvedeno v tab. 5.1. S nevytvrzeným materiálem lze po smíchání následně pracovat po dobu 1,5 hod při teplotě 25 °C [12]. V předchozích publikacích bylo také prokázáno, že tento elastomer je vhodný pro optické vlnodody

pracující na vlnových délkách 650 nm, 850 nm a 1300 nm [13].

**Tabulka 5.1** Doba vytvrzení materiálu Sylgard 184 při určité teplotě.

Teplota (°C)	25	100	125	150
Doba vytvrzení (min)	2880	35	20	10

Důležitým parametrem materiálu Sylgard 184 je index lomu [4]. Hodnoty indexu lomu uvedené výrobcem jsou v tab. 5.2.

**Tabulka 5.2** Index lomu materiálu Sylgard 184 na různých vlnových délkách [12].

Vlnová délka (nm)	589	632,8	1321	1554
Index lomu (-)	1,4118	1,4225	1,4028	1,3997

### *LS 6943*

LS 6943 je dvousložkový silikonový elastomer. Pro přípravu je nutné obě složky smíchat v poměru 10:1. Viskozita po smíchání je 5400 cP. V tab. 5.3 jsou uvedeny hodnoty indexu lomu materiálu LS6943 na různých vlnových délkách při teplotě 25 °C. Doba vytvrzení materiálu LS 6943 je 60 minut při 60 °C [14].

**Tabulka 5.3** Index lomu materiálu LS 6943 na různých vlnových délkách [14].

Vlnová délka (nm)	411	589	833	1306	1550
Index lomu (-)	1,4440	1,4269	1,4220	1,4172	1,4157

### *KER 4690*

KER 4690 je UV vytvrzovatelný tekutý silikonový elastomer. Skládá se ze složky A a složky B. Po smíchání složek A a B v poměru 1:1 je možné materiál zpracovávat po dobu 24 hodin odléváním nebo jinými depozičními metodami. Viskozita po smíchání je 2700 cP. Vytvrzení je vyvoláno vystavením materiálu UV záření po dobu 10 minut a teplotou. Teplota pro vytvrzení nebyla výrobcem uvedena. Pro vytvrzení jsem polymer vystavil teplotě 150 °C po dobu 15 minut. Výhoda tohoto elastomeru oproti jiným PDMS elastomerům je rychlejší vytvrzování [15]. Index lomu výrobce neuvádí, proto jsem podle [3] uvažoval index lomu 1,4090 na vlnové délce 654,2 nm.

*MED 6210*

MED 6210 je dvousložkový, opticky čistý silikonový elastomer vytvrzovatelný teplem. Skládá se ze složky A a složky B, které jsou smíchány v poměru 1:1. Viskozita po smíchání je 16000. Po smíchání je možné s materiálem pracovat po dobu 4 hodin. K vytvrzení dochází při teplotě 150 °C po dobu 30 minut. Tento elastomer je možné použít pro implantaci do lidského těla po dobu delší než 29 dní. Index lomu výrobce uvádí 1,43 [16].

*MED 6215*

MED 6215 je dvousložkový, opticky čistý, nízko viskozní silikonový elastomer vytvrzovatelný teplem. Skládá se ze složky A a složky B, které jsou smíchány v poměru 10:1. Viskozita po smíchání je 3800 cP. Po smíchání je možné s materiálem pracovat po dobu 5 hodin. K vytvrzení dochází při teplotě 150 °C po dobu 15 minut. Tento elastomer je možné použít pro implantaci do lidského těla po dobu delší než 29 dní. Index lomu výrobce uvádí 1,41 [17].

*MED 6233*

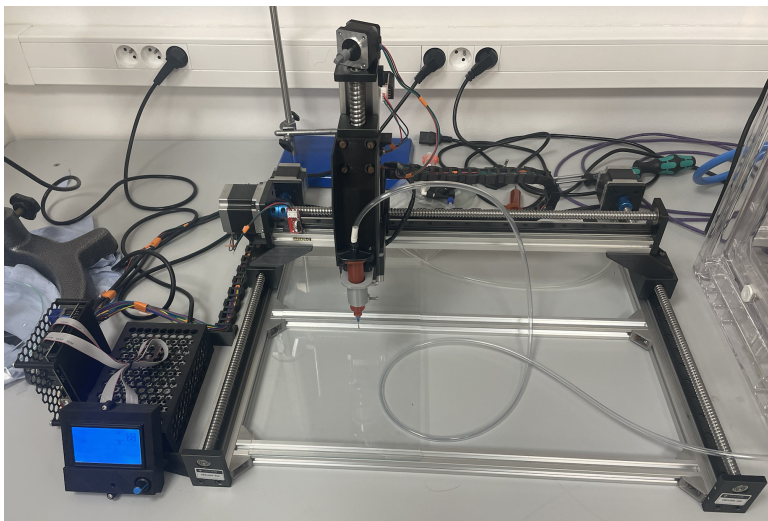
MED 6233 je odlévatelný, opticky čistý silikonový elastomer vytvrzovatelný teplem. Skládá se ze složky A a složky B, které jsou smíchány v poměru 1:1. Viskozita po smíchání je 73500 cP. Po smíchání je možné s materiálem pracovat po dobu 52 hodin. K vytvrzení dochází při teplotě 150 °C po dobu 30 minut. Tento elastomer je možné použít pro implantaci do lidského těla po dobu delší než 29 dní. Index lomu výrobce uvádí 1,41 [18].



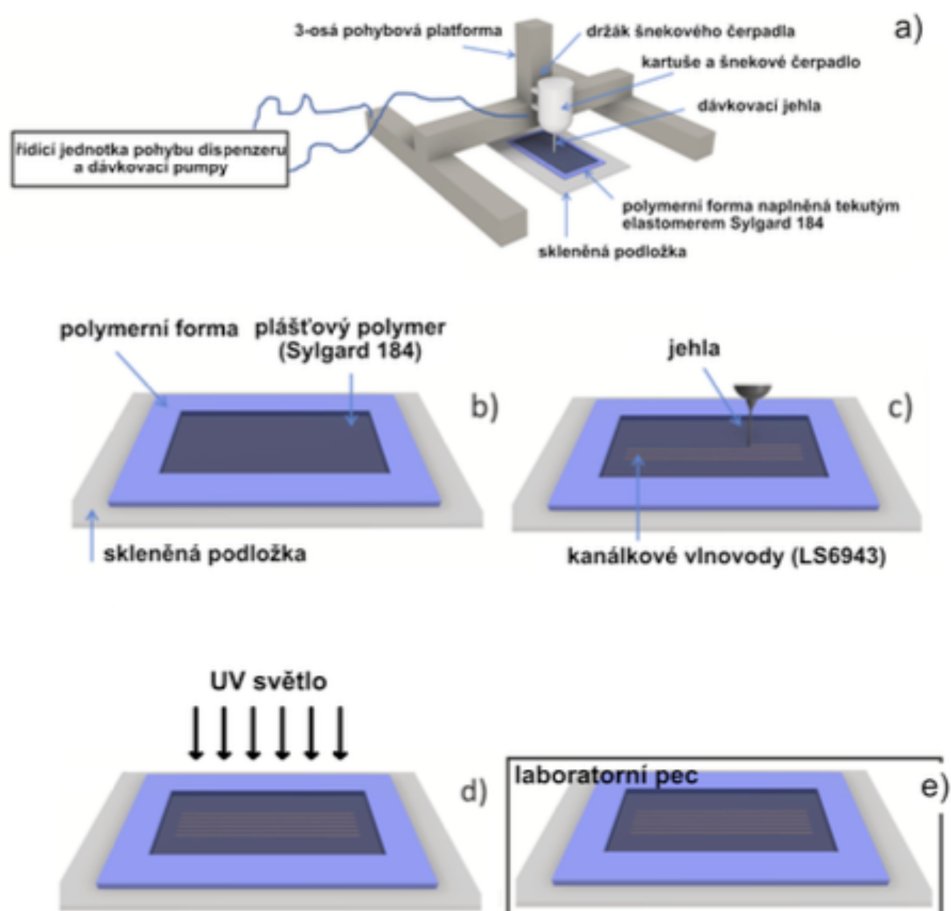
## Kapitola 6

### Výroba polymerních vzorků a optických kanálkových vlnodů

Pro výrobu optických kanálkových vlnodů pomocí technologie mikrodávkování jsem využil mikrodispenser vyrobený v rámci řešení diplomové práce na Katedře mikroelektroniky FEL ČVUT v Praze [3]. Fotografie přístroje je uvedena na obr. 6.1. Dále na obr. 6.2 je uvedeno schéma výroby optických polymerních vlnodů pomocí technologie mikrodávkování. Na obr. 6.2 a je uvedeno schéma zařízení pro mikrodávkování. Do silikonové formy je nalit plášťový polymer (obr. 6.2 b). Jehlou je do plášťového polymeru nanášen jádrový polymer (obr. 6.2 c). Některé polymery je potřeba vytvrdit UV světlem (obr. 6.2 d). Nakonec je provedeno vytvrzení polymerních materiálů teplem v laboratorní peci (obr. 6.2 e).



**Obrázek 6.1** Fotografie zařízení pro výrobu optických polymerních vlnodů v laboratoři NANOLAB, Katedra mikroelektroniky, FEL ČVUT v Praze.



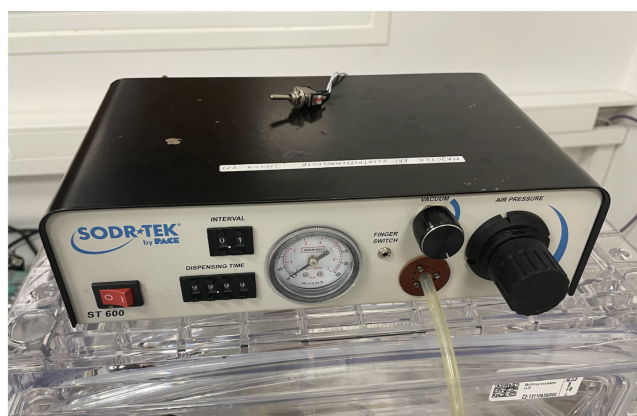
**Obrázek 6.2** Princip výroby optických polymerních vlnodů pomocí technologie mikrodávkování a) zařízení pro mikrodávkování, b) forma vyplněná tekutým polymerem Sylgard 184, c) nanášení polymeru LS 6943 (jádro) do polymeru Sylgard 184 (plášť), d) vystavení polymerních materiálů UV světlu, e) vytvrzení polymerních materiálů v laboratorní peci [13].

Aby bylo možné optimalizovat průměr kanálek vlnodů na určitý rozměr, je potřeba zvolit vhodné nastavení parametrů pro výrobu. Jedná se o zvolení průměru jehly, rychlosti posuvu jehly a tlaku dávkování polymerního materiálu (jádra). Přístroj vyrobený Ing. Václavem Chlupatým použitým v jeho diplomové práci obsahoval malé šnekové čerpadlo (obr. 6.3 a) pro řízení tlaku dávkování, které nasává materiál z kartuše a tlačí ho do dávkovací jehly [3]. Toto řízení tlaku lze využít pouze pro polymerní materiály s nízkou viskozitou. Postup použitý v této práci byl modifikován a rozšířen tak, že místo šnekového čerpadla byl použit externí dávkovač PACE SODRTEK ST600 (viz obr. 6.3 b).





a)



b)

**Obrázek 6.3** Fotografie příslušenství pro technologii mikrodávkování a) šnekové čerpadlo, b) externí dávkovač.

Pro výrobu optických polymerních vlnodů jsem využíval materiálů uvedených v kapitole 4. Na základě výsledku měření indexu lomu jsem určil možné kombinace materiálů pro vlastní výrobu optických kanálkových vlnodů. V tab 6.1 jsou uvedeny možné kombinace materiálů pro jádro a plášť včetně indexu lomu a viskozity. Index lomu je zde uveden na vlnové délce 650 nm.

**Tabulka 6.1** Kombinace materiálů pro jádro a plášť určených na základě hodnot indexu lomu na vlnové délce 650 nm.

	<b>Materiál</b>	<b>Index lomu (-)</b>	<b>Viskozita (cP)</b>
<b>jádro</b>	LS 6943	1,4277	5400
<b>plášť</b>	KER 4690	1,4085	2700
<b>jádro</b>	LS 6943	1,4277	5400
<b>plášť</b>	MED 6215	1,4096	3800
<b>jádro</b>	LS 6943	1,4277	5400
<b>plášť</b>	MED 6233	1,4099	73500
<b>jádro</b>	LS 6943	1,4277	5400
<b>plášť</b>	Sylgard 184	1,4107	3500
<b>jádro</b>	MED 6210	1,4275	16000
<b>plášť</b>	MED 6215	1,4096	3800
<b>jádro</b>	MED 6210	1,4275	16000
<b>plášť</b>	MED 6233	1,4099	73500
<b>jádro</b>	MED 6210	1,4275	16000
<b>plášť</b>	KER 4690	1,4085	2700
<b>jádro</b>	MED 6210	1,4275	16000
<b>plášť</b>	Sylgard 184	1,4107	3500
<b>plášť</b>	MED 6215	1,4096	3800
<b>plášť</b>	KER 4690	1,4085	2700
<b>plášť</b>	MED 6233	1,4099	73500
<b>plášť</b>	KER 4690	1,4085	2700
<b>plášť</b>	MED 6233	1,4099	73500
<b>plášť</b>	MED 6215	1,4096	3800
<b>plášť</b>	Sylgard 184	1,4107	3500
<b>plášť</b>	KER 4690	1,4085	2700
<b>plášť</b>	Sylgard 184	1,4107	3500
<b>plášť</b>	MED 6215	1,4096	3800
<b>plášť</b>	Sylgard 184	1,4107	3500
<b>plášť</b>	MED 6233	1,4099	73500

Vzhledem k tomu, že některé kombinace materiálů měly podobnou hodnotu indexu lomu, na hranici přesnosti měření, tyto kombinace jsem pro výrobu vlnodů neuvažoval. Mohlo by se stát, že by jádro mělo nižší index lomu než plášť a tedy by nebylo možno realizovat optický vlnod. Na základě předešlých prací [3], [4] jsem provedl výběr kombinací materiálů pro jádro a plášť. V tab 6.2 jsou uvedeny kombinace materiálů, které jsem použil pro experimenty pro výrobu kanálkových vlnodů.

**Tabulka 6.2** Kombinace materiálů pro jádro a plášť určených na základě hodnot indexu lomu na vlnové délce 650 nm, které byly experimentálně zkoušeny v rámci řešení této bakalářské práce.

	Materiál	Index lomu (-)	Viskozita (cP)
<b>jádro</b>	LS 6943	1,4277	5400
<b>plášť</b>	KER 4690	1,4085	2700
<b>jádro</b>	LS 6943	1,4277	5400
<b>plášť</b>	Sylgard 184	1,4107	3500
<b>jádro</b>	MED 6210	1,4275	16000
<b>plášť</b>	MED 6215	1,4104	3800
<b>jádro</b>	MED 6210	1,4275	16000
<b>plášť</b>	MED 6233	1,4099	73500
<b>jádro</b>	MED 6210	1,4275	16000
<b>plášť</b>	KER 4690	1,4085	2700
<b>jádro</b>	MED 6210	1,4275	16000
<b>plášť</b>	Sylgard 184	1,4107	3500

#### *LS 6943 - jádro, Sylgard 184 - plášť*

Nejprve jsem začal výrobu optických kanálkových vlnodů pro kombinaci elastomerů LS 6943 jako jádro a Sylgard 184 jako plášť. Důvod ke zvolení této kombinace jako první je ten, že tyto materiály mají podobnou viskozitu a také jsem měl k dispozici větší množství těchto materiálů. Tato kombinace byla také popsána v předešlých pracích [3], [4] a tedy jsem využil již popsané postupy výroby. Vyrobil jsem 6 vzorků s různým nastavením parametrů jako jsou rozestup mezi kanálky  $x$ , rychlost posuvu jehly  $v$ , průměr jehly  $D$  a tlak dávkovače  $p$ , tak aby se průměr kanálku  $d$  blížil 250  $\mu\text{m}$ . Rozestup mezi kanálky jsem zvolil 2 mm. Každý vzorek obsahoval 5 stejně dlouhých kanálků. Pro dávkování materiálu LS 6943 bylo možné použít šnekové čerpadlo, protože tento materiál má nízkou viskozitu. Rozhodl jsem se ale pro použití externího dávkovače a to z důvodu, abych mohl stanovit čas vypnutí a zapnutí. Dalším důvodem ke zvolení externího dávkovače místo šnekového čerpadla je nadcházející práce s materiály, které mají vyšší viskozitu a šnekové čerpadlo nelze použít. Během výroby několika vzorků z materiálů Sylgard 184 a LS 6943 jsem zjistil, že je potřeba, aby materiály byly namíchaný v den výroby vzorků. Pokud došlo k namíchání materiálů dříve a tyto materiály byly uchovány v mrazáku, docházelo ke zvýšení viskozity a nebylo možné opakovat výrobu vlnodů se shodnými výsledky průměru kanálků pro stejné nastavení parametrů. Vzorky byly vytvrzeny v peci při teplotě 150  $^{\circ}\text{C}$  po dobu 15 minut. Pro tuto kombinaci materiálů se mi nepodařilo najít vhodné nastavení parametrů tak, aby se průměr kanálku blížil 250  $\mu\text{m}$ .

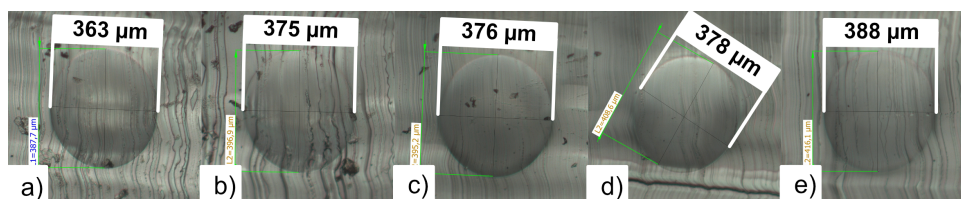
Pro nastavení parametrů:

- rozestup kanálek  $x$  - 2 mm,
- průměr jehly  $D$  - 0,33 mm,
- tlak dávkovače  $p$  - 1 bar,
- rychlost posuvu  $v$  - 210 mm/min,

jsou v tab. 6.3 uvedeny průměry optických kanálek a na obr. 6.4 je fotografie čel pro kombinaci materiálů LS 6943 a Sylgard 184.

**Tabulka 6.3** Průměry vyrobených optických kanálek pro kombinaci materiálů LS 6943 (jádro) a Sylgard 184 (plášť) pro nastavení parametrů: rozestup kanálek  $x$  - 2 mm, průměr jehly  $D$  - 0,33 mm, tlak dávkovače  $p$  - 1 bar a rychlost posuvu jehly  $v$  - 210 mm/min.

$v$ (mm/min)	$d$ ( $\mu\text{m}$ )				
	kanálek 1	kanálek 2	kanálek 3	kanálek 4	kanálek 5
210	363	375	376	378	388



**Obrázek 6.4** Fotografie optických kanálkových vlnodů pořízená mikroskopem pro průřez kanálek pro kombinaci materiálů LS 6943 (jádro) Sylgard 184 (plášť) s rozestupem mezi kanálky  $x$  - 2 mm, tlakem  $p$  - 1 bar, tloušťkou jehly  $D$  - 0,33 mm a rychlostí posuvu  $v$  - 210 mm/min a) kanálek 1, b) kanálek 2, c) kanálek 3, d) kanálek 4, e) kanálek 5.

*LS 6943 - jádro, KER 4690 - plášť*

Jako další kombinaci materiálů jsem zvolil PDMS materiály LS 6943 jako jádro a KER 4690 jako plášť. Nejprve jsem vytvořil sadu tří vzorků, kde každý vzorek obsahoval 5 kanálek s následujícím nastavením parametrů:

- rozestup kanálek  $x$  - 2 mm,
- průměr jehly  $D$  - 0,33 mm,
- tlak dávkovače  $p$  - 1 bar.

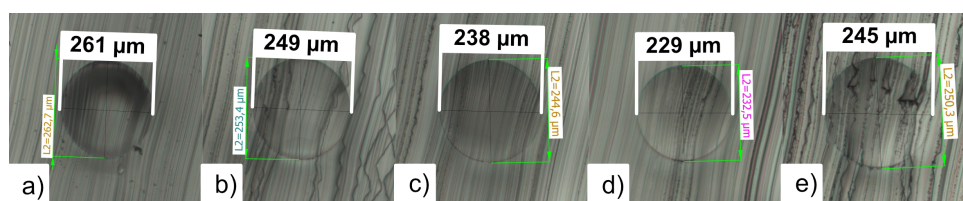
Rychlost posuvu jehly pro tuto sadu vzorků byla 100 mm/min, 300 mm/min a 500 mm/min. Pro toto nastavení parametrů jsou uvedeny průměry vyrobených optických kanálek v tab. 6.4. Na základě výsledných průměrů kanálek pro rychlost posuvu jehly 500 mm/min jsem zopakoval výrobu vzorku se stejným nastavením parametrů a rychlostí posuvu 500 mm/min. Po výrobě kanálek jehlou jsem vzorky vytvrzoval pomocí UV záření po dobu 10 minut, následně jsem je nechal vytvrdit telotou 150 °C po dobu 15 minut. Porovnáním hodnot pro rychlost posuvu 500 mm/min z tab. 6.4 a 6.5 je vidět, že při zopakované výrobě se podařilo vyrobit vzorky se stejnými geometrickými rozměry. Na obr. 6.5 jsou uvedeny fotografie čel kanálek pro nastavení parametrů z tab. 6.5.

**Tabulka 6.4** Průměry vyrobených optických kanálek pro kombinaci materiálů LS 6943 (jádro) a KER 4690 (plášť) pro nastavení parametrů: rozestup kanálek  $x$  - 2 mm, průměr jehly  $D$  - 0,33 mm, tlak dávkovače  $p$  - 1 bar a rychlost posuvu jehly  $v$  - 100 mm/min, 300 mm/min a 500 mm/min.

$v$ (mm/min)	$d$ ( $\mu\text{m}$ )				
	kanálek 1	kanálek 2	kanálek 3	kanálek 4	kanálek 5
100	588	582	610	644	633
300	347	345	361	341	409
500	262	270	264	273	262

**Tabulka 6.5** Průměry vyrobených optických kanálek pro kombinaci materiálů LS 6943 (jádro) a KER 4690 (plášť) pro nastavení parametrů: rozestup kanálek  $x$  - 2 mm, průměr jehly  $D$  - 0,33 mm, tlak dávkovače  $p$  - 1 bar a rychlost posuvu jehly  $v$  - 500 mm/min.

$v$ (mm/min)	$d$ ( $\mu\text{m}$ )				
	kanálek 1	kanálek 2	kanálek 3	kanálek 4	kanálek 5
500	261	249	238	229	245



**Obrázek 6.5** Fotografie optických kanálkových vlnodů pořízená mikroskopem pro průřez kanálek pro kombinaci materiálů LS 6943 (jádro) a KER 4690 (plášť) s rozestupem mezi kanálky  $x$  - 2 mm, tlakem  $p$  - 1 bar, tloušťkou jehly  $D$  - 0,33 mm a rychlostí posuvu  $v$  - 500 mm/min a) kanálek 1, b) kanálek 2, c) kanálek 3, d) kanálek 4, e) kanálek 5.

*MED 6210 - jádro, Sylgard 184 - plášť*

Pro následující vzorky jsem využil kombinaci materiálů MED 6210 (jádro) a Sylgard 184 (plášť). Vytvořil jsem 3 vzorky s 5 kanálky s nastavením parametrů:

- rozestup kanálek  $x$  - 2 mm,
- průměr jehly  $D$  - 0,41 mm,
- tlak dávkovače  $p$  - 1 bar,

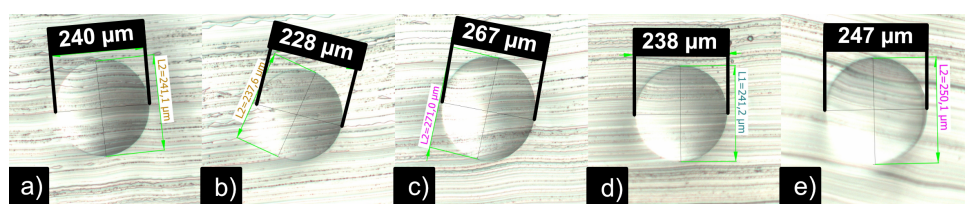
a proměnnou rychlostí posuvu jehly (100 až 300 mm/min). V tab. 6.6 jsou uvedeny průměry realizovaných kanálek pro dané nastavení parametrů. Pro nastavení parametrů s rychlostí posuvu jehly 100 mm/min se výsledné průměry blíží požadovanému průměru kanálkových vlnovodů 250  $\mu\text{m}$ . Vytvořil jsem ještě jeden vzorek se stejným nastavením parametrů s rychlostí posuvu jehly 80 mm/min. V tomto případě jsem trochu snížil rychlost posuvu jehly, abych zvýšil průměr kanálku. Vzorky jsem nechal vytvrdit při teplotě 150 °C po dobu 30 minut. V tab. 6.7 lze vidět průměry kanálek pro výše uvedené nastavení parametrů s rychlostí posuvu jehly 80 mm/min. Na obr. 6.6 jsou uvedeny fotografie čel vlnovodů pro průměry kanálek uvedené v tab. 6.7.

**Tabulka 6.6** Průměry vyrobených optických kanálek pro kombinaci materiálů MED 6210 (jádro) a Sylgard 184 (plášť) pro nastavení parametrů: rozestup kanálek  $x$  - 2 mm, průměr jehly  $D$  - 0,41 mm, tlak dávkovače  $p$  - 1 bar a rychlost posuvu jehly  $v$  - 100 mm/min, 200 mm/min a 300 mm/min.

$v$ (mm/min)	$d$ ( $\mu\text{m}$ )				
	kanálek 1	kanálek 2	kanálek 3	kanálek 4	kanálek 5
100	238	229	234	218	233
200	147	139	140	141	138
300	136	125	137	125	136

**Tabulka 6.7** Průměry vyrobených optických kanálek pro kombinaci materiálů MED 6210 (jádro) a Sylgard 184 (plášť) pro nastavení parametrů: rozestup kanálek  $x$  - 2 mm, průměr jehly  $D$  - 0,41 mm, tlak dávkovače  $p$  - 1 bar a rychlost posuvu jehly  $v$  - 80 mm/min.

$v$ (mm/min)	$d$ ( $\mu\text{m}$ )				
	kanálek 1	kanálek 2	kanálek 3	kanálek 4	kanálek 5
80	240	228	267	238	247



**Obrázek 6.6** Fotografie optických kanálkových vlnodů pořízená mikroskopem pro průřez kanáleků pro kombinaci materiálů MED 6210 (jádro) a Sylgard 184 (plášť) s rozestupem mezi kanálky  $x$  - 2 mm, tlakem  $p$  - 1 bar, tloušťkou jehly  $D$  - 0,41 mm a rychlostí posuvu  $v$  - 80 mm/min a) kanálek 1, b) kanálek 2, c) kanálek 3, d) kanálek 4, e) kanálek 5.

*MED 6210 - jádro, KER 4690 - plášť*

Dále jsem pokračoval s výrobou optických kanálkových vlnodů s materiály MED 6210 a KER 4690. U této kombinace jsem zvolil podobné nastavení parametrů jako v předchozím případě, tedy:

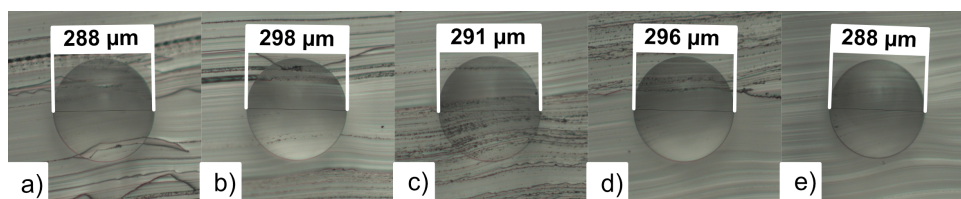
- rozestup kanáleků  $x$  - 2 mm,
- průměr jehly  $D$  - 0,41 mm,
- tlak dávkovače  $p$  - 1 bar,
- rychlost posuvu jehly  $v$  - 100 mm/min.

Důvodem ke zvolení podobných parametrů byla podobná viskozita materiálů Sylgard 184 a KER 4690. Pro toto nastavení parametrů jsou v tab. 6.8 uvedeny průměry kanáleků. Na obr. 6.7 jsou uvedeny fotografie čel vlnodů. Vzorek byl vytvrzován při teplotě 150 °C po dobu 30 minut.

**Tabulka 6.8** Průměry vyrobených optických kanáleků pro kombinaci materiálů MED 6210 (jádro) a KER 4690 (plášť) pro nastavení parametrů: rozestup kanáleků  $x$  - 2 mm, průměr jehly  $D$  - 0,41 mm, tlak dávkovače  $p$  - 1 bar a rychlost posuvu jehly  $v$  - 100 mm/min.

	$d$ ( $\mu\text{m}$ )				
$v$ (mm/min)	kanálek 1	kanálek 2	kanálek 3	kanálek 4	kanálek 5
100	288	298	291	296	288





**Obrázek 6.7** Fotografie optických kanálkových vlnodů pořízená mikroskopem pro průřez kanáleků pro kombinaci materiálů MED 6210 (jádro) a KER 4690 (plášť) s rozestupem mezi kanálky  $x - 2$  mm, tlakem  $p - 1$  bar, tloušťkou jehly  $D - 0,41$  mm a rychlostí posuvu  $v - 100$  mm/min a) kanálek 1, b) kanálek 2, c) kanálek 3, d) kanálek 4, e) kanálek 5.

*MED 6210 - jádro, MED 6215 - plášť*

Další vlnovody jsem vyrobil z materiálů MED 6210 a MED 6215. Pro tuto kombinaci materiálů jsem zvolil následující nastavení parametrů:

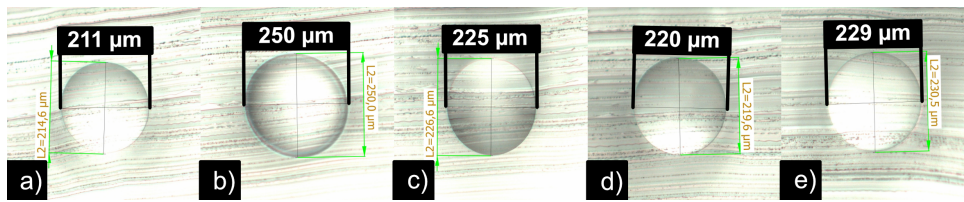
- rozestup kanáleků  $x - 2$  mm,
- průměr jehly  $D - 0,41$  mm,
- tlak dávkovače  $p - 1$  bar,
- rychlost posuvu jehly  $v - 80$  mm/min.

Na obr. 6.8 jsou uvedeny fotografie čel vlnodů a v tab. 6.9 jsou uvedeny průměry kanáleků. Vzorek byl vytvrzován při teplotě  $150$  °C po dobu 30 minut.

**Tabulka 6.9** Průměry vyrobených optických kanáleků pro kombinaci materiálů MED 6210 (jádro) a MED 6215 (plášť) pro nastavení parametrů: rozestup kanáleků  $x - 2$  mm, průměr jehly  $D - 0,41$  mm, tlak dávkovače  $p - 1$  bar a rychlost posuvu jehly  $v - 80$  mm/min.

	$d$ ( $\mu\text{m}$ )				
$v$ (mm/min)	kanálek 1	kanálek 2	kanálek 3	kanálek 4	kanálek 5
80	211	250	225	220	229





**Obrázek 6.8** Fotografie optických kanálkových vlnodů pořízená mikroskopem pro průřez kanáleků pro kombinaci materiálů MED 6210 (jádro) a MED 6215 (plášť) s rozestupem mezi kanálky  $x$  - 2 mm, tlakem  $p$  - 1 bar, tloušťkou jehly  $D$  - 0,41 mm a rychlostí posuvu  $v$  - 80 mm/min a) kanálek 1, b) kanálek 2, c) kanálek 3, d) kanálek 4, e) kanálek 5.

*MED 6210 - jádro, MED 6233 - plášť*

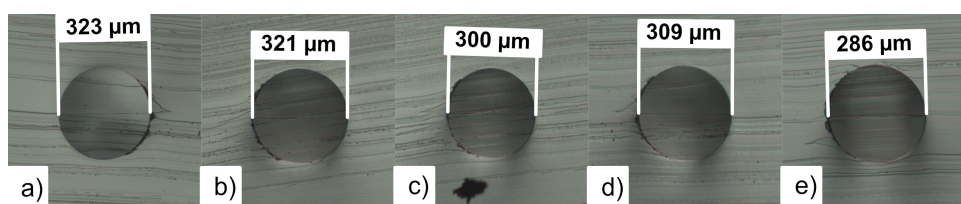
Poslední vzorek jsem vyrobil z materiálu MED 6210 jako jádro a materiálu MED 6233 jako plášť. Pro tuto kombinaci jsem zvýšil tlak dávkovače, protože viskozita materiálu MED 6233 byla výrazně vyšší než viskozita materiálu MED 6210. Konkrétní nastavení parametrů bylo:

- rozestup kanáleků - 2 mm,
- průměr jehly - 0,41 mm,
- tlak dávkovače - 1,6 bar,
- rychlost posuvu jehly - 400 mm/min.

V tab. 6.10 jsou uvedeny průměry kanáleků a na obr. 6.9 je fotografie čel vlnodů.

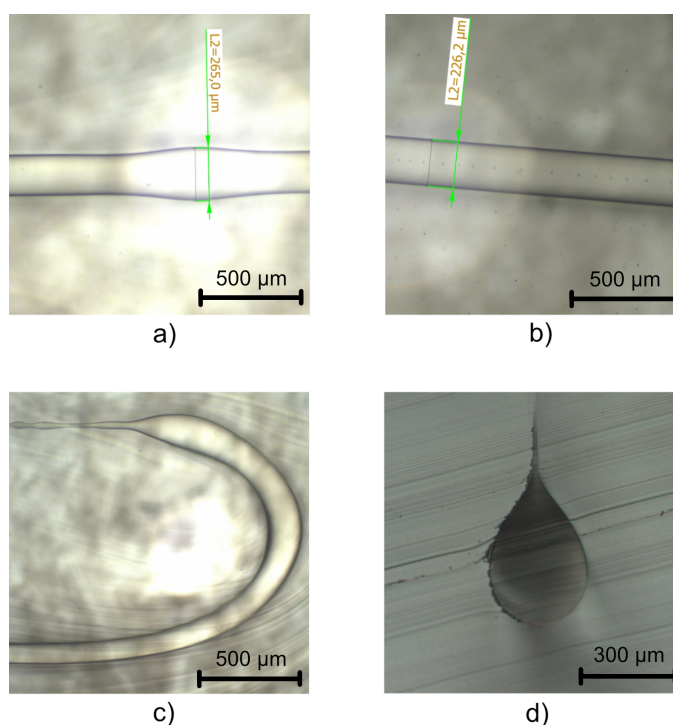
**Tabulka 6.10** Průměry vyrobených optických kanáleků pro kombinaci materiálů MED 6210 (jádro) a MED 6233 (plášť) pro nastavení parametrů: rozestup kanáleků  $x$  - 2 mm, průměr jehly  $D$  - 0,41 mm, tlak dávkovače  $p$  - 1,6 bar a rychlost posuvu jehly  $v$  - 400 mm/min.

	$d$ ( $\mu\text{m}$ )				
$v$ (mm/min)	kanálek 1	kanálek 2	kanálek 3	kanálek 4	kanálek 5
400	323	321	300	309	286



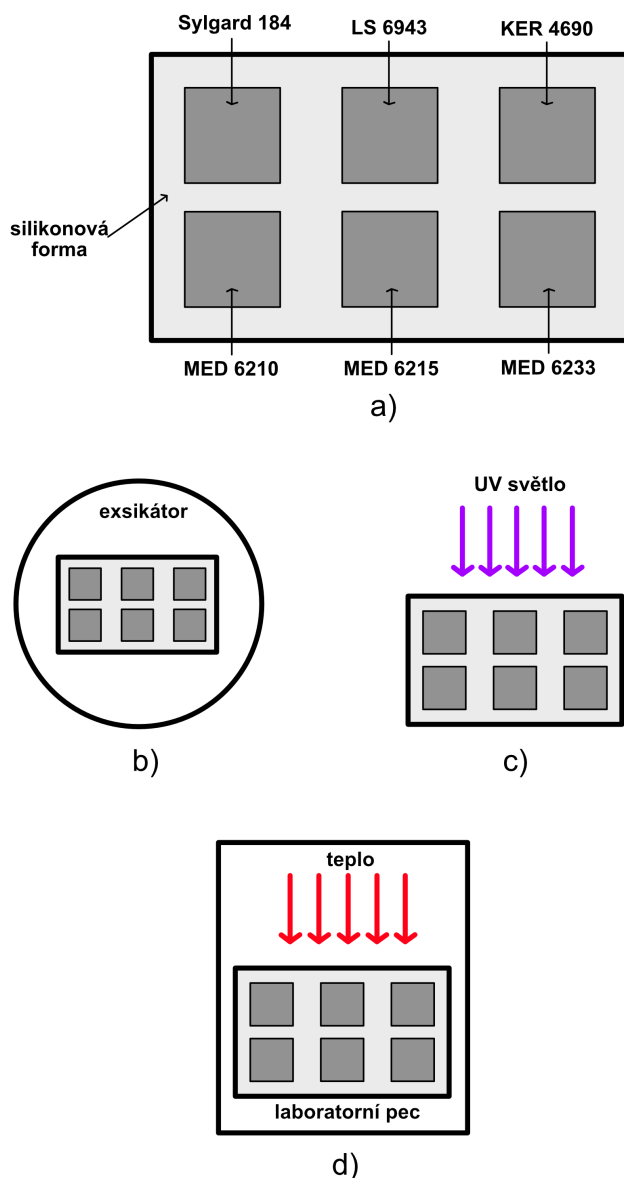
**Obrázek 6.9** Fotografie optických kanálkových vlnodů pořízená mikroskopem pro průřez kanáleků pro kombinaci materiálů MED 6210 (jádro) a MED 6233 (plášť) s rozstupem mezi kanálky  $x$  - 2 mm, tlakem  $p$  - 1,6 bar, tloušťkou jehly  $D$  - 0,41 mm a rychlostí posuvu  $v$  - 400 mm/min a) kanálek 1, b) kanálek 2, c) kanálek 3, d) kanálek 4, e) kanálek 5.

Při výrobě optických polymerních vlnodů docházelo k různým defektům kanáleků. Příklady těchto defektů jsou uvedeny na obr. 6.10. Na obr. 6.10 a) je uveden příklad defektu, kdy průměr jádra byl odlišný pro různou vzdálenost od počátku vlnodů. Dále obr. 6.10 b) ukazuje vznik malých bublin v jádře vlnodů. Na obr. 6.10 c) je zobrazen defekt, který vzniká při změně směru pohybu osy  $x$  jehly dávkovače. Tento defekt nemá vliv na měření optického útlumu ani na spektrální charakteristiky, protože tato část vzorku je odříznuta. Nakonec na obr. 6.10 d) lze pozorovat defekt, který vzniká při rychlém vyjmutí jehly po nanášení jádra do pláště.



**Obrázek 6.10** Defekty kanálkových vlnodů: a) odlišný průměr jádra na různé vzdálenosti, b) vznik malých bublin uvnitř jádra, c) ohnutí kanálku při změně směru pohybu osy  $x$  disperzeru, d) defekt rychlého vyjmutí jehly.

Nakonec jsem vyrobil objemové vzorky všech použitých polymerních materiálů. Princip výroby objemových vzorků je uveden na obr. 6.11. Do silikonové formy jsou vloženy tekuté polymerní materiály (obr. 6.11 a). Při míchání polymerů vznikají vzduchové bubliny, které jsou odstraněny pomocí exsikátoru (obr. 6.11 b). Následně jsou polymerní materiály vytvrzeny UV světlem (obr. 6.11 c) a nakonec teplem v laboratorní peci (obr. 6.11 d). Objemové vzorky měly rozměry přibližně 2×2 cm a tloušťku 3 až 4 mm a sloužily k měření indexu lomu a transmisních spekter.



**Obrázek 6.11** Princip výroby objemových vzorků a) nalítí polymerních materiálů do silikonové formy, b) odstranění vzduchových bublin pomocí exsikátoru, c) vytvrzení UV světlem (aplikováno pouze u vzorků UV-PDMS), d) vytvrzení teplem.



# Kapitola 7

## Naměřené výsledky

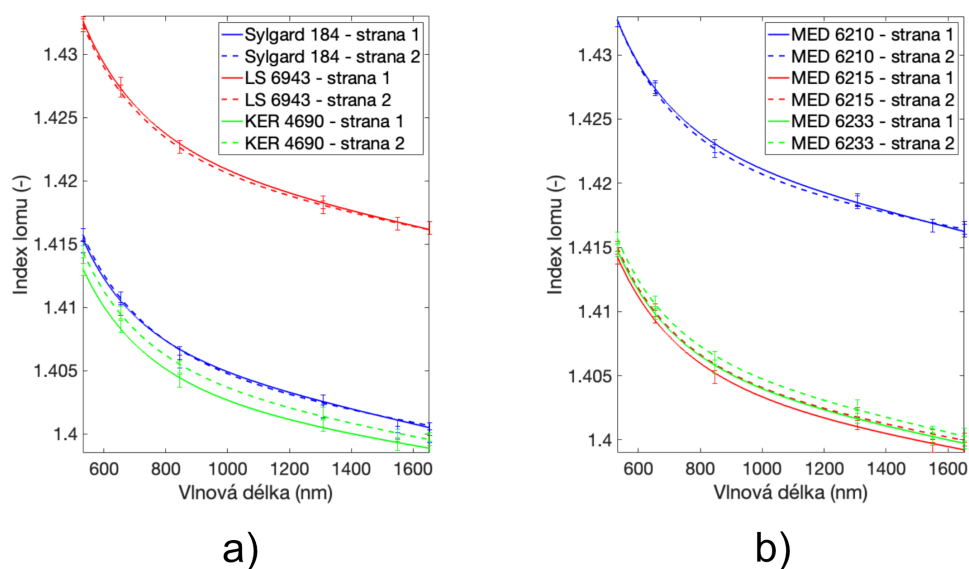
Nejprve jsem na tenkých objemových vzorcích elastomerů určil jejich index lomu, následně jsem měřil transmisní spektra. Z indexu lomu a transmisních spekter jsem zvolil vhodnou kombinaci materiálů jádro-plášť vlnovodu. Poté jsem vytvořil několik kombinací materiálu jádro-plášť a snažil se optimalizovat výrobu vlnovodů na průměr kanálku 250  $\mu\text{m}$ . Dále jsem pokračoval měřením optického útlumu všech vzorků. Nakonec jsem měřil spektrální charakteristiky kanálkových vlnovodů.

### 7.1 Index lomu

Měření indexu lomu jsem prováděl vždy z obou stran vzorku. V tab. 7.1 jsou uvedeny naměřené hodnoty indexu lomu materiálů Sylgard 184, LS 6943, KER 4690, MED 6210, MED 6215 a MED 6233 na vlnových délkách 532,0 nm, 654,2 nm, 846,4 nm, 1308,2 nm, 1549,1 nm a 1652,1 nm. Teplota okolního prostředí byla v rozmezí 22 °C až 24 °C. Na obr. 7.1 je zobrazena závislost indexu lomu na vlnové délce pro vyrobené vzorky z tab. 7.1. Z tab. 7.1 je vidět, že u objemových vzorků materiálů KER 4690, MED 6215 a MED 6233 se lišily hodnoty indexu lomu na horní a spodní straně. Tento rozdíl byl pravděpodobně způsoben nedostatečným promícháním složek A a B.

**Tabulka 7.1** Indexy lomu PDMS materiálů.

Vzorek	Strana	Vlnová délka (nm)					
		532,0	654,2	846,4	1308,2	1549,1	1652,1
Sylgard 184	Strana 1	1,4154	1,4107	1,4064	1,4029	1,4008	1,4006
	Strana 2	1,4157	1,4109	1,4064	1,4027	1,4010	1,4007
LS6943	Strana 1	1,4325	1,4277	1,4227	1,4183	1,4166	1,4163
	Strana 2	1,4323	1,4271	1,4227	1,4179	1,4166	1,4163
KER 4690	Strana 1	1,4130	1,4085	1,4042	1,4007	1,3992	1,3989
	Strana 2	1,4144	1,4096	1,4053	1,4016	1,3999	1,3996
MED6210	Strana 1	1,4327	1,4275	1,4229	1,4187	1,4167	1,4163
	Strana 2	1,4327	1,4273	1,4225	1,4185	1,4167	1,4165
MED6215	Strana 1	1,4142	1,4096	1,4049	1,4013	1,3995	1,3993
	Strana 2	1,4150	1,4101	1,4057	1,4020	1,4003	1,4000
MED6233	Strana 1	1,4148	1,4099	1,4057	1,4018	1,4001	1,3998
	Strana 2	1,4157	1,4107	1,4064	1,4026	1,4006	1,4004

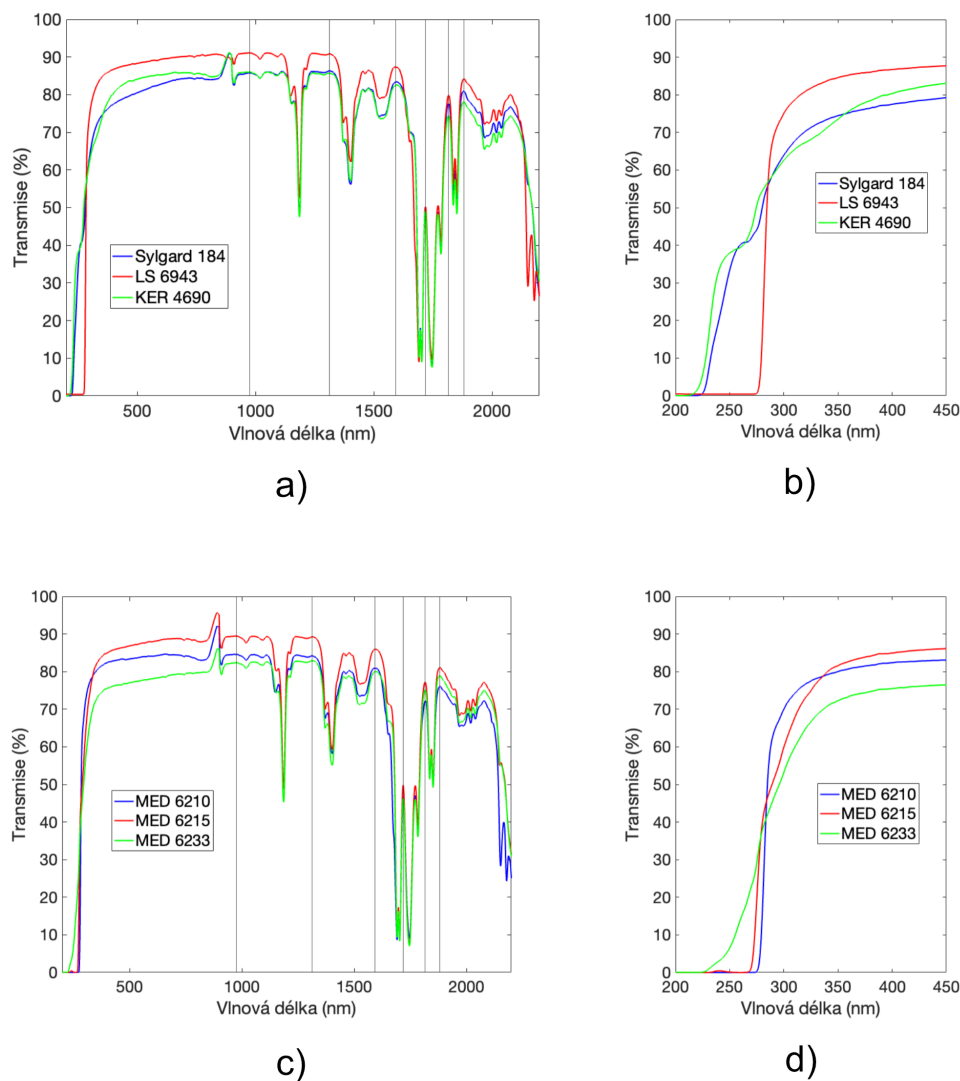
**Obrázek 7.1** Indexy lomu PDMS vzorků a) Sylgard 184, LS 6943 a KER 4690, b) MED 6210, MED 6215 a MED 6233.

Z naměřených hodnot indexu lomu jsem potom určil možné kombinace polymerních materiálů pro realizaci optických vlnodů - plášť/jádro, které jsou uvedeny v tab. 6.1

## 7.2 Transmisní spektra

K měření transmisních spekter jsem používal stejné vzorky jako při měření indexu lomu. Transmisi jsem měřil na přístroji UV 3600 Shimadzu. Protože

docházelo k přepínání lampy a detektorů, bylo potřeba provést korekci naměřených dat. Na obr. 7.2 jsou uvedeny výsledky měření transmisních spekter materiálů PDMS materiálů a je vidět, že maxima jsou na shodných vlnových délkách. Konkrétně se jedná o vlnové délky 975 nm, 1314 nm, 1594 nm, 1718 nm, 1816 nm a 1881 nm (svíslé čáry na obr. 7.2 a, c). Největší rozdíl byl pozorován u transmisních hran jednotlivých PDMS polymerů (obr. 7.2 b, d).



**Obrázek 7.2** Naměřená transmisní spektra PDMS materiálů a), c) v rozmezí vlnových délek 200 nm až 2050 nm, b), d) detail transmisní hrany.

## Absorpční koeficient

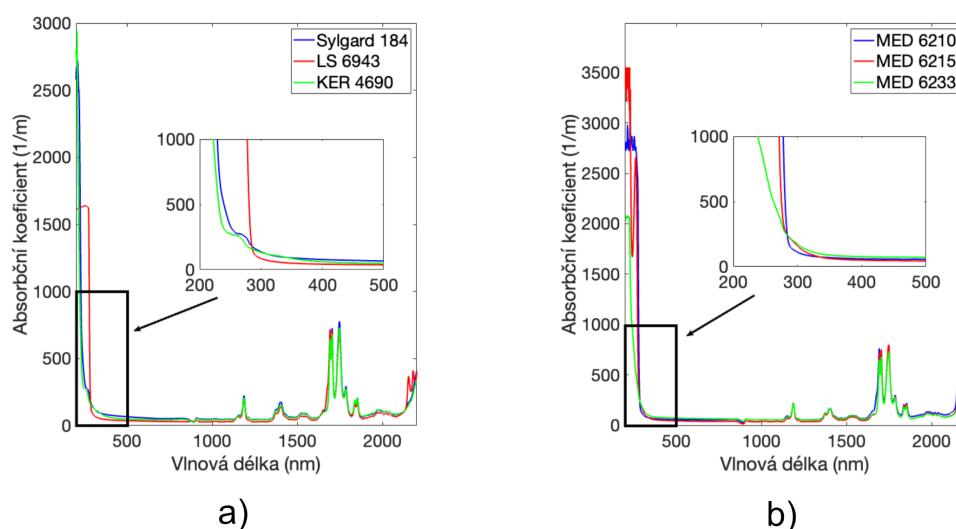
Z dat transmisních spekter jsem určil absorpční koeficient. K tomu jsem využil vzorce [4]:

$$\alpha(\lambda) = -\ln\left(\frac{T(\lambda)}{100}\right) \cdot \frac{1}{t}, \quad (7.1)$$

kde  $\alpha$  je absorpční koeficient,  $T$  je transmise a  $t$  je tloušťka vzorku materiálu. Tloušťku vzorků materiálů jsem určoval pomocí digitálního úchylkoměru a výsledky měření jsou uvedeny v tab. 7.2. Na obr. 7.3 je zobrazena závislost absorpce PDMS materiálů na vlnové délce a z obr. 7.3 je vidět, že absorpční koeficient je u všech používaných materiálů přibližně stejný.

**Tabulka 7.2** Naměřené hodnoty tlouštěk vzorků.

Číslo měření	Vzorek					
	Sylgard 184	LS 6943	KER 4690	MED 6210	MED 6215	MED 6233
	Tloušťka vzorků (mm)					
1	3,302	3,323	3,573	3,214	3,243	3,626
2	3,286	3,388	3,586	3,182	3,239	3,653
3	3,249	3,362	3,496	3,219	3,251	3,665
4	3,208	3,354	3,540	3,209	3,229	3,613
5	3,263	3,376	3,498	3,223	3,247	3,670
6	3,289	3,344	3,524	3,211	3,240	3,642
7	3,255	3,350	3,550	3,201	3,229	3,651
8	3,210	3,318	3,492	3,217	3,248	3,626
9	3,221	3,370	3,571	3,189	3,215	3,674
10	3,256	3,349	3,517	3,229	3,236	3,633
Výsledná hodnota	3,254±0,010	3,353±0,007	3,353±0,011	3,209±0,005	3,238±0,003	3,645±0,007



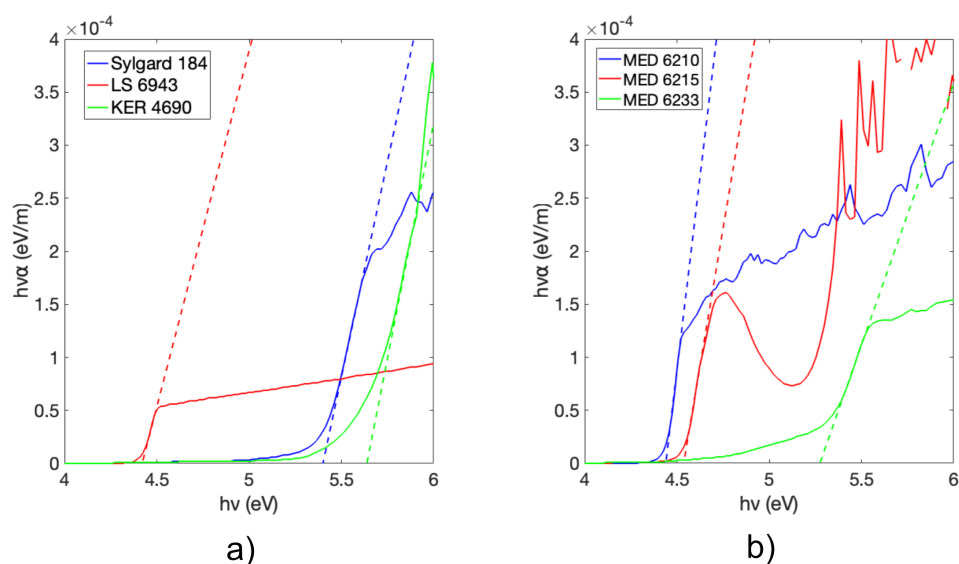
**Obrázek 7.3** Závislost absorpce na vlnové délce materiálů a) Sylgard 184, LS 6943 a KER 4690, b) MED 6210, MED 6215 a MED 6233.



Z důvodu nízké absorpce na vlnových délkách 532 nm, 590 nm, 650 nm, 850 nm a 1310 nm jsou použité materiály vhodné pro přenos signálu na těchto vlnových délkách. Na vlnové délce 1550 nm je absorpce vyšší.

### Šířka zakázaného pásu

Šířku zakázaného pásu  $E_g$  jsem určil protažením přímky v lineární oblasti z grafů na obr. 7.4 (čárkovaně). Hodnota  $E_g$  je určena průsečíkem přímky s osou x [9]. V tab. 7.3 jsou určené hodnoty  $E_g$  měřených materiálů. Z tab. 7.3 a z obr. 7.4 lze pozorovat, že nejmenší šířku zakázaného pásu má materiál LS 6943 a naopak největší šířku zakázaného pásu má materiál KER 4690.



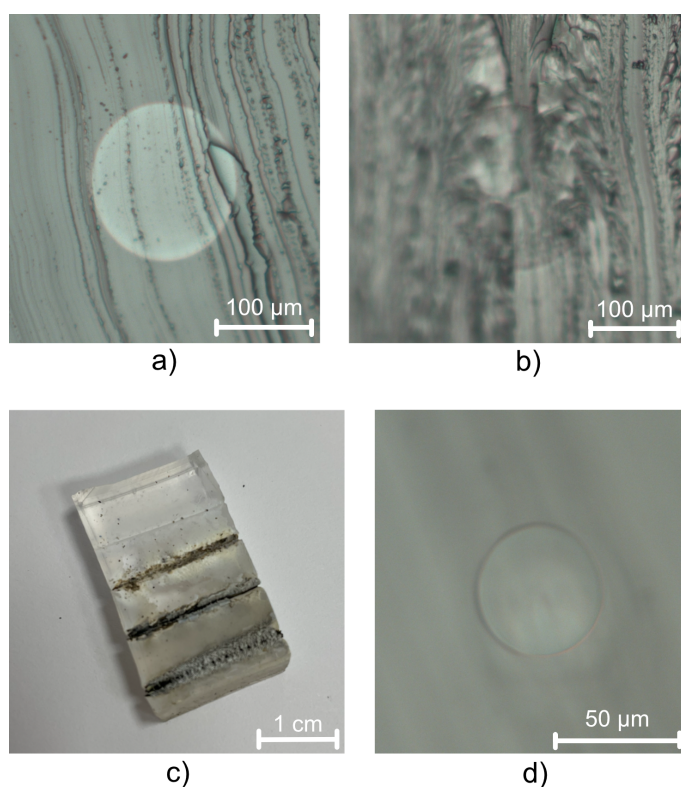
**Obrázek 7.4** Závislost  $h\nu$  na  $h\nu\alpha$  materiálů a) Sylgard 184, LS 6943 a KER 4690, b) MED 6210, MED 6215 a MED 6233.

**Tabulka 7.3** Šířka zakázaného pásu vzorků.

materiál	$E_g$ (eV)
Sylgard 184	5,399
LS 6943	4,421
KER 4690	5,632
MED 6210	4,448
MED 6215	4,541
MED 6233	5,293

### 7.3 Optický útlum

Po vyrobení vzorku jsem na každé straně vyrobil čela vlnovodů, aby bylo možné jednotlivé kanálky navázat na optické vlákno. Snažil jsem se zvolit vhodný postup pro výrobu čel vlnovodů tak, aby byl řez co nejvíce opticky kvalitní. Nejprve jsem zkusil provést řez pomocí skalpelu a žiletky. Pod mikroskopem bylo vidět, že řez pomocí těchto nástrojů není opticky kvalitní. Dále jsem zkusil výrobu čel řezáním CO<sub>2</sub> laserem. CO<sub>2</sub> laser nebyl vhodný pro výrobu čel, protože docházelo ke spálení vzorku v místě řezu a řez nebyl opticky kvalitní. Nakonec jsem vyzkoušel výrobu čel pomocí horkého nože. Podle obr. 7.5 je vidět, že horký nůž má ze všech použitých nástrojů nejlepší vlastnosti pro výrobu čel vlnovodů.



**Obrázek 7.5** Fotografie pro výrobu čel vlnovodů pro vytvoření vstupní a výstupní optické vazby a) řez skalpelem, b) řez žiletkou, c) řez CO<sub>2</sub> laserem, d) řez horkým nožem.

Po zvolení vhodného postupu pro vytvoření opticky kvalitní vazby jsem jednotlivé vzorky přeříznul na délku 6 až 7 cm a na takto dlouhých vzorcích jsem měřil optický útlum pomocí metody dvou délek. Metodu dvou délek jsem aplikoval dvakrát - vzorek jsem postupně dvakrát zkracoval o 2 cm.

Nejprve jsem měřil útlum vzorku s jádrem LS 6943 a pláštěm KER 4690, který měl délku 7 cm. Po navázání optického vlákna na vstup a výstup jednotlivých kanálků jsem změřil výkon na výstupu vlnovodu. Následně jsem vzorek zkrátil o 2 cm, znovu jsem změřil vystupující výkon a pomocí vzorce 4.3 jsem určil optický útlum části vzorku. Poté jsem znovu zkrátil vzorek o 2 cm, opět jsem změřil výstupní výkon a určil optický útlum další části vzorku. V tab. 7.4 jsou uvedeny hodnoty optického útlumu vzorku s jádrem LS 6943 a pláštěm KER 4690.

**Tabulka 7.4** Optický útlum vzorku s jádrem LS 6943 a pláštěm KER 4690.

Kanálek	Útlum na vlnové délce (dB/cm)				
	590 nm	650 nm	850 nm	1310 nm	1550 nm
1	0,73	0,51	0,38	0,33	1,98
2	0,81	0,61	0,39	0,49	2,27
3	0,39	0,45	0,19	0,20	1,96
4	0,40	0,24	0,46	0,09	1,89
5	0,41	0,35	0,51	0,50	1,72

Největší optický útlum je na vlnové délce 1550 nm, což se dalo očekávat podle výsledků měření transmisních spekter.

Dále jsem pokračoval s měřením optického útlumu vzorku vyrobeného z materiálů MED 6210 (jádro) a Sylgard 184 (plášť). Postup měření optického útlumu byl shodný s předchozím vzorkem. Délka vzorku byla v tomto případě 6 cm. V tab. 7.5 je uveden optický útlum měřených kanálků.

**Tabulka 7.5** Optický útlum vzorku s jádrem MED 6210 a pláštěm Sylgard 184.

Kanálek	Útlum na vlnové délce (dB/cm)				
	590 nm	650 nm	850 nm	1310 nm	1550 nm
1	1,37	1,46	1,78	1,57	3,38
2	2,27	2,11	2,10	0,75	4,24
3	1,18	1,00	1,46	1,08	2,65
4	0,79	0,43	0,74	0,94	2,77
5	2,83	2,39	2,60	2,69	4,45

Z tab. 7.5 je vidět, že optický útlum je vyšší než u předchozí kombinace materiálů LS 6943 a KER 4690. Dále lze z tab. 7.5 pozorovat, že u kanálků 1, 2, 3 a 5 je optický útlum vyšší než u kanálku 4. Z toho lze usoudit, že tyto kanálky nebyly vyrobeny dostatečně kvalitně nebo nebyla vyrobena dostatečně kvalitní čela vlnovodů. Optický útlum dosahoval nižších hodnot než 1 dB/cm jen pro kanálek 4.

Další vzorek byl vyroben z materiálů MED 6210 jako jádro a MED 6215

jako plášť a byl dlouhý 6 cm. V tab. 7.6 jsou uvedeny hodnoty optického útlumu kanálků. Z tab. 7.6 je vidět, že hodnoty optického útlumu byly vysoké. Z takto vysokých hodnot optického útlumu je jisté, že vzorek obsahoval defekty z obr. 6.10. Nejvyšší optický útlum byl i u tohoto vzorku na vlnové délce 1550 nm. Optický útlum dosahoval nejnižších hodnot pro kanálek 3.

**Tabulka 7.6** Optický útlum vzorku s jádrem MED 6210 a pláštěm MED 6215.

Kanálek	Útlum na vlnové délce (dB/cm)				
	590 nm	650 nm	850 nm	1310 nm	1550 nm
1	3,63	3,81	4,20	4,52	6,64
2	6,02	4,51	5,74	6,15	7,72
3	1,53	1,28	1,44	1,75	3,21
4	3,66	3,98	4,08	7,97	6,82
5	4,35	4,03	4,75	4,20	9,54

Následně jsem pokračoval s měřením optického útlumu vzorku z materiálů MED 6210 a KER 4690 délky 6 cm. V tab. 7.7 jsou výsledné hodnoty optického útlumu a je z nich vidět, že optický útlum tohoto vzorku byl nejnižší ze všech měřených vzorků. Nejvyššího optického útlumu bylo dosaženo na vlnové délce 1550 nm. Nejnižší hodnoty optického útlumu byly na vlnové délce 590 nm.

**Tabulka 7.7** Optický útlum vzorku s jádrem MED 6210 a pláštěm KER 4690.

Kanálek	Útlum na vlnové délce (dB/cm)				
	590 nm	650 nm	850 nm	1310 nm	1550 nm
1	0,12	0,47	0,58	0,48	1,96
2	0,10	0,33	0,24	0,35	2,06
3	0,03	0,40	0,15	0,44	1,89
4	0,06	0,26	0,15	0,36	1,79
5	0,18	0,38	0,20	0,47	1,81

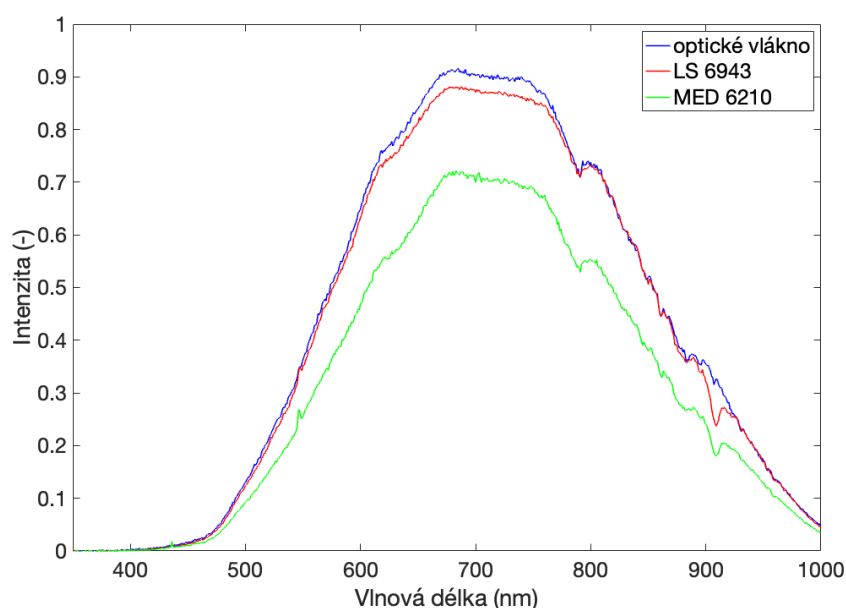
Poslední vzorek délky 6 cm byl vyroben z materiálu MED 6210 jako jádro a materiálu MED 6233 jako plášť. Hodnoty útlumu tohoto vzorku jsou uvedeny v tab. 7.8. Z tab.7.8 je vidět, že kanálek 1 byl vyroben nekvalitně nebo obsahoval defekty a to z důvodu vysokého optického útlumu. U ostatních kanálků byl optický útlum nižší. Nejvyšší optický útlum byl jako v předchozích případech na vlnové délce 1550 nm. Nejnižšího optického útlumu bylo dosaženo na vlnové délce 650 nm.

**Tabulka 7.8** Optický útlum vzorku s jádrem MED 6210 a pláštěm MED 6233.

Kanálék	Útlum na vlnové délce (dB/cm)				
	590 nm	650 nm	850 nm	1310 nm	1550 nm
1	1,74	1,30	1,92	1,61	3,42
2	0,34	0,21	0,75	0,35	2,49
3	0,27	0,16	0,49	0,32	1,88
4	0,52	0,16	0,82	0,36	1,84
5	0,32	0,22	0,54	0,34	1,77

## 7.4 Spektrální charakteristiky

K měření spektrálních charakteristik jsem použil širokopásmový zdroj světla THORLABS SLS201L/M. Nejprve jsem měřil spektrální charakteristiky optického vlákna s průměrem 200  $\mu\text{m}$ . Dále jsem změřil spektrální charakteristiky vzorku s jádrem z materiálu LS 6943 a průměrem přibližně 250  $\mu\text{m}$ . Nakonec jsem změřil spektrální charakteristiky vzorku s jádrem MED 6210. Měření jsem prováděl pomocí spektrálního analyzátoru Ocean Insight USB 650. Na obr. 7.6 jsou zobrazeny změřené spektrální charakteristiky.

**Obrázek 7.6** Změřené spektrální charakteristiky optického vlákna, kanálových vlnodů s jádrem LS 6943 a MED 6210.



## Kapitola 8

### Závěr

V bakalářské práci jsem se zabýval výrobou optických polymerních kanálkových vlnodů pomocí technologie mikrodávkování. Pro výrobu jsem používal biokompatibilní elastomery PDMS. Nejprve jsem vyrobil objemové vzorky, kde tyto vzorky sloužily k měření indexu lomu a transmisních spekter. Z naměřených hodnot transmisních spekter jsem určil závislost absorpce na vlnové délce a šířku zakázaného pásu těchto polymerů.

Dále jsem se snažil vyrobit optické kanálkové vlnovody s průměrem jádra 250  $\mu\text{m}$ . Postupně jsem vytvořil vlnovody z kombinace materiálů LS 6943(jádro)-KER 4690(plášť), MED 6210(jádro)-Sylgard 184(plášť), MED 6210(jádro)-KER 4690(plášť), MED 6210(jádro)-MED 6215(plášť) a MED 6210(jádro)-MED 6233(plášť). Průměry jader vlnodů se pohybovaly v rozmezí 210,1  $\mu\text{m}$  až 321,4  $\mu\text{m}$ . Dále jsem testoval různé nástroje pro výrobu čel vlnodů. Vyzkoušel jsem nástroje jako skalpel, žiletka, CO<sub>2</sub> laser a horký nůž. Nejvhodnější z nich byl horký nůž, protože řez tohoto nástroje byl nejčistší ze všech použitých nástrojů.

Také jsem prováděl měření optického útlumu výše uvedených vlnodů. Pro kombinaci polymerů MED 6210(jádro)-KER 4690(plášť) se pohybovala hodnota optického útlumu od 0,03 dB/cm do 0,58 dB/cm na vlnových délkách 590 nm, 650 nm, 850 nm a 1310 nm. U ostatních vlnodů jsem naměřil optický útlum od 0,16 dB/cm do 7,97 dB/cm na stejných vlnových délkách. Na vlnové délce 1550 nm byl optický útlum všech vyrobených vzorků nejvyšší. Při výrobě vlnodů vznikaly různé defekty, které měli za následek vysoký optický útlum některých vlnodů. Provedl jsem měření spektrálních charakteristik polymerů LS 6943 a MED 6210 pro spektrální rozsah od 350 nm do 1000 nm a z měření vyplunulo, že spektrální charakteristiky těchto dvou polymerů jsou podobné.







## Literatura

- [1] NIZAMOGLU, Sedat; C. HATHER, Malte; HUMAR, Matjaž; CHOI, Myunghwan; KIM, Seonghoon et al. Bioabsorbable polymer optical waveguides for deep-tissue photomedicine. Online. Nature communications. 2016, roč. 7, č. 10374. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/ncomms10374>. [cit. 2024-05-04].
- [2] FARUK RASEL, Omar a ISHIGURE, Takaaki. Circular core single-mode 3-dimensional crossover polymer waveguides fabricated with the Mosquito method. Online. Optics Express. 2019, roč. 17, č. 22, s. 32465-32479. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1364/OE.27.032465>. [cit. 2024-05-04].
- [3] CHLUPATÝ, Václav. Příprava a měření vlastností optických polymerních vlnodů pro fotonické aplikace. Diplomová práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2021.
- [4] LATEČKA, Matěj. Polymerní mnohavidové optické kanálkové vlnovody a jejich výroba novými technologiemi. Bakalářská práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2022.
- [5] NOVOTNÝ, Karel. Optická komunikační technika. 3. vydání. Skripta ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03920-5.
- [6] HEINRICH, Andreas; RANK, Manuel; MAILLARD, Phillipe; SUCKOW, Anne; BAUCKHAGE, Yannick et al. Additive manufacturing of optical components. Online. Advanced Optical Technologies. 2016, roč. 5, č. 4, s. 293-301. Dostupné z: <https://doi.org/10.1515/aot-2016-0021>. [cit. 2024-05-10].
- [7] PRAJZLER, Václav; NERUDA, Miloš; JAŠEK, Petr a NEKVINDOVÁ, Pavla. The properties of free-standing epoxy polymer multi-mode optical waveguides. Online. Microsystem Technologies. 2018, č. 25, s. 257-264. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00542-018-3960-9>. [cit. 2024-05-10].

- [8] PRAJZLER, Vaclav; CHLUPATY, Vaclav; MARES, David; BEDEMO BEYENE, Agaje a SU, Wei-Nien. Inorganic–organic hybrid polymer multi-mode optical channel waveguides. Online. *Microsystem Technologies*. 2023, č. 29, s. 1769-1781. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00542-023-05567-x>. [cit. 2024-05-10].
- [9] DE BEUCKELAER, Siegfried. Studium vlastností optických polymerních materiálů a možnosti sterilizace pomocí gama záření. Bakalářská práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2022.
- [10] HYBŠ, Petr. Flexibilní optické polymerní vlnovody pro přenos dat mezi elektrooptickými moduly. Diplomová práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2015.
- [11] FENG, Jun; ZHENG, Yijun; JIANG, Qiyang; K. WŁODARCZYK-BIEGUN, Małgorzata; PEARSON, Samuel et al. Elastomeric Optical Waveguides by Extrusion Printing. Online. 2022. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/admt.202101539>. [cit. 2024-03-18].
- [12] Sylgard 184 datasheet. Online. Dostupné z: <https://cz.farnell.com/dowsil-formerly-dow-corning/sylgard-184-1-1kg/elastomer-clear-184-1-1kg/dp/101697>. [cit. 2023-10-19].
- [13] PRAJZLER, Václav; CHLUPATÝ, Václav a NERUDA, Miloš. Circular large core optical elastomer waveguides fabricated by using direct micro-dispense fabrication method. Online. *Optik*. 2022, roč. 250, č. 168348. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.168348>. [cit. 2024-05-04].
- [14] LS 6943 datasheet. Online. Dostupné z: <https://www.silicone-polymers.co.uk/pdfMaster/LS-6943.pdf>. [cit. 2023-10-20].
- [15] KER 4690 datasheet. Online. Dostupné z: <https://www.microresist.de/en/produkt/uv-curable-liquid-silicone-rubber-uv-pdms/>. [cit. 2024-05-02].
- [16] MED 6210 datasheet. Online. Dostupné z: <https://nusil.avantorsciences.com/nusil/en/product/MED-6210/optically-clear-low-viscosity-silicone-elastomer>. [cit. 2023-11-21].
- [17] MED 6215 datasheet. Online. Dostupné z: <https://nusil.avantorsciences.com/nusil/en/product/MED-6215/optically-clear-low-viscosity-silicone-elastomer>. [cit. 2023-11-21].
- [18] MED 6233 datasheet. Online. Dostupné z: <https://nusil.avantorsciences.com/nusil/en/product/MED-6233/optically-clear-low-viscosity-silicone-elastomer>. [cit. 2023-11-21].