



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromagnetického pole

Příprava a měření vlastností optických polymerních vlnodů pro fotonické aplikace

**Fabrication and measurement of properties of optical polymer waveguides for
photonic applications**

Diplomová práce

Václav Chlupatý

Studijní program: Elektronika a komunikace
Studijní obor: Fotonika

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

Praha 2021



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Chlupatý** Jméno: **Václav** Osobní číslo: **460516**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Specializace: **Fotonika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Příprava a měření vlastností optických polymerních vlnodů pro fotonické aplikace

Název diplomové práce anglicky:

Fabrication and measurement properties of optical polymer waveguides for photonic applications

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s teoretickými principy vedení světla v planárních optických vlnovodech.
- 2) Seznamte se s novými technologiemi a optickými polymerními materiály používanými pro fotonické aplikace.
- 3) Realizujte zařízení pro výrobu 3D fotonických struktur pomocí mikrodávkače.
- 4) Otestujte vlastnosti dostupných polymerních materiálů.
- 5) Proveďte depoziční testy pro výrobu polymerních fotonických struktur pomocí mikrodávkače.
- 6) Proveďte charakterizaci připravených vzorků.

Seznam doporučené literatury:

1. K. Novotný: Optická telekomunikační technika, ČVUT 1998, skripta.
2. J. C. Dingeldein, K. A. Walczak, et al.: Process characterization for direct dispense fabrication of polymer optical multi-mode waveguides. J. Micromech. Microeng. 23 (2013) 075015 (9pp). doi:10.1088/0960-1317/23/7/075015
3. K. Soma, T. Ishigure, Fabrication of a Graded-Index Circular-Core Polymer Parallel Optical Waveguide Using a Microdispenser for a High-Density Optical Printed Circuit Board. IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, Volume: 19, Issue: 2, Article Number: 3600310, Published: 1 MAR-APR 2013

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

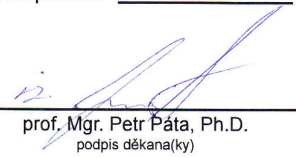
Datum zadání diplomové práce: **26.01.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2022**


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


podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

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

V Praze dne 14.5.2021

.....

Václav Chlupatý

Především bych rád poděkoval vedoucímu práce, doc. Ing. Václavu Prajzlerovi, Ph.D., za cenné rady a připomínky k práci a za čas, který mi věnoval při konzultacích a realizaci praktické části práce. Dále děkuji prof. Ing. Heleně Jelínkové, DrSc. za umožnění měření transmisních spekter a Ing. Miloši Nerudovi za pomoc s měřením optického útlumu.

Název práce: Příprava a měření vlastností optických polymerních vlnovodů pro fotonické aplikace

Autor: Bc. Václav Chlupatý

Katedra: Katedra elektromagnetického pole

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

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

Abstrakt: Diplomová práce se zabývá přípravou optických polymerních planárních vlnovodů metodou mikrodávkování. V první části práce jsou shrnuty dosavadní výsledky publikací s touto problematikou. Následně je navrženo a sestaveno pracoviště pro nanášení optických vlnovodů pomocí mikrodávkače. Jsou otestovány optické vlastnosti dostupných optických elastomerů polydimethylsiloxane (PDMS) a jsou zvoleny materiály Sylgard 184 (plášť) a LS-6943 (jádro) pro přípravu kanálkových optických vlnovodů. S těmito materiály je následně provedena série depozičních testů, při kterých je optimalizován proces nanášení vlnovodných jader o průměru 50 a 500 μm . S optimalizovanými depozičními procesy je připravena sada vzorků s vlnovodnými kanálky, které jsou následně vyhodnocovány z hlediska měrného optického útlumu a kompatibility s optickými vlákny. Připravené vlnovody s jádrem o průměru 50 μm mají měrné optické útlumy pohybující se nad hranicí 1 dB/cm na vlnových délkách 650; 850 a 1300 nm. Vlnovody mají podobné rozložení vidového pole jako mnohovodivé optické vlákno s jádrem o průměru 50 μm . Nanesené vlnovodné kanálky o průměru 500 μm mají průměrný měrný útlum 0,28; 0,34 a 0,42 dB/cm na vlnových délkách 650; 850 a 1300 nm. Rozložení vidového pole těchto vlnovodů je podobné jako má optické vlákno s jádrem o průměru 500 μm . Výsledkem diplomové práce je realizované pracoviště využívající mikrodávkač, který umožní nanášet optické polymerní vlnovody s velkým rozměrem vlnovodného jádra, které je možno použít pro senzorové aplikace v širokém rozsahu vlnových délek od viditelného spektra po blízkou infračervenou oblast.

Klíčová slova: optické planární vlnovody, mikrodávkování optických polymerů, mosquito method

Název práce: Fabrication and measurement of properties of optical polymer waveguides for photonic applications

Autor: Bc. Václav Chlupatý

Katedra: Katedra elektromagnetického pole

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

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

Abstract: The thesis deals with fabrication of optical polymer planar waveguides using microdispensing method. The first part of the thesis summarizes the results of previous publications dealing with this topic. Subsequently, a workplace for fabrication of optical waveguides using a micro-dispenser is designed and assembled. Optical properties of available polydimethylsiloxane (PDMS) optical elastomers are measured and materials Sylgard 184 (cladding) and LS-6943 (core) are selected for the preparation of channel optical waveguides. A series of deposition tests is then performed using the selected materials, during which the deposition process is optimized for optical waveguides with 50 and 500 μm core diameter. With the optimized deposition processes, a set of samples with channel waveguides is prepared, which are subsequently evaluated in terms of specific optical attenuation and compatibility with optical fibers. The prepared waveguides with a core diameter of 50 μm have specific optical attenuations above 1 dB/cm at wavelengths 650; 850 and 1300 nm. The waveguides have a similar mode field distribution as a multimode optical fiber with a core diameter of 50 μm . The deposited waveguide channels with a core diameter of 500 μm have an average specific attenuation of 0.28; 0.34 and 0.42 dB/cm at wavelengths 650; 850 and 1300 nm respectively. Mode field distribution of these waveguides is similar to that of an optical fiber with a core diameter of 500 μm . The result of the thesis is a realized workplace with a microdispenser, which allows the application of optical polymer waveguides with a large waveguide core size, which can be used for sensor applications in a wide range of wavelengths from visible to near infrared.

Key words: optical planar waveguides, microdispensing of optical polymers, mosquito method

Obsah

1	Úvod	1
2	Planární optické vlnovody	2
3	Výroba optických planárních vlnovodů	4
4	Metody měření	7
4.1	Index lomu	7
4.2	Transmisní spektra	8
4.3	Optická kontrola vlnovodů	8
4.4	Optický útlum	8
4.5	Rozložení vidového pole	10
5	Návrh zařízení pro výrobu optických polymerních vlnovodů	11
5.1	Mechanické prvky	12
5.2	Elektronika	12
5.3	Firmware a ovládání	14
6	Optické vlastnosti materiálů	16
6.1	Dostupné materiály	16
6.2	Index lomu	17
6.3	Transmisní spektra	19
7	Depoziční testy	21
7.1	Postup přípravy vzorků	21
7.2	Závislost průměru a kvality jádra na depozičních parametrech	22
7.3	Optimalizace výrobního procesu	25
7.4	Příprava optimalizovaných vzorků	27
8	Charakterizace připravených vlnovodů	29
8.1	Charakterizace 50 μm vlnovodů	29
8.2	Charakterizace 500 μm vlnovodů	36
9	Závěr	40
	Literatura	41
A	Seznam digitálních příloh	43

B Zkonstruovaný přístroj	44
C Naměření hodnoty optického výkonu	47

1. Úvod

Optická vlákna slouží pro digitální telekomunikační účely už dlouhou dobu. Jejich přednosti, jako je velká šířka pásma, nízký optický útlum a nemožnost rušení, z nich dělají ideální médium pro přenos dat na velké vzdálenosti. Jednovidová optická vlákna tvoří páteřní sítě, které jsou schopny přenášet ohromná množství dat přes celé kontinenty. Při přenosech dat na kratší vzdálenost se však k využití optických vlnovodů přistupovalo až později. Vzdálenosti stovek metrů jsou již nějakou dobu pokrývány vícevidovými optickými vlákny, ale při komunikaci na krátké vzdálenosti řádově desítek centimetrů jsou stále preferovány metalické spoje. Rostoucí požadavky na datovou propustnost a rozvoj v této oblasti však naznačují, že v blízké budoucnosti budou metalická spojení nahrazena optickým přenosem [1].

Vlnovod určený pro přenos signálu na takto krátké vzdálenosti má určitá specifika oproti klasickým optickým vláknům. Důležitý je požadavek na cenu, jednak samotného vlnovodu, ale i celého systému. Takové vlnovody jsou tedy vícevidové, což zjednodušuje výrobní metody a kompletaci. Při přenosu na krátkou vzdálenost je požadavek na nízký optický útlum méně důležitý, je tedy možné využívat různé polymerní materiály, které mají vyšší materiálovou absorpci než křemenné sklo. Přicházejí tak na řadu nové výrobní metody, které umožňují levnou výrobu velkého množství dostatečně kvalitních vlnovodů.

Polymerní optické vlnovody jsou také využívány k navázání optického signálu do optických vláken [1]. Je tak možné integrovat optický vysílač do čipu a signál přivést k optickým vláknům vedoucím mimo přístroj pomocí těchto vlnovodů, čímž se snižuje množství metalických vedení na desce plošných spojů. Podobně mohou být složitější optické prvky, jako jsou rozbočnice nebo multiplexory, vyráběny jako polymerní struktury a sloužit pro aplikace integrované optiky a fotoniky [2].

Takovéto polymerní vlnovodné struktury jsou běžně vyráběny technologickými metodami kompatibilními s technologiemi výroby mikroelektroniky. Jednou z možností je výroba pomocí litografie, kdy je vytvořena struktura buď přímo z materiálu vlnovodu, nebo jako forma, ze které se pak struktura přenáší do samotných materiálů. Takto vyrobenou formou lze masově vyrábět vlnovody například metodami Roll-to-Plate nebo Roll-to-Roll [3].

V této práci se věnuji nové metodě výroby polymerních optických vlnovodů pomocí mikrodávkování. Oproti litografickým metodám má proces méně technologických kroků a je možné využívat širší spektrum materiálů. Je také možné výrobní proces snadno upravit pro přípravu specifických struktur bez výroby nových litografických masek. Výhodu může také představovat kulatý průřez vzniklých vlnovodů, který má oproti čtvercovým vlnovodům vyrobeným litografií lepší vazební vlastnosti při spojení s optickými vlákny.

2. Planární optické vlnovody

Optické vlnovody rozdělujeme na jednovidové a mnohovidové. Při návrhu jednovidových optických vlnovodů vycházíme z Maxwellových rovnic a počítáme rozložení elektromagnetického pole ve struktuře v závislosti na jejích rozměrech, indexech lomů použitých materiálů a provozní vlnové délce. Když ale navrhujeme mnohovidový optický vlnovod, můžeme použít jednodušší geometrickou optiku a zajímá nás jen index lomu, respektive kontrast indexů lomu materiálů jádra a pláště. Průměr vlnovodu volíme podle aplikace. V této práci se zabývám pouze mnohovidovými vlnovody, proto se nevěnuji návrhu vlnovodů na základě šíření záření. Index lomu je daný použitými materiály a průměr vlnovodů vychází ze standardů pro zvolené aplikace.

Známe vlnovody se skokovou a s gradientní změnou indexu lomu [4]. Ve vlnovodech se skokovou změnou je materiál jádra jasně oddělen od materiálu pláště a na jejich rozhraní dochází k totálnímu odrazu vedeného světla. Ve vlnovodech s gradientní změnou indexu lomu je přechod mezi pláštěm a jádrem postupný a index lomu materiálu plynule roste. Díky tomu dochází k ohybu paprsku směrem do vlnovodné struktury a ve výsledku se paprsek šíří po sinusové trajektorii.

Při přenosu velkého množství dat na velké vzdálenosti v páteřních sítích jsou využívány jednovidové vláknové optické vlnovody z křemičitého skla. Tyto vlnovody mají průměr jádra obvykle kolem 9 μm . Hlavním parametrem u nich však je průměr vidového pole (MFD, mode field diameter), který určuje velikost vidu, jelikož ten se částečně šíří i v plášti. Při navazování vláken tak porovnáváme tento parametr, ne průměr jádra. Jednovidové vlnovody mají výhody ve formě nízkého útlumu a malé disperze, která signál zkresluje. Je pro ně však potřeba používat kvalitní a drahé optické zdroje (lasery). Na kratších trasách (stovky metrů) jsou proto často využívána mnohovidová optická vlákna z křemičitého skla. Pro ty je možné využít levnější laserové zdroje nebo i LED zdroje díky většímu průměru jádra, do kterého se záření snáze naváže. Standardy definují průměr jádra těchto vláken jako 50 nebo 62,5 μm při průměru pláště 125 μm . Při komunikaci na krátké vzdálenosti do 100 m jsou používána také plastová optická vlákna (POF - Plastic Optical Fiber) z PMMA (polymethylmethakrylát). Tato vlákna se používají pro přenos dat na vlnových délkách ve viditelném spektru okolo 650 nm, lze pro ně využívat velice jednoduché LED zdroje díky velkému průměru jádra (běžné průměry jsou 750 až 1000 μm).

V jednovidových vláknech jsou používané vlnové délky 1310 nm, kde má křemičité sklo nejnižší materiálovou disperzi, a 1550 nm kde má nejnižší materiálovou absorpci. V mnohovidových vláknech jsou běžné vlnové délky 1300 a 850 nm a v plastových optických vláknech, která mají jádro optického vlnovodu vyrobenou z polymethylmethakrylátu (PMMA), je obvykle využíváno viditelné světlo na 650 nm.

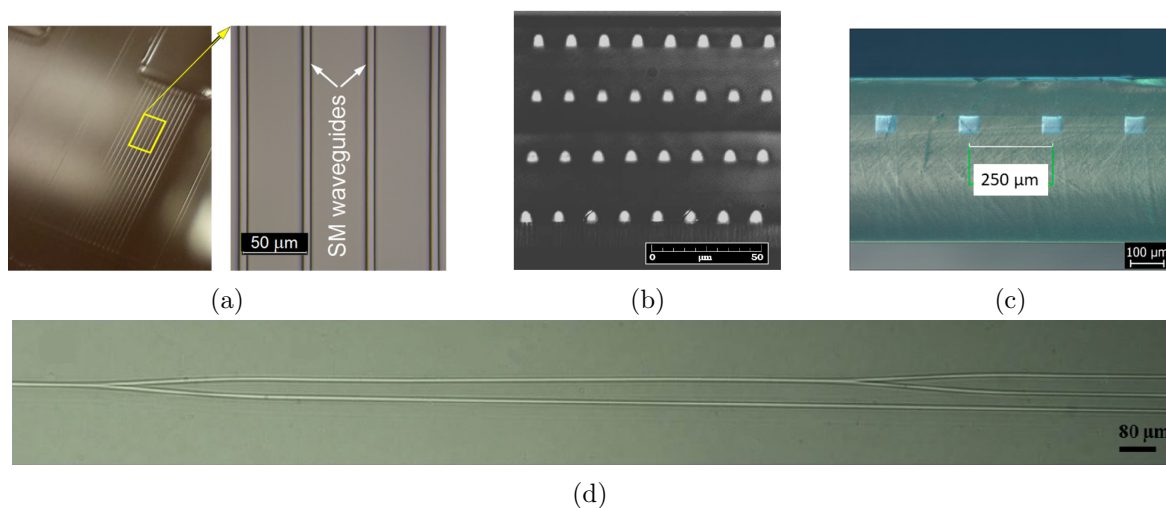
Při komunikaci na velmi krátké vzdálenosti (jednotky až desítky cm) jsou využívány planární optické vlnovody. Je možné je osazovat na desky plošných spojů a vyrobit velké množství kanálků (jader) v jednom bloku pláště [5]. Takovéto vlnovody přenášejí data mezi jednotlivými deskami plošných spojů a čipy tam, kde je málo místa na metalická vedení, je potřeba větší datová propustnost nebo je příliš velké elektromagnetické rušení. V případě těchto vlnovodů je možné

volit velikost jádra nezávisle na klasických optických vláknech, běžné jsou mnohavidové vlnovody s velikostí kolem 50 μm (standard OM2, OM3, OM4 a OM5). Vzhledem ke krátkým trasám se měrný optický útlum optických planárních vlnovodů může pohybovat v řádu desetin dB/cm, v praxi by měl být nižší než 1 dB/cm pro pracovní vlnové délky.

Polymerní optické vlnovody jsou obvykle vyráběny litografickými metodami z UV světlem vytvrzovaných fotopolymerů [3], [2]. Takto mohou být vyráběny jednovidové (obrázek 2.1a) i mnohovidové (obrázek 2.1c) optické vlnovody, také je možné výrobní proces opakovat a vytvářet více vrstev s vlnovodnými kanálky (obrázek 2.1c). Jsou dostupné materiály navržené právě pro výrobu optických vlnovodů s nízkým měrným útlumem v požadovaném komunikačním okně. Výrobci často dodávají dva podobné materiály s mírně odlišným indexem lomu, určené k výrobě jádra a pláště vlnovodu.

Litografickou výrobou však lze dosáhnout pouze vlnovodů se čtvercovým průřezem a se skokovou změnou indexu lomu. Při samostatném použití vlnovodu na krátkou vzdálenost při propojení vysílače a přijímače na průřezu jádra nezáleží. Polymerní vlnovody jsou však také využívány k realizaci složitějších prvků, jako jsou rozbočnice (viz obrázek 2.1d) na trasách s optickými vlákny [2]. Při těchto použitích pak mohou vlnovody s čtvercovým průřezem jádra způsobovat vyšší vazební ztráty.

Při výrobě integrovaných optických zdrojů a detektorů jsou využívány křemíkové vlnovody (SOI, silicon-on-insulator), vyráběné stejnými kroky jako polovodičové součástky [6]. Ty vedou světlo ze zdroje, ale vzhledem k jejich vysokému útlumu a dalším vlastnostem (cena, mechanické vlastnosti) se nehodí na optické trasy. Běžně tak křemíkové vlnovody vedou signál na hranici čipu, kde na ně navazují planární polymerní vlnovody, které vedou mezi deskami při krátkých trasách, nebo na které pak navazují optická vlákna pro komunikaci na delší vzdálenosti [1].

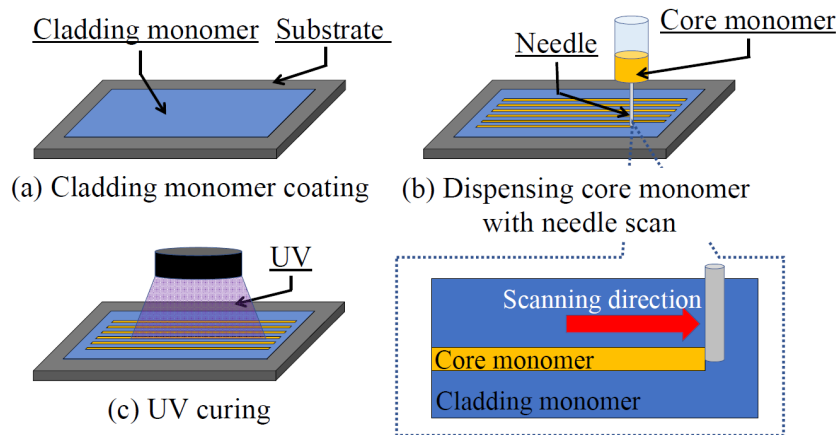


Obrázek 2.1: Ukázky litograficky vyrobených polymerních vlnovodů, (a) pohled shora na jednovidové vlnovody [1], (b) pohled v řezu na matici jednovidových vlnovodů [5], (c) pohled v řezu na mnohovidové vlnovody [3], (d) pohled shora na mnohovidovou rozbočnici [2].

3. Výroba optických planárních vlnovodů

Jednou z nových metod výroby polymerních vlnovodů je nanášení pomocí mikrodávkače. Metoda je označována jako Mosquito method [7]. Toto označení vzniklo na Keio Univerzitě, v Yokohamě v Japonsku v laboratoři prof. Takaaki Ishigure. Spočívá v nanášení kapalného materiálu jádra do kapalného materiálu substrátu a jejich společném vytvrzení. Jsou využívány materiály, jejichž vlastnosti jsou optimalizované na výrobu optických vlnovodů. Jedná se o monomery, které při osvětlení UV zářením polymerizují a struktura nanosená v kapalném skupenství je tak zachována. Materiály určené na jádro i plášť jsou často podobné, pouze je modifikována hodnota indexu lomu.

Na substrát je nanášena tenká vrstva kapalného monomeru pláště. Polohovací robot (CNC router) pohybuje s tenkou jehlou, skrz kterou je dávkován materiál jádra, těsně pod povrchem materiálu pláště. Monomer jádra vytéká z jehly a zanechává tenkou stopu. Když jsou použity podobné materiály, které jsou mísitelné, můžou před vytvrzením difundovat a vzniká tak vlnovod s gradientní změnou indexu lomu. Na obrázku 3.1 je postup ilustrován [7].



Obrázek 3.1: Postup při výrobě vlnovodů pomocí mikrodávkače [7].

Jiné metody používané pro výrobu planárních optických vlnovodů, jako je fotolitografie nebo nanoimprinting, vyrábějí vlnovody se čtvercovým průřezem jádra. Oproti tomu výrobou pomocí mikrodávkače lze vyrobit vlnovody kruhového průřezu, což zlepšuje možnosti navazování do klasických optických vláken. Je také možné vyrábět trojrozměrné struktury v jednom technologickém kroku. Nastavením parametrů procesu lze upravit tloušťku vyráběného vlnovodu a vyrábět tak jednovidové i mnohovidové vlnovody, nebo složitější fotonické struktury, jako jsou vazební členy a multiplexory.

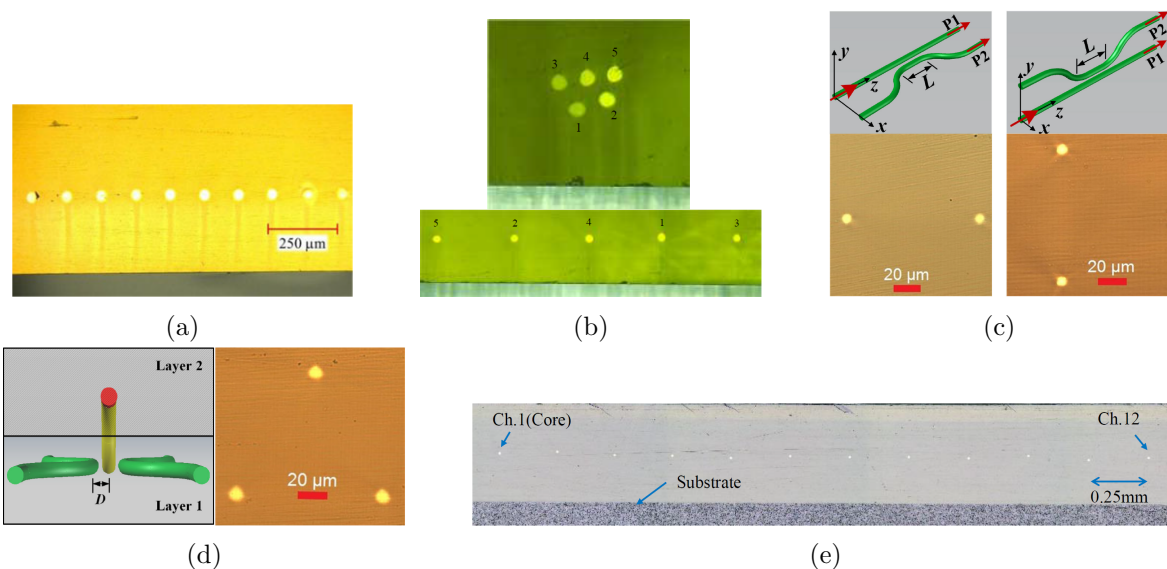
Výsledek procesu depozice materiálu závisí na mnoha parametrech, které ovlivňují průměr naneseného vlnovodu, homogenitu (kolísání průměru) a tvar jádra v průřezu. Mezi tyto para-

metry patří hlavně rychlost posunu nanášecí jehly, tlak materiálu v jehle a průměr jehly. Záleží také na vlastnostech obou materiálů, především na viskozitě materiálu jádra.

V [7] je představen mnohovidový optický vlnovod s gradientní změnou indexu lomu z materiálů FX-W712 (jádro) a FX-W713 (plášť). Autoři vytvořili vlnovody s průměrem $40\ \mu\text{m}$ s roztečí kanálek 250 a $125\ \mu\text{m}$ (obrázek 3.2a). Vzhledem k absorpci použitých materiálů měl vlnovod nejlepší přenosové vlastnosti na nízkých vlnových délkách, s útlumem $0,03\ \text{dB/cm}$ na vlnové délce $850\ \text{nm}$ u nejlepšího vzorku. Srovnání s vlnovody se čtvercovým průřezem vyrobeným ze stejných materiálů ukázalo, že útlum vlnovodů vyrobených pomocí mikrodávkovače je o něco nižší.

Pro dávkování materiálu jádra sloužil stlačený vzduch o kontrolovaném tlaku, který materiál vytlačoval ze zásobníku do jehly. Autoři testovali nanášení pomocí několika jehel a dospěli k závěru, že opakovatelnost se zlepšuje s použitím menší jehly a rychlejšího posunu. Průměr naneseného jádra pak závisel na tlaku vzduchu, průměru jehly a rychlosti pohybu. Při nižší rychlosti docházelo k deformaci jádra, které pak mělo oválný tvar a zároveň docházelo ke změnám průměru. Kolísání průměru jádra odhadli na $\pm 5\%$. Při použití jehly s vnitřním průměrem $100\ \mu\text{m}$ byli schopni snížit průměr jádra až na $16,5\ \mu\text{m}$.

Pro dosažení maximální datové propustnosti je potřeba zvýšit počet vlnovodných kanálek, a to zmenšením jejich rozestupu (pitch) nebo nanesením několika vrstev jader do 3D struktury. Ve článku [8] autoři stejným procesem jako v [7] dosáhli vlnovodných jader v různých hloubkách substrátu úpravou výšky dávkovací jehly. Díky tomu byli schopni nanést jádra ve 3D struktuře, kdy jednotlivé kanálky vedly pod jiným úhlem tak, že na jedné straně vlnovodu byly ve struktuře nad sebou a na druhé straně ležely vedle sebe (obrázek 3.2b). Zároveň dosáhli snížení vzdálenosti jednotlivých kanálek, kdy byl při průměru jádra $25\ \mu\text{m}$ rozstup $40\ \mu\text{m}$, i když byla pro nanášení použita jehla o vnějším průměru $310\ \mu\text{m}$. To bylo umožněno tím, že jádro se po nanášení ponořilo hlouběji do materiálu pláště a následující přejezdy jehly tak na něj neměly zásadní vliv.



Obrázek 3.2: Ukázky nanesených optických vlnovodů, (a) $40\ \mu\text{m}$ mnohovidové vlnovody [7], (b) obě strany 3D nanesených vlnovodů (fan-out struktura) [8], (c) dvoukanálové vazební členy [9], (d) tříkanálový vazební člen [9], (e) jednovidové vlnovody [10].

V publikaci [10] autoři navázali na předešlé publikované výsledky s mnohovidovými vlnovody. Věnují se výrobě jednovidového vlnovodu s gradientní změnou indexu lomu (obrázek 3.2e),

který by bylo možné dobře navázat na standardní telekomunikační optické vlákno a byl by tak použitelný pro vyvedení optického signálu ze zdroje ke konektoru. Problémem byl oválný průřez vyrobených vlnodů, což zvyšovalo ztráty při navazování na optické vlákno. Autoři zjistili, že při použití jehly se zúženou špičkou nebo nakloněné jehly lze dosáhnout kruhových průřezů. Útlum vyrobených vlnodů byl 0,3 dB/cm na vlnové délce 1310 nm a vazební útlum 0,12 dB při vazbě na jednovidové vlákno.

Díky tomu, že je mikrodávkoč schopný pohybu ve třech rozměrech, je možné jím vyrábět i složité třírozměrné struktury. Příklad výroby takovéto struktury je v uveden [9]. Zde autoři navrhli a připravili jednovidový vazební člen z materiálů OrmoCore a OrmoClad, které jsou vhodné pro použití na vlnové délce 1550 nm (obrázek 3.2c). Struktura byla nanášena rovnoběžně i kolmo na substrát, což ilustruje možnost přípravy vazebních členů s více vlnovody s několika vazbami v různých úrovních. Na základě výsledků byl připraven vazební člen se třemi vlnovody (obrázek 3.2d). Vazební poměr ve struktuře je však silně závislý na přesnosti průměru a vzdáleností nanášených jader a ve článku nevycházel příliš stabilně (0,55 a 0,66 pro dva připravené horizontální vazební členy, 0,13 a 0,48 pro vertikální vazební členy, 58:23:19 pro vazební člen se třemi vlnovody).

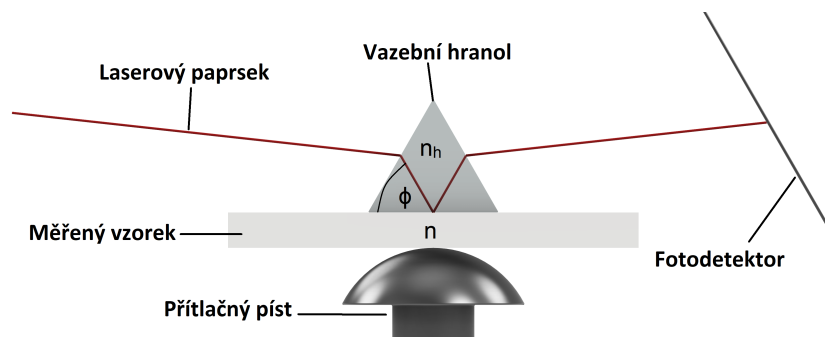
Všechny zmíněné články využívaly k dávkování přesně kontrolovaný tlak vzduchu, který vytlačoval materiál jádra ze zásobníku do dávkovací jehly. V práci se zabývá návrhem přístroje pro výrobu optických vlnodů pomocí mikrodávkoče, ten však k dávkování materiálu využívá šroubové čerpadlo. Dalším rozdílem jsou použité materiály, kdy představené články využívají UV světlem vytvrzované polymery, které jsou vzájemně mísitelné a vznikají tak vlnovody s gradientní změnou indexu lomu. Vlnovody představené v této práci jsou oproti tomu vyrobeny z teplem vytvrzovaných materiálů (optických termosetů), které se spolu nemísily a vznikaly z nich vlnovody se skokovou změnou indexu lomu. Tyto materiály také nabízejí vysokou pružnost, při výrobě dostatečně tenkých vzorků tak lze připravit flexibilní vlnodné struktury.

4. Metody měření

V této kapitole se věnuji popisu metod měření, které jsem použil k vyhodnocení vlastností použitých materiálů a připravených optických vlnodů. U objemových vzorků materiálů jsem měřil optické vlastnosti, tedy index lomu a transmisní spektrum. Na základě těchto hodnot jsem volil kombinaci materiálů pro jádro a plášť optického vlnovodu. U depozičních vzorků s vlnovodnými strukturami jsem v prvním kroku prováděl optickou kontrolu kvality pomocí mikroskopu. Po dostatečném odladění depozičního procesu jsem přistoupil k měření optického útlumu a rozložení výstupního vidového pole vyrobených vlnodů.

4.1 Index lomu

Pro měření indexu lomu jsem využil zařízení Metricon Model 2010/M Prism Coupler [11], které využívá hranolového vazebního členu k navázání světla do měřeného vzorku. Na obrázku 4.1 je zobrazen princip měření. Laserový paprsek vstupuje do vazebního hranolu s definovaným indexem lomu. Na hranol je pístem přitlačen měřený vzorek tak, aby vznikl optický kontakt bez vzduchové mezery. Měřený vzorek proto musí mít kvalitní povrch s malou drsností. V případě mnou měřených materiálů vznikaly vzorky s kvalitním povrchem, který se navíc díky pružnosti materiálu hranolu přizpůsobil.



Obrázek 4.1: Měření indexu lomu přístrojem Metricon.

Vazební hranol se vzorkem je umístěn na platformě, která se v průběhu měření otáčí a mění tak úhel dopadu paprsku. Pokud paprsek v hranolu dopadá na měřený vzorek pod menším než kritickým úhlem, dochází k totálnímu odrazu, paprsek se vrací do hranolu a dopadá na fotodetektor. Při překročení mezního úhlu se část energie paprsku naváže do měřeného vzorku a na fotodetektor dopadá menší výkon. Získáváme tak závislost dopadajícího výkonu na úhlu dopadu paprsku na měřený vzorek. Při dopadu nad kritickým úhlem je výkon konstantní, při dosažení kritického úhlu dopadající výkon prudce poklesne. Z křivky výkonu je odečtena pozice platformy a tedy kritický úhel dopadu paprsku. Z něj se určí index lomu pomocí Snellova zákona:

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

kde n_h je index lomu vazebního hranolu a ϕ je úhel dopadu paprsku na vzorek.

Pro optickou vazbu světelného paprsku do měřeného vzorku je použit optický vazební hranol, který musí mít vyšší hodnotu indexu lomu než je hodnota indexu lomu měřeného vzorku. Pro měření jsem použil vazební hranol 200-P-4a ($n = 2,1558 @ 632,8 \text{ nm}$). Přístroj je vybaven lasery s vlnovými délkami 532; 654,2; 846,2; 1308,2; 1549,1; a 1652,1 nm. Ty představují běžně používané vlnové délky v optických komunikacích. Je možné využít jednu ze známých aproximačních funkcí indexu lomu a proložit ji naměřenými hodnotami pro spojitou křivku indexu lomu. Udávaná přesnost měření indexu lomu je $\pm 0,0005$.

4.2 Transmisní spektra

Pro měření transmisních spekter jsem využil přístroj UV–VIS–NIR spectrometer (UV 3600 Shimadzu). Světlo ze širokopásmového zdroje v přístroji prochází monochromátorem a nastavitelnou štěrbinou, kde vzniká kolimovaný monochromatický svazek. Ten prochází skrz umístěný vzorek na fotodetektor. Vzhledem k širokému měřicímu rozsahu 185 - 3300 nm je světelných zdrojů i detektorů několik a v průběhu měření dochází k jejich přepínání.

Měření probíhá postupným přeladováním monochromátoru a zaznamenáním intenzity dopadající na detektor na každé měřené vlnové délce (používal jsem rozlišení 1 nm). Před samotným měřením je potřeba provést referenční měření, kdy přístroj změří spektrum bez vloženého vzorku. Z referenčních a naměřených dat řídicí software určí průběh transmisního spektra měřeného vzorku.

Kvůli nepřesné kalibraci přístroje byly v měřených průbězích viditelné nespojitosti na těch vlnových délkách, na kterých docházelo k přepnutí detektoru nebo zdroje. Tyto nespojitosti jsem odstranil v prostředí matlab naváhováním všech dat pod vlnovou délkou nespojitosti takovým koeficientem, aby byly transmise na bodech kolem nespojitosti stejné. Transmisní spektra jsem měřil v rozsahu 250-2200 nm.

4.3 Optická kontrola vlnodů

Při provádění depozičních experimentů jsem vyhodnocoval kvalitu vzorků pozorováním pomocí mikroskopu Olympus BX60 s kamerou Promicam 3-12C. Kamera mikroskopu je připojena k počítači, který umožňuje zaznamenávat snímky vzorku a po nastavení zvoleného objektivu také měřit velikosti zobrazených objektů. Toho jsem využíval při prvotním vyhodnocování parametrů depozičních testů - zjišťoval jsem tak rozměry a homogenitu vyrobených optických vlnodů.

4.4 Optický útlum

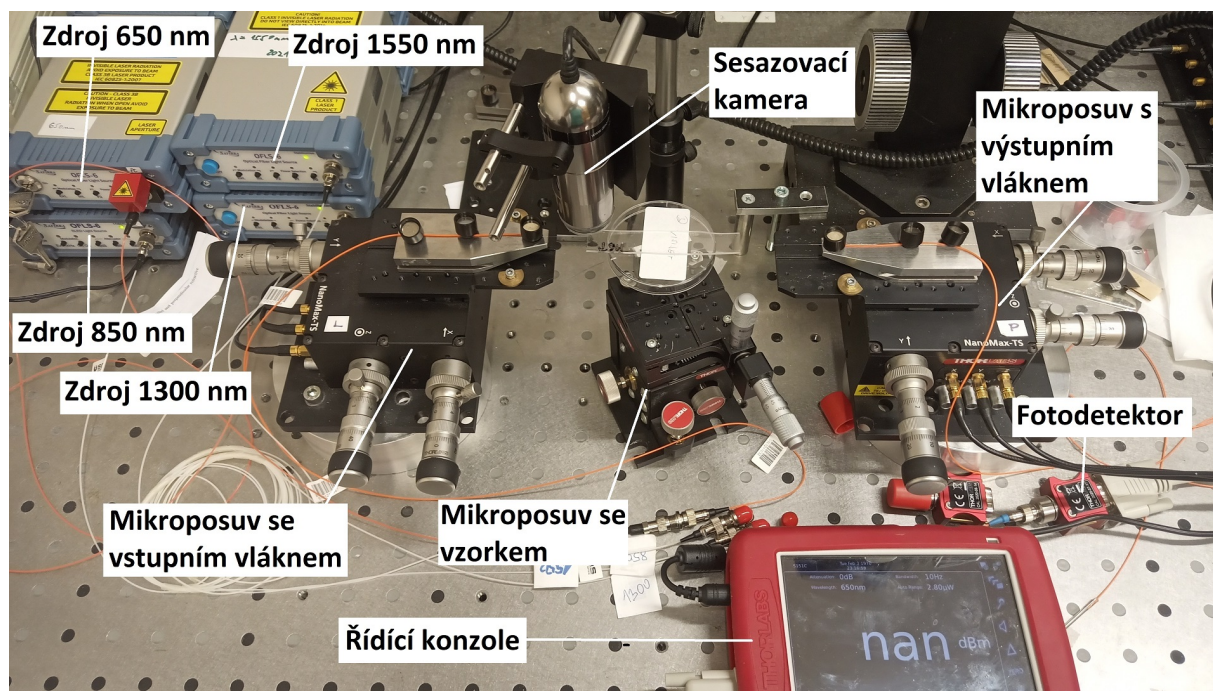
U optických vlnodů je důležité přesně změřit měrný optický útlum, na základě kterého pak vyhodnocujeme jejich kvalitu. Měření jsem prováděl metodou dvou délek, která dává nejpřesnější výsledky, ale jedná se o destruktivní metodu, kdy vzorek je při měření zničen. Do měřeného vlnovodu o délce l_1 je navázán paprsek přivedený optickým vláknem ze zdroje. Na konci vlnovodu je vyvázán do optického vlákna vedoucího do fotometru, kde je zaznamenán výkon P_1 procházejícího paprsku. Vzorek je pak zkrácen na délku l_2 , je znovu navázán na vstupní i výstupní

vláknem a je změřen procházející výkon P_2 . Měrný optický útlum A je pak počítán z naměřených výkonů P_1, P_2 a délek vzorku při měření l_1, l_2 podle vztahu

$$A = \frac{P_{2dBm} - P_{1dBm}}{l_1 - l_2}. \quad (4.2)$$

Díky využití metody dvou délek měříme pouze vložný útlum vlnovodu bez vazebních ztrát na rozhraní vlnovodu a optického vlákna. Vzorek je však při měření zničen, je potřeba provádět víc měření (při různých délkách vzorku), navíc musí být optická vazba vlnovodu a vlákna pokaždé stejná, měření je tak velmi časově náročné.

Na obrázku 4.2 je zobrazena použitá měřicí soustava. Využíval jsem zdroje o vlnových délkách 650; 850; 1300 a 1550 nm. Vstupní a výstupní vlákna, stejně jako měřený vzorek, jsou umístěna na tříosých mikrometrických posuvech, pomocí nichž jsou pozice optických vláken nastaveny tak, aby docházelo k navázání optického paprsku mezi vlákny a měřeným vlnovodem. Při sesazování je využíván červený laser (650 nm), na paprsku je pak vidět, jestli je navázán do vlnovodu. K navedení také slouží sesazovací kamera připojená k počítači. Signál zachycený do výstupního vlákna je přiveden do fotodetektoru připojeného k řídicí konzoli, která zobrazí naměřenou hodnotu výkonu. Jsou k dispozici dva fotodetektory s rozsahy 400-1100 nm (Si detektor), respektive 800-1700 nm (InGaAs detektor). Po správném navázání vláken k vlnovodu je změřen procházející výkon na všech měřených vlnových délkách, je tak potřeba mezi jednotlivými měřeními přepojit zdroje a fotodetektory.



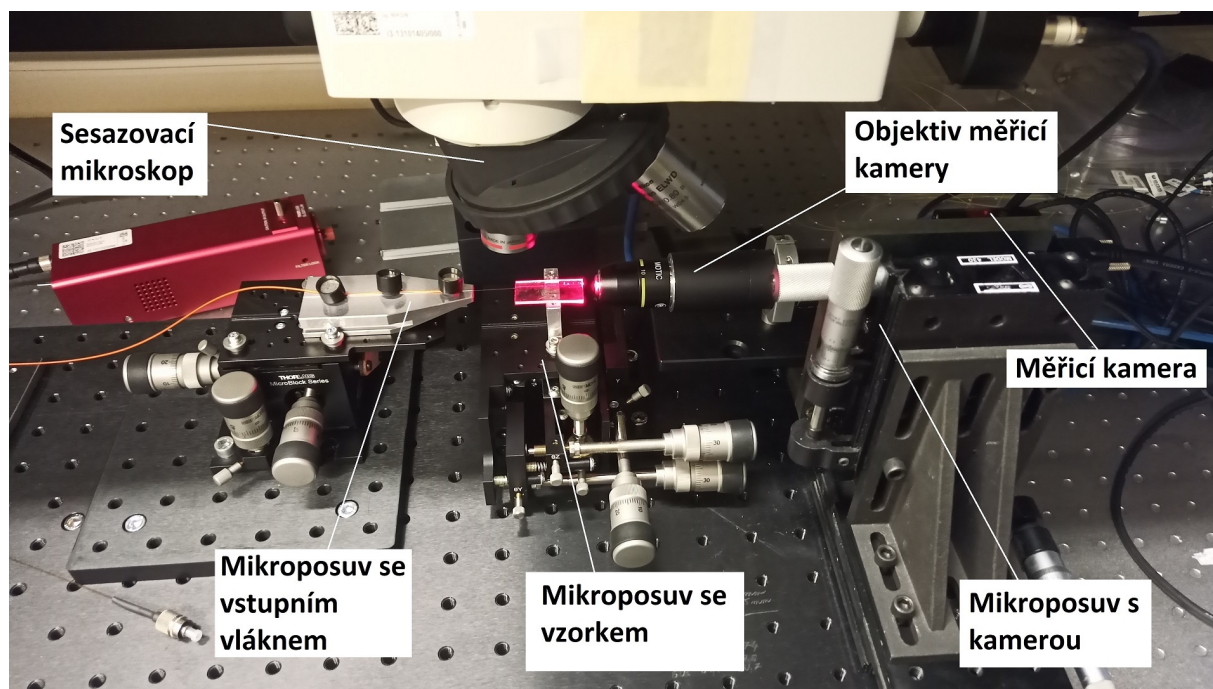
Obrázek 4.2: Soustava pro měření optického útlumu vlnovodů.

Při měření útlumu vlnovodů s průměrem 50 μm jsem využíval optické vlákno s průměrem jádra 50 μm na vstupu a 62,5 μm na výstupu. Při měření 500 μm vlnovodu pak šlo o vlákna s průměrem jádra 50 μm na vstupu a 500 μm na výstupu vlnovodu. Cílem je, aby se maximum energie navázalo a maximum vyvázalo z vlnovodu i při trošku jiném průměru jádra nebo při nepřesném umístění vazebních vláken.

4.5 Rozložení vidového pole

Pro ověření možnosti navazování signálu mezi připravenými vlnovody a optickými vlákny jsem měřil rozložení vidového pole na výstupu optických vláken i připravených optických kanálkových vlnovodů. Když jsou rozložení a hlavně průměr obou polí podobná, vazební ztráty při navázání vlákna a vlnovodu budou nízké.

K měření jsem využíval měřicí pracoviště zobrazené na obrázku 4.3. Vstupní vlákno přivádí záření o vlnové délce 650; 850; 1300 nebo 1550 nm ze stejných zdrojů jako u měření optického útlumu. Pomocí mikroposuvů se vzorkem a se vstupním vláknem je podle sesazovacího mikroskopu s kamerou připojenou k počítači navázán signál ze vstupního vlákna do vlnovodu. Poté je pomocí mikroposuvů zaostřena měřicí kamera na čelo vlnovodu a zaznamenané rozložení pole je zobrazeno na počítači.



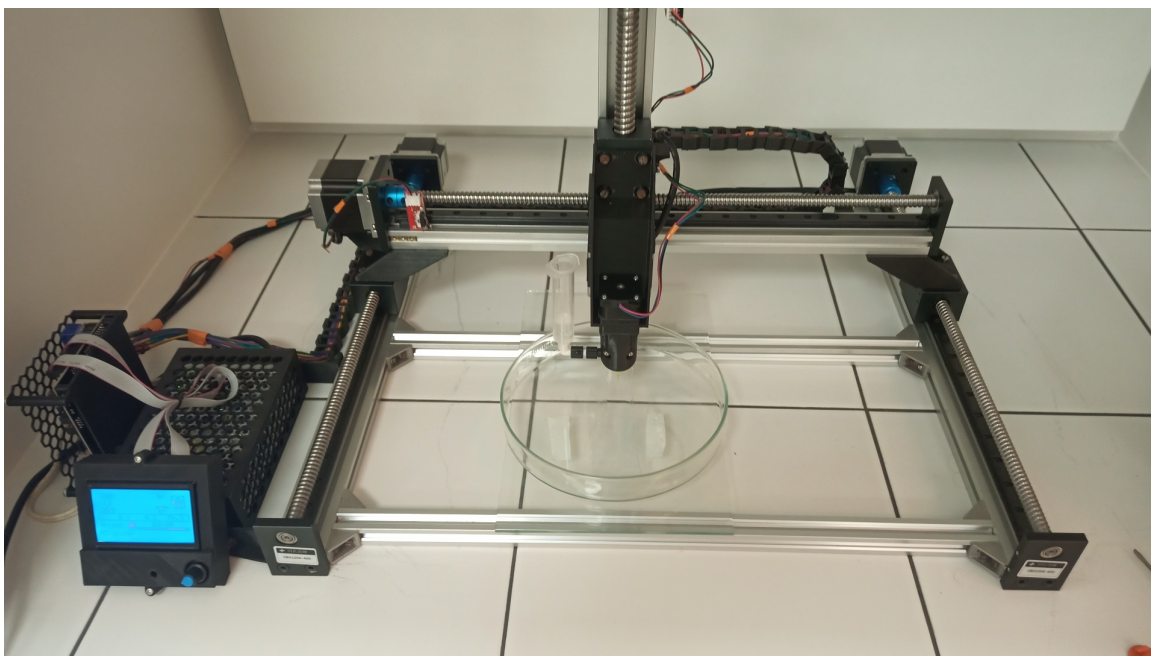
Obrázek 4.3: Soustava pro měření rozložení vidového pole.

V soustavě je použita kamera Owl 640 II, která je založena na InGaAs čipu, díky kterému detekuje vlnové délky v rozsahu 400-1700 nm. Má rozlišení 640x512 pixelů a je možné využít objektivy s 10x; 40x nebo 60x zvětšením, při kterých odpovídá jeden pixel 1,53; 0,38 nebo 0,25 μm . Ačkoli jsem soustavu využíval jen pro měření rozložení pole v mnohovidových vlnovodech, vzhledem k rozlišení je možné ji využívat i pro jednovidové vlnovody.

5. Návrh zařízení pro výrobu optických polymerních vlnodů

V této části se věnuji návrhu a realizaci zařízení, které umožní vyrábět optické planární vlnodné struktury pomocí mikrodávkače. Zařízení je postaveno z běžně dostupných součástek určených pro výrobu 3D tiskáren a jiných polohovacích zařízení. Využil jsem také 3D tisku a velké množství součástek navrhl a vytiskl. K tisku jsem využíval materiál PLA (Kyselina polyléčná), který má nízkou pružnost. Díly jsem tiskl na tiskárně Anet A8 plus. K návrhů přístroje a jednotlivých dílů jsem využil program Fusion 360.

Základem zařízení je kartézský tříosý CNC router, který má jako pracovní nástroj mikrodávkač. Cílem bylo navrhnout přístroj s velkou pracovní plochou pro možnost výroby delších vlnodů a s dobrým rozlišením a opakovatelností pohybů. Na obrázku 5.1 je sestavený mikrodávkový přístroj. V příloze A jsou použité zdrojové kódy firmwaru a navržené 3D modely přístroje. V příloze B jsou obrázky zkompletovaného přístroje.

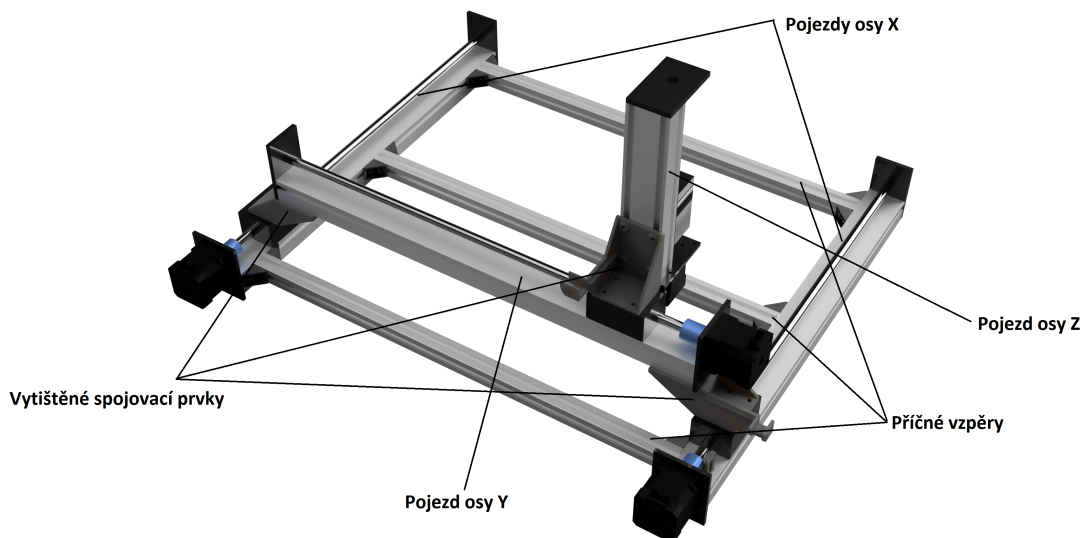


Obrázek 5.1: Fotografie realizovaného pracoviště pro výrobu optických polymerních vlnodů pomocí mikrodávkače.

5.1 Mechanické prvky

Jako základ přístroje jsem zvolil zkompletované lineární pojezdy [12]. Ty zajišťují vedení osy pomocí lineárních ložisek na kolejničích a pozicování pomocí krokového motoru a kuličkového (závitového) šroubu. Oproti variantě s tyčovými pojezdy nabízí kolejničové vedení větší přesnost při zachování poměrně robustní konstrukce.

Na obrázku 5.2 je náhled na návrh přístroje v programu Fusion 360. Osa X sestává ze dvou 400 mm dlouhých pojezdů spojených třemi příčnými vzpěrami. Na vozících osy X je upevněn pojezd osy Y, který má také délku 400 mm, a na vozíku osy Y je upevněn pojezd osy Z délky 100 mm. Osy jsou k sobě připevněny pomocí 3D vytištěných spojovacích prvků. Rozměry pracovní plochy (400 x 400 mm) byly zvoleny tak, aby umožnily výrobu delších vzorků vlnovodů a případně větších struktur.



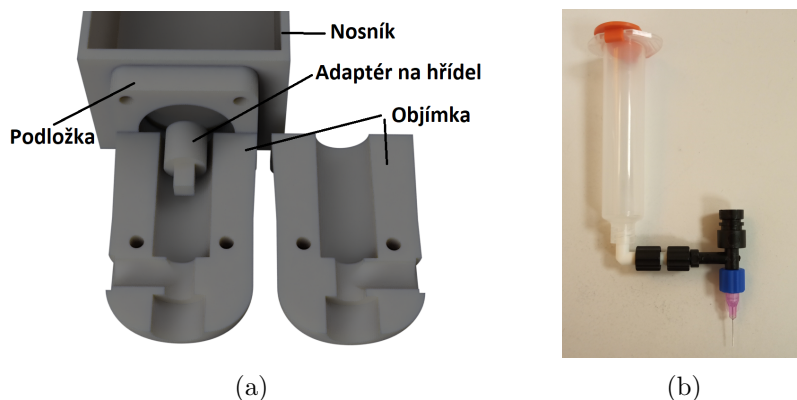
Obrázek 5.2: Pohled zezadu na rám navrženého přístroje v programu Fusion 360.

Jako pracovní nástroj jsem použil dávkovač od firmy Vieweg [13]. Jde o malé šnekové čerpadlo, které nasává materiál z kartuše a tlačí ho do dávkovací jehly. K dispozici jsou jehly s průměry od 0,11 do 1,6 mm. K pohonu čerpadla jsem použil malý krokový motor (NEMA 14). Motor a dávkovač mají různé hřídele, a tak jsou propojeny vytištěným adaptérem.

Pro ukotvení dávkovače k vozíku pojezdu osy Z jsem vytiskl nosník, na který je upevněna objímka. Ta je rozdělena na dvě poloviny, mezi kterými je umístěn dávkovač (viz obrázek 5.3). Povolněním několika šroubků jde dávkovač snadno vyměnit, což je potřeba kvůli skladování teplem vytvrditelných materiálů, které by po pár hodinách při pokojové teplotě zatuhly a dávkovač znehodnotily.

5.2 Elektronika

Na základě předchozích zkušeností jsem k řízení přístroje zvolil řídicí desku SKR V1.3. Jedná se o univerzální desku určenou pro řízení především 3D tiskáren, obsahuje sloty na 5 driverů krokových motorů a řadu konektorů na připojení sensorů teploty a mechanických spínačů dorazu (endstopů). Deska je postavena na 32bitovém ARM procesoru a pracuje s napájením v rozmezí 12-24V. Pro účely stavěného zařízení jsem zvolil 12V 4A zdroj, který pro pokrytí spotřeby stačí.



Obrázek 5.3: Nástrojová hlava, (a) model vytištěných součástek dávkovače, (b) dávkovací čerpadlo.

24V napájení je zamýšleno pro 3D tiskárny, které mají výkonné vyhřívací prvky (až 300 W), zatímco na tomto zařízení tvoří většinu odběru driverů krokových motorů. K zařízení ovládání slouží jednobarevný LCD displej s rozlišením 128x64 pixelů a s rotačním enkodérem.

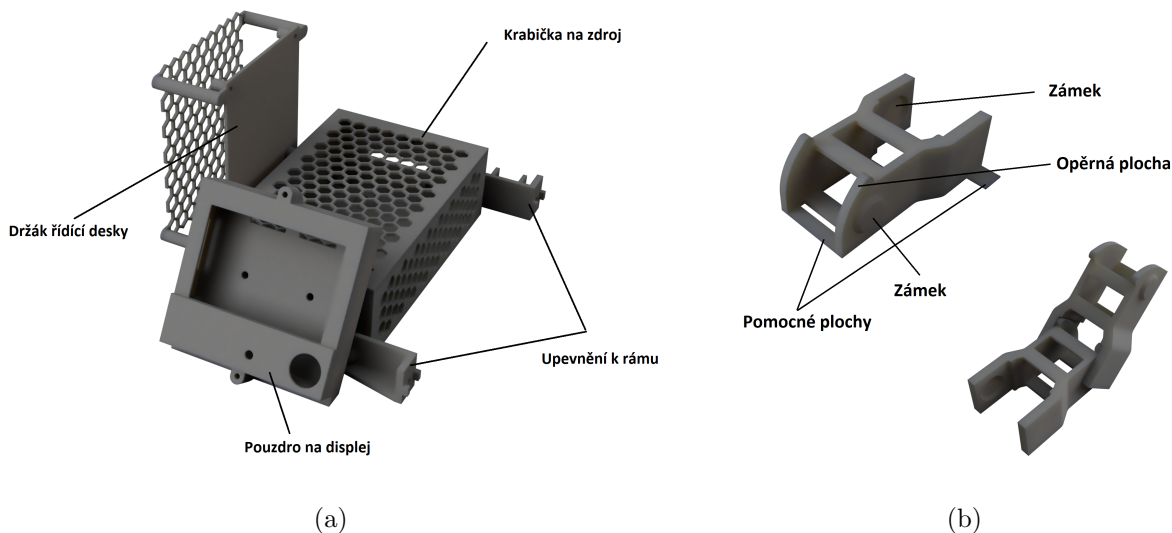
Pro ovládání krokových motorů slouží specializované integrované obvody (driverů). Ty mohou být umístěny buď přímo na řídicí desce, nebo, jako v tomto případě, malé desce plošných spojů s vyvedenými kontakty, které se zasunou do slotů na řídicí desce. Může se totiž stát, že dojde ke zničení obvodu driveru například prudkým pohybem motoru, který naindukuje vysoké napětí, a toto řešení umožňuje vyměnit pouze jeden obvod místo celé desky.

Motorů na lineárních pojezdech jsou dvoufázové s krokem 2° . Fáze jsou vůči sobě posunuté o 90° a každá čtvrtperioda signálu znamená jeden krok motoru. Úkolem driverů je na základě signálu z procesoru modulovat napětí obou fází. Zvolené driverů TMC2208 jsou schopny dodávat až 256 úrovní napětí. V zařízení jsem zvolil šestnáctiúrovňové krokování. To znamená, že v každém 2° kroku je ještě 16 mikrokroků a reálné rozlišení motoru je tak $0,125^\circ$. Větší rozlišení by celkovou přesnost přístroje už neovlivnilo, mikrokrok odpovídá posunu $1,25 \mu\text{m}$ a větší nepřesnost už je způsobena omezenou pevností konstrukce. Při pohybu motoru však stále dochází k interpolaci na 256 úrovní, což vyhlazuje křivku napětí a umožňuje tichý chod motorů s minimem vibrací. Pomocí potenciometru na driveru jde nastavit budící proud motoru až do 2 A v maximu. Při větším proudu jsou schopny motory rychlejšího pohybu, než začnou vynechávat kroky. Pro motory pojezdu jsem zvolil hodnotu proudu 1,5 A, aby nedocházelo k přehřívání driverů. Pro menší motor dávkovače jsem zvolil proud 1 A, aby nedocházelo k přehřívání motoru.

K nalezení domovské pozice pracovní hlavy slouží tři mechanické spínače (endstopy), každý umístěn na jedné ose. Při hledání výchozí pozice přístroj posouvá osu, dokud nenarazí do spínače, a tato poloha je pak uložena jako nulová. Program pak sleduje polohu osy a nedovolí překročit nastavenou maximální hodnotu.

Pro napájecí zdroj jsem pomocí 3D tiskárny vytiskl krabičku s větracími otvory a otvory na vstupní a výstupní vodiče. Krabička je připevněna k rámu a k ní je z boku připevněn držák řídicí desky s mřížkovým krytem, který umožňuje proudění vzduchu. Zepředu je na krabičce připevněno pouzdro na displej. Na obrázku 5.4a jsou modely krabiček složené dohromady.

Ke každému motoru a endstopu vede několik vodičů a pro vodiče vedoucí dávkovači a k ose Y a Z bylo potřeba zajistit, aby se při pohybu přístroje nepoškodily a nezamotaly. Pro tento účel jsem navrhl a vytiskl vodičí řetěz ze článků na obrázku 5.4b. Pomocné plochy na jsou určeny pouze pro zlepšení přilnavosti článku k podložce při tisku, po vytištění jsem je odstránil. Je možné navázat libovolný počet článku na sebe a skrz ně vodiče vést. Jeden řetěz vede podél



Obrázek 5.4: Vytisknuté součástky na elektroniku, (a) krabíčka zdroje s kryty řídicí desky a displeje, (b) článek vodícího řetězu na kabely.

osy Y s kabely motorů Z pojezdu a dávkovače a Z endstopu. Podél osy X vede od motoru osy Y další řetěz ke krabičkám s elektronikou, v něm jsou navíc kabely od Y pojezdu a endstopu.

5.3 Firmware a ovládání

K řízení přístroje jsem použil open source Marlin firmware [14]. Ten je určen pro řízení 3D tiskáren a je snadno upravitelný pro konkrétní konfiguraci přístroje. Z webových stránek jsem stáhl balíček zdrojových kódů, které jsem pak upravil a zkompilel v programu Visual Studio Code.

Ve staženém balíčku zdrojových kódů jsem zvolil použitou řídicí desku, pro kterou už byl k dispozici připravený soubor s definicemi procesoru a vývodů. Podobně jsem zvolil model displeje s ovládacím enkodérem. Dále bylo potřeba vyřadit ovládání vyhřívaných prvků 3D tiskárny, pro kterou je firmware určen. Nastavil jsem rozměry jednotlivých os a pozice mechanických dorazů, podle kterých přístroj hledá domovskou pozici. Ve výchozím nastavení využívá každá osa jeden driver motoru, takže jsem driver určený pro druhý nástroj předefinoval na driver druhého motoru osy X.

Podle stoupání (posun v mm na otočku) kuličkových šroubů v pojezdech a velikosti kroků (respektive mikrokroků) jsem nastavil počet impulsů na 1 mm posunu jednotlivých os. V případě motoru dávkovače nedochází k posunu, pouze k otáčení, tak jsem nastavil počet impulsů tak, aby příkaz posunutí o 1 mm způsobil deset otáček motoru dávkovače. Pak jsem otestoval, jakých rychlostí jsou jednotlivé osy schopné dosáhnout, aniž by docházelo k přeskokování kroků motorů a byla ztracena přesnost, a nastavil jsem odpovídající hodnoty maximálních rychlostí s dostatečnou rezervou (10 mm/s pro osy X a Y, 16 mm/s pro osu Z).

Pohyb přístroje je řízen souborem GCODE, který obsahuje instrukce popisující jednotlivé úkony. V případě 3D tiskárny a obráběcích zařízení je tento kód generován programem podle vstupního 3D modelu a parametrů definovaných uživatelem. V případě dávkovače však nevycházím z 3D modelu a naopak chci mít kontrolu nad jednotlivými pohyby, kterých je navíc poměrně malé množství. Soubory s příkazy jsem proto psal ručně. K tomu jsem využíval několik základních příkazů:

- G1 - pohyb po přímce
- G2 - pohyb po kružnici po směru hodinových ručiček
- G3 - pohyb po kružnici proti směru hodinových ručiček
- G28 - najít výchozí pozici (homing)
- G90 - používat absolutní souřadnice
- G91 - používat relativní souřadnice
- M17 - zapnout motory
- M18 - vypnout motory

Nejdůležitějším příkazem je G1, který posune všechny osy na souřadnice, respektive o definované souřadnice, v závislosti na použití relativních nebo absolutních souřadnic. Pro nanášení jsem využíval relativní souřadnice, díky tomu bylo jednoduché vytvořit kód například pro nanášení několika čar vedle sebe. V příkazu pohybu definujeme souřadnice v jednotlivých osách a rychlost, například G1 X1 Y2 Z3 E4 F100. Tento příkaz posune osu X o 1 mm, osu Y o 2 mm, osu Z o 3 mm a dávkovač o 4 mm (v našem případě tedy 40x otočí motorem dávkovače. Všechny pohyby jsou vykonávány zároveň, a to tak, aby rychlost nejrychlejší osy byla 100 mm/min (parametr F100).

6. Optické vlastnosti materiálů

Před vlastní přípravou optických planárních vlnovodů jsem měřil vlastnosti dostupných polymerních materiálů. Měřil jsem index lomu a hodnoty transmise na objemových vzorcích vyrobených odlitím materiálu do malé Petriho misky a jeho vytvrzením. Tloušťka vzorků byla přibližně 7 mm. Na základě naměřených hodnot jsem pak volil kombinaci materiálů pro výrobu vlnovodů a vlnové délky, pro které byly vlnovody vhodné.

6.1 Dostupné materiály

K dispozici jsem měl několik variant optického elastomeru PDMS (polydimethylsiloxan). Jedná se o termoset, tedy polymer, který je formě kapaliny, dokud ho nevratně nevytvdíme do pevného stavu. Vyznačuje se dobrou tepelnou a chemickou odolností a je velice pružný.

Použité materiály jsou dodávány ve dvou složkách, po jejichž smícháním v určeném poměru je možné materiál vytvrdit. Materiály jsou vytvrzované teplem, výjimku tvoří materiál KER, který je vytvrzován UV zářením. U materiálu Sylgard je doporučeno několik způsobů vytvrzení s různými teplotami a časem. V tabulce 6.1 je přehled měřených materiálů.

Tabulka 6.1: Vlastnosti dostupných optických polymerních materiálů.

Materiál	Poměr složek	Doporučené vytvrzení	Čas na zpracování (h)	Viskozita (cP)
LS-6943 [15]	10:1	60 min @ 100°C	5	5400
Sylgard 184 [16]	10:1	10 min @ 150° C	1,5	3500
QSIL 216 [17]	10:1	60 min @ 100° C	4	3300
KER-4690 [18]	1:1	2000 mJ/cm ² @ 365 nm	Neuvedeno	2700
MED-6210 [19]	1:1	30 min @ 150° C	4	15700
MED-6215 [20]	10:1	15 min @ 150° C	5	3600

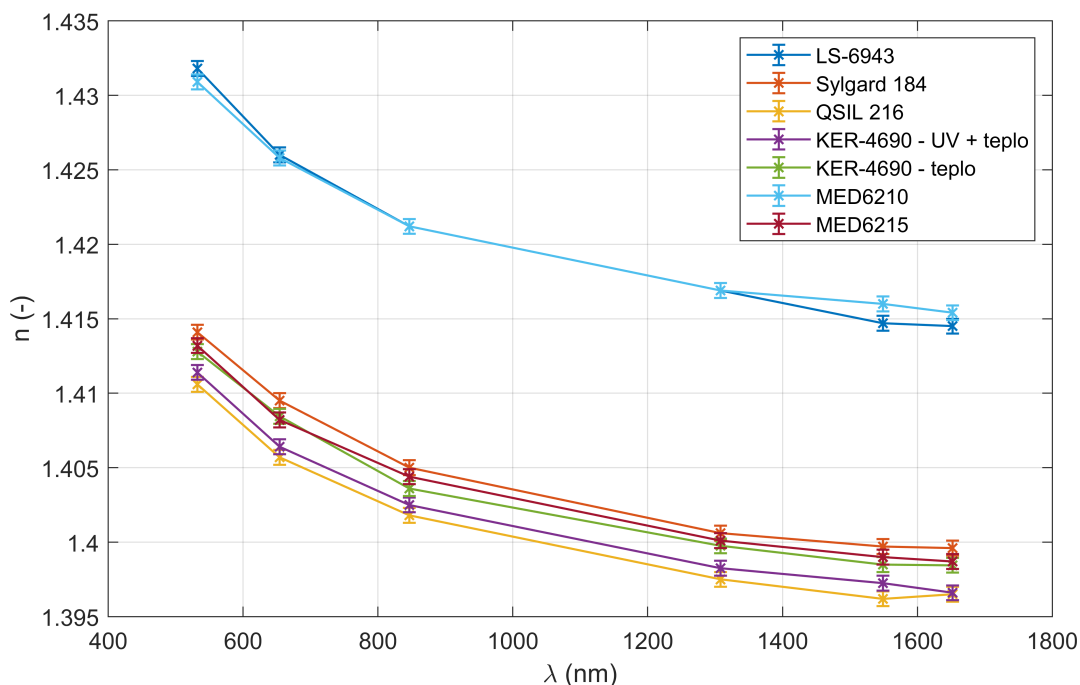
Postup přípravy je u všech materiálů podobný. Složky jsou po odměření pečlivě promíchány, k čemuž jsem využíval vrtulové míchadlo po dobu 15 minut. Poté je materiál umístěn do exsikatoru, kde je vývěvou snížena tlak na 15 kPa. Díky tomu z materiálu uniknou vzduchové bublinky, které by jinak při vytvrzování znehodnotily vytvářenou strukturu. Po uniknutí všech bublinek, což trvá obvykle kolem půl hodiny, je materiál připraven k vytvrzení.

Po namíchání složek začíná polymerizační reakce v materiálu. Materiály jsou vytvrzovány i nižší teplotou než jaká je uváděna jako doporučená, ikdyž pomaleji. Při pokojové teplotě jsou PDMS materiály po několika hodinách částečně zatuhlé a nepoužitelné. Proto jsem namíchané materiály, které jsem okamžitě nevyužil, uložil do mrazáku v podtlakové nádobě. Takto uložené materiály nezatuhly a bylo je možné používat i několik týdnů po původním namíchání. Při použití takto uložených materiálů jsem po jejich rozmrazení opakoval míchání a odvzdušnění.

Z materiálů QSIL 216, Sylgard-184, LS-6943, MED-6210 a MED-6215 jsem vyrobil vždy jeden vzorek, který jsem vytvrdil postupem doporučeným dodavatelem materiálu. V případě materiálu KER nebyl jasně uvedený doporučený zdroj světla, navíc se výrobce zmiňoval o dovytvrzení vzorku teplotou. Z materiálu KER jsem proto vyrobil čtyři vzorky. Jeden byl vytvrzen umístěním pod 365 nm LED zdroj na 15 minut, druhý byl navíc umístěn na 60 minut do pece při teplotě 100°C. Třetí vzorek byl umístěn pod UV výbojku po dobu 10 minut a poslední byl vytvrzen pouze teplem, a to po dobu 30 minut při 150°C.

6.2 Index lomu

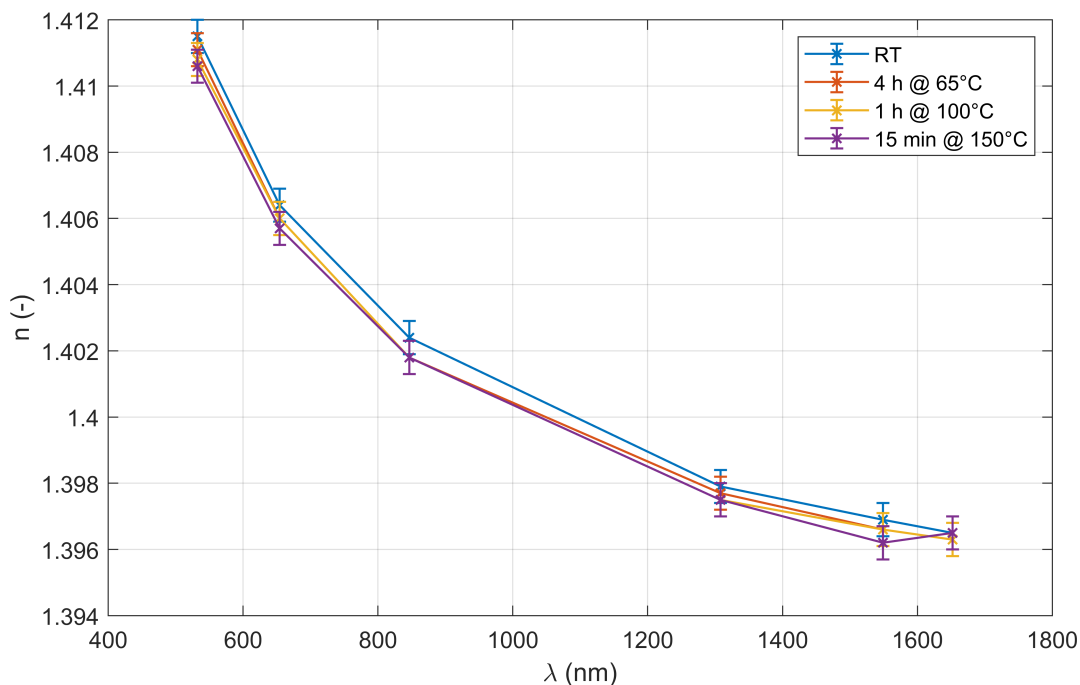
Index lomu je nejdůležitějším parametrem testovaných materiálů. Především nás zajímá rozdíl indexů lomu jednotlivých materiálů. Všechny vzorky byly změřeny z obou stran, aby byla zjištěna případná nehomogenita vzniklá nerovnoměrným vytvrzením nebo separací složek kvůli delší době vytvrzování. Kromě některých vzorků z materiálu KER byly všechny vzorky homogenní, z materiálu KER jsou tak v grafu reprezentovány pouze dva homogennější vzorky (jeden vytvrzovaný jen teplem a jeden UV LED a teplem). V grafu na obrázku 6.1 jsou naměřené hodnoty indexu lomu dostupných materiálů s vyznačenou nejistotou měření ($\pm 0,0005$). Podle těchto hodnot jsem zvolil kombinaci materiálů na výrobu vlnovodů jako Sylgard 184 (plášť) a LS-6943 (jádro). Tyto materiály mají velký kontrast indexu lomu a jsou dostupné v dostatečném množství.



Obrázek 6.1: Naměřené hodnoty indexu lomu materiálů PDMS.

V dalším měření jsem zjišťoval, jestli má teplota vytvrzování vliv na výsledný index lomu materiálu. Materiály je totiž možné vytvrzovat i při nižších teplotách po delší dobu. Materiál QSIL jsem nechal vytvrdit následujícími způsoby: 15 min při 150°C, 1 h při 100°C, 4 h při 65°C a 1 týden při pokojové teplotě (RT). Naměřené indexy lomu jsou zobrazeny v grafu na obrázku 6.2. Z výsledků vyplývá, že s nižší teplotou vytvrzování index lomu mírně roste, ale nárůst

je minimální a je téměř na úrovni chyby měření. Při výrobě vlnodů tak není potřeba brát vytvrzovací postup v potaz a můžeme počítat s hodnotami v obrázku 6.1.



Obrázek 6.2: Naměřené hodnoty indexu lomu materiálu QSIL v závislosti na způsobu vytvrzení.

Tabulka 6.2: Index lomu různě připravených vzorků z materiálu KER.

Způsob vytvrzení	Vlnová délka (nm)	532	654,2	846,4	1308,2	1549,1	1652,1
LED	Strana 1	1,4104	1,4055	1,4013	1,3973	1,3966	1,3957
LED	Strana 2	1,4119	1,4071	1,4029	1,3982	1,3973	1,3965
LED	Rozdíl	-0,0015	-0,0016	-0,0016	-0,0009	-0,0007	-0,0008
LED + 1 h@100°C	Strana 1	1,4109	1,4060	1,4024	1,3979	1,3968	1,3963
LED + 1 h@100°C	Strana 2	1,4119	1,4068	1,4026	1,3986	1,3977	1,3969
LED + 1 h@100°C	Rozdíl	-0,0010	-0,0008	-0,0002	-0,0007	-0,0009	-0,0006
Výbojka	Strana 1	1,4100	1,4057	1,4013	1,3975	1,3968	1,3959
Výbojka	Strana 2	1,4121	1,4068	1,4033	1,3984	1,3977	1,3967
Výbojka	Rozdíl	-0,0021	-0,0011	-0,0020	-0,0009	-0,0009	-0,0008
30min@150°C	Strana 1	1,4137	1,4090	1,4046	1,4003	1,3993	1,3991
30min@150°C	Strana 2	-	1,4079	-	1,3992	-	1,3978
30min@150°C	Rozdíl	-	0,0011	-	0,0011	-	0,0013

- Hodnota nebyla změřena.

Z materiálu KER jsem připravil čtyři vzorky, které jsem popsal výše. U každého z nich však vycházel index lomu rozdílně, navíc se od sebe lišily jednotlivé strany (vrchní a spodní) vzorku.

To přičítám tomu, že materiál nebyl dostatečně vytvrzený, což bylo způsobeno malou dávkou UV záření v kombinaci s velkou tloušťkou vzorku. Vzhledem k velké absorpci v UV části spektra tak neprošla dostatečná intenzita záření do spodní vrstvy. V tabulce 6.2 jsou uvedeny naměřené hodnoty indexu lomu jednotlivých vzorků.

Z hodnot v tabulce 6.2 vidíme, že rozdíl naměřených hodnot indexu lomu ze dvou stran jednoho vzorku se pohybuje výrazně nad chybou měření, která je u měřicího přístroje uváděna jako $\pm 0,0005$. Pro vzorky vytvrzené pouze UV světlem jsou rozdíly velké (až 0,0021), pro vzorek vytvrzený UV světlem i teplem jsou rozdíly menší. U vzorku vytvrzeného pouze teplem jsou také poměrně velké, nejsou ale změřeny pro všechny vlnové délky. Vzorky vytvrzené pomocí UV LED a výbojky jsou velice podobné. Zajímavé také je, že při vytvrzení pouze teplem je rozdíl indexů lomu opačný - vyšší index lomu je na horní straně vzorku. Hlavně je ale v tomto případě index lomu celkově vyšší o 0,001 až 0,003. V grafu na obrázku 6.1 jsou zobrazeny dvě varianty materiálu KER, jedna při vytvrzení UV LED i teplem a druhá pouze při vytvrzení teplem. Při využití materiálu ve vlnovodu spolu s jiným, teplem vytvrditelným materiálem, totiž není možné materiál vytvrzovat pouze světlem. Zobrazené hodnoty jsou průměrem měření z obou stran.

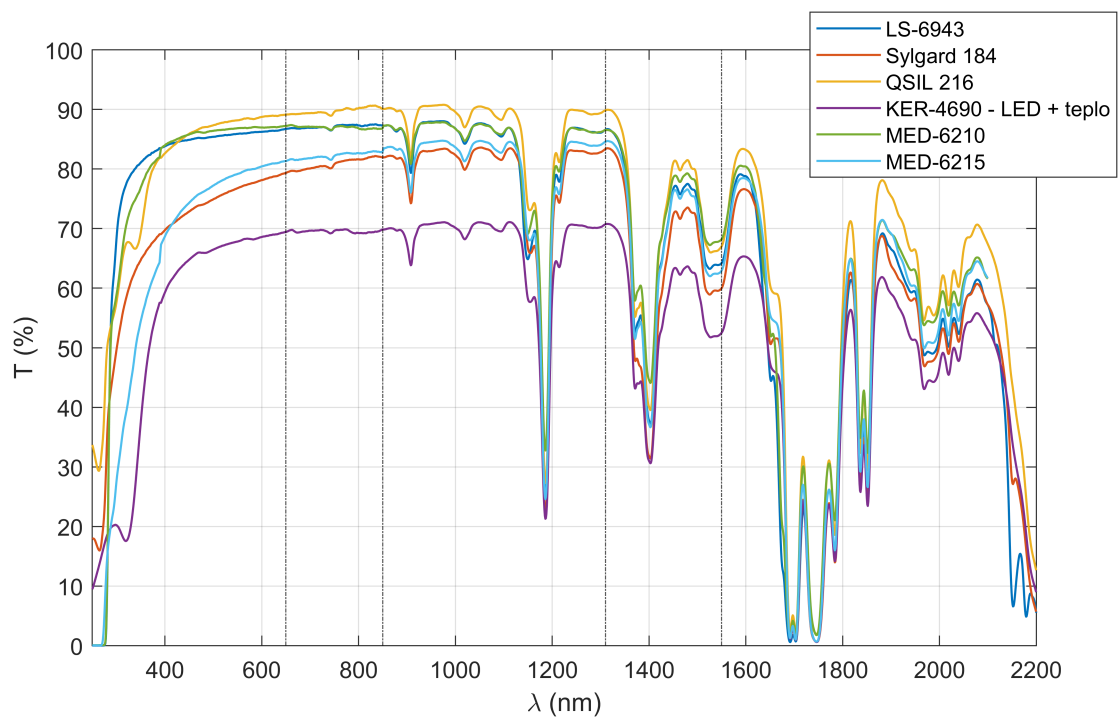
6.3 Transmisní spektra

Na přístroji Shimadzu UV-3600 popsaném v kapitole 4.2 jsem změřil transmisní spektra všech připravených vzorků. Výsledky jsou na zobrazeny obrázku 6.3. Vzhledem k tomu, že tloušťky vzorků nebyly úplně stejné, není cílem určit hodnoty měrného útlumu materiálu, ale zjistit průběh transmise s vlnovou délkou a určit, pro jaké vlnové délky bude vlnovod z daných materiálů vhodný.

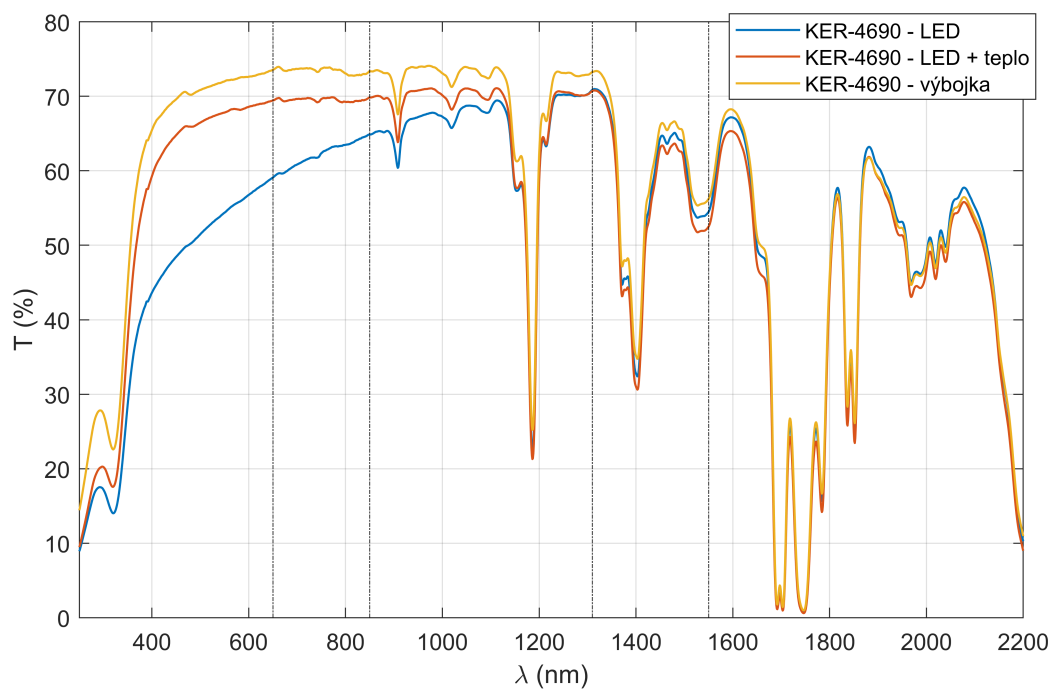
Na obrázku 6.3 jsou naměřené průběhy transmisních spekter. Černé přerušované čáry vyznačují běžně používané vlnové délky, na které by měly být vlnovody optimalizovány. Jde o vlnové délky 650; 850; 1300 a 1550 nm. Z materiálu KER je v grafu transmisní spektrum pouze pro vzorek vytvrzený UV LED a teplem. Z grafu vidíme, že všechny materiály mají podobný průběh transmise a na vlnové délce 1550 nm je měrný útlum poměrně velký. Na ostatních vlnových délkách je však transmise materiálu dobrá, vlnovody ze všech materiálů tak bude možné používat na vlnových délkách 650; 850 a 1300 nm. Mezi průběhy jsou velké rozdíly, zatímco QSIL dosahuje transmise 90%, KER vytvrzený UV zdrojem a teplem má maximum kolem 70%. Na spektrech také vidíme, že všechny materiály mají stejné absorpční špičky, největší rozdíl je v propustnosti UV záření, které prochází materiálem KER nejhůř.

Na obrázku 6.4 je průběh transmisních spekter různě připravených vzorků z materiálu KER. V infračervené části spektra mají všechny vzorky podobný průběh, ale ve viditelné oblasti vidíme výrazné rozdíly. U materiálu vytvrzovaných UV světlem obvykle lze podle sklonu průběhu v modré až ultrafialové části spektra určit stupeň vytvrzení - vytvrzený materiál v tomto pásmu pohlcuje méně záření a má vyšší transmisi. Z dat proto usuzuji, že samotný osvit LED zdrojem ke správnému vytvrzení materiálu nestačí. Pokud je pak materiál ošetřen teplem, nebo je použita UV výbojka, vytvrzení je lepší. V případě UV výbojky to může být širším spektrem působícího záření při vytvrzování. Transmise vzorku z materiálu KER vytvrzeného pouze teplem nebyla změřena.

Nedostatečné vytvrzení v případě vzorku ošetřeného pouze LED zdrojem by také mělo vliv na vlnovod používaný na vlnové délce 650 nm, kde už je vidět vyšší útlum materiálu. Jelikož ale bude materiál při výrobě vlnovodu vystaven teplu při vytvrzování druhého materiálu, takto ošetřený materiál KER není možné ve vlnovodu realizovat.



Obrázek 6.3: Naměřená transmissní spektra jednotlivých materiálů.



Obrázek 6.4: Naměřená transmissní spektra různě připravených vzorků z materiálu KER.

7. Depoziční testy

V této kapitole popisuji výrobu optických vlnodů pomocí zařízení sestaveného v kapitole 5. V první části se věnuji charakterizaci vlastností nanesených vlnodů v závislosti na parametrech nanášení a ovládání přístroje. Dále jsem testoval vliv jednotlivých parametrů na vlastnosti naneseného vlnodu a hledal vhodné nastavení pro nanášení 50 a 500 μm vlnodných jader. Podle těchto výsledků jsem pak optimalizovanou metodou připravil optické vlnodvy k dalšímu zhodnocení.

7.1 Postup přípravy vzorků

Na kapalný materiál pláště, do kterého byla nanášena jádra, jsem použil formu z PDMS (na obrázku 7.1a). Tu jsem připravil vyříznutím obdélníku velikosti 6x2 cm do tenkého (3 mm) plátku vytvrzeného PDMS (Sylgard 184 nebo QSIL-216). Formu jsem umístil do skleněné Petriho misky ošetřené separátorem Ambersil Formula 10, který vytváří tenký film, zabraňující přichycení vytvrzovaného materiálu. Do formy jsem pak nalil kapalný materiál pláště (Sylgard 184) a umístil ji do přístroje s dávkovačem. Dávkovací jehlu jsem umístil do rohu připravené formy s materiálem tak, aby byla špička zhruba 0,5 mm pod hladinou. Přístroj pak do materiálu nanasl několik vlnodných kanálků vedle sebe (obrázek 7.1b). Vzorek jsem vytvrdil v peci a po vychladnutí vyřízl z formy (obrázek 7.1c), kterou jsem pak mohl použít znovu.

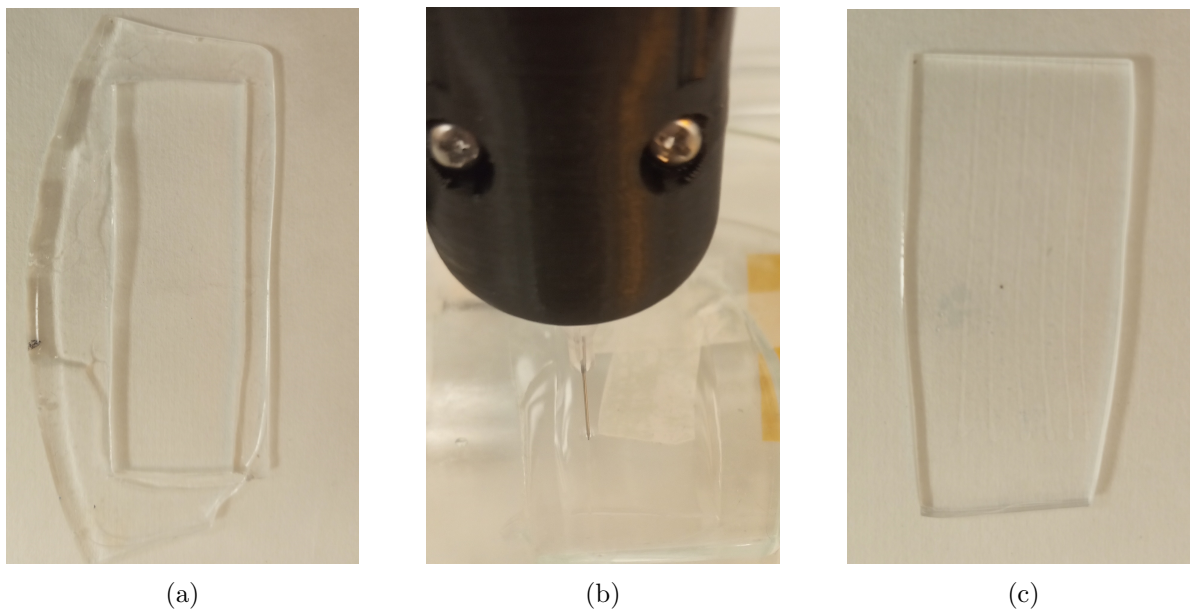
Pro účely nalezení optimálních parametrů depozice jsem testoval nanášení jednoduchých čar materiálu jádra do materiálu pláště. Nanášení čáry bylo prováděno následující sérií příkazů:

```
G1 X-50 E1 F400; nanášení čáry
G1 Z-5; zvednutí jehly
G1 X50 Y1 F600; posunutí na výchozí pozici v X, 1 mm posun v Y
G1 Z5; zanoření jehly pro nanášení další čáry
```

Přístroj byl nastaven na používání relativních souřadnic. Příkaz G1 tak prováděl lineární pohyb v osách X, Y, Z a E (dávkovač) definovaný parametry v příkazu v jednotkách mm. Parametr F udává rychlost osy s nejdelším pohybem v jednotkách mm/min. Příkaz G1 X-50 E1 F400 tedy posune osu X o 50 mm rychlostí 400 mm/min, a v průběhu pohybu 10-krát otočí motorem dávkovače (ve firmwaru je nastaven 1 mm posunu = 10 otáček, viz kapitola 5.3). Tím je nanášena čára, ostatní příkazy zvednou jehlu nad úroveň hladiny, vrátí ji na původní pozici X, posunou osu Y o 1 mm a vrátí jehlu zpět pod hladinu. Blok kódu se opakuje a stroj nanese další čáru.

Parametry, které jsem v kódu měnil, byly E a F , tedy počet otáček a rychlost posunu. Zajímalo mě ale, jak závisí nanášená čára na rychlosti posunu a na tlaku v trysce, tedy na rychlosti otáčení dávkovače. Dopotávám tedy rychlost otáčení v_e jako

$$v_e = \frac{10 \cdot E \cdot F}{|X|} \text{ (ot/min)}. \quad (7.1)$$



Obrázek 7.1: Postup výroby vzorku, (a) prázdná forma, (b) nanášení jader do formy s kapalným materiálem pláště, (c) výsledný vzorek po vytvrzení.

Nanesené vzorky jsem vytvrzoval umístěním do pece vyhřáté na 150°C po dobu 15 minut. První vzorky jsem vytvrzoval teplotou 100°C po dobu 1 hodiny, při porovnání se však ukázalo, že stejně nanesené vzorky vytvrzené při nižší teplotě mají horší kvalitu jádra - docházelo k většímu kolísání průměru kanálku. To příkládám tomu, že vlivem povrchového napětí materiálu docházelo k jeho stahování do kapiček a při pomalejším vytvrzování měla jádra delší dobu k deformaci.

7.2 Závislost průměru a kvality jádra na depozičních parametrech

V prvních depozičních testech jsem provedl sadu experimentů s různými průměry jehel, rychlostmi posunu a rychlostmi dávkovače. Připravil jsem tři soubory GCODE s různou rychlostí posunu (parametr F). Každý z nich nanesl 12 čar s různými rychlostmi dávkovače (parametr E). Všechny tři experimenty jsem pak opakoval s několika velikostmi jehel. Používal jsem materiál Sylgard 184 jako plášť a LS-6943 jako jádro. Tyto materiály mají velký kontrast indexu lomu, takže jde dobře vizuálně vyhodnotit kvalitu naneseného vlnovodu.

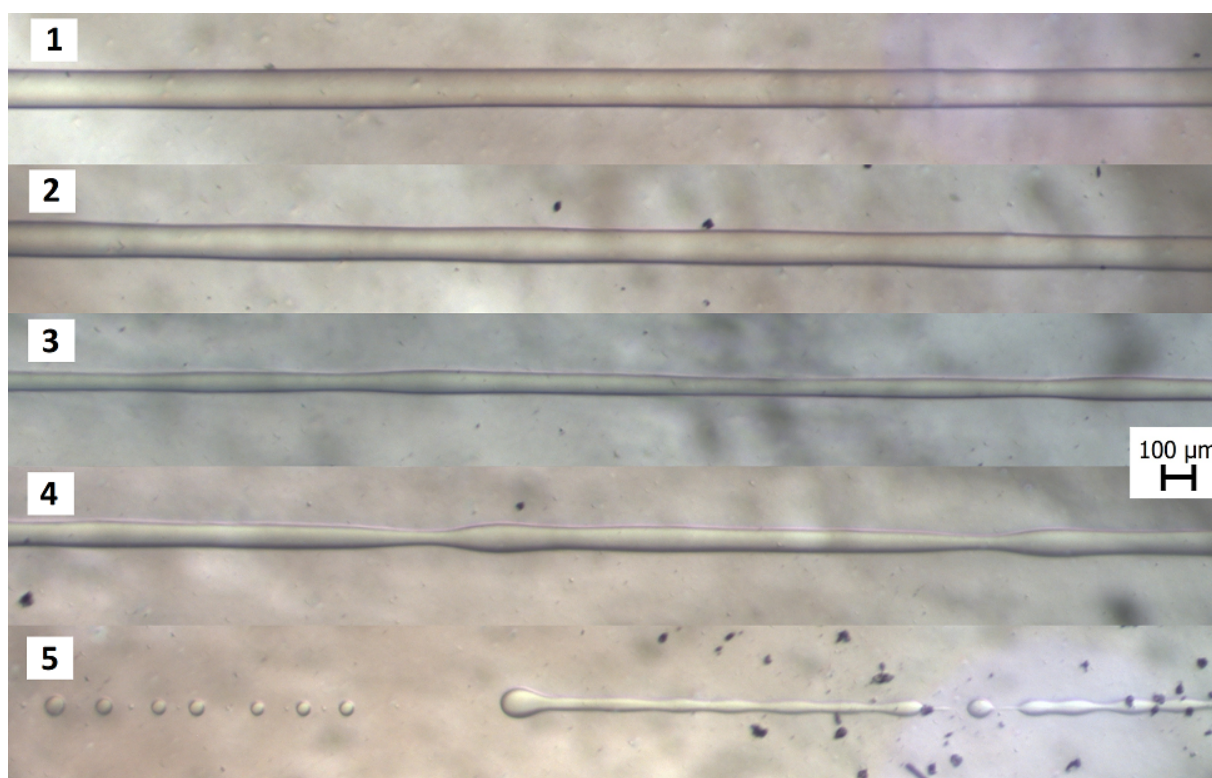
U všech připravených vzorků jsem opticky kontroloval průměr nanesených jader a jejich homogenitu (změnu průměru v podélném směru) pomocí mikroskopu. Kontrolu jsem prováděl pohledem zeshora na vzorek, takže hodnocení nebere v potaz deformaci průřezu jádra. Z kontroly několika vzorků však vyplývalo, že u menších jader ($100\ \mu\text{m}$ a méně) byl průřez jader kruhový, s větším průměrem byla jádra více roztáhlá do oválů. U větších jader ($500\ \mu\text{m}$ a více) také docházelo k deformaci průřezu jádra tím, že jednotlivé přejezdy jehly byly relativně blízko u sebe ($1\ \text{mm}$). Podle této sady vzorků tak pouze určuji hrubé rozsahy parametrů, se kterými mám pracovat v dalších optimalizacích.

Homogenitu jader jsem vyhodnocoval subjektivně, jelikož šlo pouze o hrubé přiblížení požadovaných parametrů. Podle pozorované kvality jsem všem jádrům přiřadil hodnocení 1 (nejlepší)

až 5 (nejhorší). Hodnocení zhruba odpovídá následujícímu klíči:

- 1: variabilita průměru jádra vlnovodu <5%,
- 2: variabilita průměru jádra vlnovodu <15%,
- 3: variabilita průměru jádra vlnovodu >15%, čára je spojitá,
- 4: variabilita průměru jádra vlnovodu >30% nebo občasná nespojitost,
- 5: úplně nespojitá čára.

Na obrázku 7.2 je uvedena ukázka jednotlivých stupňů kvality.



Obrázek 7.2: Ukázka jednotlivých subjektivních hodnocení vlnovodných jader.

V tabulce 7.1 jsou uvedeny naměřené průměry a hodnocení kvality jader optických vlnovodů ve všech připravených vzorcích. Je zřejmé, že s větší jehlou a vyšší rychlostí dávkovače roste průměr jádra. Z dat ale také vyplývá, že větší jádra jsou nanášena s menšími nehomogenitami průřezu. Pokud se podíváme na možné kombinace parametrů pro nanesení určitého průměru jádra, je vidět, že lepší kvality dosáhneme při použití menší jehly, větší rychlosti posunu a větší rychlosti dávkovače.

Optimalizoval jsem proces pro výrobu vlnovodů s jádry o průměru 50 a 500 μm . Z naměřených dat vyplývá pro 50 μm jádra několik možností, při kterých je jádro nanášeno v dobré kvalitě:

- $F = 400 \text{ mm/min}$, $v_e = 200 - 280 \text{ ot/min}$, 0,11 mm jehla,
- $F = 600 \text{ mm/min}$, $v_e = 360 \text{ ot/min}$, 0,11 mm jehla,
- $F = 600 \text{ mm/min}$, $v_e = 120 - 200 \text{ ot/min}$, 0,15 mm jehla.

Tabulka 7.1: Průměr jádra d (μm) a subjektivní kvalita jádra Q (-) v závislosti na rychlosti posunu F (mm/min), rychlosti dávkovače v_e (ot/min) dané parametrem E (-) a průměru jehly.

Průměr jehly (mm)			0,11		0,15		0,2		0,25		0,33		0,41		0,51	
F	E	v_e	Q	d	Q	d	Q	d	Q	d	Q	d	Q	d	Q	d
200	0,2	8	5	-	5	-	5	-	3	70	1	128	1	246	2	320
200	0,3	12	5	-	5	-	5	-	2	85	2	129	3	225	1	234
200	0,5	20	5	-	4	34	5	-	2	89	2	154	1	229	2	267
200	0,7	28	4	20	3	37	2	81	1	107	2	180	2	296	2	333
200	1	40	4	31	2	54	2	73	1	122	2	210	2	303	2	433
200	2	80	4	46	2	62	1	100	2	170	2	346	2	421	1	550
200	3	120	3	55	2	79	1	131	2	230	2	406	3	527	1	660
200	5	200	3	67	2	103	1	165	1	320	1	511	1	642	1	790
200	7	280	2	82	1	108	1	200	1	390	1	601	1	853	1	931
200	9	360	1	97	1	121	1	223	1	451	1	653	1	862	1	962
200	12	480	1	107	1	137	1	260	1	490	1	680	1	918	1	986
200	15	600	1	115	1	140	1	276	1	461	1	842	1	911	1	1495
400	0,1	8	5	-	5	-	5	-	2	52	1	80	1	181	1	188
400	0,15	12	5	-	5	-	5	-	3	53	1	103	2	127	1	158
400	0,25	20	5	-	5	-	5	-	2	70	2	113	3	105	4	-
400	0,35	28	5	-	4	41	4	40	2	71	2	114	4	120	4	-
400	0,5	40	4	31	3	46	2	56	2	89	2	159	3	255	3	273
400	1	80	4	34	3	65	1	80	2	117	2	212	2	372	3	375
400	1,5	120	3	39	2	74	2	94	2	151	2	247	1	508	2	458
400	2,5	200	2	47	2	97	2	124	2	188	2	332	1	609	1	571
400	3,5	280	2	58	2	129	2	144	2	222	1	403	1	624	1	668
400	4,5	360	2	65	2	147	2	166	1	259	1	457	1	613	1	687
400	6	480	2	77	1	170	3	176	1	297	1	513	1	683	1	477
400	7,5	600	2	87	1	164	1	229	1	323	1	563	1	-	1	992
600	0,0667	8	5	-	5	-	5	-	2	-	2	-	2	-	4	-
600	0,1	12	5	-	5	-	5	-	4	28	1	79	2	141	2	124
600	0,167	20	5	-	5	-	4	31	3	37	1	92	4	146	4	-
600	0,233	28	5	-	5	-	3	29	2	49	2	111	3	134	4	-
600	0,333	40	5	-	3	26	2	41	2	65	2	124	3	172	4	-
600	0,667	80	4	23	2	41	2	64	2	110	2	154	2	251	3	353
600	1	120	3	30	2	45	2	74	1	124	3	222	2	308	3	357
600	1,667	200	2	36	2	58	2	94	2	150	2	295	2	399	2	522
600	2,333	280	2	46	2	72	2	100	2	174	2	324	2	480	1	584
600	3	360	2	50	2	80	2	113	2	204	1	367	1	503	1	612
600	4	480	2	54	2	89	2	140	1	239	1	403	1	474	1	600
600	5	600	2	61	2	97	1	154	1	262	1	444	1	605	1	705

- Nanesený kanálek byl příliš nehomogenní a jeho průměr nebylo možné přesně změřit.

Pro jádro průměru 500 μm vychází nejlépe následující možnosti:

- $F = 200 \text{ mm/min}$, $v_e = 200 \text{ ot/min}$, 0,33 mm jehla,
- $F = 400 \text{ mm/min}$, $v_e = 120 \text{ ot/min}$, 0,41 mm jehla,
- $F = 600 \text{ mm/min}$, $v_e = 200 \text{ ot/min}$, 0,51 mm jehla.

Z těchto hodnot jsem vycházel a dále jsem je zpřesňoval, abych dosáhl co největší kvality vlnovodů požadovaných průměrů.

7.3 Optimalizace výrobního procesu

Prvním cílem bylo připravit vlnovod s průměrem jádra 50 μm , který by byl kompatibilní s mnohovidovým optickým vláknem s jádrem o průměru 50 μm . Vycházel jsem z hodnot z předchozí části a připravil další sadu vzorků podle tří zmíněných možností. Pro každou možnost jsem nanesl jeden vzorek, přičemž z rozsahu možných rychlostí otáčení dávkovače jsem zvolil tři hodnoty v rozsahu, ve kterém podle tabulky 7.1 vznikly vlnovody požadovaného průměru. Pro každou hodnotu rychlosti otáčení dávkovače jsem nanesl čtyři jádra, u kterých jsem pak měřil průměr pomocí mikroskopu. Cílem bylo upřesnit depoziční parametry a ověřit opakovatelnost metody. V tabulce 7.2 jsou uvedené výsledné průměry jader pro testované parametry.

Tabulka 7.2: Průměry jednotlivých vlnovodných kanálků ve vzorcích optimalizovaných pro rozměr 50 μm průměr jádra.

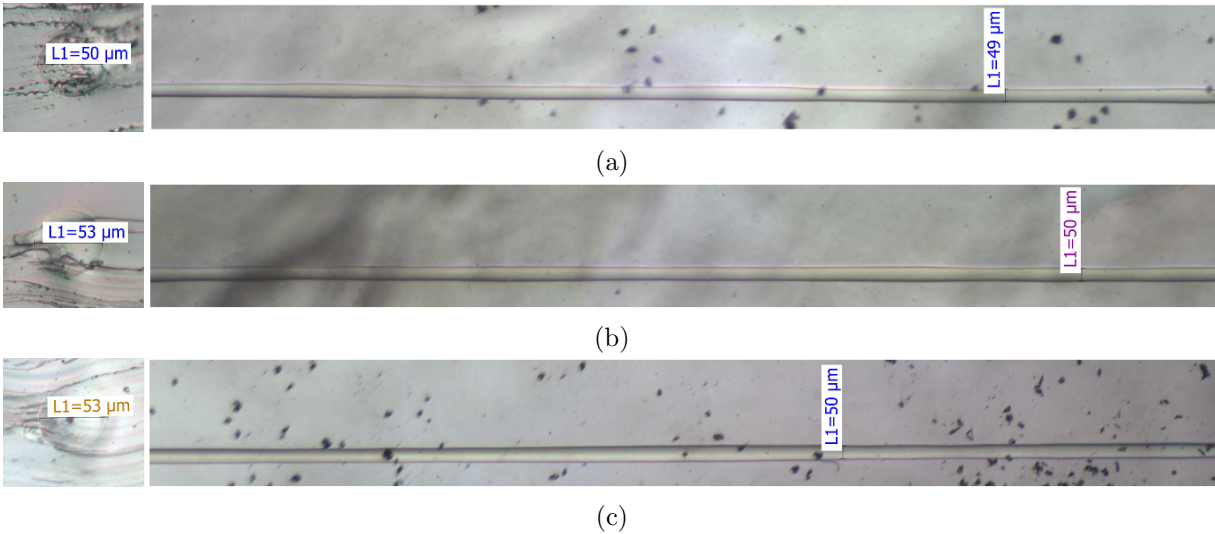
Průměr jehly (mm)	F (mm/min)	E (-)	v_e (ot/min)	Průměr 1. jádra (μm)	Průměr 2. jádra (μm)	Průměr 3. jádra (μm)	Průměr 4. jádra (μm)
0,11	400	2,5	200	45	45	46	45
0,11	400	2,75	220	48	48	48	47
0,11	400	3	240	49	51	52	50
0,11	600	2,5	300	46	44	47	46
0,11	600	3	360	52	55	48	49
0,11	600	3,5	420	56	58	-	-
0,15	600	1	120	52	48	49	51
0,15	600	1,3	160	64	59	59	59
0,15	600	1,6	200	68	68	69	68

- Kanálek se do pláště nenanesl správně, jehla byla příliš vysoko.

Kvalita jader byla u všech vzorků podobná, variace průměru byla maximálně 10%. V průřezu byla všechna jádra kulatá, nedocházelo k jejich deformacím. Na obrázku 7.3 jsou zobrazeny 50 μm vlnovody nanesené použitím všech tří postupů.

U všech vzorků měla jedna ze skupin jader průměr kolem 50 μm , z naměřených hodnot tak rovnou vyplývají tři možná nastavení pro nanášení vlnovodů s 50 μm jádry:

- $F = 400 \text{ mm/min}$, $v_e = 240 \text{ ot/min}$, 0,11 mm jehla,
- $F = 600 \text{ mm/min}$, $v_e = 360 \text{ ot/min}$, 0,11 mm jehla,
- $F = 600 \text{ mm/min}$, $v_e = 120 \text{ ot/min}$, 0,15 mm jehla.



Obrázek 7.3: Vlnovody nanesené (a) 0,11 mm jehlou, $F = 400$, $v_e = 240$, (b) 0,11 mm jehlou, $F = 600$, $v_e = 360$, (c) 0,15 mm jehlou, $F = 600$, $v_e = 120$.

Stejným způsobem jako u 50 μm jader jsem prováděl optimalizaci procesu pro nanášení vlnovodů s průměrem jádra 500 μm . Podle tří nastavení nalezených z výsledků v tabulce 7.1 jsem nanesl tři vzorky s různým nastavením rychlosti a různými jehlami. Znovu jsem vyzkoušel tři rychlosti dávkovače v rámci rozsahu nalezeného v předchozí části. Vzhledem k větším průměru jádra jsem nastavil rozteč jednotlivých kanálek na 2 mm, a proto jsem s každým nastavením nanesl pouze 2 jádra. V tabulce 7.3 jsou parametry nanášení a výsledné průměry jader.

Tabulka 7.3: Průměry jednotlivých vlnovodných kanálek ve vzorcích optimalizovaných na 500 μm průměr jádra.

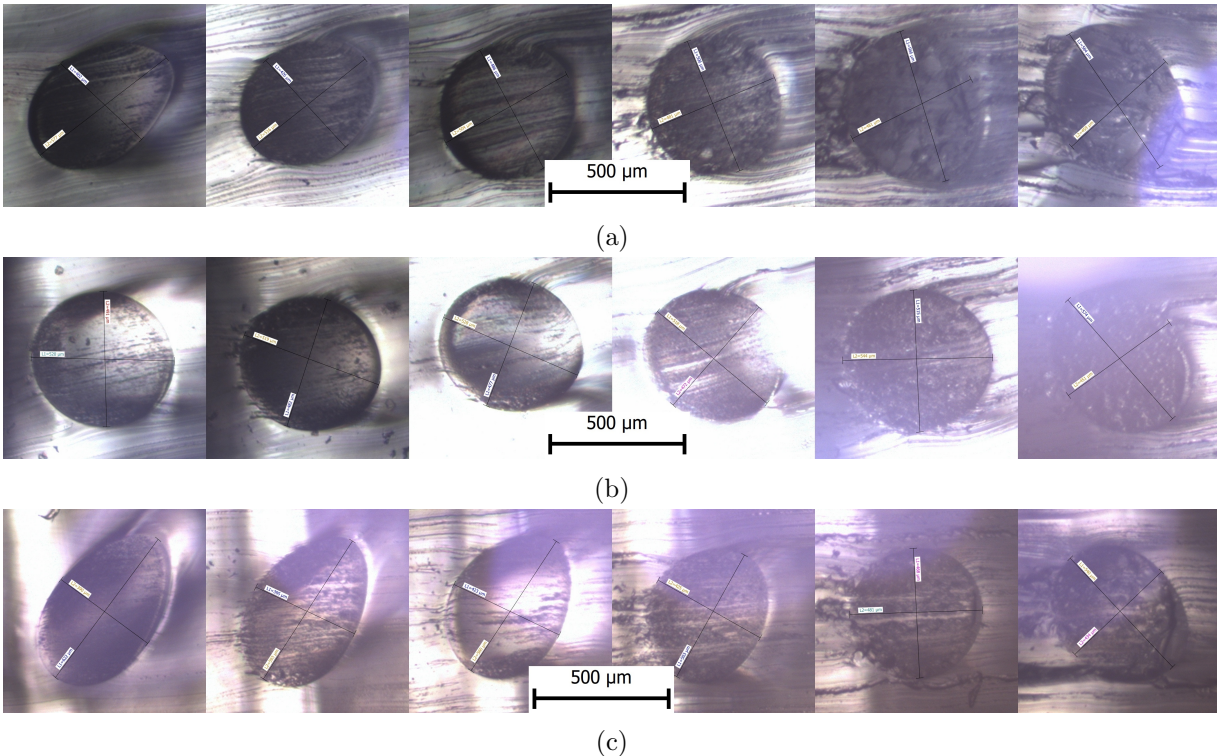
Průměr jehly (mm)	F (mm/min)	E (-)	v_e (ot/min)	Průměr 1. jádra (μm)	Průměr 2. jádra (μm)
0,33	200	5	200	535	509
0,33	200	6	240	573	564
0,33	200	7	280	582	538
0,41	400	1,5	120	368	424
0,41	400	2	160	412	424
0,41	400	2,5	200	450	-
0,51	600	1,5	180	442	394
0,51	600	2	240	445	470
0,51	600	2,5	300	513	522

- Kanálek se do pláště nenanesl správně, jehla byla příliš vysoko.

Při nanášení takto velkých jader byl problém především s dosažením kulatého průřezu, homogenita průměru byla dobrá. U vzorků nanášených jehlami s průměrem 0,41 a 0,51 mm byl tvar jádra protáhlý do oválu. Při použití jehly s průměrem 0,33 mm měla jádra více kruhový průřez, stále ne však ideálně, navíc ne u všech jader stejně.

Na základě toho jsem dál pokračoval pouze s procesem využívajícím 0,33 mm jehlu. Dále

však bylo potřeba zajistit opakovatelně kulatý průřez jádra a upřesnit nastavení dávkovače pro dosažení 500 μm jádra. Pro tento účel jsem připravil další sadu vzorků. Pro zpřesnění průměru jádra byly otestovány rychlosti dávkovače $v_e = 160; 173,3$ a $186,7$ ot/min (parametr $E = 4; 4,333; 4,667$), každou rychlostí byla nanášena dvě jádra. S tímto nastavením jsem připravil tři vzorky za použití jehly s průměrem 0,33 mm. První vzorek byl nanášen neupravenou jehlou, druhý byl nanášen jehlou ohnutou zhruba o 20° ve směru posunu dávkovače a třetí s jehlou ohnutou proti směru posunu dávkovače. Na obrázku 7.4 jsou zobrazeny průřezy všech nanášených jader.



Obrázek 7.4: Průřezy vlnodů nanášených 0,33 mm jehlou s rychlostmi dávkovače $v_e = 160; 173,3$ a $186,7$ ot/min (a) rovnou jehlou, (b) jehlou ohlou proti směru posunu, (c) jehlou ohlou po směru posunu.

Z obrázku vidíme, že proces nemá příliš dobrou opakovatelnost a při jednotlivých přejezdech vznikají různě tvarovaná jádra. Nejlépe vychází nanášení jehlou ohlou proti směru posunu (obrázek 7.4b). Nanášení neupravenou jehlou (obrázek 7.4a) dává horší výsledky a nanášením jehlou ohlou ve směru posunu (obrázek 7.4c) vznikají nejvíce deformovaná jádra. Vzhledem k deformovaným průřezům vlnodů se jejich průměr nedal přesně změřit, pohyboval se však okolo 500 μm .

Vlnovody určené pro vyhodnocení kvality jsem nanášel s následujícími parametry:

- $F = 200$ mm/min, $v_e = 180$ ot/min, 0,33 mm jehla.

Připravil jsem jeden vzorek pomocí neupravené (rovné) jehly a jeden vzorek pomocí jehly ohnuté proti směru posunu.

7.4 Příprava optimalizovaných vzorků

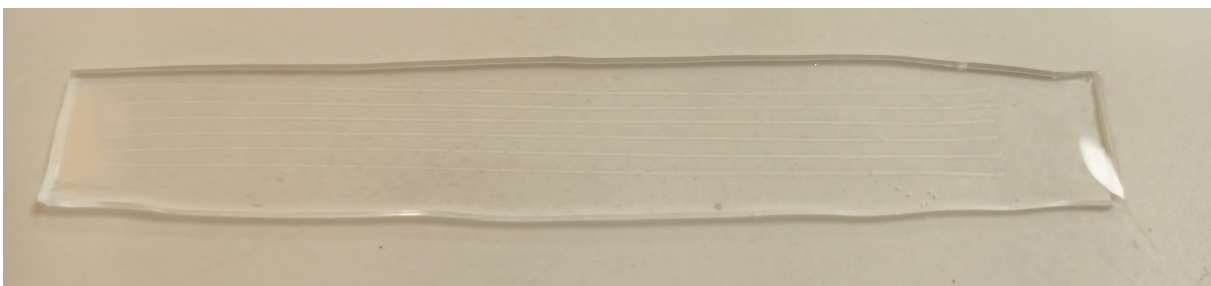
Podle postupů získaných v předchozí části jsem nanášel sadu vzorků k vyhodnocení kvality vlnodů. Všechny vzorky byly, stejně jako v předchozí části, připravovány z materiálů Sylgard 184

(plášť) a LS-6943 (jádro). Vytvrzovány byly teplotou 150°C po dobu 15 minut. Pro účely měření útlumu je lepší mít k dispozici delší vzorky, nanášel jsem proto 10 cm dlouhé vlnovody do nově připravených forem z materiálu Sylgard. Připravené formy měly hloubku kolem 2 mm, aby byly výsledné vzorky co nejtenčí. Vzorky jsem připravoval pokaždé z čerstvě namíchaných materiálů (bez skladování v mrazáku) v rámci doporučeného času zpracování 5 hodin pro LS-6943. Materiál Sylgard 184 vydržel beze změny viskozity déle než uváděných 1,5 hodiny, využíval jsem ho po dobu asi 2,5 hodiny, než začala být znatelná změna viskozity a zhoršila se možnost práce s materiálem.

Pomocí každého z výše definovaných postupů pro 50 μm jádra jsem připravil dva vzorky s osmi vlnovodnými kanálky, jeden s rozestupem kanálků 1 mm, druhý 0,25 mm. Podobně jsem připravil dva vzorky s 500 μm jádry, jeden s rovnou jehlou a druhý s jehlou ohlou proti směru posunu dávkovače. Vlnovody s 500 μm jádry měly pouze 6 vlnovodných kanálků kvůli většímu rozestupu. V tabulce 7.4 je seznam připravených vlnovodů. Na obrázku 7.5 je jeden z optimalizovaných vzorků určených na další vyhodnocení (vzorek 7). Soubory GCODE použité k nanesení vzorků jsou v příloze A.

Tabulka 7.4: Seznam vzorků vlnovodů určených k vyhodnocení.

Vzorek	Cílový průměr jádra (μm)	Rozestup kanálků (mm)	Počet kanálků	Průměr jehly (mm)	F (mm/min)	v_e (ot/min)
1	50	1	8	0,11	400	240
2	50	1	8	0,11	600	360
3	50	1	8	0,15	600	120
4	50	0,25	8	0,11	400	240
5	50	0,25	8	0,11	600	360
6	50	0,25	8	0,15	600	120
7	500	2	6	0,33	200	180
8	500	2	6	0,33, ohnutá	200	180



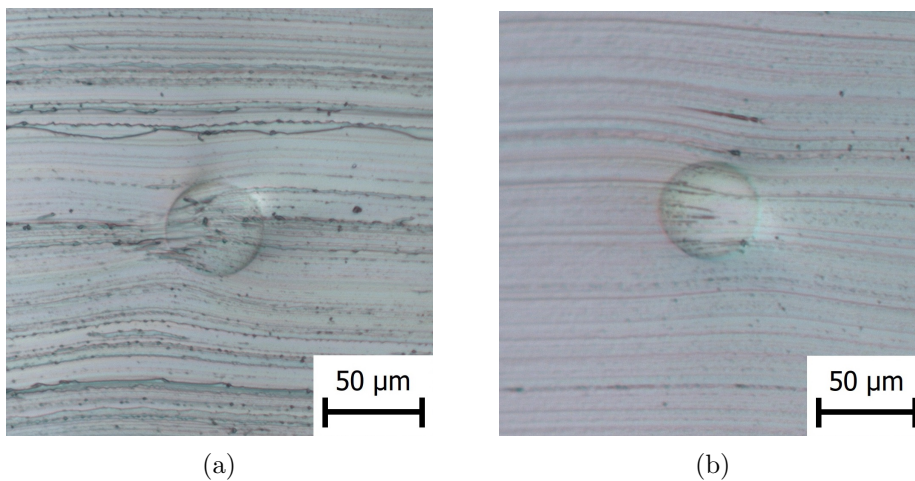
Obrázek 7.5: Vzorek 7 určený k vyhodnocení kvality vlnovodných kanálků. Délka kanálků je 10 cm, délka celého vzorku zhruba 12 cm.

8. Charakterizace připravených vlnodů

Vzorky uvedené v tabulce 7.4 jsem rozdělil do tří skupin: vlnodů o průměru 50 μm s roztečí kanálků 1 mm (vzorky 1, 2 a 3), vlnodů o průměru 50 μm s roztečí kanálků 250 μm (vzorky 4, 5 a 6) a vlnodů o průměru 500 μm s roztečí kanálků 2 mm (vzorky 7 a 8). V této kapitole se věnuji zhodnocení jejich kvality, především zjištění jejich měrného útlumu. Také opticky kontroluji kvalitu nanesených kanálků a vyhodnocuji jednotlivé depoziční procesy. Za účelem zjištění možnosti navazování vlnodů na optická vlákna jsem pak měřil rozložení výstupního vidového pole připravených vlnodů.

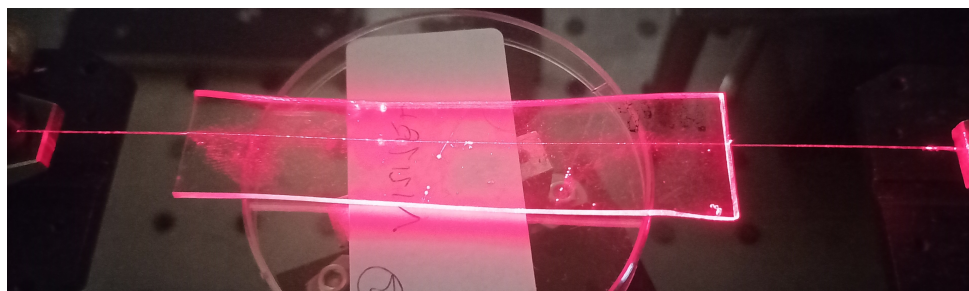
8.1 Charakterizace 50 μm vlnodů

Měřicí soustava, kterou jsem využíval pro měření optického útlumu vlnodů, je popsána v kapitole 4.4. Pro přesně měření je potřeba co nejlépe navázat svazek z optického vlákna do měřeného vlnodu. Vzhledem k mechanickým vlastnostem PDMS nešlo čela vlnodů po seříznutí vyleštit, bylo tak potřeba vlnodů uříznout tak, aby čelo bylo dostatečně kvalitní. Na obrázku 8.1 jsou fotografie čela vlnodu seříznutého žiletkou a skalpelem. Na obou je jasně viditelné jádro, řez však není dokonale rovný a na čele vznikají rýhy, které zasahují i do jádra. Ukázalo se, že nedokonalá čela mají na měření nezanedbatelný vliv. Při charakterizaci vzorků jsem čela řezal skalpelem, který zanechával menší stopy, ale pro přesnější měření a pro malé vazební ztráty při reálném použití vlnodů by bylo potřeba řezat čela jiným způsobem, například laserem, který jsem však neměl k dispozici.

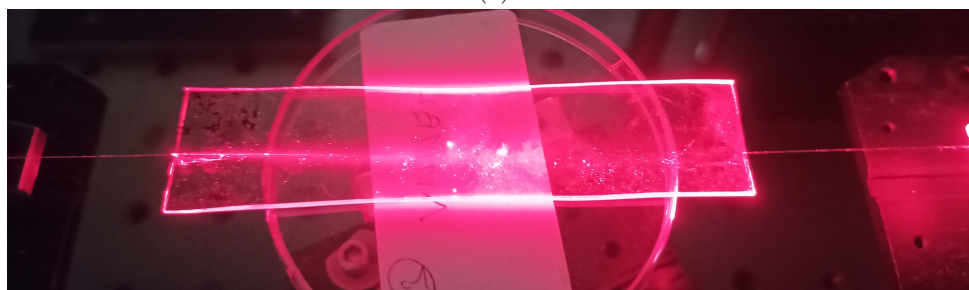


Obrázek 8.1: Seříznuté čelo vlnodu, (a) žiletkou, (b) skalpelem.

Pro kvalitní navázání svazku bylo potřeba přesně umístit obě vlákna vůči vlnovodu ve vzorku. Při navazování jsem používal červený (650 nm) laser. K prvnímu navedení vláken pomocí mikroposuvů jsem využíval kameru, poté, co byl ve vlnovodu vidět navázaný paprsek, jsem obě vlákna napoložoval tak, aby byl měřený výkon maximální, tedy aby byla optická vazba mezi vlákny a vlnovodem co nejlepší. Na obrázku 8.2 jsou ukázány dva vlnovody s dobře navázaným paprskem, jeden s nízkým (obrázek 8.2a) a jeden s vysokým (obrázek 8.2b) útlumem.



(a)



(b)

Obrázek 8.2: Vzorok během měření útlumu s navázanými vlákny, (a) vzorek s nízkým útlumem, (b) vzorek s vysokým útlumem.

Pro zpřesnění výsledků jsem měřil procházející výkon pro tři různé délky každého vlnovodu, získal jsem tak útlum pro dva úseky daného vlnovodu. Všechny změřené hodnoty výkonu jsou v příloze C. Nanesené kanálky měly délku 10 cm, po oříznutí okrajů vznikl první měřený úsek s délkou kolem 8 cm, ten jsem poté dvakrát zkrátil zhruba o 3 cm a při každé délce vzorku jsem změřil procházející výkon na vlnových délkách 650; 850; 1300 a 1550 nm.

Kvalita 50 μm kanálků s roztečí kanálků 1 mm

V tabulce 8.1 jsou uvedeny hodnoty měrného útlumu jednotlivých kanálků ve vzorku 1. Měřil jsem výkon procházející vlnovody při délkách 8,6; 4,8 a 1,8 cm a podle nich jsem spočítal měrný útlum pro dva úseky vlnovodů. V tabulkách 8.2 a 8.3 jsou stejně získané hodnoty pro vzorky 2 a 3 s podobnými délkami měřených úseků. Kanálky jsou číslované od posledního naneseného (kanálek č. 1 byl nanesen jako poslední, kanálek č. 8 jako první).

Z hodnot v tabulkách vidíme, že útlum vlnovodů na vlnových délkách 650, 850 a 1300 nm je srovnatelný, zatímco na vlnové délce 1550 nm je výrazně vyšší, což se shoduje s výsledkem měření transmisních spekter na obrázku 6.3. Je také zřejmé, že kvůli kvalitě seřiznutí čel se u jednotlivých měření liší vazební útlumy mezi vlákny a měřeným vzorkem, naměřené hodnoty jsou tímto výrazně zkreslené. Kvůli tomu jsou mezi oběma měřenými úseky na stejném kanálku rozdíly a jednotlivé kanálky se mezi sebou také liší.

Tabulka 8.1: Naměřené hodnoty útlumu vzorku 1.

Kanálék	Měrný útlum (dB/cm) v prvním úseku (3,8 cm) na vlnové délce				Měrný útlum (dB/cm) v druhém úseku (3,0 cm) na vlnové délce			
	650 nm	850 nm	1300 nm	1550 nm	650 nm	850 nm	1300 nm	1550 nm
1	0,66	0,67	0,86	2,61	1,14	1,19	1,07	2,16
2	1,19	1,40	1,59	3,73	0,92	0,68	0,55	2,02
3	0,40	0,71	0,84	3,10	3,11	3,16	2,84	3,75
4	0,83	1,78	1,96	3,92	4,98	4,12	4,26	5,88
5	-	-	-	-	7,94	7,26	7,49	8,55
6	-	-	-	-	6,97	6,77	6,81	7,96
7	-	-	-	-	4,25	4,18	4,02	4,39
8	-	-	-	-	-	-	-	-

- Kanálék nevede optický signál.

Tabulka 8.2: Naměřené hodnoty útlumu vzorku 2.

Kanálék	Měrný útlum (dB/cm) v prvním úseku (3,6 cm) na vlnové délce				Měrný útlum (dB/cm) v druhém úseku (3,1 cm) na vlnové délce			
	650 nm	850 nm	1300 nm	1550 nm	650 nm	850 nm	1300 nm	1550 nm
1	1,99	1,67	1,82	3,58	1,25	1,38	1,59	2,81
2	2,43	2,26	2,33	4,03	0,91	1,40	1,63	3,27
3	1,80	1,72	1,97	2,89	2,59	2,69	2,55	4,61
4	3,10	3,07	2,98	4,63	3,52	3,01	3,17	4,76
5	1,37	1,10	0,94	2,71	1,66	1,38	1,82	3,74
6	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-

- Kanálék nevede optický signál.

Útlum vzorku 1 vychází lépe u prvních dvou kanálků, kde se pohybuje kolem 1 dB/cm. U kanálků 3 a 4 vycházejí měření dvou úseků různě a kanálky 5-7 byly měřitelné pouze na kratším úseku. Z hodnot útlumů v druhém úseku se zdá, že kanálky nanesené dříve mají horší přenosové vlastnosti. Tomu odpovídají i neprosvítitelné kanálky v prvním úseku.

Vzorek 2 vychází podobně jako vzorek 1. Pouze kanálky 1-5 byly měřitelné, útlum je horší u dříve nanesených kanálků (kromě kanálku 5). Všechny kanálky mají útlum výrazně vyšší než 1 dB/cm, vlnovody jsou tedy nedostatečně kvalitní.

Vzorek 3 vychází z měření nejlépe, 7 z 8 kanálků mělo měřitelný útlum, který se pohyboval okolo 1-2 dB/cm. Z hodnot opět vidíme tendenci vyššího útlum u dříve nanesených kanálků, ikdyž méně výraznou. Výsledky jsou opět poměrně nekonzistentní, ale oproti vzorkům 1 a 2 jsou lepší. Ze tří vyzkoušených depozičních postupů tak vychází nejlépe postup využívaný u vzorku 3.

U všech tří vzorků pozorujeme, že kanálky nanesené dříve mají horší přenosové vlastnosti než kanálky nanesené později. V části 7.1 jsem zmínil, že vzorky vytvrzované teplotou 100°C po dobu 1 hodiny byly viditelně méně kvalitní než vzorky vytvrzované teplotou 150°C po dobu 15 minut. Odtud, spolu s naměřenými útlumy jednotlivých kanálků, usuzuji, že použitá kombinace

Tabulka 8.3: Naměřené hodnoty útlumu vzorku 3.

Kanálek	Měrný útlum (dB/cm) v prvním úseku (3,0 cm) na vlnové délce				Měrný útlum (dB/cm) v druhém úseku (2,9 cm) na vlnové délce			
	650 nm	850 nm	1300 nm	1550 nm	650 nm	850 nm	1300 nm	1550 nm
1	0,70	0,93	0,94	2,56	0,58	0,65	0,77	2,28
2	0,31	1,15	1,28	2,79	1,37	0,52	0,54	2,32
3	0,39	0,97	1,15	2,63	1,75	1,02	1,11	2,63
4	-0,16*	0,68	0,87	2,37	1,56	0,48	0,47	2,36
5	-0,25*	1,01	1,12	2,90	2,71	1,38	1,44	2,85
6	0,63	1,39	1,43	3,15	2,90	1,91	2,07	3,76
7	0,06	1,44	1,39	3,64	3,11	1,61	1,92	3,27
8	-	-	-	-	-	-	-	-

- Kanálek nevede optický signál.

* Útlum kanálku vychází záporný - příliš velká chyba měření.

materiálů LS-6943 a Sylgard 184 zřejmě vlivem povrchového pnutí vytváří v kanálku nehomogeneity, které výrazně zvyšují útlum. Dříve nanesené kanálky degradují delší dobu před vytvrzením a proto mají vyšší útlum.

Kvalita 50 μm kanálků s roztečí 250 μm

Stejným způsobem jako u vzorků 1-3 jsem změřil optický útlum u vzorků 4-6. U vzorku 4 měly všechny kanálky příliš velký útlum ke změření. Výsledné hodnoty měrných útlumů vzorků 5 a 6 jsou uvedeny v tabulkách 8.4 a 8.5.

Tabulka 8.4: Naměřené hodnoty útlumu vzorku 5.

Kanálek	Měrný útlum (dB/cm) v prvním úseku (3,3 cm) na vlnové délce				Měrný útlum (dB/cm) v druhém úseku (3,0 cm) na vlnové délce			
	650 nm	850 nm	1300 nm	1550 nm	650 nm	850 nm	1300 nm	1550 nm
1	1,38	0,62	1,16	2,81	1,32	2,39	2,17	4,67
2	1,10	0,46	1,00	2,52	0,64	1,41	1,51	3,92
3	1,56	1,51	1,78	3,74	1,01	2,26	2,36	4,18
4	1,27	1,14	1,50	2,57	1,65	2,51	2,53	4,49
5	1,09	1,48	1,61	4,25	1,46	1,89	1,92	3,31
6	2,47	2,28	2,38	4,50	1,51	2,33	2,02	3,57
7	-	-	-	-	2,08	2,36	2,22	4,62
8	2,20	2,68	2,15	2,43	2,21	2,20	2,77	5,67

- Kanálek nevede optický signál.

U vzorku 5 opět vidíme o něco vyšší hodnoty útlumu u dříve nanesených kanálků. Všechny kanálky kromě prvního úseku kanálku č. 7 však měly měřitelný útlum. Výsledky pro oba úseky se navíc docela dobře shodují. Útlumy se opět pohybují okolo 1-2 dB/cm, což je pro praktické využití příliš velká hodnota. Pouze na jednom úseku v kanálku 7 byl útlum neměřitelný. Dříve nanesené kanálky mají opět o něco nižší měrný útlum.

Vzorek 6 má oproti vzorku 5 větší rozdíly optického útlumu mezi jednotlivými kanálky a úseky. Prvních pět kanálků vychází podobně nebo lépe, kanálky 6-8 jsou však nepoužitelné. Při rozteči kanálků 250 μm by tak mohl problém představovat vnější průměr použité jehly. Jehla s vnitřním průměrem 0,11 mm, použitá na vzorky 4 a 5, má vnější průměr 0,20 mm, zatímco jehla s vnitřním průměrem 0,15 mm použitá na vzorek 6 má vnější průměr 0,25 mm.

Tabulka 8.5: Naměřené hodnoty útlumu vzorku 6.

Kanálek	Měrný útlum (dB/cm) v prvním úseku (3,2 cm) na vlnové délce				Měrný útlum (dB/cm) v druhém úseku (3,0 cm) na vlnové délce			
	650 nm	850 nm	1300 nm	1550 nm	650 nm	850 nm	1300 nm	1550 nm
1	0,12	0,12	0,28	2,11	1,02	0,78	0,76	6,07
2	0,42	0,36	0,47	2,04	1,10	0,84	1,02	3,00
3	0,31	0,25	0,29	1,43	1,33	0,78	0,78	2,43
4	0,85	0,32	0,35	1,61	2,06	1,58	1,45	3,45
5	0,76	0,36	0,65	2,20	2,08	1,39	1,25	2,42
6	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-

- Kanálek nevede optický signál.

Výsledky jsou podobné jako u vzorků 1, 2 a 3. Útlum kanálků je velký a mezi jednotlivými měřeními kolísá, zřejmě vlivem seřízení čel vlnovodů. Je tu také patrný trend vyšších útlumů u dříve nanesených kanálků, u vzorku 6 jsou nejstarší kanálky neměřitelné.

Na obrázku 8.3 jsou pohledy shora na vlnovody ve vzorcích 4, 5 a 6. Všechny kanálky ve vzorku 4 (obrázek 8.3a) jsou nehomogenní a deformované, což vysvětluje jejich vysoký útlum. Rozestup jednotlivých kanálků navíc kolísá. Tento vzorek byl připravován pomalejším posunem dávkovače než vzorky 5 a 6, nanášení tak trvalo déle a kanálky mohly degradovat delší dobu, než byly vytvrzeny.

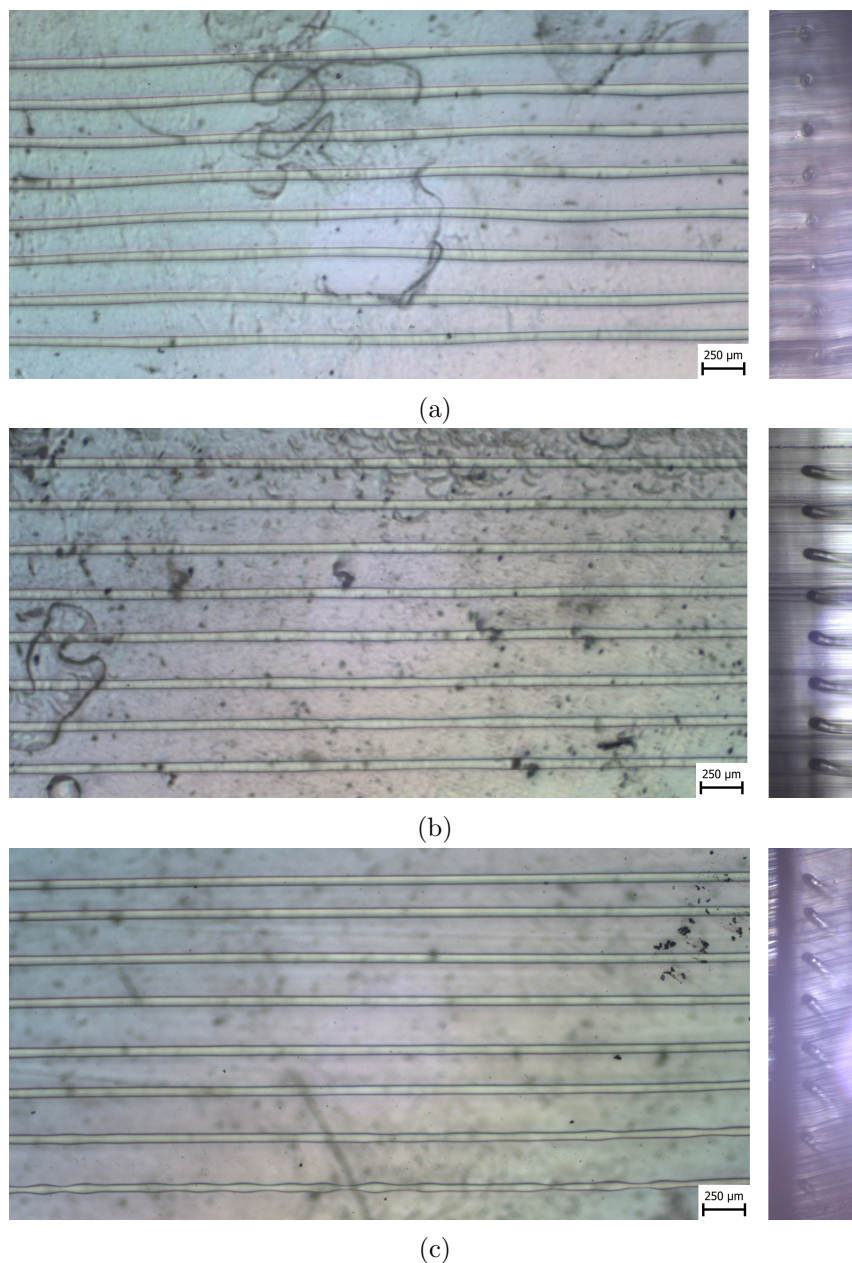
Vzorek 5 na obrázku 8.3b vycházel z měření útlumů jako nejkvalitnější, při optické kontrole kanálků vypadá také nejlépe. Na jednotlivých kanálcích jsou také nehomogenity, ale méně výrazné. Rozestup kanálků se mění minimálně. U dříve nanesených kanálků (dole) se zdá, že průměr kolísá víc než u pozdějších (nahore).

Vzorek 6 na obrázku 8.3c byl jako jediný nanášen jehlou o průměru 0,15 mm. Rozteč mezi jednotlivými kanálky se mění, ale ne tak výrazně jako u vzorku 4, což přičítám většímu průměru jehly, která tak více ovlivňovala sousední kanálky. Z obrázku je jasné vidět, že u dříve nanesených kanálků je více poruch a průměr jádra je méně homogenní.

Srovnání procesů

Připravil jsem celkem 6 vzorků vlnovodů s 50 μm jádrem pomocí tří nastavení dávkovače. Jeden ze vzorků neměl žádný kanálek s měřitelným útlumem (vzorek 4), u ostatních vždy alespoň polovina kanálků vedla optický signál. Kanálky, které signál nevedly, byly obvykle ty, které byly přístrojem nanášeny jako první. Zároveň byl u většiny vzorků vidět trend nižšího měrného útlumu u později nanesených kanálků. Na obrázku 8.3c je pohled shora na vzorek 6 a vidíme, že dříve nanesené kanálky jsou méně homogenní než ty nanesené později. Kanálky tedy zřejmě v době mezi nanášením a vytvrzením degradují, nejspíš vlivem povrchového pnutí materiálů.

Při takto nanášení vlnovodů s průměrem jádra 50 μm tedy problém představuje především měrný útlum daný nehomogenitami na kanálku. Průřez připravených vzorků byl vždy téměř kruhový a nedocházelo k jeho deformaci.



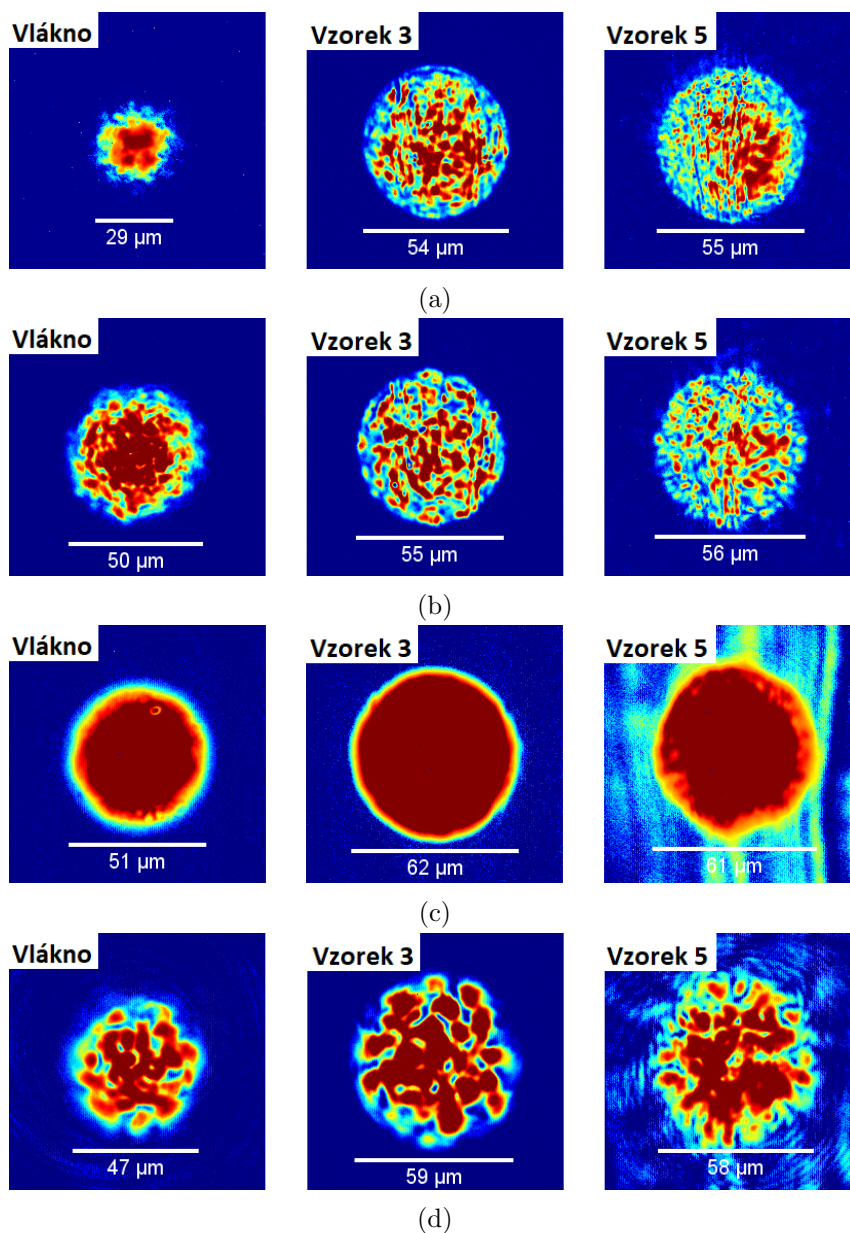
Obrázek 8.3: Pohled shora a v řezu na vzorky 50 μm vlnovodů s roztečí 250 μm , (a) vzorek 4, (b) vzorek 5, (c) vzorek 6.

Z naměřených hodnot měrného útlumu vycházejí nejlépe vzorky 3 a 6, připravované stejným procesem. U těchto vzorků se měrný útlum na vlnových délkách 650; 850 a 1300 nm pohyboval okolo 1 dB/cm. Vzorky 2 a 5 jsou o něco horší, ačkoli vzorek 5 má víc funkčních kanálků než vzorek 6, což může být dané použitím menší jehly, která při malé rozteči míň poškozuje už nanesené kanálky. Měrný útlum se zde pohyboval okolo 1-2 dB/cm. Vzorky 1 a 4 mají nejvyšší měrný útlum, respektive vůbec nevedou optický signál. Z testovaných procesů tedy nejkvalitnější

vlnovody vznikly při využití jehly s průměrem 0,15 mm s parametry $F = 600$, $v_e = 120$.

Rozložení vidového pole

V kapitole 3 jsem zmiňoval, že jednou z výhod výroby vlnodů pomocí mikrodávkače je kulatý průřez jader, který umožňuje lepší navázání signálu mezi takto připraveným vlnovodem a optickým vláknem. V kapitole 7.3 jsem pak ověřil, že připravené vlnovody s 50 μm jádry mají dobře kruhový průřez, kdy rozměr je kompatibilní s rozměr optického vláknového vlnovodu standardu OM2, OM3 a OM4, kde má jádro optického vlnovodu rozměr 50 μm . Pro ověření



Obrázek 8.4: Rozložení vidového pole v mnohovidovém optickém vlákně s jádrem 50 μm , v kanálku 1 vzorku 5 a v kanálku 1 vzorku 6, (a) na vlnové délce 650 nm, (b) na vlnové délce 850 nm, (c) na vlnové délce 1300 nm, (d) na vlnové délce 1550 nm.

možnosti navazování jsem měřil rozložení vidového pole v optickém vlákne i v připravených vlnovodech.

Rozložení pole jsem měřil na optické lavici s InGaAs kamerou (kapitola 4.5). Využíval jsem objektiv s 40x zvětšením. Změřil jsem rozložení pole na vlnových délkách 650; 850; 1300 a 1550 nm v mnohovidovém optickém vláknu s průměrem jádra 50 μm a v kanálcích 1 vzorků 3 a 5.

Na obrázku 8.4 jsou naměřená rozložení vidového pole na jednotlivých vlnových délkách. Na všech měřených vlnových délkách vidíme, že oba měřené vlnovody mají téměř ideálně kruhový průřez a rozložení vidového pole v nich je velmi podobné rozložení v optickém vlákne. Rozdíl je v průměru vidového pole, který je na všech vlnových délkách o něco větší u připravených vlnovodů. Vlnovody tak mají pravděpodobně mírně větší průměr jádra, průměr může být také ovlivněn větším kontrastem indexu lomu mezi pláštěm a jádrem vlnovodu. Úpravou dávkovacího procesu by šlo zmenšit průměr jádra vlnovodu tak, aby průměr vidového pole odpovídal optickému vláknu.

8.2 Charakterizace 500 μm vlnovodů

Stejně jako u vlnovodů s 50 μm jádry jsem měřil optický útlum připravených vzorků s 500 μm vlnovodnými jádry. Na vstupu vlnovodů jsem nechal 50 μm mnohovidové optické vlákno, na výstupu jsem použil velkopřůměrové vlákno MOLEX (FIP500550590, Polymicro TECHNOLOGIES) s průměrem jádra 500 μm . Oproti měření v předchozí části se zdálo, že seříznutí čel vlnovodů neovlivňuje měření, hodnoty vycházely poměrně konzistentně. U výstupního vlákna to bylo zřejmě průměrem čela vlnovodu, na kterém byly v průměru vždycky podobné poruchy. Při navazování vstupního vlákna jsem musel najít takovou pozici, při které byl procházející výkon maximální, tedy vlákno navazovalo na část čela vlnovodu s minimem poruch.

Měl jsem připravené dva vzorky vlnovodů, každý s šesti kanálky, popsané v tabulce 7.4. V tabulkách 8.6 a 8.7 jsou uvedeny hodnoty měrného útlumu spočítané z naměřených hodnot procházejícího výkonu. Z tabulek vidíme, že oproti kanálkům s průměrem 50 μm mají naměřené

Tabulka 8.6: Naměřené hodnoty útlumu vzorku 7.

Kanálek	Měrný útlum (dB/cm) v prvním úseku (3,0 cm)				Měrný útlum (dB/cm) v druhém úseku (3,0 cm)			
	650 nm	850 nm	1300 nm	1550 nm	650 nm	850 nm	1300 nm	1550 nm
1	0,20	0,36	0,40	1,99	0,48	0,46	0,56	2,15
2	0,13	0,11	0,19	1,81	0,35	0,40	0,53	2,10
3	0,27	0,30	0,10	1,93	0,28	0,38	0,78	2,07
4	0,20	0,32	0,34	1,99	0,31	0,34	0,42	1,94
5	0,10	-0,01*	0,10	1,67	0,38	0,47	0,56	2,08
6	0,22	0,28	0,32	2,03	1,03	1,11	1,22	2,70

* Útlum kanálku vychází záporný - příliš velká chyba měření.

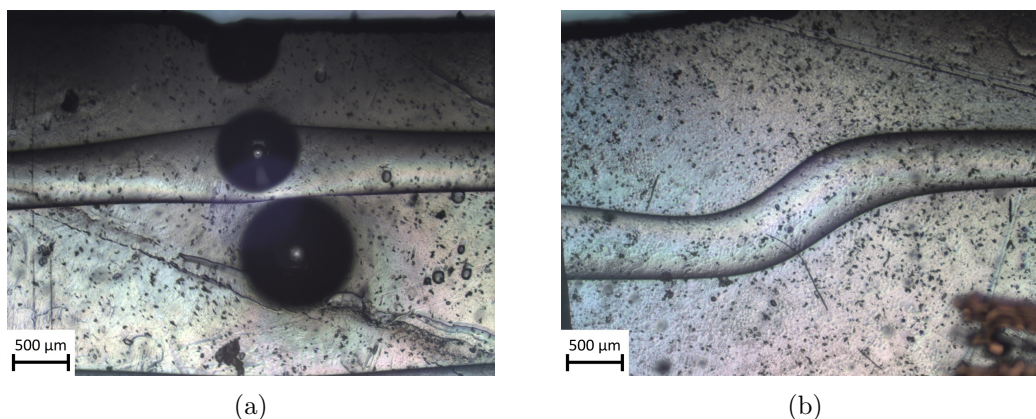
hodnoty optického útlumu daleko menší rozptyl hodnot. Naměřené hodnoty útlumu jsou také nižší než u vlnovodů s 50 μm jádry. Jediné odchylky jsou u kanálků 5 a 6 vzorku 8 a druhého měřeného úseku kanálku 6 vzorku 7. Tyto zvýšené hodnoty byly způsobeny narušením kanálku vzduchovou bublinou (obrázek 8.5a) nebo prudkým záhybem na vlnovodu (obrázek 8.5b). Bubliny v materiálu vznikaly zřejmě vlivem nedostatečného odvzdušnění materiálu, záhyby vznikaly

Tabulka 8.7: Naměřené hodnoty útlumu vzorku 8.

Kanálek	Měrný útlum (dB/cm) v prvním úseku (3,5 cm)				Měrný útlum (dB/cm) v druhém úseku (2,9 cm)			
	650 nm	850 nm	1300 nm	1550 nm	650 nm	850 nm	1300 nm	1550 nm
1	0,40	0,36	0,44	2,33	0,06	0,33	0,47	1,81
2	0,25	0,20	0,26	1,88	0,27	0,41	0,52	2,12
3	0,85	0,90	1,01	2,68	0,39	0,25	0,32	1,85
4	0,91	1,20	1,32	3,03	-0,08	-0,21	-0,11	1,40
5	1,80	1,02	1,06	2,78	2,37	1,83	1,96	3,42
6	-	-	-	-	-	-	-	-

- Kanálek nevede optický signál.

vlivem proudění materiálu pláště buď při vzniku bublin, nebo při poškození formy, ze které pak materiál vytékal.



Obrázek 8.5: Poruchy vlnovodů s průměrem 500 µm, (a) vzduchová bublina v plášti, (b) záhyb na vlnovodu.

V tabulce 8.8 jsou průměrné hodnoty měrného optického útlumu u vzorků 7 a 8 spočítané z měrných útlumů všech měřitelných kanálků v obou úsecích bez nejvyšší a nejnižší naměřené hodnoty. Vidíme, že vzorek 7 má na vlnových délkách 650; 850 a 1300 nm průměrný útlum 0,28; 0,34 a 0,42 dB/cm s malým rozptylem hodnot, což považuji za velmi dobrý výsledek a prakticky použitelnou hodnotu. Na vlnové délce 1550 nm je útlum podle očekávání výrazně vyšší vlivem materiálové absorpce. Průměrné hodnoty útlumu vzorku 8 jsou vyšší, při zanedbání nepovedeného kanálku 5 jsou však v podstatě stejné jako u vzorku 7. Jednotlivé kanálky se však mezi sebou víc liší a hodnoty útlumu mají větší rozptyl.

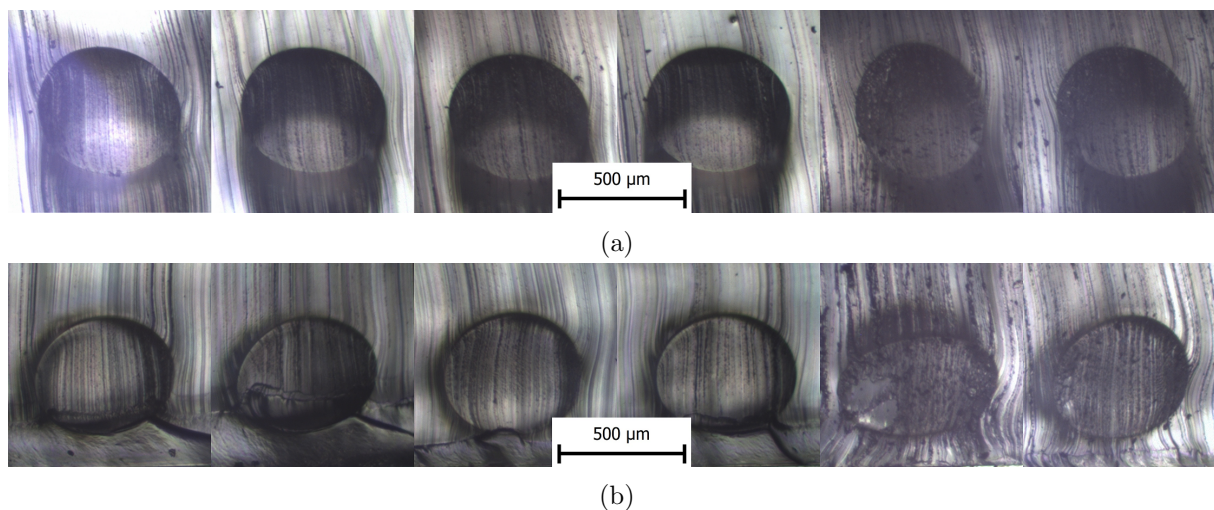
Oproti vlnovodům s 50 µm jádry zde vysoký měrný útlum kanálků daný rozptylem na nehomogenitách nepředstavuje problém. Zřejmě vlivem většího průměru mají kanálky méně poruch, jejich útlum je nízký a rozptyl útlumu je malý. To je dané také tím, že vzhledem k většímu průměru je snazší navázání optického svazku z vlákna do kanálku a naopak i přes nedokonale hladká čela, chyba měření optického útlumu je tak menší. Naopak oproti vlnovodům z předchozí části zde představuje problém průřez vlnovodů, který se mezi jednotlivými kanálky liší a není dokonale kruhový. Zřejmě však nepředstavuje takový problém, aby se významná část svazku

vyvázala a ovlivnila měření.

Tabulka 8.8: Průměrné hodnoty měrného útlumu vzorků 7 a 8 po odstranění nejnižší a nejvyšší hodnoty.

Kanálek	Střední hodnota útlumu (dB/cm) na vlnové délce				Směrodatná odchylka útlumu (dB/cm) na vlnové délce			
	650 nm	850 nm	1300 nm	1550 nm	650 nm	850 nm	1300 nm	1550 nm
Vzorek 7	0,28	0,34	0,42	2,01	0,10	0,10	0,20	0,10
Vzorek 8	0,62	0,58	0,68	2,31	0,56	0,39	0,40	0,47
Vzorek 8 kanálky 1-4	0,28	0,31	0,38	1,58	0,32	0,38	0,39	0,47

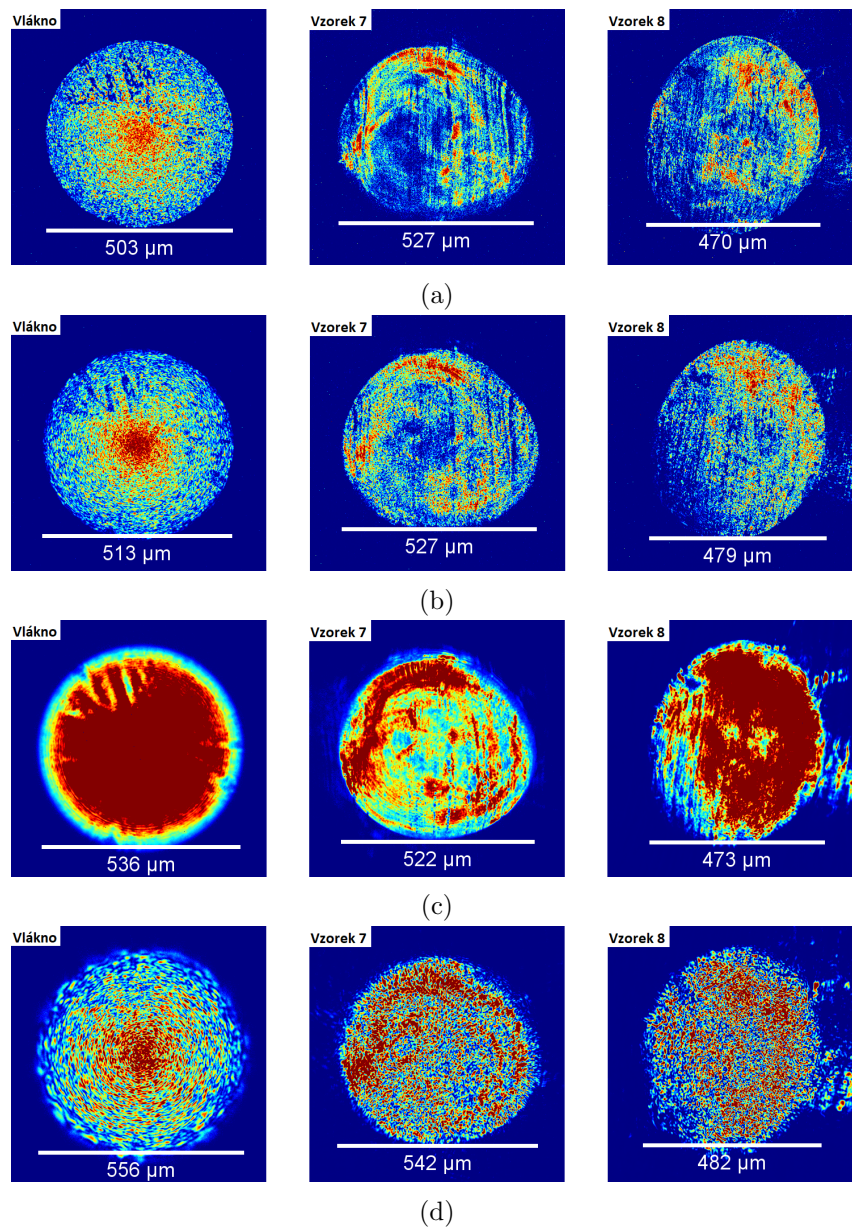
Na obrázku 8.6 průřezy jednotlivých jader ve vzorcích 7 a 8. Vidíme, že ve vzorku 7 (obrázek 8.6a) jsou průřezy kulatější než ve vzorku 8 (obrázek 8.6b), kde jsou více deformované do oválu. Celkově jsou si však jednotlivá jádra podobná a nejsou mezi nimi velké rozdíly. Vliv zde také může mít tloušťka vrstvy materiálu pláště a hloubka ponoření jehly při nanášení - tyto parametry jsem netestoval.



Obrázek 8.6: Průřezy měřených kanálků o průměru 500 µm, (a) vzorek 7, (b) vzorek 8.

Rozložení vidového pole

Měřil jsem rozložení vidového pole v plastovém optickém vlákne s jádrem o průměru 500 µm a v kanálcích 1 vzorků 7 a 8. Naměřené výsledky jsou na obrázku 8.7. Na všech vlnových délkách je ve vlákne podobné rozložení pole, ve středu je nejvyšší intenzita a ke krajím klesá. U měřených vlnovodů je pole rozloženo rovnoměrněji a víc koncentrováno v bodech mimo střed jádra. To může být dané poruchami na čele vzniklými seřiznutím, nebo specifickým (nekulatým) tvarem vlnovodu, ve kterém pak vznikají jiné vidy. Podle očekávání je také průřez vidového pole deformovaný do oválu, ale ne nijak zásadně, a rozměrově je optickému vláknu s průměrem jádra 500 µm podobný. Předpokládám proto, že vazební ztráty vlnovodu na optické vlákno by nebyly příliš velké.



Obrázek 8.7: Rozložení vidového pole v mnohovidovém optickém vlákně s jádrem 500 μm , v kanálku 1 vzorku 7 a v kanálku 1 vzorku 8, (a) na vlnové délce 650 nm, (b) na vlnové délce 850 nm, (c) na vlnové délce 1300 nm, (d) na vlnové délce 1550 nm.

9. Závěr

V práci jsem se věnoval výrobě optických planárních vlnovodů pomocí metody mikrodávkování polymerních materiálů. Navrhl a sestrojil jsem přístroj pro mikrodávkování z dostupných a 3D vytištěných součástek. Přístroj při práci dávkuje kapalným materiálem jádra do kapalného materiálu pláště pomocí dávkovací jehly, která se zároveň posouvá. Po dokončení nanášení jsou materiály vytvrzeny v laboratorní peci při teplotě 150°C. Za závěr jsou vzorky seříznuty a nanášené kanálky tvoří jádra optických planárních vlnovodů.

Změřil jsem transmisní spektra a index lomu dostupných polymerních materiálů PDMS. Na základě těchto dat jsem zvolil kombinaci materiálů Sylgard 184 (plášť) a LS-6943 (jádro). S těmito materiály jsem pak prováděl depoziční testy a optimalizoval proces pro výrobu optických vlnovodů s průměrem jádra 50 a 500 μm . Na základě optimalizovaného procesu jsem pak připravil sadu vzorků k vyhodnocení kvality nanášených optických vlnovodů.

Připravené vlnovody s jádrem o průměru 50 μm měly proměnnou kvalitu. Část kanálků nevedla optický signál, měrný útlum ostatních se pohyboval nad hranicí 1 dB/cm na měřených vlnových délkách 650; 850 a 1300 nm. Kvůli mechanickým vlastnostem použitých materiálů PDMS nebylo možné čelo po seříznutí vyleštit, zůstaly tak na něm poruchy, které působovaly vazební ztráty mezi měřeným vlnovodem a optickým vláknem a naměřené hodnoty měrného útlumu tak byly zatíženy velkou chybou. Útlum vlnovodů byl dán rozptylem na nehomogenitách v jádře, která vznikaly v průběhu nanášení a vytvrzování. Připravené vlnovody měly podobné rozložení výstupního vidového pole jako mnohovidové optické vlákno s jádrem o průměru 50 μm . Byly připraveny vzorky s roztečí jednotlivých vlnovodných kanálků 1 a 0,25 mm, tloušťka vzorků byla zhruba 1-1,5 mm.

Průměrné hodnoty měrného optického útlumu na vzorku s šesti vlnovodnými kanálky o průměru 500 μm byly 0,28; 0,34 a 0,42 dB/cm na vlnových délkách 650; 850 a 1300 nm. Rozteč jednotlivých kanálků byla 2 mm, vzorky měly tloušťku kolem 1,5-2 mm. Rozložení vidového pole připravených kanálků a optického vlákna s průměrem jádra 500 μm bylo podobné, průřez připravených vlnovodů byl mírně deformovaný (neměl ideálně kruhový tvar) a vlivem poruch na čele vlnovodů nebylo rozložení intenzity gaussovské. Poruchy však měly minimální vliv na naměřené hodnoty útlumu, jelikož vlivem většího průměru jádra vlnovodu méně ovlivňovaly vazební útlum. Chyba měření a rozptyl naměřených hodnot měrného útlumu tak byly malé.

Předchozí publikace, věnující se přípravě vlnovodů mikrodispensingem, se zabývaly využitím metody při nanášení UV světlem vytvrditelných materiálů, které jsou spolu mísitelné, díky čemuž dochází k difúzi jádra a pláště a vzniku vlnovodů s gradientní změnou indexu lomu. Oproti tomu jsou materiály používané v této práci jsou vytvrzované teplem a nejsou mísitelné. Vznikají tak vlnovody se skokovou změnou indexu lomu. Díky specifickým vlastnostem použitých materiálů mají výsledné vlnovody velmi dobrou tepelnou a chemickou odolnost a ohebnost.

Literatura

- [1] R. Dangel, J. Hofrichter, F. Horst, D. Jubin, A. L. Porta, N. Meier, I. M. Soganci, J. Weiss, and B. J. Offrein, “Polymer waveguides for electro-optical integration in data centers and high-performance computers,” *Opt. Express*, vol. 23, no. 4, pp. 4736–4750, Feb 2015. [Online]. Available: <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-23-4-4736>
- [2] M. U. Khan, J. Justice, J. Petäjä, T. Korhonen, A. Boersma, S. Wieggersma, M. Karppinen, and B. Corbett, “Multi-level single mode 2d polymer waveguide optical interconnects using nano-imprint lithography,” *Opt. Express*, vol. 23, no. 11, pp. 14 630–14 639, Jun 2015. [Online]. Available: <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-23-11-14630>
- [3] V. Prajzler, V. Chlupaty, P. Kulha, M. Neruda, S. Kopp, and M. Mühlberger, “Optical polymer waveguides fabricated by roll-to-plate nanoimprinting technique,” *Nanomaterials*, vol. 11, no. 3, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2079-4991/11/3/724>
- [4] K. Novotný, *Optická komunikační technika*. ČVUT, 1998.
- [5] U. Streppel, P. Dannberg, C. Wächter, A. Bräuer, L. Fröhlich, R. Houbertz, and M. Popall, “New wafer-scale fabrication method for stacked optical waveguide interconnects and 3d micro-optic structures using photoresponsive (inorganic–organic hybrid) polymers,” *Optical Materials*, vol. 21, no. 1, pp. 475–483, 2003. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925346702001866>
- [6] F. E. Doany, C. L. Schow, B. G. Lee, R. A. Budd, C. W. Baks, C. K. Tsang, J. U. Knickerbocker, R. Dangel, B. Chan, H. Lin, C. Carver, J. Huang, J. Berry, D. Bajkowski, F. Libsch, and J. A. Kash, “Terabit/s-class optical pcb links incorporating 360-gb/s bidirectional 850 nm parallel optical transceivers,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, no. 4, pp. 560–571, 2012.
- [7] K. Soma and T. Ishigure, “Fabrication of a graded-index circular-core polymer parallel optical waveguide using a microdispenser for a high-density optical printed circuit board,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 19, no. 2, pp. 3 600 310–3 600 310, 2013.
- [8] T. Ishigure, D. Sukanuma, and K. Soma, “Three-dimensional high density channel integration of polymer optical waveguide using the mosquito method,” in *2014 IEEE 64th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2014, pp. 1042–1047.
- [9] X. Xu, L. Ma, and Z. He, “3d polymer directional coupler for on-board optical interconnects at 1550 nm,” *Opt. Express*, vol. 26, no. 13, pp. 16 344–16 351, Jun 2018. [Online]. Available: <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-26-13-16344>

- [10] S. Yakabe, Y. Kobayashi, H. Matsui, Y. Saito, K. Manabe, and T. Ishigure, “Low loss single-mode polymer optical waveguide with circular cores,” *OSA Continuum*, vol. 4, no. 3, pp. 1070–1085, Mar 2021. [Online]. Available: <http://www.osapublishing.org/osac/abstract.cfm?URI=osac-4-3-1070>
- [11] “Model 2010/ m overview.” [Online]. Available: <https://www.metricon.com/model-2010-m-overview>
- [12] “Lineární pojezd.” [Online]. Available: <https://www.postavrobota.cz/Prizmaticky-linearni-pojezd-400mm-s-kulickovym-soubem-a-krokovym-motorem-d1343.htm>
- [13] [Online]. Available: <https://www.dosieren.de/cz/detail/index/sArticle/692>
- [14] “Marlin firmware.” [Online]. Available: <https://marlinfw.org/>
- [15] “Ls-6943 datasheet.” [Online]. Available: https://www.avantorsciences.com/assetsvc/asset/en_US/id/29018084/contents
- [16] “Sylgard 184 datasheet.” [Online]. Available: <https://www.dow.com/content/dam/dcc/documents/en-us/productdatasheet/11/11-31/11-3184-sylgard-184-elastomer.pdf?iframe=true>
- [17] “Qsil 216 datasheet.” [Online]. Available: <http://www.quantumsilicones.com/wp-content/uploads/2012/02/QSil-216A-and-B.pdf>
- [18] “Ker-4690 datasheet.” [Online]. Available: https://www.microresist.de/?jet_download=1977
- [19] “Med-6210 datasheet.” [Online]. Available: https://www.avantorsciences.com/assetsvc/asset/en_US/id/29019905/contents/en_us_tds_nusimed-6210.pdf
- [20] “Med-6215 datasheet.” [Online]. Available: https://www.avantorsciences.com/assetsvc/asset/en_US/id/29019912/contents/en_us_tds_nusimed-6215.pdf

A. Seznam digitálních příloh

A.1 3D model mikrodávkovacího přístroje

Soubor ve formátu f3d obsahující navržený model přístroje pro mikrodávkování polymerů.

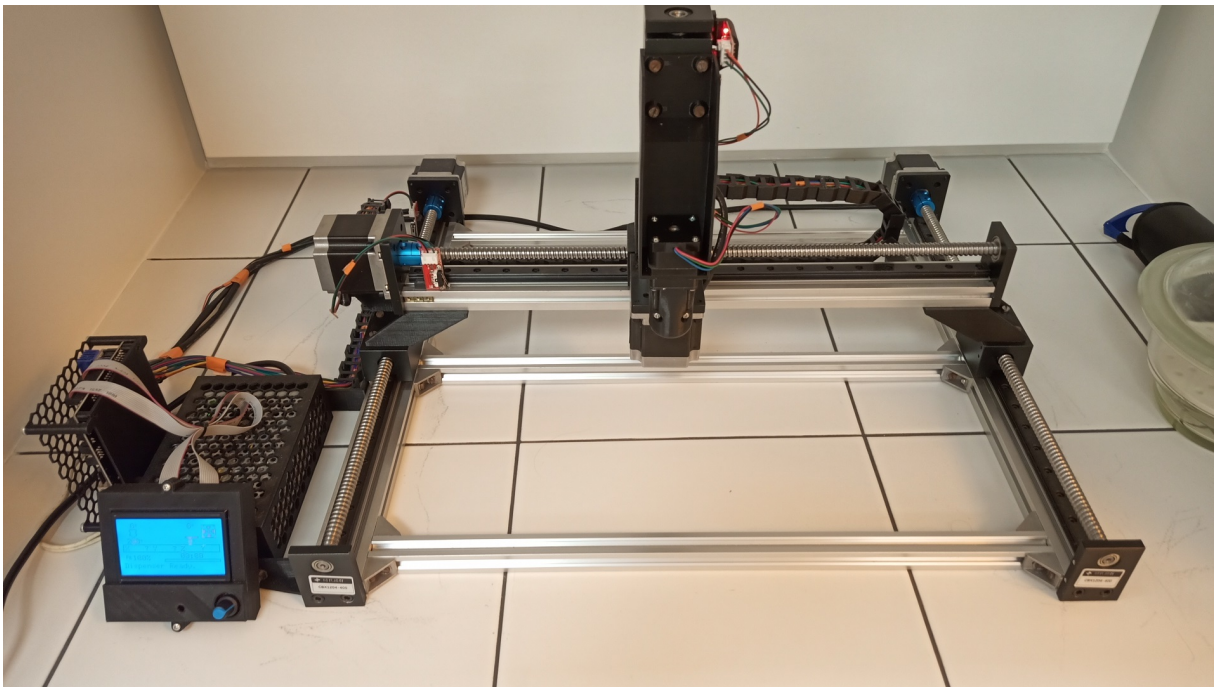
A.2 Firmware mikrodávkovacího přístroje

Firmware marlin konfigurovaný pro navržený přístroj.

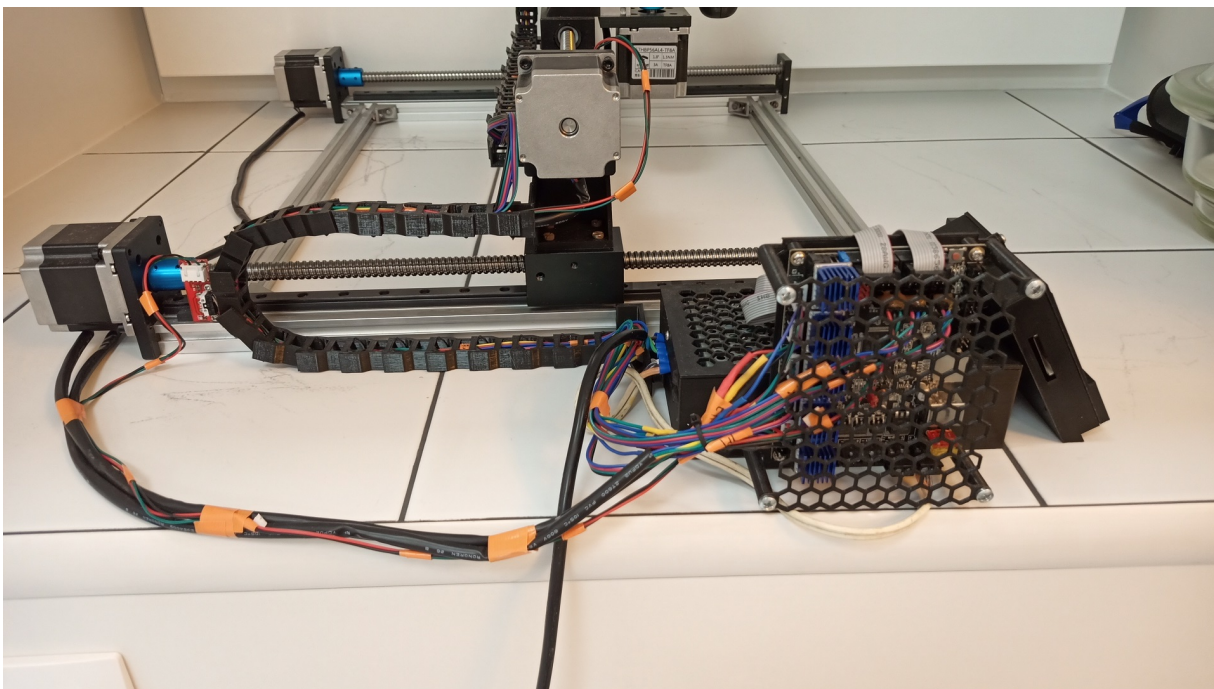
A.3 Použité GCODE soubory

GCODE soubory použité pro nanášení vzorků popsaných v tabulce 7.4.

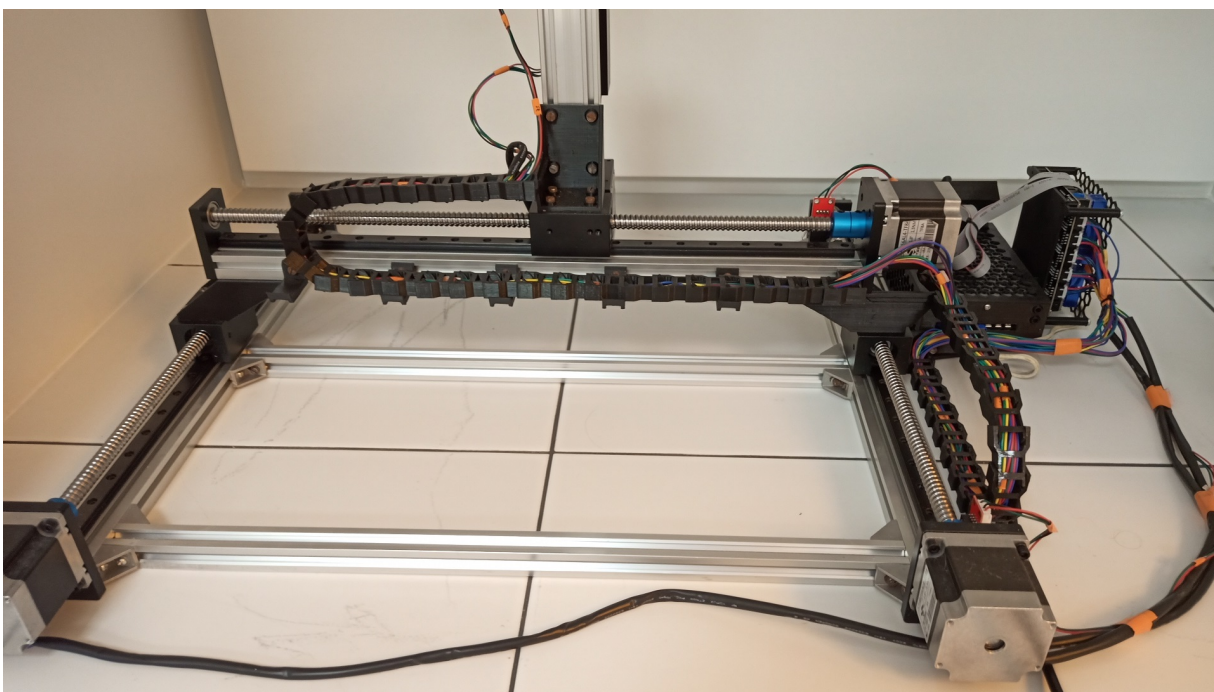
B. Zkonstruovaný přístroj



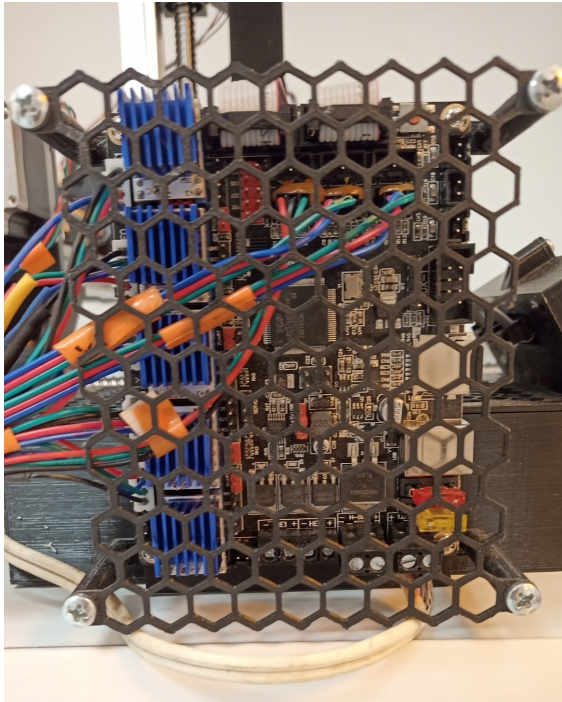
Obrázek B.1: Přístroj při pohledu zepředu.



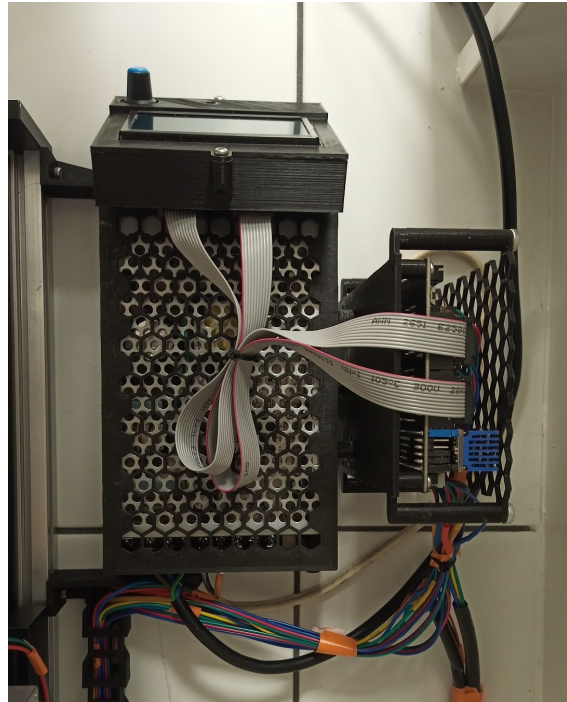
Obrázek B.2: Příklad při pohledu z boku.



Obrázek B.3: Příklad při pohledu zezadu.

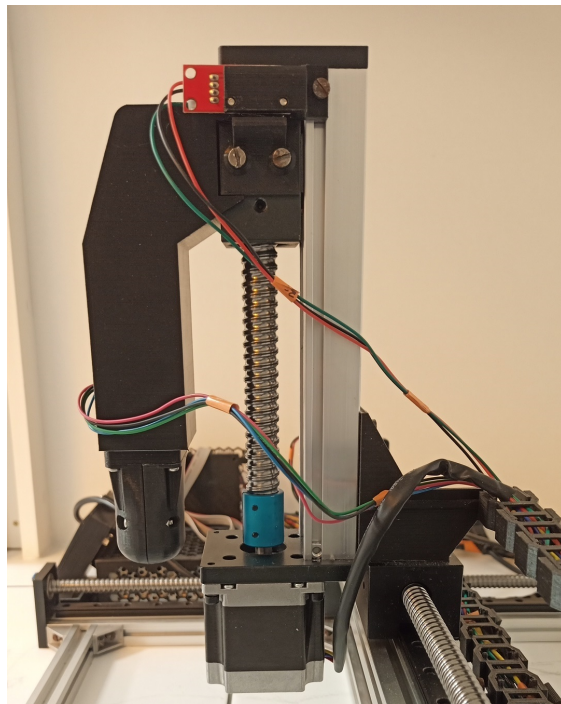


(a)



(b)

Obrázek B.4: Elektronika přístroje, (a) pohled na upevněnou řídicí desku, (b) pohled shora na vytištěnou konstrukci s elektronikou.



Obrázek B.5: Konstrukce osy Z s objímkou na dávkovač.

C. Naměření hodnoty optického výkonu

Tabulka C.1: Naměřené hodnoty výkonu v jednotlivých kanálech vzorku 1.

K.	Naměřený výkon na 650 nm (dBm)			Naměřený výkon na 850 nm (dBm)			Naměřený výkon na 1300 nm (dBm)			Naměřený výkon na 1550 nm (dBm)		
	8,6 cm	4,8 cm	1,8 cm	8,6 cm	4,8 cm	1,8 cm	8,6 cm	4,8 cm	1,8 cm	8,6 cm	4,8 cm	1,8 cm
1	-6,20	-3,68	-0,27	-19,18	-16,65	-13,07	-10,04	-6,78	-3,57	-22,81	-12,91	-6,42
2	-8,38	-3,84	-1,08	-22,52	-17,21	-15,17	-13,11	-7,05	-5,39	-28,26	-14,08	-8,02
3	-12,00	-10,48	-1,15	-26,51	-23,81	-14,33	-17,22	-14,02	-5,49	-31,62	-19,84	-8,60
4	-19,70	-16,56	-1,61	-34,92	-28,17	-15,81	-26,82	-19,39	-6,61	-41,57	-26,66	-9,01
5	-	-26,66	-2,84	-	-39,14	-17,37	-	-30,81	-8,33	-	-37,39	-11,74
6	-	-26,60	-5,70	-	-38,68	-18,38	-	-28,90	-8,48	-	-35,30	-11,42
7	-	-19,29	-6,55	-	-32,81	-20,27	-	-23,33	-11,27	-	-28,38	-15,21
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- Kanálkem neprocházal žádný měřitelný výkon.

Tabulka C.2: Naměřené hodnoty výkonu v jednotlivých kanálech vzorku 2.

K.	Naměřený výkon na 650 nm (dBm)			Naměřený výkon na 850 nm (dBm)			Naměřený výkon na 1300 nm (dBm)			Naměřený výkon na 1550 nm (dBm)		
	8,5 cm	4,9 cm	1,8 cm	8,5 cm	4,9 cm	1,8 cm	8,5 cm	4,9 cm	1,8 cm	8,6 cm	4,8 cm	1,8 cm
1	-10,50	-3,33	0,56	-23,25	-17,25	-12,98	-15,02	-8,48	-3,56	-27,87	-15,00	-6,28
2	-12,63	-3,88	-1,07	-26,74	-18,62	-14,29	-18,53	-10,13	-5,08	-31,82	-17,32	-7,17
3	-16,16	-9,68	-1,66	-30,74	-24,54	-16,20	-22,37	-15,27	-7,36	-34,61	-24,20	-9,92
4	-27,66	-16,51	-5,59	-40,79	-29,75	-20,42	-32,25	-21,53	-11,71	-45,97	-29,32	-14,55
5	-34,84	-29,90	-24,75	-45,29	-41,34	-37,06	-35,53	-32,16	-26,51	-50,00	-40,23	-28,65
6	-	-30,93	-	-	-43,96	-	-	-33,38	-	-	-42,41	-
7	-	-31,64	-	-	-43,68	-	-	-34,72	-	-	-44,90	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- Kanálkem neprocházely žádné měřitelné výkony.

Tabulka C.3: Naměřené hodnoty výkonu v jednotlivých kanálech vzorku 3.

K.	Naměřený výkon na 650 nm (dBm)			Naměřený výkon na 850 nm (dBm)			Naměřený výkon na 1300 nm (dBm)			Naměřený výkon na 1550 nm (dBm)		
	7,9 cm	4,9 cm	2,0 cm	7,9 cm	4,9 cm	2,0 cm	7,9 cm	4,9 cm	2,0 cm	7,9 cm	4,9 cm	2,0 cm
1	-2,37	-0,27	1,41	-15,00	-12,21	-10,32	-5,84	-3,01	-0,78	-17,50	-9,83	-3,22
2	-3,97	-3,04	0,94	-16,09	-12,64	-11,13	-6,92	-3,08	-1,50	-18,64	-10,26	-3,52
3	-4,92	-3,76	1,32	-17,35	-14,45	-11,50	-8,26	-4,80	-1,57	-19,83	-11,95	-4,32
4	-4,10	-4,57	-0,05	-16,60	-14,55	-13,17	-7,31	-4,69	-3,32	-19,04	-11,93	-5,08
5	-6,09	-6,83	1,02	-18,61	-15,57	-11,56	-9,26	-5,89	-1,70	-21,03	-12,34	-4,08
6	-10,30	-8,41	0,00	-22,60	-18,44	-12,91	-13,46	-9,18	-3,18	-25,89	-16,43	-5,53
7	-9,59	-9,42	-0,41	-23,11	-18,78	-14,11	-13,97	-9,80	-4,23	-26,61	-15,68	-6,20
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- Kanálkem neprocházely žádné měřitelné výkony.

Tabulka C.4: Naměřené hodnoty výkonu v jednotlivých kanálech vzorku 5.

K.	Naměřený výkon na 650 nm (dBm)			Naměřený výkon na 850 nm (dBm)			Naměřený výkon na 1300 nm (dBm)			Naměřený výkon na 1550 nm (dBm)		
	8,3 cm	5,0 cm	2,0 cm	8,3 cm	5,0 cm	2,0 cm	8,3 cm	5,0 cm	2,0 cm	8,3 cm	5,0 cm	2,0 cm
1	-9,95	-5,38	-1,43	-23,25	-21,20	-14,02	-15,02	-11,19	-4,69	-29,45	-20,19	-6,18
2	-8,43	-4,79	-2,87	-22,49	-20,97	-16,75	-15,10	-11,81	-7,29	-29,45	-21,14	-9,37
3	-10,67	-5,52	-2,49	-27,62	-22,64	-15,86	-19,24	-13,35	-6,26	-33,61	-21,26	-8,71
4	-12,73	-8,54	-3,59	-28,41	-24,64	-17,11	-20,58	-15,62	-8,04	-33,03	-24,55	-11,09
5	-13,62	-10,02	-5,65	-29,27	-24,40	-18,72	-20,53	-15,23	-9,47	-35,64	-21,63	-11,69
6	-16,65	-8,50	-3,98	-32,04	-24,51	-17,53	-22,53	-14,66	-8,60	-34,99	-20,13	-9,43
7	-	-9,52	-3,28	-	-24,38	-17,31	-	-14,58	-7,93	-	-22,18	-8,32
8	-21,13	-13,88	-7,25	-36,47	-27,61	-21,02	-26,80	-19,71	-11,39	-37,08	-29,07	-12,06

- Kanálkem neprocházela žádná měřitelná výkon.

Tabulka C.5: Naměřené hodnoty výkonu v jednotlivých kanálech vzorku 6.

K.	Naměřený výkon na 650 nm (dBm)			Naměřený výkon na 850 nm (dBm)			Naměřený výkon na 1300 nm (dBm)			Naměřený výkon na 1550 nm (dBm)		
	8,1 cm	4,9 cm	2,0 cm	8,1 cm	4,9 cm	2,0 cm	8,1 cm	4,9 cm	2,0 cm	8,1 cm	4,9 cm	2,0 cm
1	-4,38	-3,99	-0,93	-16,15	-15,76	-13,43	-6,66	-5,76	-3,49	-19,07	-12,33	-5,88
2	-7,60	-6,25	-2,66	-20,47	-19,33	-16,80	-10,57	-9,06	-5,99	-23,11	-16,57	-7,58
3	-6,67	-5,67	-1,69	-18,94	-18,13	-15,80	-9,06	-8,13	-5,80	-23,11	-15,52	-8,23
4	-12,96	-10,25	-4,07	-24,67	-23,65	-18,90	-14,91	-13,78	-9,44	-26,57	-21,43	-11,08
5	-15,38	-12,94	-6,70	-27,01	-25,85	-21,67	-17,06	-14,97	-11,23	-27,83	-20,79	-13,53
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- Kanálkem neprocházela žádná měřitelná výkon.

Tabulka C.6: Naměřené hodnoty výkonu v jednotlivých kanálcích vzorku 7.

K.	Naměřený výkon na 650 nm (dBm)			Naměřený výkon na 850 nm (dBm)			Naměřený výkon na 1300 nm (dBm)			Naměřený výkon na 1550 nm (dBm)		
	8,0 cm	5,0 cm	2,0 cm	8,0 cm	5,0 cm	2,0 cm	8,0 cm	5,0 cm	2,0 cm	8,0 cm	5,0 cm	2,0 cm
1	-0,99	-0,40	1,05	-12,39	-11,34	-9,95	-3,18	-2,00	-0,28	-14,61	-8,79	-2,22
2	-0,24	0,15	1,21	-11,37	-11,04	-9,83	-2,20	-1,64	-0,03	-13,57	-8,27	-1,85
3	-0,30	0,50	1,36	-11,46	-10,57	-9,40	-2,28	-1,99	0,39	-13,69	-8,04	-1,74
4	-0,34	0,24	1,19	-11,52	-10,59	-9,56	-2,16	-1,15	0,12	-13,62	-7,79	-1,87
5	-0,36	-0,06	1,09	-11,38	-11,40	-9,97	-2,22	-1,94	-0,22	-13,54	-8,65	-2,32
6	-2,86	-2,21	0,94	-14,14	-13,32	-9,94	-4,86	-3,93	-0,22	-16,27	-10,32	-2,08

- Kanálkem neprocházela žádná měřitelná výkon.

Tabulka C.7: Naměřené hodnoty výkonu v jednotlivých kanálcích vzorku 8.

K.	Naměřený výkon na 650 nm (dBm)			Naměřený výkon na 850 nm (dBm)			Naměřený výkon na 1300 nm (dBm)			Naměřený výkon na 1550 nm (dBm)		
	8,4 cm	4,9 cm	2,0 cm	8,4 cm	4,9 cm	2,0 cm	8,4 cm	4,9 cm	2,0 cm	8,4 cm	4,9 cm	2,0 cm
1	-0,24	1,15	1,33	-11,79	-10,55	-9,59	-2,68	-1,16	0,21	-14,97	-6,86	-1,61
2	-0,15	0,72	1,51	-11,09	-10,41	-9,22	-2,02	-1,11	0,41	-14,22	-7,67	-1,51
3	-3,48	-0,52	0,61	-14,90	-11,76	-11,04	-5,76	-2,26	-1,34	-18,06	-8,74	-3,38
4	-2,30	0,87	0,63	-14,27	-10,09	-10,71	-5,22	-0,63	-0,95	-17,71	-7,17	-3,12
5	-13,75	-7,48	-0,61	-21,53	-17,98	-12,68	-12,42	-8,72	-3,03	-24,86	-15,20	-5,27
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- Kanálkem neprocházela žádná měřitelná výkon.