



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra měření**

Pasivní optické polymerní planární struktury pro optický přenos dat

Passive optical polymer structures for optical data transmission

Diplomová práce

Autor práce: Bc. Radek Maštera

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

Praha 2015

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

.....

Radek Maštera

Poděkování

Rád bych poděkoval především vedoucímu mé diplomové práce, panu doc. Ing. Václavu Prajzlerovi, Ph.D., který mi poskytl neocenitelné rady a předal své zkušenosti při návrhu struktur a jejich výrobě. Děkuji panu Ing. Tomášovi Vítkovi za výrobu drážek pro vlnovodné vrstvy pomocí CNC gravírování struktur do substrátu. Dále pak firmě Zenit za vzorky polymeru polymethylmetakrylátu, které byly použity jako podložky pro výrobu vlnovodných struktur, a také paní Ing. Pavle Nekvindové, PhD. z VŠCHT v Praze za měření indexu lomu pomocí jednohranové vidové spektroskopie.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student:	Bc. Radek Maštera
Studijní program:	Inteligentní budovy
Název tématu česky:	Pasivní optické polymerní planární struktury pro optický přenos dat
Název tématu anglicky:	Passive Optical Polymer Structure for Optical Data Transmission

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s teoretickými principy planárních mnohavidových optických vlnovodů.
2. Seznamte se s postupy návrhu fotonických struktur pomocí softwaru BeamProp.
3. Navrhněte planární optickou vlnovodnou strukturu s plastovými vlákny.
4. Navrhněte vlnové selektivní strukturu pro plastová optická vlákna.
5. Podílejte se na výrobě navržených struktur.
6. Proveďte diagnostiku vyrobených struktur.
7. Diskutujte možnost praktického využití dosažených výsledků pro použití v inteligentních budovách.

Seznam odborné literatury:

- [1] Novotný, K.: Optická telekomunikační technika. Skripta ČVUT, Praha 1998.
- [2] Ziemann, O., Krauser, J., Zamzow, P. E., Daum, W.: POF Handbook. Springer 2008.
- [3] Prajzler, V., Tůma, H., Špírková, J., Jelfáček, V.: Design and modeling of symmetric three branch polymer planar optical power dividers. Radioengineering, 2013, vol. 22, p. 233-239.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Václav Prajzler Ph.D. (K13134)

Datum zadání diplomové práce: 15. ledna 2015

Platnost zadání do¹: 31. srpna 2016



Doc. Ing. Jan Holub, Ph.D.
vedoucí katedry

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 15. 1. 2015

¹ Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.

Název práce: Pasivní optické polymerní planární struktury pro optický přenos dat

Autor: Bc. Radek Maštera

Katedra (ústav): Katedra měření

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

e-mail vedoucího: xprajzler@fel.cvut.cz

Abstrakt: Diplomová práce se zabývá návrhem, výrobou a diagnostikou polymerních mnohavidových vlnově selektivních struktur určených pro plastová optická vlákna o průměru 1 mm. Na úvod je v diplomové práci vysvětleno, jak lze tyto optické struktury využít v inteligentních budovách pro přenos dat. Před samotným návrhem struktur jsou v práci popsány materiály pro výrobu substrátů, vlnovodné vrstvy a optické filtry použité při výrobě optických vlnově selektivních struktur. Návrh struktur byl optimalizován pomocí metody šíření optického svazku BPM (Beam Propagation Method), pomocí programu BeamPROPTM od firmy Rsoft Design Group. Podle těchto návrhů byly provedeny depoziční testy, které vedly k výrobě vybraných navržených struktur. Byly realizovány struktury na substrátech z Polymethylmethakrylátu (PMMA) s vlnovodnými vrstvami z polymeru Norland Optical Adhesive (NOA) za použití tenkovrstvých (Thin Film Filters - TFF), plastových a tenkých fóliových filtrů. V práci jsou také uvedeny měřicí metody, které byly použity k diagnostice vyrobených struktur. Na závěr jsou uvedeny nejdůležitější dosažené výsledky.

Klíčová slova: Mnohavidové vlnovody, Polymery, Optické rozbočnice, Optické filtry

Title: Passive optical polymer structures for optical data transmission

Author: Bc. Radek Maštera

Department: Department of Measurement

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

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

Abstract: The thesis deals with design, fabrications and measurements properties of optical polymer multimode selective wavelength structure for 1 mm diameter core Plastic Optical Fiber. First part of the thesis described possible applications optical structures for data transmission in intelligent buildings. Before the actual proposal and modeling of the polymer structures, it was measured refractive indices of the applied materials to make design much accurate. The design and optimization of the structures were done by the optical beam propagation method (BPM), using the BeamPROP™ software by Rsoft Design Group. According to the designed it was made deposition tests which led to the fabrication of the selected proposed structures. Structures were fabricated using Norland Optical Adhesives (NOA) core waveguiding layer and on polymethylmethacrylate (PMMA) substrates. Wavelength selective structures were assembled with Thin Film Filters or thin plastic foil filters. The last part of the thesis describes the measurement methods used for investigation properties and there are also given most important obtained results.

Keywords: Multimode waveguide, Polymer, Optical Splitter, Optical filters

Symbol	Veličina	Jednotka
n_s	Index lomu substrátu	(-)
n_f	Index lomu vlnovodné vrstvy	(-)
n_c	Index lomu krycí vrstvy	(-)
λ	Vlnová délka	(λ)
α	Optický útlum	(dB/km)

Zkratka

Veličina

AON (Active Optical Network)	Aktivní optická síť
BPM (Beam Propagation Method)	Metoda šíření optického svazku
CAD (Computer aided design)	Návrhový počítačový program
CATV (Cable TV)	Kabelové rozvody TV
DSI-POF (Double Step Index-POF)	Dvojitý skokový index lomu
FTTB (Fibre to the Building)	Vlákno přivedené do budovy
FTTC (Fibre to the Curb),	Vlákno přivedené k rozvaděči
FTTH (Fibre to the Home)	Vlákno přivedené do domu
FTTO (Fibre to the Office)	Vlákno přivedené do kanceláře
FTTx (Fibre To The Home)	Vlákno ke koncovému bodu
GI (Graded index lomu)	Gradientní index lomu
GOF (Glass Optical Fiber)	Skleněné optické vlákno
HD (High Definition)	Vysoké rozlišení
MC-POF (Multi-Core POF),	Multi jádrové POF
MSI-POF (Multi Step Index-POF)	Multi skokový index lomu
NA	Numerická apertura
NOA (Norland Optical Adhesive)	Společnost v USA
OLT (Optical Line Termination)	Optický terminál
PMMA (Polymethylmetakrylát)	Polymerní materiál
POF (Plastic Optical Fiber)	Optické vlákno na bázi polymeru
PON (passive Optical Network)	Pasivní optická síť
SI (Step Index)	Skokový index lomu
STP (Shielded Twisted Pair)	Stíněný kroucený dvoudrát
TDM (Time Division Multiplex)	Časové multiplexování
TFF (Thin Film Filtres)	Tenkovrstvý filtr
UTP (Unshielded Twisted Pair)	nestíněný kroucený kabel
UV (UltraViolet)	Ultrafialové záření
VoIP (Voice over IP)	Telefonii IP
WDM (Wavelength Division Multiplex)	Vlnové multiplexování
Wi-Fi (Wireless Fidelity)	Bezdrátová datová technologie
WLAN (Wireless Local Area Network)	Lokální domácí síť

Obsah

1	Úvod	9
2	Přenosové médium	12
2.1	<i>Metalická přenosová cesta</i>	12
2.2	<i>Bezdrátová přenosová cesta</i>	13
2.3	<i>Optická přenosová cesta</i>	13
3	Přenos dat v budovách	18
4	Optické vlnově selektivní rozbočnice	23
4.1	<i>Polymery pro substrát a vlnovodnou vrstvu</i>	23
4.2	<i>Použité filtry pro POF vlákna</i>	25
5	Návrh struktur vlnově selektivních rozbočnic	31
5.1	<i>Návrh optických kanálků pro dva a tři filtry</i>	31
5.2	<i>Návrh optické vlnově selektivní rozbočnice s dělicím poměrem 1x2Y</i>	32
5.3	<i>Návrh optické vlnově selektivní rozbočnice s dělicím poměrem 1x3Y</i>	35
6	Výroba	39
6.1	<i>Výroba testovacích kanálků</i>	41
6.2	<i>Výroba optických selektivních rozbočnic s dělicím poměrem 1x2Y a 1x3Y</i>	43
7	Diagnostika	46
7.1	<i>Vyhodnocení vzorků pomocí mikroskopické kamery</i>	46
7.2	<i>Měření vloženého optického útlumu a přeslechu</i>	49
7.3	<i>Měření vzorků pomocí spektrálního analyzátoru</i>	58
7.4	<i>Vyrobené struktury</i>	67
7.5	<i>Test rozbočnic pro připojení k internetu</i>	70
8	Závěr	72
9	Použitá literatura	74
10	Seznam obrázků	76
11	Seznam tabulek	81
12	Seznam příloh	82

1 Úvod

Vzhledem k rostoucím požadavkům na rychlost a objem přenášených dat, a to jak při přenosu dat v páteřních telekomunikačních sítích, tak i v datových lokálních sítích instalovaných nejen v budovách, kancelářích, ale i například v letadlech, lodích a automobilech, je přenos dat stále častěji přenášen pomocí optického signálu po optických vláknech. Dnes se pro přenos optického signálu používají křemenná optická jednovidová vlákna, jejichž geometrický rozměr je $4/125\ \mu\text{m}$ (průměr jádra/průměr pláště) nebo $9/125\ \mu\text{m}$. Standardní mnohavidová optická telekomunikační vlákna mají geometrické rozměry $50/125\ \mu\text{m}$ nebo $62,5/125\ \mu\text{m}$. Méně často se pro přenos dat s nižší přenosovou kapacitou a na kratší vzdálenosti používají také další typy mnohavidových vláken s rozměry např. $100/110\ \mu\text{m}$, $200/230\ \mu\text{m}$, $500/550\ \mu\text{m}$ apod. Telekomunikační optické systémy používají zpravidla pracovní vlnové délky $850\ \text{nm}$, takzvané první telekomunikační okno. Systémy využívající první telekomunikační okno jsou určeny pro méně náročný přenos dat, a to jak po ekonomické, tak i technické stránce, který probíhá na kratší vzdálenosti s nižším objemem přenášených dat. V páteřních sítích se používají vlnové délky $1310\ \text{nm}$, tzv. druhé telekomunikační okno, kde mají křemenná optická vlákna nejmenší disperzi, nebo vlnové délky $1550\ \text{nm}$, tzv. třetí telekomunikační okno, kde mají křemenná vlákna nejnižší optický útlum. V současnosti je snaha využít pro přenos dat celé přenosové pásmo. Kromě standardních křemenných vláken (používaných v páteřních sítích pro přenos dat na velké vzdálenosti) se začínají na kratší vzdálenost používat mnohavidová plastová vlákna POF (Plastic Optical Fiber), u kterých probíhá přenos dat zpravidla na vlnové délce $650\ \text{nm}$ [7].

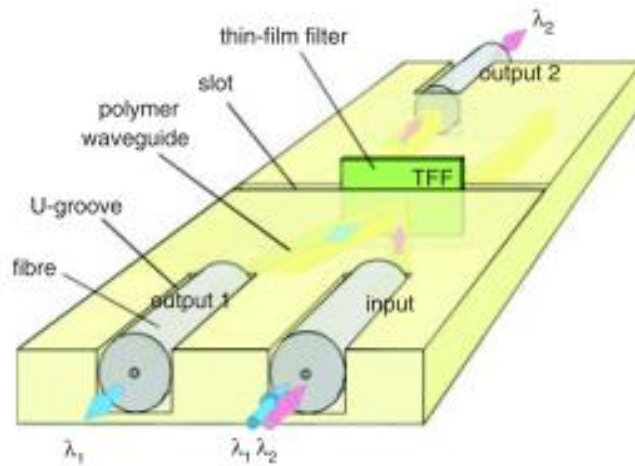
Optická vlákna, zejména pak POF vlákna, bude možné použít místo stávajících metalických vedení, kterými jsou například koaxiální kabel, síťový UTP kabel (Unshielded Twisted Pair), kabelové rozvody CATV (Cable TV), ale stejně tak místo bezdrátové datové technologie Wi-Fi (Wireless Fidelity). Důvodem je nedostačující kapacita média. U výše zmíněných přenosových médií (ale i jiných v současnosti používaných) již je nebo v blízké budoucnosti bude vyčerpána přenosová kapacita (objem přenášených dat), respektive přenosová rychlost. Optické vlákno poskytuje moderní a vysoce účinnou výkonovou alternativu, která umožní rychlý přenos datových souborů nebo online spojení. POF vlákna mohou být velice vhodná alternativa zejména pro domácnosti a kanceláře. Optická vlákna lze samozřejmě využít nejen pro přenos dat jako takových (datové komunikace) nebo pro

přenos dat v průmyslových zařízeních, ale jsou vhodná pro různé aplikace, jako jsou například různé druhy optických a vláknových senzorů. Další možnost využití jsou čidla pro regulační a měřicí systémy, komunikace v zabezpečovací technice nebo i medicíně. A to z toho důvodu, že mají celou řadu výhod. Kromě již výše zmíněné kapacity kanálu je to i rychlost přenášené informace. Jsou lehčí než metalická vedení, snadněji se s nimi pracuje a zajišťují galvanické oddělení přijímače od vysílače. Jsou také odolné proti elektromagnetickému rušení a proti přeslechům.

Z těchto důvodů se vyvíjejí nové fotonické struktury, které slouží pro distribuci a zpracování optického signálu. Přestože celá řada těchto struktur je již komerčně dostupná, stále jsou vyvíjeny nové struktury za použití nových materiálů a postupů. Mezi nově vyvíjené struktury patří optické výkonové rozbočnice nebo optické vlnově selektivní rozbočnice pro POF vlákna, o kterých pojednává tato práce. Tyto optické selektivní rozbočnice, ve kterých jsou používány jak tenkovrstvé filtry TFF (Thin Film Filters) a plastové filtry, tak i levnější varianta tenkých fóliových filtrů, lze využít pro přenos dat v optických sítích na krátké vzdálenosti s větším počtem vlnových pásem podle počtu výstupních kanálků dělicí rozbočnice (podle počtu filtrů). Taková vlnová rozbočnice umožní přenos více kanálů po jednom optickém POF vlákně, a tedy umožní zvýšení přenosové kapacity soustavy.

Doposud popsané multiplexní systémy s tenkovrstvými filtry

V článku [16] byl popsán 1x2Y vlnový multiplexer (viz obr. 1.1) založený na technologii planární vlnovodné technologie pro jednovidové vlnovody s použitím tenkovrstvých filtrů TFF (Thin Film Filter). V tomto článku byly ovšem využity filtry, které propouštěly optické záření spadající do současných přenosových telekomunikačních oken za použití křemenného vlákna (použité vlnové délky 1310 nm, 1490 nm a 1550 nm). Tento multiplexer byl vyráběn za použití tenkovrstvých technologií a byl realizován na úrovni čipů.



Obrázek 1.1: Vlnovodný optický multiplexor pro vlnové délky 1310/1550 nm [16].

V knize [8] je popsáno mnoho systémů, které využívají WDM (Wavelength Division Multiplex) filtry za použití různých typů POF vláken pracujících na vlnových délkách například 520 nm a 650 nm, ale pouze s rozbočovači s jedním vstupním a dvěma výstupními vlnovody (optická vlnově selektivní rozbočnice 1x2Y).

Cílem této diplomové práce je vyrobit testovací drážky a optické vlnově selektivní rozbočnice s použitím tenkovrstvých filtrů TFF, plastových a tenkých fóliových filtrů, které budou propouštět optické záření o vlnových délkách, na kterých má POF vlákno nejnižší hodnoty optického útlumu, tj. na vlnových délkách 532 nm, 591 nm a 650 nm. To vše za použití komerčně dostupných a levných materiálů.

2 Přenosové médium

Jak již bylo zmíněno v úvodu, mezi 3 nejzákladnější přenosová média patří:

- metalická přenosová cesta,
- bezdrátová přenosová cesta,
- optická přenosová cesta.

Ve své práci se zabývám přenosem dat pomocí optických vláken, proto je zde popíši podrobněji a u dalších dvou přenosových médií (metalická a bezdrátová vedení) uvedu jen jejich nejdůležitější parametry pro srovnání s optickými vlákny.

2.1 Metalická přenosová cesta

Mezi běžně používaná metalická vedení patří koaxiální kabel (Ethernet) a kroucený dvoudrát. Kroucený dvoudrát může být stíněný STP (Shielded Twisted Pair) a nestíněný UTP (Unshielded Twisted Pair). V tabulce 2.1 je zobrazen přehled kategorií kroucených dvoudrátů, jejich šířka pásma a využití.

Tabulka 2.1: Kategorie kroucených dvoudrátů [4].

Označení	Typ kabelu	Šířka pásma (MHz)	Použití
Cat1	obyčejná kroucená dvoulinka	0,4	dnes se již nepoužívá
Cat2	obyčejná kroucená dvoulinka	4	dnes se již nepoužívá
Cat3	UTP	16	datové sítě, 10BaseT rozvod telefonu v budovách
Cat4	UTP	20	dnes se již nepoužívá
Cat5	UTP, STP	100	dnes se již nepoužívá původně 100BaseTX Ethernet
Cat5e	UTP	100	100BaseTX, 1000BaseT Ethernet kategorie V současnosti nejpoužívanější
Cat6	UTP	250	datové dítě, 1000BaseT Ethernet
Cat6a	UTP	500	datové sítě, 10Gb Ethernet
Cat7	STP/FTP	600	10Gb Ethernet

*10Base, 100Base jsou označení klasického Ethernetu, kde číslo 10, respektive 100 vyjadřuje přenosovou rychlost 10 Mbit/s, respektive 100 Mbit/s.

Metalická vedení jsou dnes stále ještě používanější než optické kabely, protože metalická vedení jsou nainstalována ve větším měřítku a jejich výměna za optické kabely je finančně náročná. Ale například pátevní sítě jsou již dnes výhradně tvořena optickými vlákny.

2.2 Bezdrátová přenosová cesta

Nejznámější a nejvíce využívanou bezdrátovou technologií v budovách je technologie Wi-Fi. Tato technologie byla původně koncipována jako náhrada strukturované kabeláže. V tabulce 2.2 jsou opět uvedeny nejdůležitější parametry, které se týkají přenosu informace [3].

Tabulka 2.2: Kategorie bezdrátové technologie Wi-Fi [3].

Označení (rok)	Frekvenční pásmo (GHz)	Šířka kanálu (MHz)	Přenosové rychlosti (Mbit/s)
802.11a (1999)	3,7; 5	20	54
802.11b (1999)	2,4	20	až 11
802.11g (2003)	2,4	20	až 54
802.11n (2009)	2,4; 5	20, 40	až 600
802.11ac (2014)	2,4; 5	20, 40, 80, 160	až 867

2.3 Optická přenosová cesta

Druhy optických vláken

Optická vlákna můžeme rozdělit na základě následujících vlastností:

- průběh indexu lomu – SI (skokový index lomu), GI (gradientní index lomu),
- geometrické rozměry (průměr jádra a pláště),
- materiálové složení – křemenné, skleněné, PCS vlákna (plastic clad silica), plastová POF vlákna,
- počet vidů - jednovidové SM (Single Mode) a mnohavidové MM (Multi Mode).

Ve své práci budu používat jen mnohavidová plastová optická vlákna označovaná jako POF (Plastic Optical Fiber), proto zde tyto druhy vláken popíši podrobněji.

SI-POF (Step Index – Plastic Optical Fiber) je nejstarší verze POF vláken, která má čistě skokový index lomu. Vidy se v tomto druhu vláken šíří pomocí totálního odrazu na rozhraní. Jádro má průměr 980 μm , plášť 20 μm a typická šířka pásma je 40 MHz/100m [8, 15].

GI-POF (Graded Index – Plastic Optical Fibre). Tento typ vláken je použit pro snížení vidové disperze a jedná se o mnohavidová vlákna s proměnným indexem lomu, tzv. gradientní vlákna. Princip šíření vidů v těchto typech vláken je takový, že vidy, které se šíří po nejkratší dráze (trajektorii), mají nejmenší přenosovou rychlost a vidy šířící se po nejdelší trajektorii mají naopak přenosovou rychlost co největší. Tímto principem je dosaženo toho, že vidy dorazí k detektoru souběžně. Tohoto jevu je dosaženo postupnou změnou indexu lomu (gradientem) v jádru optického vlákna směrem k plášti. Typická šířka pásma je 2 Gbit/100m [1, 8].

Existují i další druhy plastových vláken, například DSI-POF (Double Step Index-OF), MSI-POF (Multi Step Index-POF), MC-POF (Multi-Core POF), DSI-MC POF. Toto jsou vlákna, která většinou vznikají různým pospojováním výše zmíněných hlavních typů, kdy jsou vlákna tvořena např. více jádry v jednom plášti (MC-POF, DSI-POF) nebo je jádro složeno ze 4-7 vrstev (MSI-POF), kde se vidy šíří pomocí vícenásobných odrazů na rozhraní jednotlivých vrstev [8, 15].

Ztráty v optických vláknech

Přenosové ztráty jsou jednou z nejdůležitějších charakteristik optických vláken (v současnosti jejich největší nevýhoda). Ztráty snižují přenášený optický výkon (s délkou vlákna ztráty narůstají). Jejich disperze se pak projevuje snižováním frekvenční šířky pásma, informačního přenášeného rozsahu a v neposlední řadě na kapacitě kanálu.

Šíří-li se optický puls reálným vláknovým vlnovodem, podléhá útlumu, neboť prostředí vykazuje ztráty. Ztráty optickým vláknem jsou velmi omezujícím faktorem, protože je na nich přímo závislý optický výkon přenášený optickým impulsem. Samozřejmě platí, že čím jsou ztráty větší, tím je vyšší pokles výkonu. Amplituda signálu se zmenšuje, puls se deformuje a dochází tak ke snížení přenosové vzdálenosti. Navíc na optický impuls působí disperze (jev, který způsobují rozdílné fázové i skupinové rychlosti složek signálu) způsobující další zkreslení optického impulsu. Pokud budou současně působit oba tyto faktory, můžeme na výstupu optického vlnovodu dostat značně deformované impulsy. To se může negativně projevit hlavně v případě velmi rychlých komunikací, protože po určité vzdálenosti může dojít k častému prolnutí jednotlivých optických impulsů. To způsobí, že nejdou jednotlivé pulsy odděleně detekovat a zvýší se tím bitová chybovost. Útlum a disperze tak negativně působí na rekonstrukci přijímaného signálu na detektoru. Dále

jsou ve vlákně ztráty způsobené na ohybech (způsobuje je uživatel), ztráty na mikroohybech (vznikají při výrobě) a ztráty absorpcí. Souhrn těchto ztrát je označován symbolem α , který výrobci udávají u každého druhu optického vlákna a který se poté započítává do útlumové bilance přenosové soustavy. Pro křemenná vlákna je například typická hodnota optického útlumu $\alpha=0,2$ dB/Km (1550 nm) [6]. Oproti tomu standardní plastová vlákna, používaná v této diplomové práci (PFU-UD1001-22V), mají hodnotu optického útlumu $\alpha=0,15$ dB/m (650 nm).

Základní optické ztráty můžeme rozdělit na ztráty [2]:

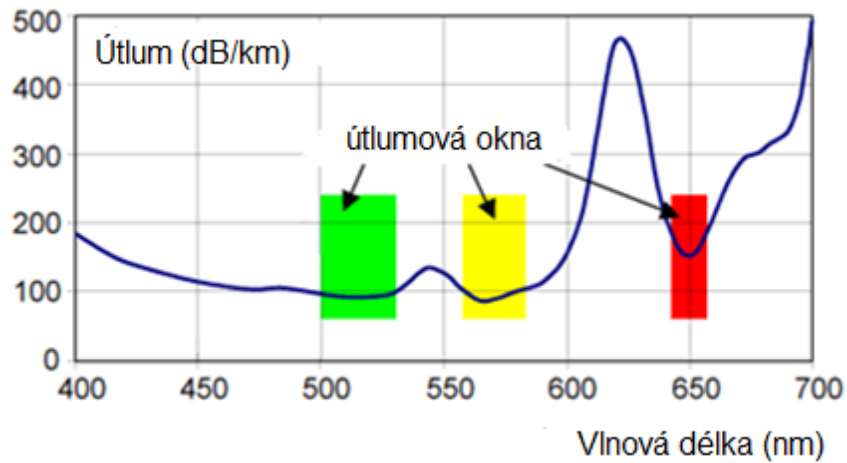
- absorpcí (pohlcování) – způsobují nečistoty materiálu, ze kterého jsou vlákna vyrobena,
- disperzí (rozptyl) – *chromatická* (je způsobena závislostí indexu lomu na vlnové délce), *vidová* (je způsobena různou délkou drah světla shodné vlnové délky), *vlnovodná* (většina světla se pohybuje v jádře, ale část zasahuje i do pláště. Jádro a plášť mají rozdílné indexy lomu, čímž dojde ke změně rychlostí jednotlivých vlnových délek),
- rayleighovým rozptylem – vzniká na mikrozměnách ve vlákně menších než vlnová délka a je nepřímo úměrný 4. mocnině vlnové délky. Vzniká při výrobě,
- fresnelovým odrazem – vznikají na výstupu vlákna na základě Snellova zákona,
- difuzním odrazem – špatný odraz na vstupu do vlákna (vyšší úhel než udává numerická apertura),
- ztráty v optických spojích (konektorech) – špatné navázání vlákna do jádra.

Plastová optická vlákna POF

Plastová vlákna se začala rozvíjet již v počátcích optické komunikace, nicméně nedosahovala takových parametrů (měrný optický útlum) jako bylo dosaženo u skleněných vláken založených na křemičitých sloučeninách (SiO_2), proto se v počátcích rozvoje optických komunikací v podstatě nevyužívala. Se zlepšujícími se parametry se plastová vlákna postupně začala využívat v oblasti lokálních datových sítí a přístupových telekomunikačních sítí. Plastová vlákna nikdy nebudou použitelná pro přenos dat na velké vzdálenosti, ale budou se čím dál více využívat pro koncové úseky přípojek FTTx (Fibre To The x). Protože mají plastová vlákna výborné mechanické vlastnosti, mohl by tento druh optických vláken přispět k rychlejšímu rozvoji optických přístupových sítí.

Jádro plastových POF vláken je vyrobeno z polymeru Polymethylmetakrylát (PMMA), kterému se říká organické sklo (plexisklo). Plášť je tvořen fluorovaným PMMA. První POF vlákna (se skokovou změnou indexu lomu SI-POF) dosahovala měrného útlumu přibližně 1000 dB/km na vlnové délce 650 nm. První POF vlákna s gradientní změnou indexu lomu GI-POF (rok 1995) měla měrný útlum již jen 50 dB/km v rozsahu vlnových délek od 650 nm do 1300 nm. V této době dosahovala plastová vlákna přenosové rychlosti 500 Mbit/s na vzdálenost 100 m. V roce 1994 byla přenosová rychlost již 2,5 Gbit/s na 100 m pro vlnovou délku 650 nm a za dalších 5 let to bylo už 11 Gbit/s pro 1300 nm. Od 21. století se tato vlákna využívají komerčně nejen v lokálních datových sítích, ale jsou hojně využívána jak v automobilovém průmyslu (s přenosovými rychlostmi až 400 Mbit/s), tak třeba v letectví a senzorové technice. V neposlední řadě jsou plastová optická vlákna alternativou při výstavbě přístupových optických sítí, lokálních datových sítí a jako náhrada za rozvody metalického vedení v budovách [3].

Jednovidová skleněná vlákna jsou vyráběna o rozměrech 9/125 μm (jádro/plášť), mnohavidová pak mají rozměry 50-62,5 /125 μm . Oproti tomu mnohavidová plastová POF vlákna mají nejčastěji rozměry 980/1000 μm . Speciální vlákna na bázi perfluorovaných polymerů (CYTOP) mají průměr jádra nižší, většinou 500/750 μm , 120/500 μm nebo 62,5/250 μm . Díky větším rozměrům mají plastová vlákna oproti skleněným vláknům výhodu v mechanických vlastnostech (mají menší citlivost jádra na ohyb), proto je výhodné jejich využití v lokálních sítích. Index lomu jádra je přibližně 1,49 – 1,55 (PMMA) a plášť tvořený silikonovou pryskyřicí má hodnotu 1,46. Navíc mají tato vlákna vysokou hodnotu numerické apertury (NA), takže se do nich lépe navazuje optické záření. Jejich největší nevýhoda je i nadále měrný útlum, který v současnosti u moderních vláken na bázi CYTOP dosahuje hodnoty přibližně 30-50 dB/km. Tato hodnota je ale pro vlákna s menšími rozměry (např. 62,5/250 μm) a pro vlnové délky z infračerveného spektra. Pokud budeme chtít využít POF vlákna o rozměrech 980/1000 μm , která jsou levnější, je jejich měrný útlum pro vlnovou délku 570 nm nižší než 100 dB/km (viz obr. 2.1) [3]. Na tomto obrázku je vidět, na kterých vlnových délkách mají optická POF vlákna nejnižší hodnoty útlumu.

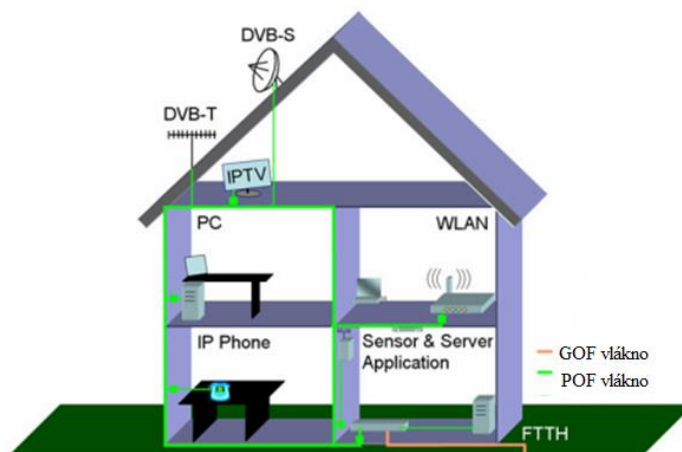


Obrázek 2.1: Útlumová okna pro POF vlákna [15].

Plastová optická vlákna mohou být v rozlehlých objektech a budovách využita v přístupových nebo lokálních sítích, kde budou díky svým vlastnostem nahrazovat stávající metalická vedení. Zejména pak v posledním úseku optické distribuční sítě mezi lokálním propojovacím panelem a samotným koncovým uživatelem. Dále mohou být použita v pasivních optických sítích PON na kratší vzdálenosti.

3 Přenos dat v budovách

V současné době jsou data v budovách přenášena výhradně pomocí metalického vedení nebo bezdrátově pomocí Wi-Fi technologie. Ale v dnešní době, kdy jsou čím dál více využívány různé druhy multimediálních zařízení, se začíná u těchto technologií (metalické vedení, Wi-Fi) projevovat jejich nedostatečná šířka pásma. Celosvětově roste počet uživatelů internetu, čímž roste množství přenášených dat. Ubývá počet účastníků v oblasti pevných telefonních sítí, které se nahrazují službami mobilních sítí a VoIP (Voice over IP) telefonie. Ve velké míře se šíří video, TV signál a obecně multimediální služby prostřednictvím datových sítí a přípojek. Mezi tyto mediální služby patří například online přenosy videa (streamovaná videa), která jsou dnes často přenášena ve vysokém HD (High Definition) rozlišení. V dnešní době je také v domácnostech rozšířená služba Triple Play, která v sobě zahrnuje telefonii (dnes stále častěji VoIP), vysokorychlostní přenos dat a distribuci videa (IPTV - přenos televizního vysílání prostřednictvím IP). Služba Triple Play s sebou přináší velké nároky na přenosové rychlosti. V neposlední řadě je dnes rozmach v různých vzdělávacích programech, které fungují online a jejich prostřednictvím narůstají požadavky na přenosové rychlosti a další parametry přístupových sítí. V počátcích komunikace (Internetu) se jako informace přenášel nejvíce text, poté mluvené slovo a v dnešní době (v budoucnu to bude patrné ještě více) se nejvíce informace přenáší pomocí videa v HD kvalitě. Když k velikosti kapacity kanálu připočteme ještě rychlost, kterou bychom rádi informaci přenášeli, tak je jasné, že metalická vedení a Wi-Fi technologie již nebude našim požadavkům vyhovovat. Proto budou stávající metalická vedení a bezdrátový přenos dat nahrazeny optickými vlákny, z nichž jedna z možností jsou plastová POF vlákna. Pokud jsou v dnešní době, například pro přenos dat v budovách, využita optická vlákna, tak je vlákno přivedeno (dle technologie FTTH) pouze od provozovatele služby do domovní ústředny, odkud je opět ke koncovému zákazníkovi vedeno metalické vedení, které může být v bytě koncového zákazníka nahrazeno bezdrátovou technologií. Cílem vývoje nových optických planárních struktur je umožnit vést optické vlákno nejenom do domovní ústředny, ale i přímo ke koncovému zařízení, čímž se dostatečně navýší kapacita přenášeného média. Na obr. 3.1 je vidět, že do domovního rozvaděče je přivedeno skleněné optické vlákno GOF (Glass Optical Fiber), které se pak větví pomocí POF vláken ke koncovým zařízením. Kromě lokální bezdrátové sítě WLAN (Wireless Local Area Network) zde probíhá komunikace (respektive přenos dat) pomocí POF vláken i s pozemní a satelitní digitální televizí [3].



Obrázek 3.1: Rozvod optického vlákna ke koncovému zařízení [12].

Pokud navíc k rozdělení signálu využijeme optické vlnově selektivní rozbočnice, umožníme tím přenos více kanálů po jednom optickém POF vlákně a opět se tedy zvýší přenosová kapacita soustavy. Jako příklad si vezměme, že budeme mít v jedné místnosti (například kuchyň) třeba lednici, mrazák, mikrovlnku, televizi a rádio. Pokud s tímto zařízením (např. s lednicí) budeme komunikovat, tak informace do lednice budeme posílat pouze jedním kanálem, kdežto například s televizí budeme moci komunikovat i pomocí jiného kanálu. Takže nám do kuchyně (z nějakého bytového rozvaděče) povede jedno optické vlákno, které bude přivedeno na vstup optické vlnově selektivní rozbočnice a z jejího výstupu bude ke každému zařízení v kuchyni přivedeno opět optické vlákno, kterým pomocí filtru v optické vlnově selektivní rozbočnice projde jen takový kanál (vlnová délka), po kterém bude dané zařízení s centrálou komunikovat. To znamená, že umožní přenos až tří kanálů po jednom optickém POF vlákně, a tedy umožní zvýšení přenosové kapacity soustavy.

Optické vlnově selektivní rozbočnice předpokládají využití hlavně v budovách, kde je potřeba přenášet vysoké množství dat, k čemuž je potřeba takové přenosové médium, které bude mít vysokou kapacitu kanálu a umožní přenos více kanálů po jednom vlákně.

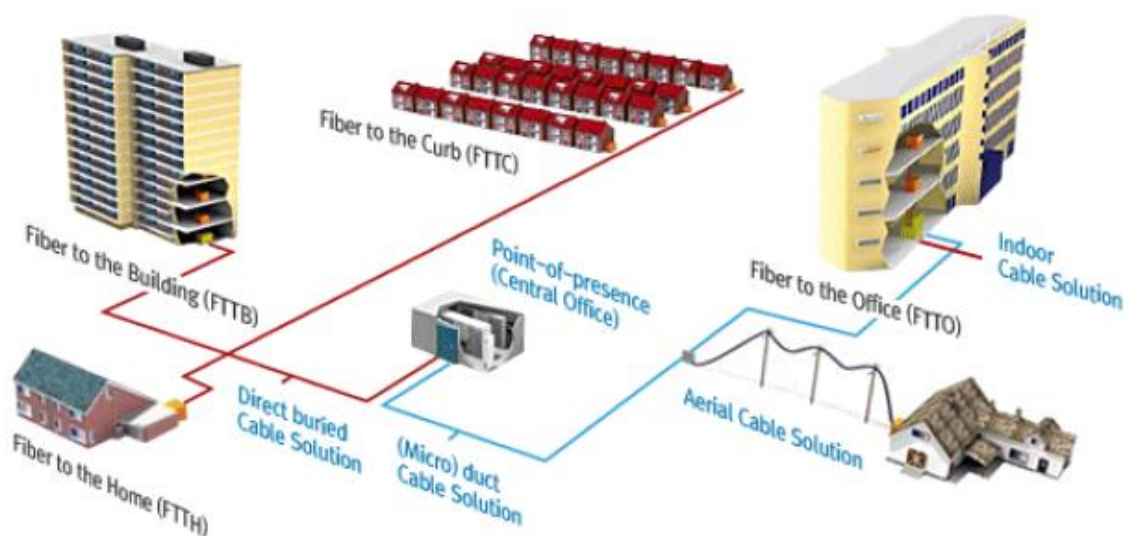
Optické sítě

Optické sítě můžeme rozdělit na dvě základní varianty:

- aktivní optické sítě AON (Active Optical Network) – obsahují alespoň jeden aktivní prvek, což je jakékoli zařízení, které ke své funkci vyžaduje napájení, řízení (management) a další aktivní funkce,
- pasivní optické sítě PON (Passive Optical Network) – obsahují pouze pasivní prvky, které ke své funkci nepotřebují žádné napájení ani režii.

Hybridní sítě

Podle místa připojení koncového uživatele a umístění koncového bodu optické přístupové sítě, můžeme sítě rozdělit zkratkou FTTx, kde FTT znamená přenos pomocí optického vlákna a písmeno „x“ značí umístění koncového bodu optické sítě. Pokud je optické vlákno přivedeno až ke koncovému uživateli, je síť realizována čistě optickým způsobem. Ale existuje několik variant, kdy je na optické vlákno napojeno metalické či bezdrátové vedení. Jsou to například kabelové televize (CATV) s přenosem po koaxiálních vedeních, lokální datové sítě LAN nebo bezdrátové sítě Wi-Fi. Pokud použijeme optická i metalická vedení, vznikne nám takzvaná hybridní přípojka. V určitém místě se nám tudíž převádí optický signál na elektrický, který je poté přiveden ke koncovému zařízení. Vizuální zobrazení FTTx je na obr. 3.2 [3, 5].



Obrázek 3.2: Vizuální znázornění zkratky FTTx [5].

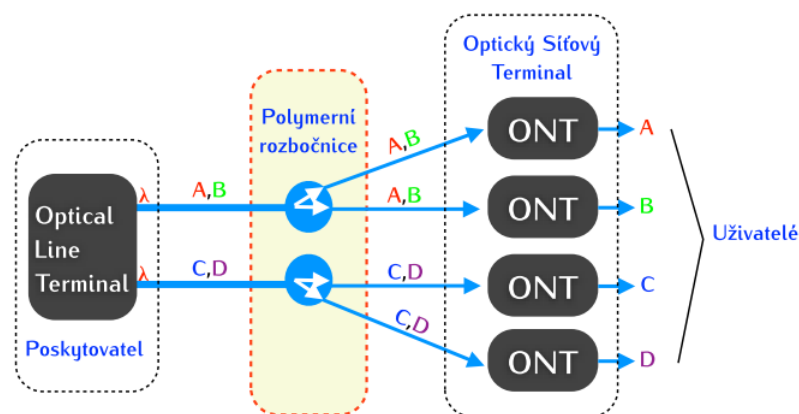
Mezi základní rozdělení umístění koncového bodu „x“ patří:

- FTTC (Fibre to the Curb), optické vlákno je přivedeno k rozvaděči, od něhož jsou poté ke koncovým zařízením vedena metalická vedení. Optická vlákna jsou umístěna (ukončena) ve venkovním prostoru,
- FTTB (Fibre to the Building), optická vlákna jsou přivedena až do budov účastníků, kteří jsou poté připojeni pomocí rozvodů,
- FTTO (Fibre to the Office), zde jsou optická vlákna přivedena až do domovních prostor, kterými jsou například důležité kanceláře, které kladou důraz na vysokou přenosovou kapacitu,
- FTTH (Fibre to the Home) znamená, že jsou optická vlákna přivedena až k uživateli, respektive do jeho účastnické zásuvky.

PON síť

Primárním určením pasivních optických sítí je připojení velkého množství koncových uživatelů, kde je uváděná přenosová rychlost sdílena všemi uživateli.

V této diplomové práci jsem se zaměřil na návrh optické mnohavidové rozbočnice (splitteru) a optické vlnově selektivní rozbočnice, která umožní připojení optického signálu pomocí standardních POF vláken. Tyto pasivní součástky se používají k rozdělení vstupního výkonu na různé výkonové poměry (v mém případě 1x2Y, nebo 1x3Y). Pokud je do výstupního kanálku vsazen filtr, potom hovoříme o optických vlnově selektivních rozbočnicích, které nám umožní ze vstupního signálu vydělit pouze jeden kanál (vlnovou délku), kterým poté budou vedena data ke koncovému zařízení. Tyto pasivní rozbočnice jsou nezbytným prvkem, který využívají PON síť (viz obr. 3.3). Kde OLT (Optical Line Termination) značí centrální prvek optické sítě, který zakončuje optickou distribuční síť na straně operátora (centrální jednotka), a ONT (Optical Network Termination) je koncová optická jednotka na straně uživatele.

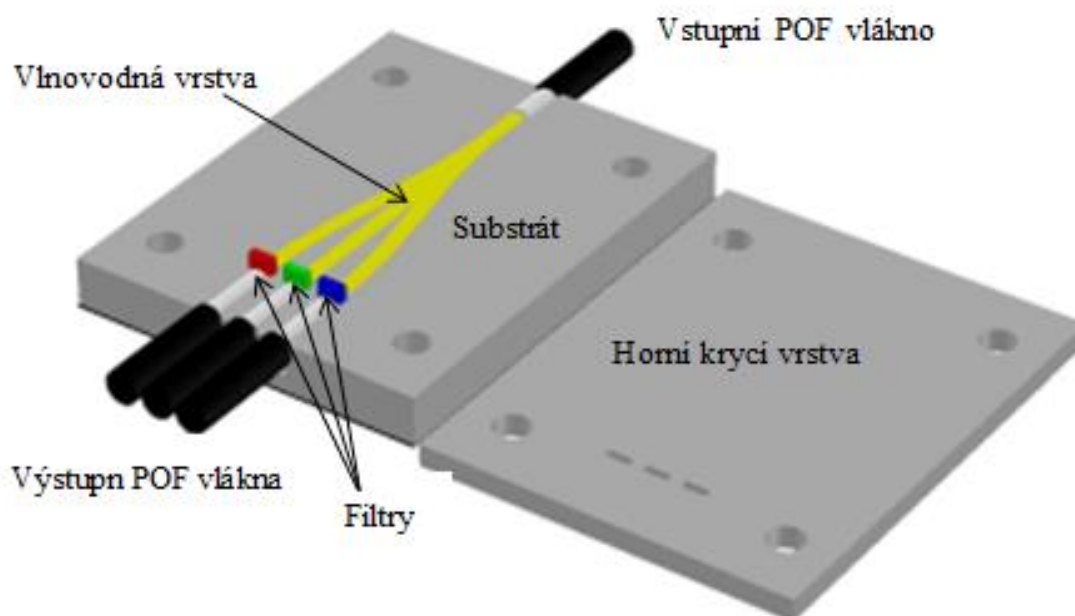


Obrázek 3.3: Příklad architektury sítě PON s optickou vlnově selektivní polymerní rozbočnicí [5].

Pro sdílení přístupu k optickému vláknu dnes slouží v PON sítích časové multiplexování TDM (Time Division Multiplex). Ke zvýšení přenosové kapacity se ale v budoucnu bude čím dál více využívat takzvané WDM (Wavelength Division Multiplex) sdílení, neboli přístup k optickému médiu pomocí vlnového multiplexování, kde bude možné využít optickou vlnově selektivní rozbočnici. V moderních optických sítích je v současnosti poptávka po optických modulech s malými rozměry, nízkou spotřebou energie a s malými náklady na výrobu. Tyto požadavky splňují planární vlnovodné obvody. Vysoce výkonové filtry jsou klíčovými prvky pro vlnovodné dělení ve WDM systémech. Filtry používané ve WDM technice můžeme rozdělit na filtry laditelné a na filtry pevné. Optická vlnově selektivní rozbočnice s tenkovrstvými filtry TFF, plastovými filtry nebo tenkými fóliovými filtry patří mezi pevné filtry, protože je zde daným filtrem přiřazena vlnová délka. Mezi pevné filtry můžeme dále zařadit tzv. filtry s Braggovou mřížkou FBG (Fiber Bragg Gratings) nebo filtry uspořádané do vlnovodné mřížky AWG (Arrayed Waveguide Grating). Dnes je nejvíce využívána Braggova mřížka (kterou ale nelze použít pro mnohavidová vlákna), která ale může mít vyšší rozměry nebo vyšší hodnotu vloženého optického útlumu. Proto se předpokládá, že se pro PON vlákna začnou více využívat například tenkovrstvé filtry TFF, které mají nízké hodnoty optického útlumu a naopak vysoké hodnoty přeslechu, jejichž spektrum není tolik závislé na teplotě a dají se snadno vložit do polymeru [16].

4 Optické vlnově selektivní rozbočnice

Polymerní optická výkonová rozbočnice je pasivní součástka, která slouží jako dělič optického výkonu, který rozděljuje signál ze vstupního vlnovodu do několika výstupních vlnovodů. Optická vlnově selektivní rozbočnice vychází z návrhu optické výkonové rozbočnice s tím rozdílem, že jsou ve výstupních vlnovodech umístěny optické filtry, které vyberou jen určitou vlnovou délku (vlnové spektrum), takže nejen že se vstupní výkon rozdělí, ale ještě od sebe odseparuje určité vlnové délky. To znamená, že umožní přenos až tří kanálů (při třech výstupních vlnovodech a třech různých filtrech) po jednom optickém POF vlákně, a tedy umožní zvýšení přenosové kapacity soustavy. Struktura se skládá ze substrátu, vlnovodné vrstvy, horní krycí vrstvy, optických filtrů a vstupních/výstupních POF vláken.



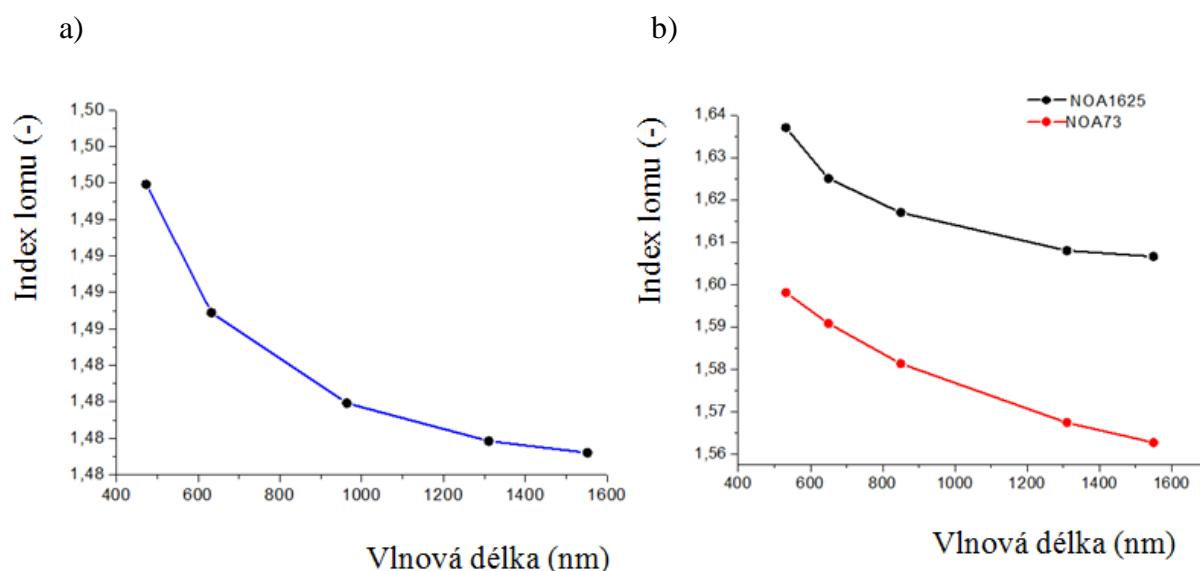
Obrázek 4.1: Pohled na optickou vlnově selektivní rozbočnici s odkrytou krycí vrstvou.

4.1 Polymery pro substrát a vlnovodnou vrstvu

Polymerní materiály pro výrobu fotonických struktur se neustále vyvíjejí a jejich vlastnosti se stále více přibližují vlastnostem, jaké mají fotonické struktury vyrobené z optických skel, dialektrických krystalů nebo polovodičů. Pro výrobu struktur do této diplomové práce jsem měl k dispozici polymer Polymethylmethakrylát (PMMA) od firmy Zenit s.r.o.

Tento polymer jsem použil k výrobě substrátu a horní krycí vrstvy, protože má nižší hodnotu indexu lomu než polymery, které jsem používal jako vlnovodnou vrstvu. Hodnoty indexu lomu v závislosti na vlnové délce byly změřeny na Vysoké škole

chemicko-technologické v Praze (VŠCHT) pomocí zařízení METRICON [13], z důvodu co možná nejpřesnějšího návrhu struktur. Měření indexu lomu bylo provedeno na pěti vlnových délkách, a to 473 nm, 632,8 nm, 964 nm, 1311 nm a 1552 nm. Výsledek měření je uveden na obr. 4.2a), ze kterého jsem poté v programu OriginPro 8.0 interpoloval hodnotu indexu lomu PMMA pro vlnovou délku 650 nm (viz tab. 4.1), pro kterou jsem návrh prováděl.



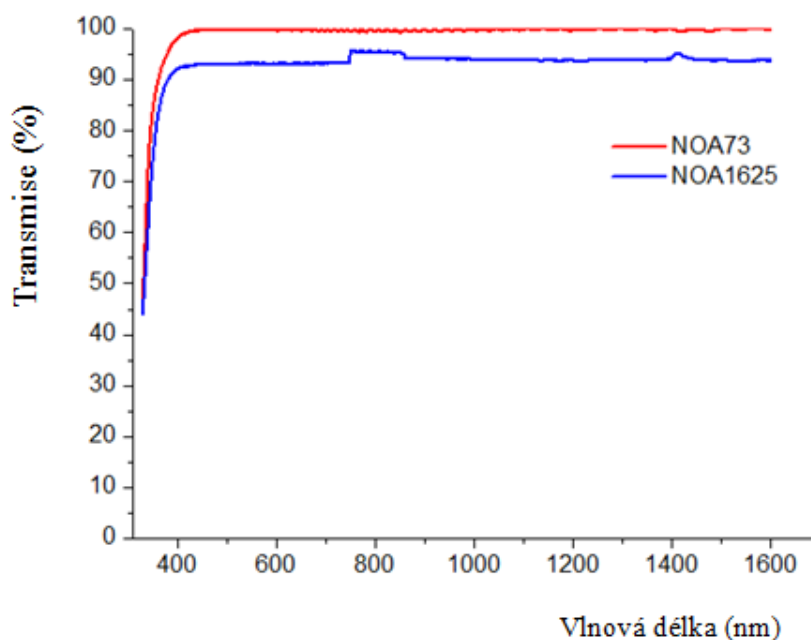
Obrázek 4.2: Změřené hodnoty indexu lomu s vlnovou délkou na zařízení Metricon a) pro substrát a horní krycí vrstvu PMMA, b) pro materiály NOA použitých vlnovodných vrstev.

Jako vlnovodnou vrstvu jsem používal polymery od firmy Norland Optical Adhesive (NOA) [14], a to NOA1625, který má hodnotu indexu lomu 1,625 ($\lambda = 650$ nm), a dále pak NOA73 s hodnotou indexu lomu 1,556 ($\lambda = 650$ nm). Pro měření hodnot indexu lomu byly vlnovodné vrstvy nanесeny na Si a Si/SiO₂ podložky pomocí metody rotačního lití, vytvrzeny UV světlem a poté změřeny hodnoty indexu lomu opět zařízením METRICON. Naměřené hodnoty indexu lomu pro polymery NOA jsou uvedeny na obr. 4.2b) a výsledky pro interpolované vlnové délky jsou uvedeny v tabulce 4.1. Tyto hodnoty indexu lomu byly interpolovány z obr. 4.2. Materiály používané pro vlnovodnou vrstvu musí mít vyšší hodnotu indexu lomu, než má materiál, ze kterého je vytvořen substrát a horní krycí vrstva.

Tabulka 4.1: Hodnoty indexu lomu pro PMMA a polymery NOA 1625 a NOA73 interpolované z obr 4.2.

λ (nm)	Index lomu (-)		
	PMMA	NOA1625	NOA73
532	1,495	1,637	1,564
650	1,489	1,625	1,558
850	1,485	1,617	1,55
1310	1,479	1,608	1,545
1550	1,478	1,606	1,539

Pomocí spektrometru Shimadzu UV-3600 byla změřena transmisní spektra vlnovodných materiálů NOA1625 a NOA73 (obr. 4.3). Pro toto měření byly materiály pro vlnovodné vrstvy nanесeny na křemenné sklo pomocí metody rotačního lití a vytvrzeny UV světlem. Z měření vyplývá, že použité polymery NOA pro vlnovodné vrstvy jsou transparentní v rozsahu vlnových délek od 400 nm do 1600 nm.



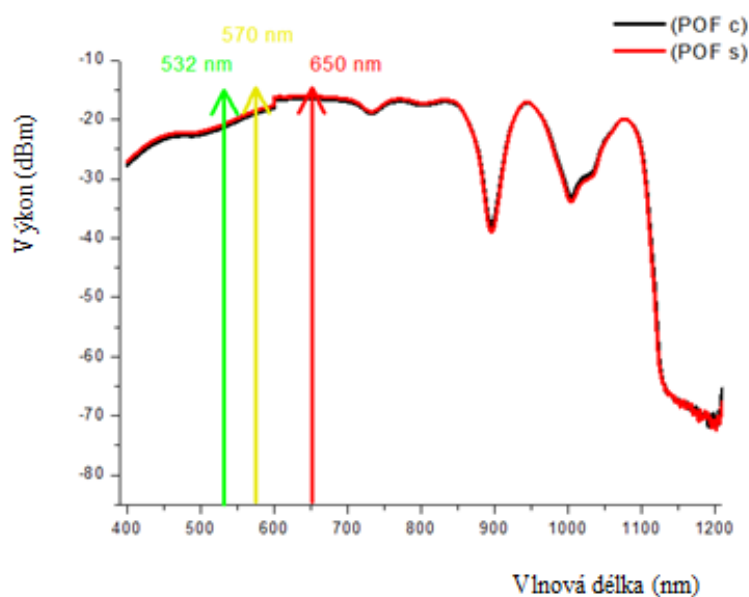
Obrázek 4.3: Naměřená transmisní spektra polymeru NOA1625 a NOA73.

4.2 Použité filtry pro POF vlákna

K připojení realizovaných optických struktur jsem používal standardní plastová optická POF vlákna (Plastic Optical Fiber) typu PFU-UD1001-22V. Tato optická vlákna se běžně používají na vlnových délkách 532 nm, 570 nm a 650 nm, kde dosahují nejnižšího

optického útlumu (obr. 2.1). Na základě této vlastnosti POF vláken jsem poté vybral optické filtry o takových vlnových délkách, které spadaly do této oblasti. Byly zvoleny filtry o vlnových délkách 532 nm (zelená), 570 nm (žlutá) a 650 nm (červená). V rámci návrhu a výroby optických rozbočnic jsem využíval i tenké fóliové filtry pro vlnovou délku 430 nm (modrá), kde mají POF vlákna jen nepatrně vyšší hodnotu optického útlumu, než je tomu u vlnové délky 570 nm.

Na obr. 4.3 je uvedena útlumová charakteristika používaných POF vláken, která byla změřena na Ústavu fotoniky a elektroniky AV ČR, v.v.i. (UFE) pomocí spektrálního analyzátoru ANDO AQ6315B. Měření bylo provedeno pro dvě POF vlákna, která jsem měl při výrobě k dispozici a která mají totožné útlumové charakteristiky. Schéma měřicího pracoviště je popsáno v kapitole 5.3. Na obr. 4.4 je uveden příklad naměřeného spektra pro dvě POF vlákna s vyznačenými přenosovými okny. Tyto POF vlákna jsem používal jako vstupně/výstupní vlákna pro přivedení a vyvedení optického signálu z vyrobených struktur.



Obrázek 4.4: Útlumová charakteristika použitých POF vláken změřená spektrálním analyzátozem ANDO.

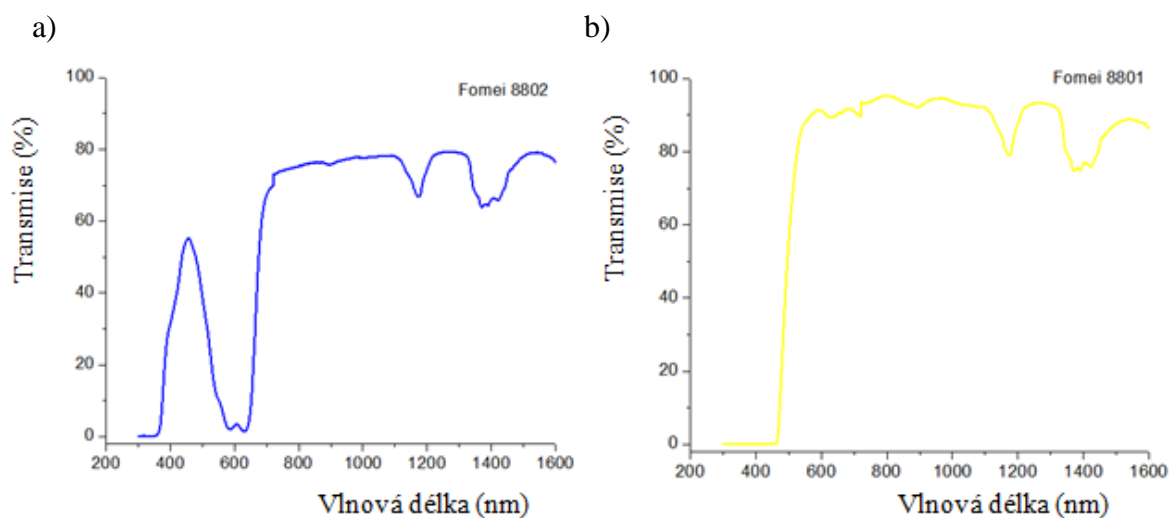
Na obrázcích 4.5-4.9 jsou uvedena transmisní spektra jednotlivých používaných filtrů. Měření transmisních spekter jsem provedl na ČVUT v Praze na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské. K měření byl využit spektrofotometr Shimadzu UV-3600, který dokáže měřit transmisní spektrum v rozsahu vlnových délek od 185 nm do 3000 nm. Mnou používané optické filtry byly měřeny v rozmezí vlnových délek určených pro optické komunikace, a to od 300 nm do 1600 nm. Vzhledem k tomu, že filtry používané pro tyto účely nejsou

zrovna levné, zkoušel jsem i jako alternativu použít barevné optické filtry určené pro fotoaparáty.

Typy používaných filtrů:

1) *Fotografické filtry od firmy Fomei*

Jako první zde uvádím testované fotografické filtry od firmy Fomei, které jsem zamýšlel použít jako levnější variantu oproti níže zmíněným filtrům. Spektrální charakteristika těchto filtrů je uvedena na obr. 4.5.



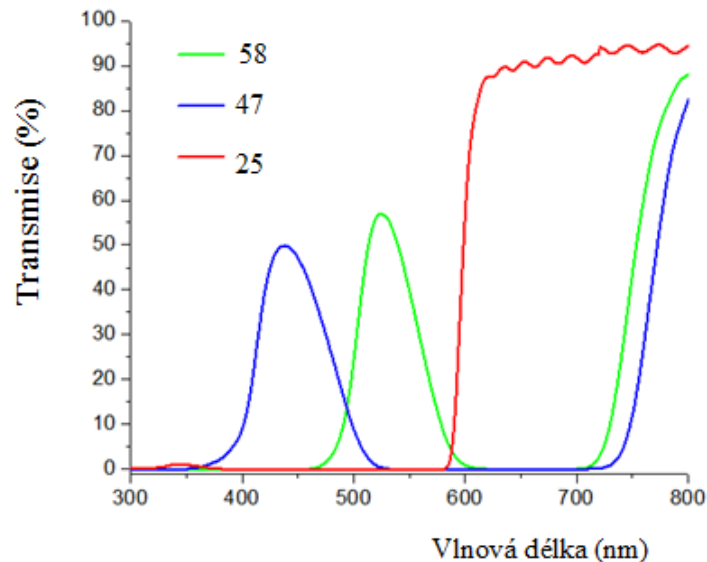
Obrázek 4.5: Transmisní spektra změřená pomocí spektrofotometru Shimadzu UV- 3600, a) modrý filtr Fomei 8802, b) žlutý filtr Fomei 8801.

Tyto filtry jsou určeny pro rozsah vlnových délek, které odpovídají vlnové délce barvy filtru. Měřením bylo zjištěno, že například modrý filtr (viz obr. 4.5a)) sice propouští záření o vlnové délce 430 nm (modrá), ale zároveň propouští i záření o vlnových délkách nad 620 nm. Pro naše potřeby jsou vhodné filtry, které mají propustnost vlnové délky v rozsahu ± 50 nm (650 ± 50 nm nebo 530 ± 50 nm). Na obr. 4.5b)) je naměřené transmisní spektrum žlutého filtru. Z obr. 4.5b) vyplývá, že tento filtr propouští všechny vlnové délky nad 470 nm.

Z měření tedy vyplynulo, že pro naše potřeby nejsou tyto filtry vhodné, protože nedokážou odfiltrovat požadovaný rozsah vlnových délek. Tyto levné filtry by se daly použít pouze za předpokladu, že bychom propouštěnou vlnovou délku „vytvořili“ překrytím několika filtrů o různých barvách. Toto řešení je ale kvůli nedostatečné nabídce těchto filtrů a jejich geometrickým rozměrům pro náš případ nerealizovatelné.

2) Filtry Kodak Wratten Filters

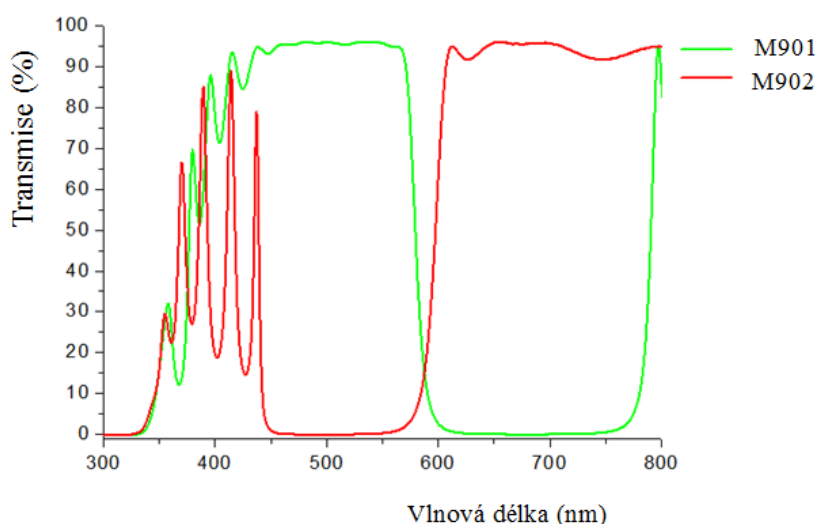
Tyto filtry jsou od firmy Edmund Optics [11] a jsou určeny k fotografickým účelům, ale lze je vyžívat i v průmyslových aplikacích. Jsou to tenké fólie, které jsou dodávány o rozměrech 75x75x0,1 mm (šířka x výška x tloušťka). Filtry propouštějí optické záření o vlnových délkách od 300 nm do 800 nm. Na obr. 4.6 jsou uvedena transmisní spektra (která jsem opět změřil pomocí spektrofotometru Shimadzu UV-3600) červeného, zeleného a modrého filtru. Z naměřených transmisních spekter je vidět, pro jaké rozsahy vlnových délek lze tyto optické filtry použít. Modrý filtr je určen pro vlnovou délku od 420 nm do 460 nm, červený pro vlnové délky od 620 nm do 690 nm a zelený filtr lze použít pro vlnové délky v rozsahu od 520 nm až 550 nm. Z obr. 4.6 vyplývá, že vložením filtru do struktury dojde k výrazným optickým ztrátám. Barvy filtrů byly vybrány podle útlumových charakteristik POF vlákna (obr. 2.1). Fóliový filtr, který by propouštěl záření o vlnové délce v rozsahu od 560 nm do 580, firma Edmund Optics v nabídce neměla, proto byl pro testovací účely k výrobě testovacích drážek a optických vlnově selektivních rozbočnic vybrán modrý filtr. V rozsahu pracovních délek, které tento typ filtru propouští (od 420 nm do 460 nm), má POF vlákno hodnotu optického útlumu srovnatelnou s vlnovou délkou 650 nm.



Obrázek 4.6: Změřená transmisní spektra tenkých fóliových filtrů Edmund Optics spektrofotometrem Shimadzu UV- 3600.

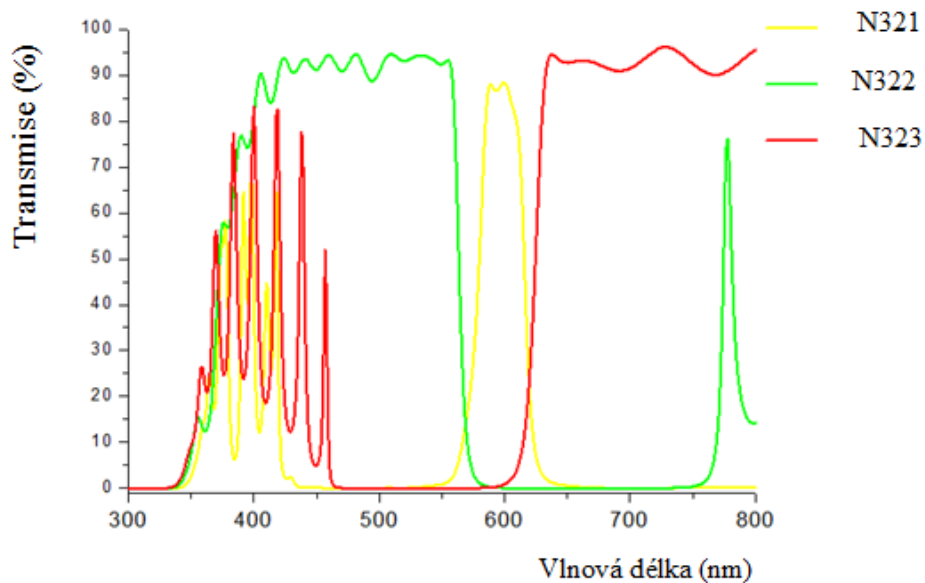
3) Tenkovrstvé optické filtry (TFF - Thin Film Filters)

Tenkovrstvé filtry (TFF – Thin Film Filters) byly vyrobeny na zakázku pro daný spektrální rozsah u firmy Crytur [10]. Jedná se o optické filtry, které byly zhotoveny na skleněných podložkách napařením několika desítek tenkých vrstev tak aby měl daný filtr potřebnou spektrální charakteristiku. Od firmy je dodána deska o průměru 5 cm, která se poté nechá nařezat na požadované rozměry. Na obr. 4.7 jsou změřená transmisní spektra první sady TFF filtru spektrofotometrem Shimadzu UV- 3600. Jak je zde vidět, tak zelený filtr (M901) je použitelný pro vlnové pásmo v rozsahu od 450 nm do 560 nm a červený filtr (M902) pro pásmo od 600 nm do 750 nm.



Obrázek 4.7: Transmisní spektra první sady tenkovrstvých filtrů TFF Crytur 1 změřená spektrofotometrem Shimadzu UV- 3600.

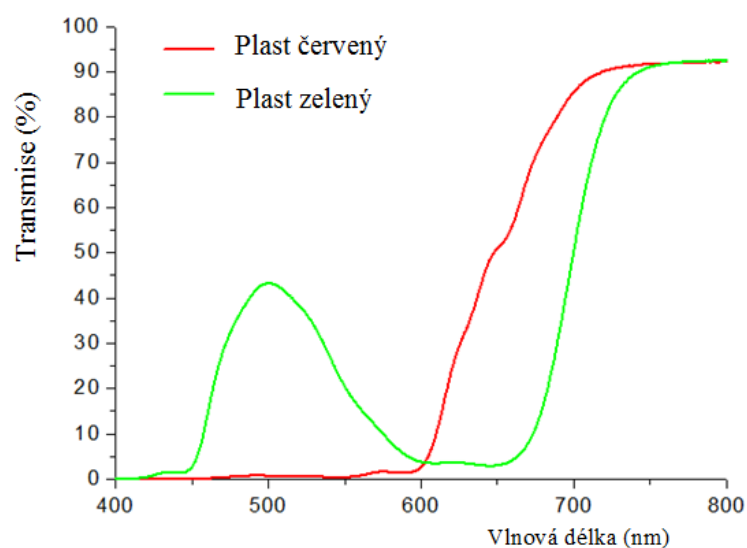
Od firmy Crytur byla poté zakoupena druhá sada tenkovrstvých TFF filtrů, jejichž spektrální charakteristika je uvedena na obr. 4.8. Spektrální charakteristiky filtrů byly vybrány na základě útlumové charakteristiky POF vlákna (obr. 2.1) a na rozdíl od první sady těchto tenkovrstvých filtrů byly spektrální charakteristiky těchto filtrů upraveny tak, aby rozdělily spektrum na tři části. První filtr má spektrální rozsah od 470 nm do 540 nm (zelená – N322), druhý filtr od 580 nm do 600 nm (žlutá – N321) a třetí filtr od 630 nm do 750 nm (červená - N323).



Obrázek 4.8: Transmisní spektra druhé sady tenkovrstvých filtrů TFF Crytur 2 změřená spektrofotometrem Shimadzu UV- 3600.

4) Plastové filtry

Tyto filtry byly zakoupeny od firmy Edmund Optics [9]. Jsou dodávány jako deska o rozměrech 8 x 8 x 1,2 cm (šířka x výška x tloušťka), která se poté musí nařezat. Naměřená transmisní spektra plastových filtrů pomocí spektrofotometru Shimadzu UV-3600 jsou uvedeny na obr. 4.9. Zelený filtr je určen pro vlnové pásmo v rozmezí od 450 nm do 550 nm a červený pro vlnové pásmo v rozmezí od 600 nm do 800 nm. Plastový filtr, který by pracoval v rozsahu vlnové délky odpovídající žluté bavě, nebyl k dispozici.



Obrázek 4.9: Transmisní spektra plastových filtrů Edmund Optics změřená spektrofotometrem Shimadzu UV- 3600.

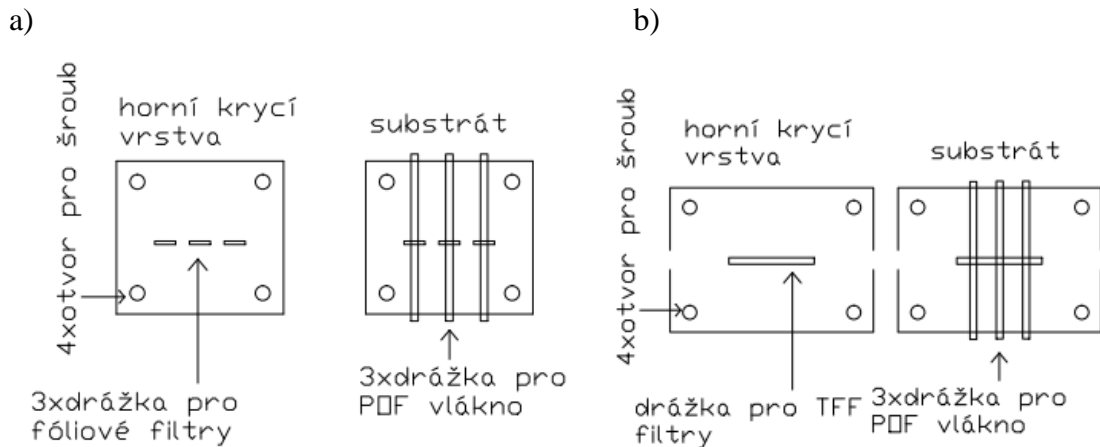
5 Návrh struktur vlnově selektivních rozbočnic

Návrh struktur optických vlnově selektivních rozbočnic vychází z návrhu optické vlnově neselektivní rozbočnice. Návrh volně navazoval na moji bakalářskou práci Návrh optické planární mnohavidové POF rozbočnice s dělicím poměrem 1x2Y a 1x3Y [4]. Všechny návrhy jsem prováděl pomocí programu BeamPROPTM od firmy Rsoft Design Group, který slouží k návrhu optických struktur. Návrh jsem prováděl pro vlnovou délku 650 nm a standardní plastová optická POF vlákna o průměru vlnovodného jádra 980 μm .

5.1 Návrh optických kanálků pro dva a tři filtry

Nejprve byly navrženy pouze testovací struktury s kanálky, na kterých jsem testoval osazení tenkovrstvých filtrů TFF, plastových filtrů a tenkých fóliových filtrů pro připojení na optický signál pomocí POF vláken. V prvním kroku byly navrženy a vyrobeny struktury pouze se dvěma kanálky pro TFF a plastové filtry pro dvě barevná spektra o vlnových délkách 532 nm a 650 nm (viz příloha C). Po otestování filtrů TFF byly zkoušeny další druhy těchto filtrů o vlnových délkách 532 nm (zelený), 591 nm (žlutý) a 635 nm (červený). Dále jsem testoval tenké fóliové filtry o třech různých barevných spektrech se střední vlnovou délkou 430 nm, 532 nm a 650 nm. Pro jejich otestování byly vyrobeny struktury se třemi kanálky pro tři různé filtry. Návrh kanálků jsem provedl v programu AutoCAD. Na obr. 5.1 jsou ukázky návrhů tří drážek pro fóliové filtry (obr. 5.1a) a pro tenkovrstvé filtry TFF (obr. 5.1b). Jak již bylo zmíněno, návrh se liší jednak v rozměrech drážky pro filtr, ale také tím, že na obr. 5.1a) jsou drážky pro filtr odděleny a na obr. 5.1b) jsou drážky spojeny. Tento upravený návrh byl zvolen z důvodu praktické zkušenosti manipulace, protože s fóliovými filtry, které mají rozměry 1,5 x 4 x 0,1 mm (šířka x výška x tloušťka) se při výrobě hůře manipuluje (pokud máme drážku na fóliový filtr jen jednu, tak se při nasazování filtrů může nalepit jeden na druhý a mohou se navzájem překrýt). V případě kdy jsou drážky oddělené, nemůže při výrobě dojít k překrytí a filtry se nasadí správně. U tenkovrstvých filtrů TFF a plastových filtrů tento problém při výrobě nenastával, protože se s nimi díky jejich rozměrům a materiálu, ze kterého jsou vyrobeny, se s nimi mnohem lépe manipuluje (nelepí se na sebe jako fóliové filtry).

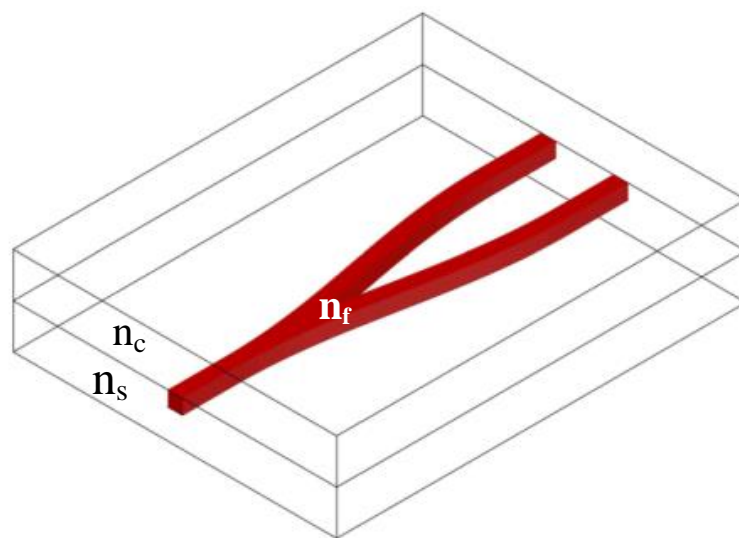
Kompletní technická dokumentace všech navržených přípravků je uvedena v příloze C.



Obrázek 5.1: Drážky pro filtry a) tenké fóliové filtry, b) tenkovrstvé filtry TFF.

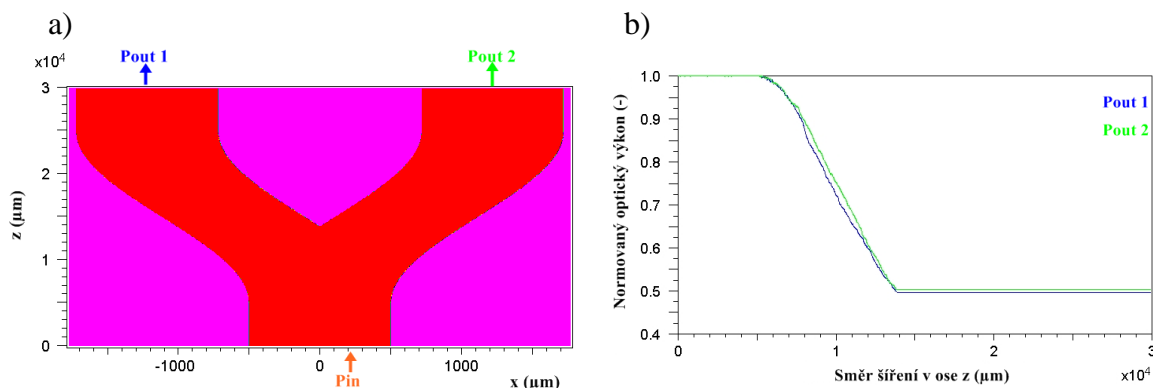
5.2 Návrh optické vlnově selektivní rozbočnice s dělicím poměrem 1x2Y

Návrh optické selektivní rozbočnice s dělicím poměrem 1x2Y vychází z návrhu 1x2Y rozbočnice s jedním vstupním a dvěma výstupními optickými vlnovody se symetrickým dělicím poměrem výstupního výkonu. Výsledkem byl návrh struktury, která má dělicí poměr 50,2 : 49,8. Struktura byla tvořena na substrátu z polymeru (PMMA) s indexem lomu 1,489 ($\lambda=650$ nm), ze kterého byla vytvořena i horní krycí vrstva a vlnovodné vrstvy, které byly tvořeny polymerem NOA1625 (index lomu 1,625; $\lambda=650$ nm) nebo polymerem NOA73 (index lomu 1,558; $\lambda=650$ nm). Na obr. 5.2 je uveden model navržené struktury, kde n_s je index lomu substrátu, n_f je index lomu vlnovodné vrstvy a n_c je index lomu horní krycí vrstvy, která má v tomto případě stejnou hodnotu indexu lomu jako substrát. Aby vznikl vlnovodný efekt, musí platit: $n_s < n_f > n_c$.



Obrázek 5.2: Model navržené struktury optické rozbočnice 1x2Y.

Na následujícím obrázku 5.3a) je uveden profil indexu lomu navržené optimalizované struktury, kde červená barva zobrazuje vlnovodnou vrstvu a růžová barva označuje index lomu okolního prostředí. Na tomto obrázku je také vidět, že celkový rozměr navržené struktury ve směru šíření optického signálu z je 3 cm. Na obr. 5.3b) je potom uveden normovaný průběh šíření optického signálu, který se šíří ze vstupního vlnovodu P_{in} do výstupních kanálků $P_{out 1}$ a $P_{out 2}$ (49,7:50,3). Detailní návrh rozbočnice byl popsán v [4].



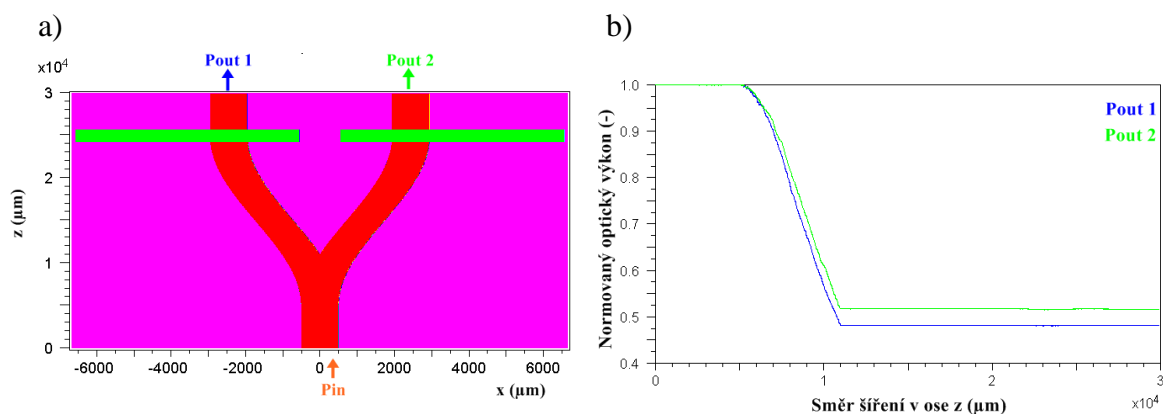
Obrázek 5.3: a) Profil indexu lomu optimalizované struktury PMMA/NOA73 1x2Y pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm při pohledu shora, b) šíření optického signálu ve struktuře pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm.

Optická vlnově selektivní rozbočnice 1x2Y s tenkovrstvými TFF a plastovými filtry

Při návrhu optické rozbočnice (bez filtrů) jsou geometrické rozměry struktury optimalizovány tak, aby struktura měla co nejmenší geometrické rozměry, a zároveň se optimalizuje úhel, který svírá výstupní vlnovody, aby bylo možné na výstupní vlnovody připojit POF vlákno s rozměrem 1000 μm . Platí, že čím je tento úhel větší, musejí být i výstupní vlnovody ve směru osy z rozměrově delší (podle obr. 5.3a)). Ve výše navržené a optimalizované rozbočnici s dělicím poměrem 1x2Y jsem našel takový maximální úhel, kde byl celkový rozměr rozbočnice max. 3 cm. Samozřejmě se dá realizovat i rozbočnice s menšími rozměry, ale zde již není možné vložení tenkovrstvých filtrů TFF do výstupních kanálků (první sada TFF filtrů byla nařezána na šířku 5 mm). Při tomto rozměru je mezera mezi výstupními kanálky 3,9 mm. To znamená, že při návrhu drážky na tenkovrstvé filtry TFF a stejně tak na plastové filtry (mají stejné rozměry), nemůže být filtr umístěn do výstupního kanálku symetricky, při šířce kanálku 1 mm to znamená 2 mm na každou stranu. Takže pro filtr TFF (a plastový filtr), které mají šířku 5 mm, jsem na ně navrhnul

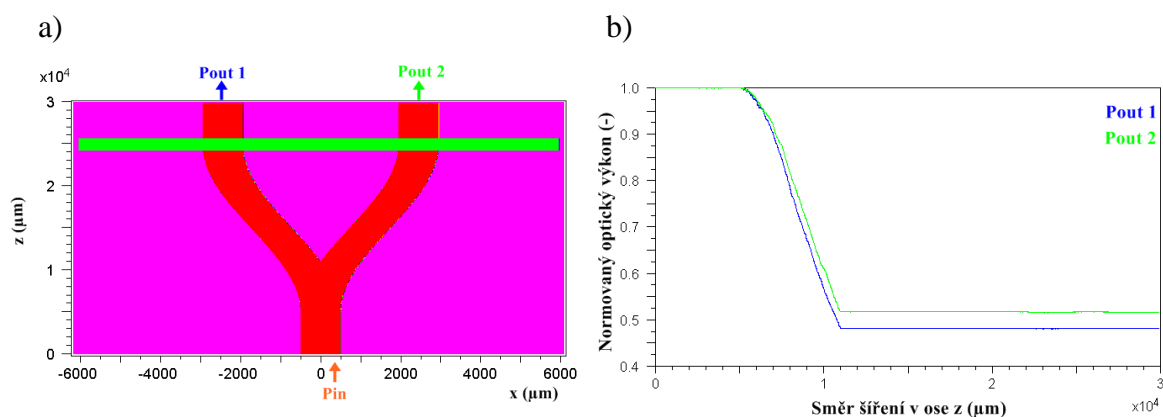
drážku kanálku 6 mm. Výsledný návrh optické vlnově selektivní rozbočnice s dělicím poměrem 1x2Y s drážkami pro tenkovrstvé filtry TFF a je zobrazen na obr. 5.4.

Na obr. 5.4a) je uveden profil indexu lomu navržené struktury, kde červená barva značí index lomu vlnovodné vrstvy (NOA73) a růžová barva značí index lomu substrátu (PMMA). Zelená barva značí drážku pro tenkovrstvé filtry TFF (nebo plastové filtry). Na obr. 5.4b) je potom vyznačen průběh výkonů z výstupních vlnovodů (0,48:0,52).



Obrázek 5.4: a) Profil indexu lomu optimalizované struktury PMMA/NOA73 1x2Y pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm při pohledu shora, b) šíření optického signálu ve struktuře pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm.

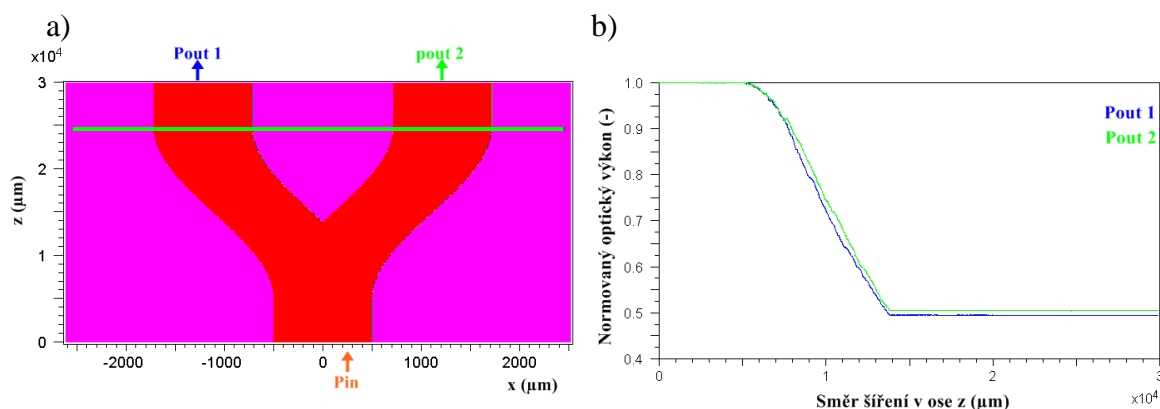
Na obr. 5.5a) je uveden profil indexu lomu, kde jsou drážky pro tenkovrstvé filtry TFF, respektive plastové filtry spojeny. Jak je vidět na obr. 5.5b), výstupní výkon je zde také v poměru 0,48:0,52, protože základní profil struktury je stejný jako na obr. 5.4 (délka a úhel svírající výstupní vlnovody), jen je modifikováno umístění drážky pro filtry. Tato struktura byla navržena pro testování, zda by se při následné výrobě do struktury tenkovrstvé filtry TFF, respektive plastové filtry nevkládaly lépe.



Obrázek 5.5: a) Profil indexu lomu optimalizované struktury PMMA/NOA73 1x2Y pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm při pohledu shora, b) šíření optického signálu ve struktuře pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm.

Optická vlnově selektivní rozbočnice 1x2Y s tenkými fóliovými filtry

Na obr. 5.6a) je uveden profil indexu lomu optické vlnově selektivní rozbočnice, kde byly použity tenké fóliové filtry, jejichž tloušťka je 0,1 mm. Nevýhodou je, že při výrobě pomocí CNC frézy, která je použita pro výrobu substrátů navržených struktur, nelze udělat drážku o tloušťce pouze 0,1 mm. Nejmenší možná tloušťka drážky je 0,5 mm. Výhodou navržené struktury je, že díky menším rozměrům drážky pro filtry se úhel svírající výstupní kanálky blíží optimálnímu úhlu, který byl nalezen při modelování struktury na obr. 5.3, a tím se výstupní výkon šíří více symetricky než je tomu u struktur s tenkovrstvými filtry TFF a plastovými filtry. Výstupní výkon se zde šíří v poměru 0,495:0,505 (viz obr. 5.7b).



Obrázek 5.6: a) Profil indexu lomu optimalizované struktury PMMA/NOA73 1x2Y pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm při pohledu shora, b) šíření optického signálu ve struktuře pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm.

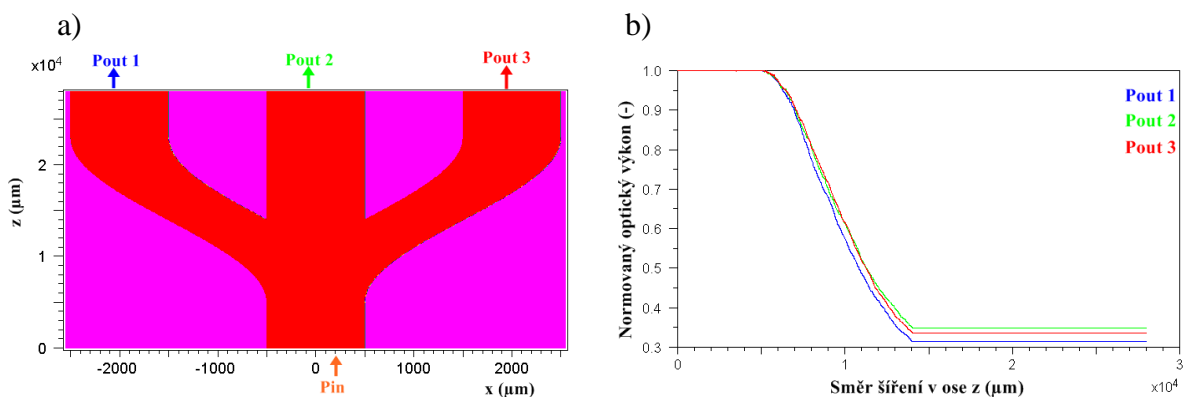
Zde je uvedena pouze simulace se spojenými drážkami pro tenké fóliové filtry. S oddělenými drážkami by navržená struktura vypadala stejně jako simulace na obr. 5.6a), jen by byla drážka na filtry uprostřed oddělena. Pro porovnání výsledků byla dána do výroby i tato varianta, aby se ověřila obtížnost manipulování a osazování struktury v případě oddělených drážek.

Kompletní technická dokumentace všech navržených struktur je uvedena v příloze C.

5.3 Návrh optické vlnově selektivní rozbočnice s dělicím poměrem 1x3Y

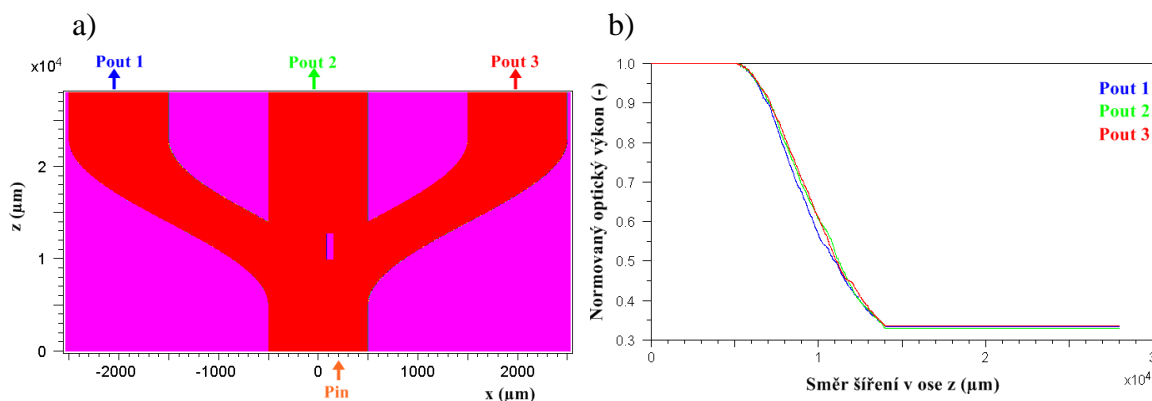
Tomuto návrhu nejdříve předcházela návrh samotné optické rozbočnice s dělicím poměrem 1x3Y bez kanálků pro filtry. Na obr. 5.7a) je zobrazeno rozložení indexu lomu navržené struktury z pohledu shora. Z obr. 5.7b) je patrné, že rozložení výstupního optického

výkonu je nesymetrické a výstupní optický výkon je zde rozdělen v poměru 31,4:34,9:33,7. Je tedy vidět, že šíření optického signálu není symetrické - středový výstupní vlnovod P_{out2} má nejvyšší výkon.



Obrázek 5.7: a) Profil indexu lomu optimalizované struktury PMMA/NOA73 1x3Y pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm při pohledu shora, b) šíření optického signálu ve struktuře pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm.

Tato výstupní nesymetrie je vyřešena na obr. 5.8a), kde je ve středové větvi vložen malý obdélník o rozměrech $66 \times 2800 \mu\text{m}$, který má stejnou hodnotu indexu lomu jako má substrát. Tento vložený obdélník umožní to, že se výkon z výstupních vlnovodů bude šířit v poměru 33,9:32,9:33,2 (viz obr. 5.8b)) a výstupní výkon je tedy rozdělen téměř symetricky.



Obrázek 5.8: a) Profil indexu lomu optimalizované struktury PMMA/NOA73 1x3Y pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm při pohledu shora, b) šíření optického signálu ve struktuře pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm.

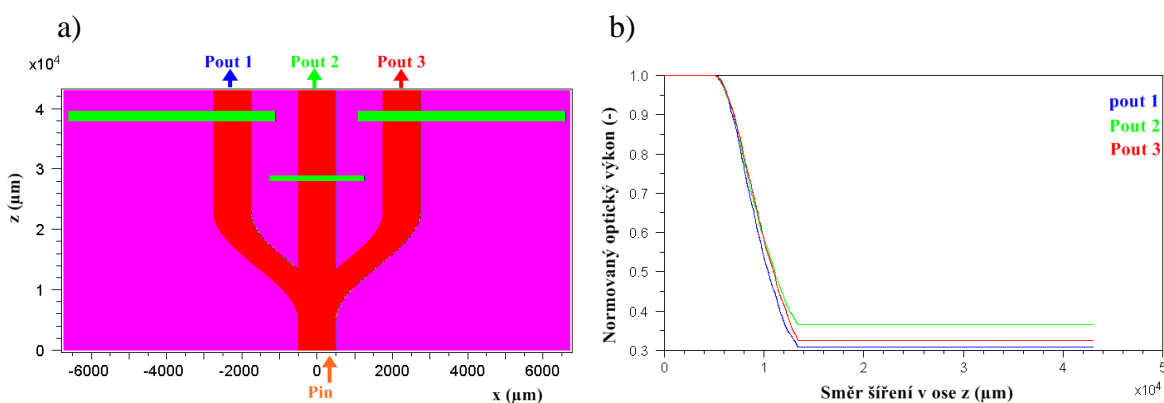
Při následné výrobě optických vlnově selektivních rozbočnic s dělicím poměrem 1x3Y nebyla vyráběna varianta s vloženým obdélníkem, protože jak je z výsledků zřejmé (viz kapitola 8, tab. 7.8), tak při praktické výrobě nelze dostupnou technologií realizovat vnitřní vložený obdélníček, který by umožnil realizovat symetrické rozdělení optického

signálu. Princip návrhu optické rozbočnice s dělicím poměrem 1x3Y je podrobněji popsán v [4].

Optická vlnově selektivní rozbočnice 1x3Y s tenkovrstvými filtry TFF a plastovými filtry

Po návrhu symetrické optické rozbočnice s dělicím poměrem 1x3Y jsem do výstupních kanálků vložil drážky pro filtry. Při návrhu optické vlnově selektivní rozbočnice s tenkovrstvými filtry TFF, respektive plastovými filtry zde nastal problém s geometrickými rozměry těchto filtrů. Geometrické rozměry tenkovrstvých filtrů TFF (z první testovací sady) a plastových filtrů byly 5 x 3 x 1,1 mm (šířka x výška x tloušťka). Návrh optické vlnově selektivní rozbočnice s dělicím poměrem 1x3Y s použitím tenkovrstvých filtrů TFF, respektive plastových filtrů lze realizovat pouze tak, jak je zobrazeno na obr. 5.9a). A to tak, že lze použít pouze 2 tenkovrstvé filtry TFF (nebo plastové filtry, které je nutné umístit do krajních výstupních vlnovodů) a k nim se do středového vlnovodu musí vložit tenký fóliový filtr. Šíření normovaného optického signálu o vlnové délce 650 nm je uvedeno na obr. 5.9b). Výstupní výkon je zde rozdělen v poměru 0,31:0,37:0,32.

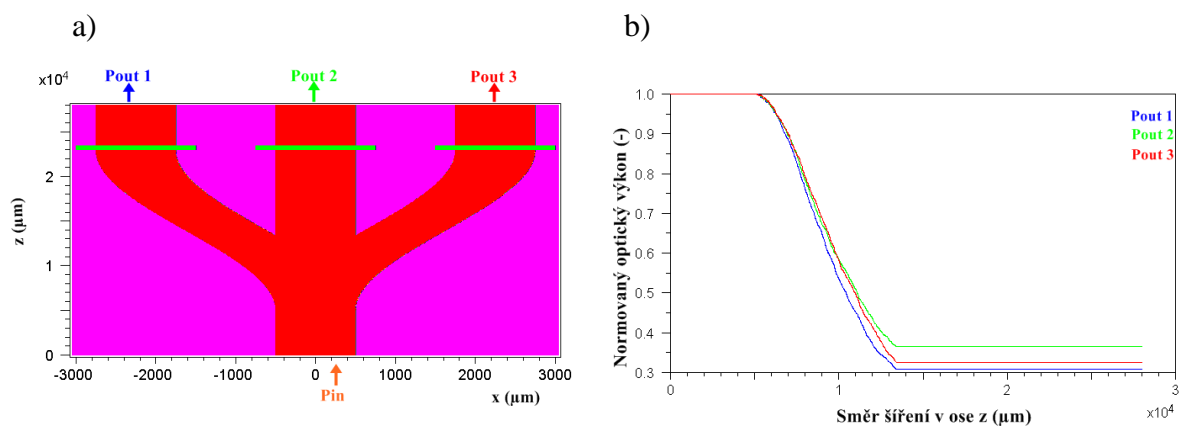
Je možné realizovat i optické vlnově selektivní rozbočnice se třemi tenkovrstvými filtry TFF nebo plastovými filtry (při geometrických rozměrech těchto filtrů z první testovací sady), ale takovéto struktury musejí mít velký úhel, který svírá levý a pravý výstupní kanálek, a tím je nutné zvětšit i rozměr struktury ve směru z a optická vlnově selektivní rozbočnice by narostla do nepřijatelných rozměrů (cca 15 cm).



Obrázek 5.9: a) Profil indexu lomu optimalizované struktury PMMA/NOA73 1x3Y pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm při pohledu shora, b) šíření optického signálu ve struktuře pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm.

Optická vlnově selektivní rozbočnice 1x3Y s tenkými fóliovými filtry

Posledním návrhem je optická vlnově selektivní rozbočnice 1x3Y, kde jsou vloženy tři tenké fóliové filtry. Drážky na tento druh filtrů mají rozměr 1,5x4 x0,1 mm (šířka x výška x tloušťka). Profil indexu lomu navržené struktury je na obr. 5.10a) a na obr. 5.10b) je potom graf s vyznačením šíření normovaného optického výkonu z jednotlivých výstupních kanálkových vlnovodech. Zde je dosažený poměr výstupních výkonů 0,31:0,37:0,33.

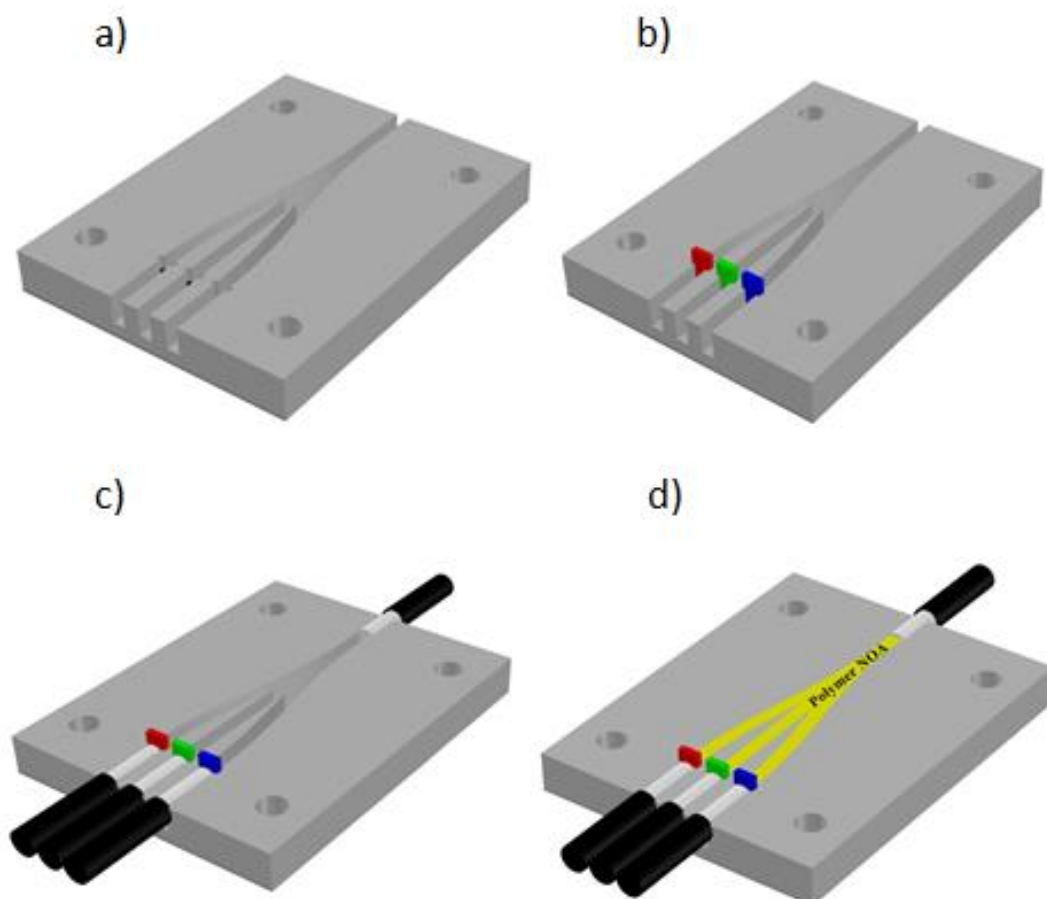


Obrázek 5.10: a) Profil indexu lomu optimalizované struktury PMMA/NOA73 1x3Y pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm při pohledu shora, b) šíření optického signálu ve struktuře pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm.

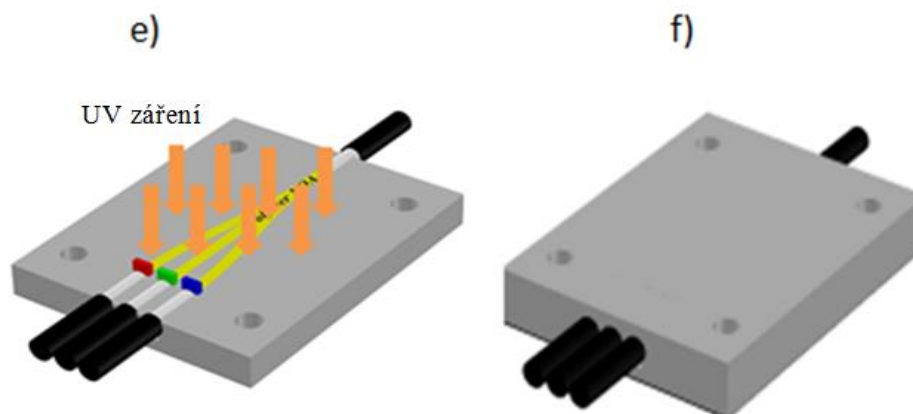
6 Výroba

Po provedení teoretických návrhů v programu BeamPROPTM byly do polymeru PMMA pomocí CNC gravírování vytvořeny drážky pro vlnovodnou vrstvu, optické filtry a vstupní/výstupní POF vlákna. Výroba drážek do substrátů byla provedena pomocí CNC gravírování zařízením NONCO KX3 s frézku o průměru 0,5 a 0,8 mm a rychlostí otáčení 1800 ot/min s posuvem 36 mm/min.

Na obr. 6.1 je graficky znázorněn postup výroby optických vlnově selektivních rozbočnic. Nejprve jsou pomocí CNC gravírování vyfrézovány drážky pro vlnovodnou vrstvu do PMMA podložky, filtry a pro POF vlákna (obr. 6.1a)). Dále se do zhotoveného substrátu vloží do vytvořených drážek optické filtry (obr. 6.1b)) a před a za filtr se nanese antireflexní gel. Poté jsou upevněna vstupní a výstupní POF vlákna (obr. 6.1c)), do drážky je nanášena vlnovodná vrstva (obr. 7.1d)), která je vytvrzena UV zářením (obr. 6.2e)). V posledním kroku je mechanicky připevněna horní krycí vrstva z PMMA (obr. 6.2f)).



Obrázek 6.1: Výrobní postup optických vlnově selektivních rozbočnic: a) gravírování Y drážek pro vlnovodnou vrstvu do PMMA podložky pro vstupní/výstupní POF vlákna a filtry, b) vložení filtrů a nanášení antireflexního gelu, c) vložení POF vláken, d) nanášení vlnovodné vrstvy.



Obrázek 6.2: Výrobní postup optických vlnově selektivních rozbočnic: e) vytvrzení vlnovodné vrstvy pod UV světlem, f) připevnění horní krycí vrstvou z PMMA.

Před vkládáním POF vláken do připravené drážky (obr. 6.1c)) se musí čela POF vláken vyleštit pomocí speciálního postupu. Nejdříve se vlákno zbaví primární ochrany, poté se naměří délka tak, aby bylo možné vlákno vložit do rychlokonektorů a následně se pomocí leštícího papírku vyleští čelo POF vlákna. Leštění se provádí ve dvou krocích. Nejprve je uříznuté vlákno vyleštěno pomocí hrubého leštícího papíru a následně se doleští jemnějším leštícím papírem. Leštění se provádí z toho důvodu, že se při řezání POF vláken na požadovanou délku vlákno nikdy nepodaří uříznout rovně a v tomto místě vzniknou na jádře POF vlákna nerovnosti. Tyto nerovnosti se vyleštěním dají odstranit a tím snížit vložený optický útlum. V tabulce 6.1 je uvedeno porovnání přenášeného výkonu pro leštěná a neleštěná POF vlákna. Z této tabulky vyplývá, že po uříznutí vlákna číslo 1 a jeho připojení ke zdroji optického záření o vlnové délce 532 nm, byl na detektoru naměřen optický výkon 1010,5 μW . Po vyleštění se detekovaný optický výkon zvýšil na hodnotu 2650 μW . Vyšší výkon na vlnové délce 532 nm je dán vyšším výkonem laseru o této vlnové délce. U vlákna číslo 2 se detekovaná hodnota optického výkonu po vyleštění zvýšila na 215,5 μW ($\lambda = 650 \text{ nm}$) oproti původním 10,5 μW před vyleštěním.

Tabulka 6.1: Porovnání vyleštěného a nevyleštěného optického vlákna osazeného rychlokonektory

	λ (nm)	Optický výkon P (μ W)	
		Před leštěním	Po leštění
Vlákno 1	532	1010,5	2620
	650	17,13	248,2
Vlákno 2	532	561,03	2340
	650	10,5	215,5

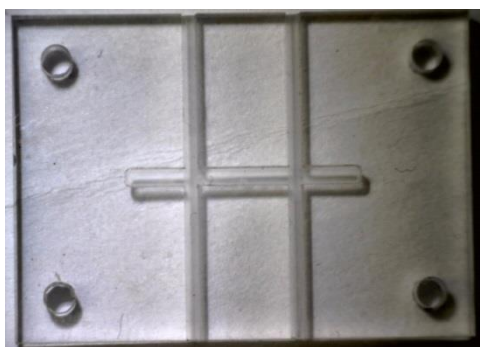
Ve vybraných případech byla standardní POF vlákna (PFU-UD1001-22V) zakončena FC konektory, jinak jsem používal POF vlákna bez FC konektorů, které jsem při měření osazoval rychlokonektory Bare Fiber Adapter dodané firmou Optovit. Výhodou těchto FC rychlokonektorů je, že je lze kdykoli nasadit na POF vlákno a následně zase sejmut. Nevýhoda nasazovacích rychlokonektorů je, že jejich opakovanou aplikací se vlákno po vyleštění opět poškrábe a optický výkon navazující se do vlákna se sníží, čímž se zvýší optický útlum.

V následující kapitole je výroba popsána podrobněji. Výrobu musíme rozdělit na dva postupy v závislosti na tom, zda jsou vyráběny testovací kanálky nebo optické vlnové selektivní rozbočnice s dělicím poměrem 1x2Y nebo 1x3Y.

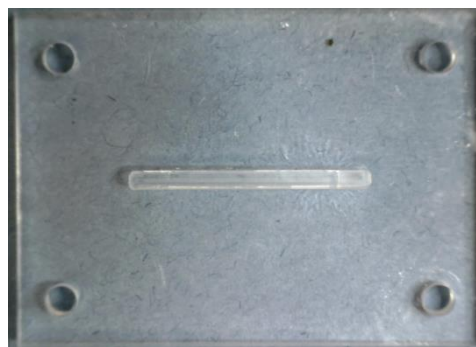
6.1 Výroba testovacích kanálků

Při výrobě testovacích kanálků, kde nedochází k dělení optického signálu, ale každá drážka s filtrem má své vstupní a výstupní POF vlákno, se filtr umístí co nejpřesněji do středu vytvořené drážky a mezi optický filtr a vlákno se z obou stran nanese antireflexní gel (Industrial Fiber Optics, Inc.), který je zde kvůli dosažení co nejmenších odrazů na rozhraní optických filtrů a vstupních/výstupních optických vláknech. Vstupní a výstupní vlákna se poté umístí co nejbližší k filtru (pokud možno až k filtru), přichytí se pomocí vteřinového lepidla (nebo lepicí pásky) a po vytvrdnutí lepidla se mechanicky připevní horní krycí vrstva. V tomto případě se výroba neliší v tom, zda používáme tenkovrstvý filtr TFF nebo plastový filtr. Na obr 6.3 je ukázka fotografie drážek vytvořených do PMMA substrátu pro testovací kanálky pro dva tenkovrstvé filtry TFF (obr.6.3a) a fotografie horní krycí vrstvy pro tento substrát (obr. 6.3b)).

a)



b)

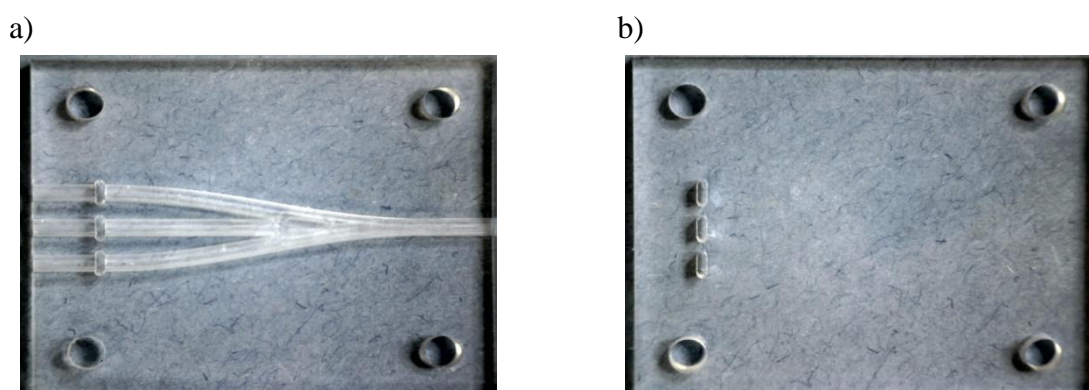


Obrázek 6.3: a) Substrát pro testovací kanálek se dvěma tenkovrstvými filtry TFF vytvořený do PMMA substrátu, b) horní krycí vrstva z PMMA.

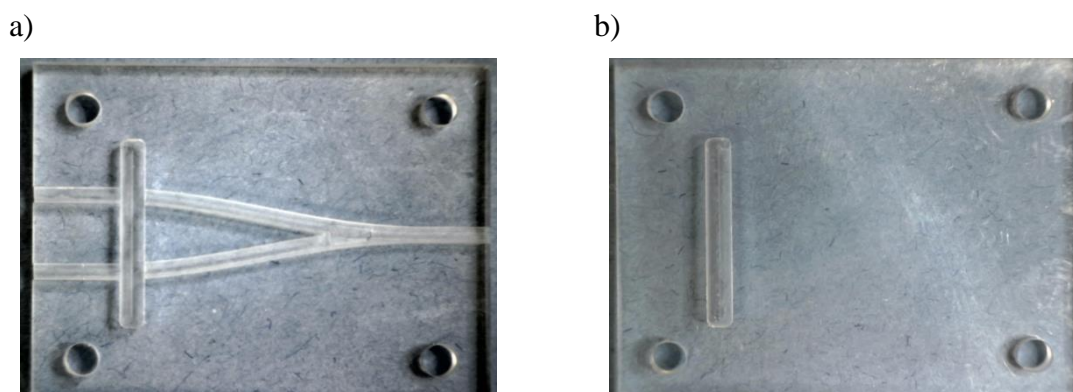
Při výrobě testovacích drážek s tenkými fóliovými filtry je postup výroby stejný. Ale na rozdíl od tenkovrstvých filtrů TFF a plastových filtrů se tenké fóliové filtry před vložením do drážek musejí mechanicky upravit na požadovaný rozměr až v laboratoři. Tenkovrstvé filtry TFF z první sady byly nařezány na rozměry 5x3x1,1 mm (šířka x výška x tloušťka) a při výrobě se umístily 2 mm do substrátu a 1 mm do horní krycí vrstvy. Tenké fóliové filtry byly také vysoké 3 mm s tím, že filtr byl 2 mm zasunut do substrátu a 1 mm do horní krycí vrstvy. Druhá sada tenkovrstvých filtrů TFF byla z důvodu otestování jiného možného postupu výroby nařezána na rozměry 5x2x1,1 mm (šířka x výška x tloušťka) a 5x1,5x1,1 mm (šířka x výška x tloušťka). Výška filtru se snížila z toho důvodu, aby se co nejmenší (nebo žádná) část filtru nasazovala do horní krycí vrstvy. A to proto, že se při mechanickém nanášení horní krycí vrstvy snadno poškodila vytvrzená vlnovodná vrstva, která byla nanášena v okolí filtru. Filtr se tedy celý zasunul do vyrobeného substrátu. Vlivem nedokonalé výroby substrátu se tato varianta neosvědčila, protože při výšce filtru 2 mm se vlivem výrobní tolerance stávalo, že filtr nezapadl do substrátu celý a z tohoto důvodu poté nešla přidělat horní krycí vrstva a filtr se poškodil. Při výšce filtru 1,5 mm se vlivem nedokonalosti výroby substrátu stalo, že drážka na filtr byla hlubší, než bylo pro filtr potřeba a filtr do drážky zapadl moc a jednoduše nepokryl celou plochu jádra POF vlákna a tudíž zde vznikla malá hodnota přeslechu oproti vlnovým délkám, než byly ty, které měl daný filtr propustit (viz tab. 7.5).

6.2 Výroba optických selektivních rozbočnic s dělicím poměrem 1x2Y a 1x3Y

Výroba selektivních optických rozbočnic s dělicím poměrem 1x2Y nebo 1x3Y je mnohem složitější než výroba testovacích kanálků. A to z důvodu nanášení a vytvrzování vlnovodné vrstvy. Postup výroby je zde (až na nanášení vlnovodné vrstvy) stejný jako u výroby testovacích drážek. Nejprve se do vytvořené drážky do substrátu z PMMA vloží optické filtry (a do jejich okolí se nanese antireflexní gel) a vyleštěná vstupní/výstupní POF vlákna. Poté se do dělicí části rozbočnice nanese pomocí injekční stříkačky polymer jako vlnovodná vrstva a vzorek se poté nechá vytvrdnout pod UV lampou. Čas vytvrzování závisí na druhu použitého polymeru a na velikosti struktury. Při používání polymeru NOA73 byla doba vytvrzení UV světlem přibližně 7-9 minut. Na obr. 6.4 a 6.5 jsou ukázky fotografií drážek vytvořených do PMMA substrátu a horní krycí vrstvy pro optickou vlnově selektivní rozbočnici 1x3Y se třemi tenkými fóliovými filtry (obr. 6.4) a optickou vlnově selektivní rozbočnici 1x2Y se dvěma tenkovrstvými filtry TFF (obr. 6.5).



Obrázek 6.4: Fotografie PMMA podložky a krycí vrstvy pro optickou rozbočnici s drážkami, a) se třemi fóliovými filtry, b) horní krycí vrstva.



Obrázek 6.5: Fotografie PMMA podložky a krycí vrstvy pro optickou rozbočnici s drážkami, a) se dvěma filtry TFF, b) horní krycí vrstva.

Při nanášení vlnovodné vrstvy do drážek mohou vzniknout nežádoucí vzduchové bublinky, které způsobí zvýšení optického útlumu. Tento jev ale v některých případech nelze odhalit již při výrobě a nelze ho tedy včas odstranit. Vzduchová bublina vznikne nejčastěji u filtru nebo těsně u vlákna. Zde je problém v tom, že se do okolí filtru musí nanést přiměřená vrstva polymeru (vlnovodné vrstvy). Když bychom polymeru nanесли málo, tak by pod UV zářením mohl polymer zcela vyschnout. V opačném případě, když se polymeru nanese mnoho, tak se „nalepí“ na filtr a v jeho okolí začnou vznikat vzduchové bublinky. Nebo pokud je v okolí filtru polymeru hodně, tak se poté obtížně nasazuje horní krycí vrstva (kvůli drážkám na filtr) a vytvrzený polymer se může poškodit.

Ještě větším problémem než vznikání vzduchových bublin je přidělení vstupních/výstupních POF vláken. Jak již bylo zmíněno, tak se drážky do substrátu, ať už na filtry nebo vlákna, vyrábějí s určitou výrobní tolerancí, kterou nelze odstranit. Průměr vlákna je 1000 μm , a pokud se drážka vyrobí jen o nepatrný kousek větší, tak v ní již vlákno nedrží a musí se přichytit lepidlem nebo lepicí páskou. Problém je v tom, že požadujeme co nejmenší rozměr celé struktury, takže výstupní vlákna se do struktury nasazují přibližně 0,2 cm (u optických vlnově selektivních rozbočnic) a přilepení lepicí páskou je obtížné. Na rozdíl od výroby testovacích drážek, kde se vlákna do struktury zasunují mnohem delší (přibližně 1 cm) a proto je lze přilepit lepicí páskou. V prvním kroku jsem konce vláken lepil vteřinovým lepidlem, kde ale nastal problém s tím, že lepidlo rozleptalo jádro vlákna, které poté prasklo a odlomilo se. V dalším kroku jsem zkoušel konce vláken přilepit pomocí různých UV fotopolymerů (Photobond 300 a 400, polymer NOA73 a NOA88). Z těchto fotopolymerů se nejlépe osvědčil Photobond 400 a polymer NOA88. U dalších dvou přípravků se jádro vlákna opět rozleptalo a prasklo. Jako nejefektivnější přidělení vláken se nakonec projevila kombinace vteřinového lepidla, které se nanese v malém množství a ne na okraj vlákna, ale spíše blíže k optickému filtru a lepicí pásky.

Další problém byl v nanášení horní krycí vrstvy, ve které byly vytvořeny drážky na optický filtr. Pokud bylo v okolí filtru nanese velké množství vlnovodné vrstvy nebo nebyly drážky dobře vyrobeny (nebyly pravoúhlé a dostatečně velké), tak do drážek filtr dobře nezapadl a vzorek se zničil (filtr se poškrábal nebo prasknul). Toto platilo zejména pro vzorky, kde byly použity tenkovrstvé filtry TFF nebo plastové filtry. Z tohoto důvodu se při dalších depozičních testech navrhly struktury, které obsahovali geometricky menší

filtry, které již nebyly zasunuty do horní krycí vrstvy, ale byly přichyceny pouze do substrátu. Zde ale opět nastal problém s výrobní tolerancí při výrobě drážek do substrátu PMMA (viz kapitola 6.1 výroba testovacích drážek, str. 41).

Přehled všech vyrobených testovacích kanálků a optických vlnově selektivních rozbočnic s dělicím poměrem 1x2Y a 1x3Y je uveden v příloze A.

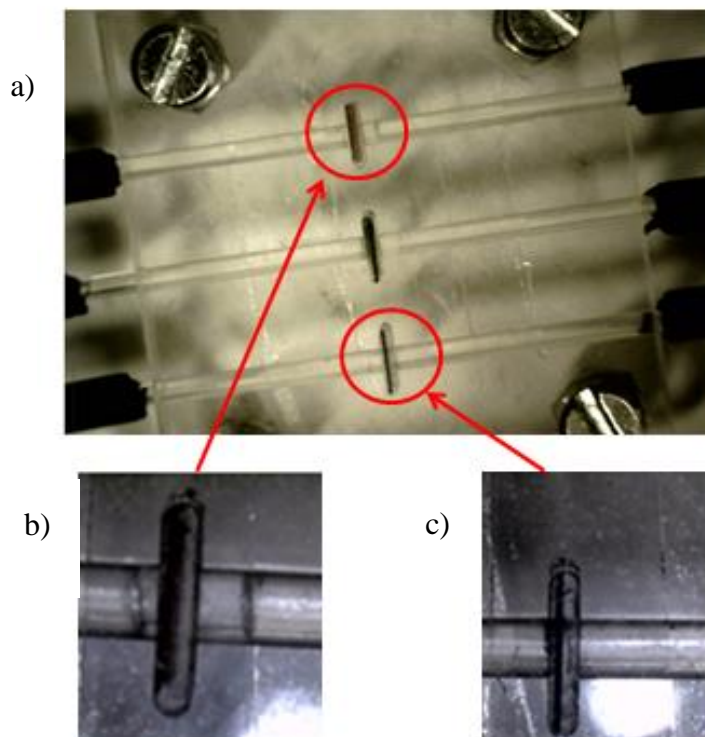
7 Diagnostika

Diagnostiku vyrobených struktur jsem prováděl třemi způsoby a to vyhodnocováním pomocí optické kamery, měřením vloženého optického útlumu a vloženého přeslechu a nakonec jsem u některých vzorků změřil jejich spektrální charakteristiky pomocí spektrálního analyzátoru Ocean optics USB 2000 a spektrálního analyzátoru ANDO AQ6315B.

7.1 Vyhodnocení vzorků pomocí mikroskopické kamery

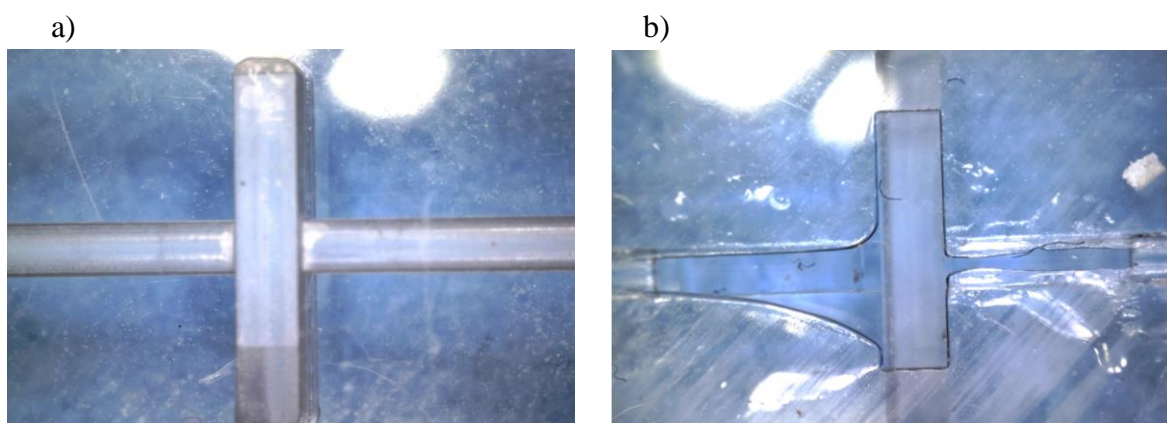
Detailní kontrolu vyrobených struktur jsem provedl pomocí digitálního fotoaparátu a mikroskopické kamery, která byla připojena pomocí USB rozhraní k PC. Pomocí mikroskopické kamery lze odhalit největší nedostatky vzniklé při výrobě. Těmito nedostatky jsou v nejvyšší míře vzduchové bubliny, které se mohou vytvořit těsně u vstupních/výstupních POF vláken nebo u filtrů. Dále je to nedostatečné usazení vláken těsně k filtru a špatné vyleštění vstupních/výstupních POF vláken.

Na obr. 7.1 je ukázka testovacího kanálku (vzorek RM204) se třemi drážkami, který byl osazen tenkými fóliovými filtry. V detailu na obr. 7.1b) je vidět, že bylo vlákno špatně uříznuté (bylo krátké) a nedosáhlo až těsně k filtru, ale naopak na obr. 7.1c) je vidět, že má vlákno správnou délku a přilehlo až těsně k drážce s usazeným optickým filtrem.



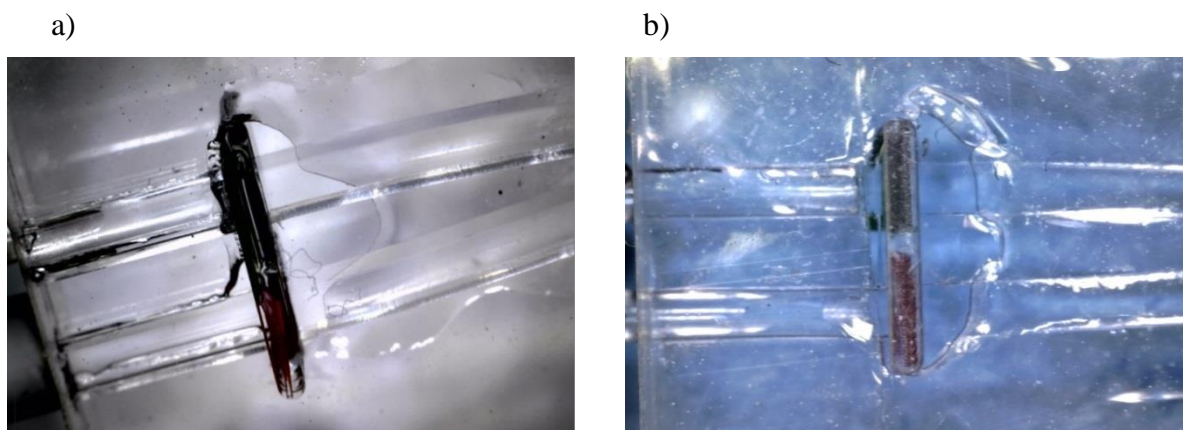
Obrázek 7.1: Fotografie vzorku RM204 (testovací drážky se třemi tenkými fóliovými filtry), a) pohled na celý vzorek b) detail špatně nasazeného vlákna, c) detail správně nasazeného vlákna.

Na obr. 7.2 jsou uvedeny fotografie vzorků, kde je detailně znázorněno, jak vypadá vzorek bez antireflexního gelu (vzorek RM103, obr. 7.2a)) a s antireflexním gelem (vzorek RM258, obr. 7.2b)). U vzorku RM 258 je vidět, jak se po připevnění horní krycí vrstvy gel „rozleje“ do okolí filtru, protože tento antireflexní gel pořád zůstává v kapalném stavu a nenechává se vytvrzovat pod UV světlem. Toto „rozlití“ antireflexního gelu nemá vliv na zvýšení optického útlumu (pokud se tímto rozlitím nevytvoří vzduchové bubliny).



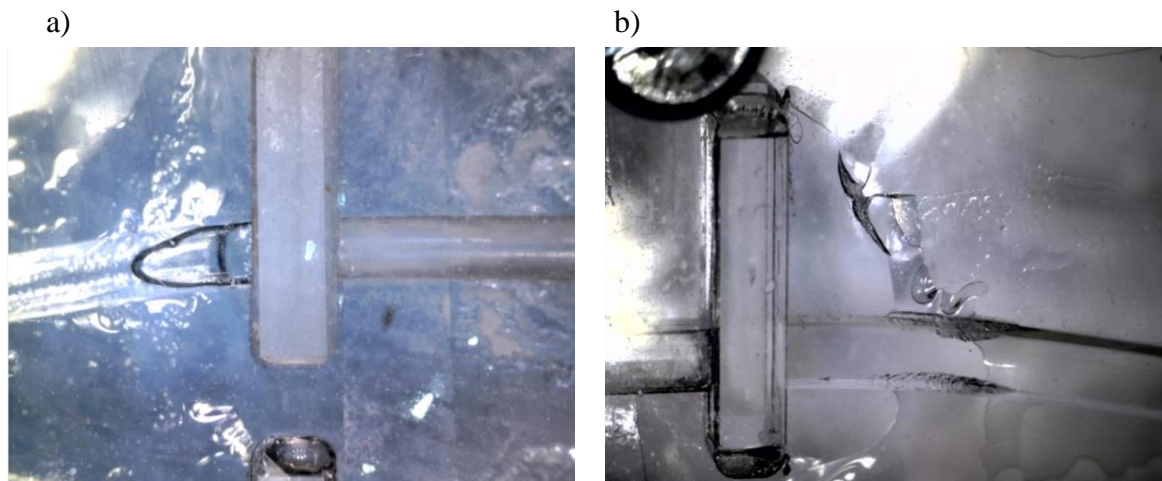
Obrázek 7.2: Fotografie vzorků a) vzorek RM103 bez antireflexního gelu s tenkovrstvým filtrem TFF 1, b) vzorek RM258 s antireflexním gelem a tenkovrstvým filtrem TFF 2.

Na obr. 7.3a) je fotografie vzorku RM230 (optická vlnově selektivní rozbočnice 1x2Y), osazena dvěma tenkými fóliovými filtry. Na obr. 7.3b) je fotografie vzorku RM231, tento vzorek je opět optická vlnově selektivní rozbočnice s dělicím poměrem 1x2Y, který je osazen tenkými fóliovými filtry. Na těchto obrázcích je vidět, že po přiložení horní krycí vrstvy se vlnovodná vrstva jakoby „rozlila“ do okolí filtru (podobně jako antireflexní gel na obr. 7.2), protože jí tam bylo větší množství a polymer nebyl dostatečně vytvrzen. V tomto případě se nevytvořili žádné bubliny a tento efekt neměl vliv na zvýšení vloženého optického útlumu.



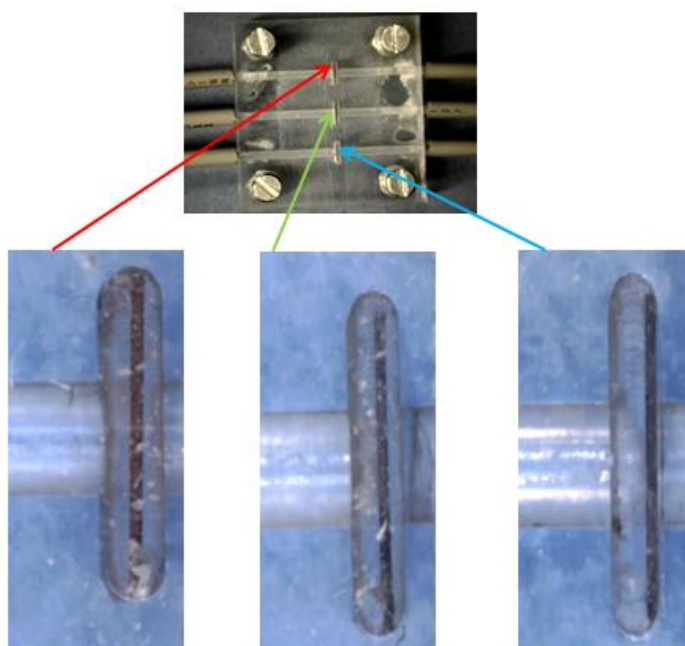
Obrázek 7.3: Fotografie vzorků a) vzorek RM 230 (PMMA/NOA73, 1x2Y s tenkými fóliovými filtry) b) vzorek RM231 (PMMA/NOA73, 1x2Y s tenkými fóliovými filtry).

Na obr. 7.4a) je příklad vzorku RM232 (1x2Y), kde se po vytvrzení pod UV lampou vytvořila těsně před červeným filtrem ve vlnodné vrstvě vzduchová bublina. Tento vzorek měl poté vysokou hodnotu vloženého optického útlumu (viz tab. 7.6). Na obr 7.4 b) je pro ukázkou uveden druhý výstupní vlnovod vzorku RM232, kde se vzduchová bublina neutvořila.



Obrázek 7.4: Fotografie vzorů RM232 (PMMA/NOA73, 1x2Y s tenkovrstvými filtry TFF 1, a) výstupní vlnovod s vytvořenou vzduchovou bublinou b) druhý výstupní vlnovod bez vzduchové bubliny.

Na obr 7.5 je detailní fotografie uložení tenkých fóliových filtrů u vzorku RM205, kde je vidět, že drážka na filtr je pro tento typ filtrů moc široká. Toto je dáno tím, že filtr má tloušťku 0,1 mm a frézka, která byla použita k výrobě drážek má nejmenší průměr 0,5 mm.



Obrázek 7.5: Fotografie detailního vložení tenkých fóliových filtrů ve vzorku RM205 (drážka se třemi tenkými fóliovými filtry).

7.2 Měření vloženého optického útlumu a přeslechu

U vyrobených struktur optických rozbočnic s dělicím poměrem 1x3Y jsem změřil výstupní výkon, ze kterého jsem následně podle vztahu 7.1 určil vložený optický útlum struktury.

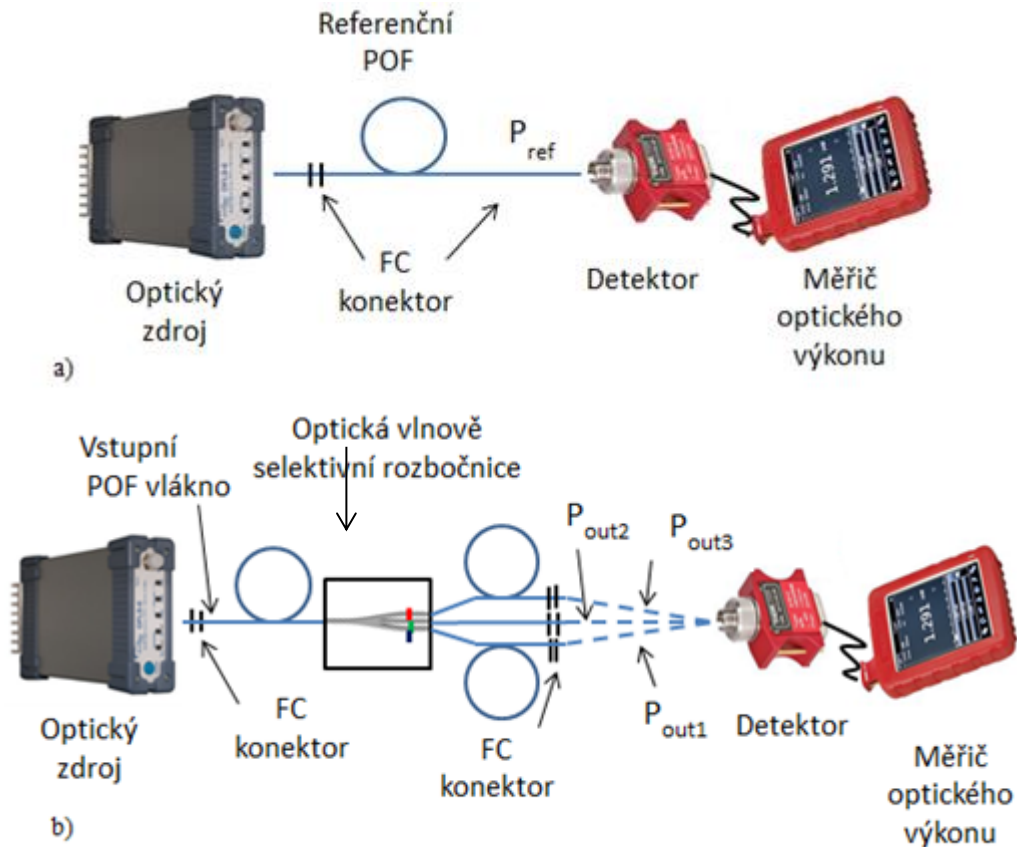
$$L = -10 \cdot \log \frac{P_{out1} + P_{out2} + P_{out3}}{P_{ref}}, \quad (7.1)$$

kde P_{out1} , P_{out2} , P_{out3} jsou výstupní výkony z jednotlivých výstupních optických POF vláken a P_{ref} je výkon referenčního POF vlákna (viz obr. 7.6).

U struktur optických vlnově selektivních rozbočnic jsem opět podle výstupního výkonu určil vložený optický útlum struktury pro filtr, který byl v dané výstupní větvi umístěn. Například u optické vlnově selektivní rozbočnice 532/650, kde byl v jednom výstupním vlnovodu umístěn optický filtr, který propouští pouze optické záření o vlnové délce zelené barvy (532 nm) a ve druhém výstupním vlnovodu byl umístěn filtr, který propouští pouze optické záření o červené barvě (650 nm), jsem v prvním kroku na vstup rozbočnice připojil optický zdroj o vlnové délce 532 nm a změřil jsem, jak velký výkon projde přes zelený filtr (532 nm) do detektoru. Z této hodnoty jsem následně vypočetl vložený optický útlum pro tuto větev (viz vztah 7.2). Poté jsem změřil, jak velký výkon projde přes tento zelený filtr (532 nm), když je na vstup připojen optický zdroj o vlnové délce 650 nm. Z této změřené hodnoty jsem poté vypočítal přeslech (viz 7.3). Z principu měření je jasné, že hodnota vloženého optického útlumu má být co nejnižší a naopak hodnota vloženého přeslechu musí být co nejvyšší. Hodnotu P_{ref} jsem opět změřil připojením POF vlákna mezi zdroj optického záření a detektor. Délka referenčního POF vlákna měla shodnou délku s délkou vyrobených vzorků optické vlnově selektivní rozbočnice včetně vstupních a výstupních POF vláken (přibližně 40 cm). Schéma pro měření referenčního POF vlákna je uvedeno na obr. 7.6a) a schéma pro měření optických vlnově selektivních rozbočnic na obr. 7.6b).

$$L \text{ (vložený optický útlum)} = -10 \cdot \log \frac{P_{out(532 \text{ nm})}}{P_{ref(532 \text{ nm})}} \quad (7.2)$$

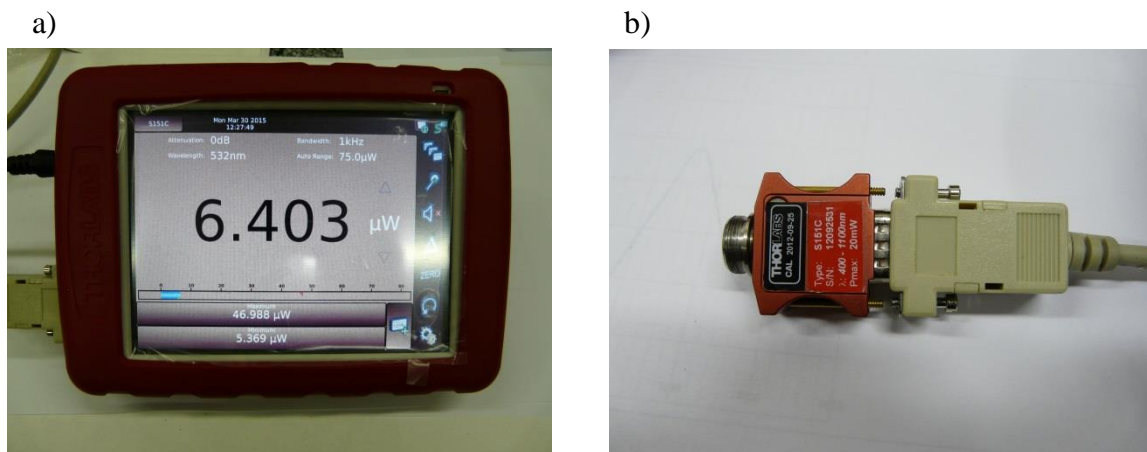
$$L \text{ (vložený optický přeslech)} = -10 \cdot \log \frac{P_{out(650 \text{ nm})}}{P_{ref(650 \text{ nm})}} \quad (7.3)$$



Obrázek 7.6: Ukázka schématu zapojení pro měření optického útlumu a) měření referenčního výkonu P_{ref} , b) měření optického výkonu z výstupu rozbočnice P_{out1} , P_{out2} , P_{out3} .

K měření jsem použil dva zdroje optického záření. Zdroj s optickým zářením o vlnové délce 532 nm, který je potřeba připojit k napájecímu zdroji Casix LDC-1500, na kterém jsem nastavil proud 0,5 A. K měření na vlnové délce 650 nm jsem použil optický laserový zdroj Safibra OFLS-5 FP-650. Všechny zdroje jsem k optickým rozbočnicím připojil pomocí FC konektorů, které buď byly součástí vlákna nebo pomocí rychlokonektorů Bare Fiber Adapter dodané firmou Optovit. K měření výstupního optického výkonu z jednotlivých výstupních větví optické rozbočnice jsem použil přístroj Thorlabs' PM200 od firmy Thorlabs s detektorem S151C (Si Photodiode), který měří optický výkon na vlnových délkách od 400 nm do 1100 nm, a jeho výkonový rozsah je od 1 nW do 20 mW (od -6 dBm do +13 dBm). Ukázka přístroje Thorlabs' PM200 s detektorem je uvedena na obr. 7.7. Pro měření žlutého filtru, který propouští optické záření o vlnové délce 591 nm, jsem měl k dispozici LED diodu, která vyzařovala optické záření o požadované vlnové délce (591 nm) a byla přes ochranný odpor připojena k laboratornímu zdroji BS 525. Z LED diody bylo poté optické záření navázáno do vstupního POF vlákna pomocí

speciálního vazebního členu od firmy Industrial Fiber Optics [12]. K měření útlumu a přeslechu modrého filtru byl k dispozici pouze širokopásmový zdroj Ocean Source HL-2000-FSHA, ale optický výkon byl detekován rovněž širokopásmovým detektorem Thorlabs' PM200, to znamená, že detektor nedetekoval pouze optické záření o vlnové délce 430 nm a z tohoto důvodu mají přeslechy pro ostatní vlnové délky (532 nm a 650 nm) velice nízké hodnoty. To znamená, že tato nízká hodnota není dána kvalitou vyrobeného vzorku, ale nedokonalostí měření modrého filtru.



Obrázek 7.7: a) Přístroj Thorlabs' PM200, b) Si detektor S151C (Si Fotodioda).

V tabulkách 7.1–7.7 jsou shrnuty výsledky měření optického útlumu a přeslechu pro testovací drážky a pro optické vlnově selektivní rozbočnice s dělicím poměrem 1x2Y.

V tabulce 7.1 jsou zobrazeny výsledky optických útlumů a přeslechů pro testovací drážky s jedním filtrem TFF 1, a to buď s červeným (650 nm) nebo zeleným (532 nm) filtrem. Nejlepší výsledek byl naměřen u vzorku RM104, kde má červený filtr vložený optický útlum 3,28 dB (650 nm) a vložený přeslech na vlnové délce 532 nm je 33,86 dB. Tento testovací kanálek měl okolo filtru nanesený antireflexní gel a byl osazen vstupně/výstupními plastovými vlákny bez FC konektorů.

Tabulka 7.1: Změřené hodnoty optických útlumů a přeslechů pro testovací kanálky s jedním filtrem.

Vzorek	Typ filtru	Útlum (dB) / barva filtru	Přeslech (dB) / barva filtru
RM103	TFF 1	4,88 / zelený	36,92 / červený
RM104	TFF 1	3,28 / červený	33,86 / zelený
RM105	TFF 1	13,49 / zelený	21,16 / červený
RM107	TFF 1	8,33 / červený	22,92 / zelený
RM109	TFF 1	6,15 / zelený	15,70 / červený

V tabulce 7.2 jsou uvedeny vzorky testovacích drážek se dvěma filtry. Nejlepší hodnoty zde vykazují vzorky RM100, RM251, RM258 a RM259. Například vzorek RM100, který je osazen dvěma plastovými filtry o vlnových délkách 532 nm a 650 nm, má pro filtr o vlnové délce 532 nm vložený optický útlum 3,85 dB a hodnota vloženého přeslechu vlnové délce 650 nm zde činí 16,42 dB. Filtr o vlnové délce 650 nm má vložený optický útlum 3,44 dB a vložený přeslech na vlnové délce 532 nm má hodnotu 21,09 dB. U tohoto vzorečku byl v okolí filtrů nanesen antireflexní gel a použity byly vstupní/výstupní POF vlákna s FC konektory. U vzorku RM258, který měl také vstupní a výstupní POF vlákna s FC konektory, byly použity tenkovrstvé filtry TFF 2. Tento vzorek má na vlnové délce 532 nm vložený optický útlum 3,33 dB a vložený přeslech na vlnové délce 650 nm zde činí 25,21 dB. A naopak pro vlnovou délku 650 nm je zde vložený útlum 3,03 dB a vložený přeslech na vlnové délce 532 nm dosahuje hodnoty 37,36 dB, to odpovídá změřené hodnotě výkonu 0,16 μ W, který prošel přes červený filtr, když byl na vstupu laser o vlnové délce 532 nm.

Tabulka 7.2: Změřené hodnoty optických útlumů a přeslechů pro testovací kanálky se dvěma filtry.

Vzorek	Typ filtru	Útlum (dB) / barva filtru	Přeslech (dB) / barva filtru
RM100*	Plast	3,85 / zelený	23,42 / červený
		3,44 / červený	21,09 / zelený
RM108	TFF 1	7,34 / zelený	26,70 / červený
		6,02 / červený	39,15 / zelený
RM114	Plast	3,01 / červený	34,32 / zelený
		13,92 / zelený	19,20 / červený
RM251	TFF 2	2,78 / zelený	34,74 / červený
		3,97 / červený	40,32 / zelený
RM252	TFF 2	9,11 / zelený	34,74 / červený
		6 / červený	37,36 / zelený
RM253*	TFF 2	3,10 / zelený	34,74 / červený
		4 / červený	39,23 / zelený
RM257*	TFF 2	5,27 / zelený	2,21 / červený
		5,44 / červený	36,26 / zelený
RM258*	TFF 2	3,33 / zelený	25,21 / červený
		3,03 / červený	37,36 / zelený
RM259	TFF 2	5,83 / zelený	14,57 / červený
		3,25 / červený	40,62 / zelený

* použita optická vlákna s FC konektorem

V tabulce 7.3 jsou vybrané vzorky testovacích drážek se třemi tenkými fóliovými filtry (červený – 650 nm, zelený – 532 nm a modrý – 430 nm), tj. se třemi vstupními a třemi výstupními vlákny. V tabulce 7.4 jsou nejlepší vzorky testovacích drážek se třemi tenkovrstvými filtry TFF 1, kde byly ale použity pouze červené a zelené filtry. Zde vykazoval nejlepší hodnoty vzorek RM222, který byl osazen třemi tenkovrstvými filtry TFF 1. Dva vložené filtry určené pro vlnovou délku 650 nm a jeden pro vlnovou délku 532 nm. První filtr určený pro vlnovou délku 650 nm má hodnotu vloženého optického útlumu 3,94 dB a vložený přeslech optickému záření o vlnové délce 532 nm je 38,21 dB. Druhý filtr pro vlnovou délku 650 nm má hodnotu vloženého optického útlumu 3,85 dB a vložený přeslech je zde 33,28 dB (532 nm). Filtr propouštějící vlnovou délku 532 nm má hodnotu vloženého optického útlumu 4,40 dB a vložený přeslech vlnové délce 650 nm má hodnotu 39,62 dB. V okolí filtru byl po obou stranách nanesen antireflexní gel.

V tabulce 7.5 jsou opět testovací drážky pro tři filtry. V tomto případě byly pro všechny vzorky použity tenkovrstvé filtry TFF 2 z nové sady, které obsahovaly i filtr žluté barvy, který propouští optické záření o vlnové délce 591 nm. Z této skupiny vzorků nelze ani jeden vzorek považovat za dobrý, protože zde byla použita nová metoda výroby, kdy nebyly filtry zasouvány do horní krycí vrstvy. Ale z důvodu nedokonalosti výroby substrátů nebyla tato metoda vhodná a tudíž ani výsledky nemají odpovídající kvalitu. Tato metoda výroby je popsána v kapitole 6.1.

Tabulka 7.3: Změřené hodnoty optických útlumů a přeslechů pro testovací kanálky se třemi různými filtry.

Vzorek	Druh filtru	Útlum (dB) / barva filtru	Přeslech (dB) / barva filtru	Přeslech (dB) / barva filtru
RM200	Fólie	10,73 / modrý	21,63 / zelený	14,67 / červený
		15,14 / zelený	40,35 / červený	13,05 / modrý
		12,16 / červený	31,74 / zelený	14 / modrý
RM201	Fólie	13,18 / modrý	24,07 / zelený	17,13 / červený
		5,46 / zelený	25,30 / červený	15,6 / modrý
		8,75 / červený	34,92 / zelený	10,36 / modrý
RM202	Fólie	6,59 / modrý	17,60 / zelený	10,54 / červený
		7,41 / zelený	33,72 / červený	9,63 / modrý
		4,19 / červený	31,74 / zelený	10,24 / modrý

Tabulka 7.4: Změřené hodnoty optických útlumů a přeslechů pro testovací kanálky se dvěma různými filtry.

Vzorek	Druh filtru	Útlum (dB) / barva filtru	Přeslech (dB) / barva filtru
RM218	TFF 1	8,79 / zelený	34,37 / červený
		12,68 / červený	37,63 / zelený
		4,69 / červený	37,12 / zelený
RM219	TFF 1	9,13 / zelený	38,05 / červený
		6,76 / červený	40,29 / zelený
		7,63 / zelený	43,79 / červený
RM220	TFF 1	5,37 / zelený	31,68 / červený
		7,43 / červený	38,01 / zelený
		2,51 / zelený	38,05 / červený
RM221	TFF 1	4,32 / zelený	35,83 / červený
		27,50 / červený	40,29 / zelený
		8,10 / zelený	15,04 / červený
RM222	TFF 1	4,40 / zelený	39,62 / červený
		3,94 / červený	38,21 / zelený
		3,85 / červený	33,28 / zelený

Tabulka 7.5: Změřené hodnoty optických útlumů a přeslechů pro testovací kanálky se třemi filtry.

Vzorek	Druh filtru	Útlum (dB) / barva filtru	Přeslech (dB) / barva filtru	Přeslech (dB) / barva filtru
RM248	TFF 2	6,83 / zelený	17,17 / červený	14,31 / zelený
		15,56 / červený	17,83 / zelený	16,87 / žlutý
		8,42 / žlutý	19,22 / červený	23,06 / zelený
RM250	TFF 2	6,23 / zelený	11,69 / červený	15,41 / žlutý
		10,46 / červený	36,70 / zelený	15,41 / žlutý
		7,95 / žlutý	10,46 / červený	10,02 / zelený
RM255	TFF 2	3,86 / zelený	34,39 / červený	19,71 / žlutý
		6,35 / červený	24,06 / zelený	11,30 / žlutý
		8,90 / žlutý	23,92 / červený	26,22 / zelený
RM254	TFF 2	6,91 / zelený	12,75 / červený	13,77 / žlutý
		7,85 / červený	24,82 / zelený	13,94 / žlutý
		7,73 / žlutý	15,63 / červený	24,61 / zelený
RM256	TFF 2	9,69 / zelený	15,29 / červený	14,83 / žlutý
		9,42 / červený	20,49 / zelený	12,10 / žlutý
		7,23 / žlutý	20,05 / červený	10,86 / zelený

V tabulce 7.6 jsou shrnuty výsledky vypočítaných vložených útlumů a přeslechů pro optické vlnově selektivní rozbočnice s dělicím poměrem 1x2Y. V této skupině vzorků jsem použil všechny tři druhy filtrů, a to jak plastové, tak i tenkovrstvé filtry TFF a tenké fóliové filtry. Ze vzorků, k jejichž výrobě jsem využil plastové filtry, vychází nejlépe vzorek RM101, kde jsem použil filtr o vlnové délce 532 nm a 650 nm. U filtru o vlnové délce 532 nm jsem vypočítal hodnotu vloženého optického útlumu 8,13 dB, ale vložený přeslech na vlnové délce je jen 11,76 dB. Tato nízká hodnota je nejspíše způsobena špatným umístěním filtru a filtr propouští i jiné spektrum záření než 532 nm (v mém případě optické záření o vlnové délce 650 nm). Naopak filtr o vlnové délce 650 nm má hodnotu vloženého útlumu 3,49 dB a přeslech na vlnové délce 532 nm je zde 22,23 dB. V tomto případě nebyl do okolí filtru aplikován antireflexní gel.

Vzorek RM113, k jehož výrobě byl použit tenkovrstvý filtr TFF, má na vlnové délce 532 nm vložený optický útlum 3,84 dB a přeslech 18,45 dB (650 nm). Červený filtr vykazuje hodnotu vloženého optického útlumu 10,30 dB (650 nm) a přeslech 39,47 dB (532 nm). Před nebo v okolí červeného filtru se nejspíše vytvořila vzduchová bublina, proto má vysoký vložený útlum pro vlnovou délku 650 nm i vysokou hodnotu pro vlnovou délku 532 nm. Do okolí tohoto filtru nebyl nanesen antireflexní gel. To může být jedna z možností, proč má tento vzorek nepatrně vyšší hodnotu vloženého optického útlumu, než například vzorek RM222 (viz tab. 7.3). Ale zmíněný vzorek RM222 může mít lepší hodnotu vloženého optického útlumu také z toho důvodu, že je to jen testovací drážka, kdežto vzorek RM113 optická vlnově selektivní rozbočnice a zvýšení vloženého optického útlumu může způsobit polymer, kterým byla vyplněna vlnovodná vrstva, respektive nedokonalost vzniklá při nanášení a vytvrzování této vlnovodné vrstvy.

S tenkými fóliovými filtry vykazují nejlepší hodnoty vzorky RM230 a RM231. Například vzorek RM230, který měl vstupní a výstupní POF vlákna s FC konektory, má vložený optický útlum u zeleného filtru 5,30 dB a vložený přeslech na vlnové délce 650 nm je 36,59 dB. U červeného filtru byla vypočítána hodnota vloženého optického útlumu 4,88 dB a vložený přeslech 41,29 dB (532 nm).

Tabulka 7.6: Změřené hodnoty optických útlumů a přeslechů pro optické vlnově selektivní rozbočnice 1x2Y.

Vzorek	Druh filtru	Útlum (dB) / barva filtru	Přeslech (dB) / barva filtru
RM101	Plast	8,13 / zelený	11,76 / červený
		3,49 / červený	22,23 / zelený
RM110	Plast	11,91 / zelený	18,92 / červený
		6,69 / červený	25,03 / zelený
RM112	Plast	6,41 / červený	18,13 / zelený
		7,02 / zelený	13,32 / červený
RM113	TFF 1	3,84 / zelený	18,45 / červený
		10,30 / červený	39,47 / zelený
RM223	PLast	16,68 / zelený	34,37 / červený
		14,18 / červený	35,46 / zelený
RM226	TFF 1	14,01 / zelený	33,89 / červený
		12,78 / červený	50,25 / zelený
RM227	TFF 1	12,38 / zelený	31,46 / červený
		8,59 / červený	33,09 / zelený
RM229	Fólie	7,35 / zelený	33,89 / červený
		10,8 / červený	32,26 / zelený
RM230*	Fólie	5,30 / zelený	36,59 / červený
		4,88 / červený	41,29 / zelený
RM231	Fólie	14,25 / zelený	36,47 / červený
		10,33 / červený	42,05 / zelený
RM232	TFF 1	8,40 / zelený	30,76 / červený
		15,41 / červený	35,59 / zelený
RM234	TFF 1	12,24 / zelený	31,46 / červený
		7,16 / červený	31,33 / zelený

* použita optická vlákna s FC konektorem

Výsledky nejlepších vzorků optických vlnově selektivních rozbočnic s dělicím poměrem 1x3Y jsou uvedeny v tabulce 7.7. Tento druh rozbočnic byl vyroben pouze s tenkými fóliovými filtry, protože jak je popsáno v kapitole 6, s tenkovrstvými filtry TFF tyto struktury zrealizovat nešly (s danými geometrickými rozměry filtrů, které byly k dispozici). Vzorky s tenkými fóliovými filtry nevykazují tak dobré hodnoty vloženého útlumu jako tenkovrstvé filtry TFF nebo plastové filtry. Nejlepší hodnoty vykazuje vzorek RM214, kde má filtr o vlnové délce 532 nm vložený optický útlum 9,41 dB. Červený filtr má vložený optický útlum 11,04 dB. Vyšší hodnoty vloženého optického útlumu zde mohou být způsobeny špatným usazením fóliových filtrů (z důvodu rozměrově větší drážky na filtr) nebo absencí antireflexního gelu, který se do okolí tenkých fóliových filtrů špatně nanáší a to z důvodů vlastnosti materiálu, ze kterého jsou tyto filtry vyrobeny. Modrý filtr, který propouští optické záření o vlnové délce 430 nm, má hodnotu vloženého

optického útlumu 11,50 dB. Tato hodnota byla ale dosažena měřením pomocí širokopásmového zdroje Ocean optics HL-2000-FSHA a jak je popsáno v kapitole 7.2, toto měření bylo velice nepřesné. Měření širokopásmovým zdrojem bylo provedeno z toho důvodu, že jsem neměl k dispozici vhodný zdroj optického záření pro měření na vlnové délce 430 nm.

Tabulka 7.7: Změřené hodnoty optických útlumů a přeslechů pro optické vlnově selektivní rozbočnice 1x3Y.

Vzorek	Druh filtru	Útlum (dB) / barva filtru	Přeslech (dB) / barva filtru	Přeslech (dB) / barva filtru
RM212	Fólie	14,08 / zelený	38,42 / červený	neměřen
		19,30 / červený	37,98 / zelený	neměřen
		neměřen	neměřen	neměřen
RM213	Fólie	15,94 / zelený	38,42 / červený	neměřen
		15,90 / červený	35,66 / zelený	neměřen
		neměřen	neměřen	neměřen
RM216	Fólie	19,52 / zelený	38,40 / červený	neměřen
		20,05 / červený	39,48 / zelený	neměřen
		neměřen	neměřen	neměřen
RM214	Fólie	11,50 / modrý	38,49 / zelený	39,91 / červený
		9,41 / zelený	35,15 / červený	12,36 / modrý
		11,04 / červený	35,94 / zelený	15 / modrý
RM215	Fólie	13,25 / modrý	41,22 / zelený	37,87 / červený
		14,19 / zelený	35,14 / červený	17,95 / modrý
		11,79 / červený	37,47 / zelený	13,79 / modrý
RM217	Fólie	10,96 / modrý	41,22 / zelený	36,90 / červený
		11,67 / zelený	36,90 / červený	12,44 / modrý
		13,77 / červený	36,45 / zelený	15,55 / modrý

V tabulce 7.8 jsou výsledky vyrobených optických výkonových rozbočnic s dělicím poměrem 1x3Y. Z návrhu těchto optických rozbočnic vychází návrh optických vlnově selektivních rozbočnic s dělicím poměrem 1x3Y. Tyto vzorky byly vyráběny z toho důvodu, aby se ověřil smysl vloženého obdélníku ve středové části rozbočnice, který by měl teoreticky zajistit, že se výstupní výkon rozdělí v poměru 1:3. Jak je ale z tabulky 7.8 patrné, při praktické výrobě není tento vložený obdélníček moc účinný, protože se stejně nejvíce výstupního optického výkonu šíří středovým výstupním vlnovodem.

Tabulka 7.8: Změřené hodnoty optických útlumů pro optické výkonové rozbočnice 1x3Y.

Vzorek	λ (nm)	Útlum (dB)	Poměr výstupních výkonů (%)
RM236 +	650	7,78	14,30 : 60,49 : 25,20
RM246	650	4,92	19,86 : 49,66 : 30,46
RM247	650	4,2	32,18 : 55,28 : 12,5
RM275*	650	2,65	8,96 : 89,08 : 1,92
RM276 *+	650	3,06	7,36 : 86,27 : 6,37

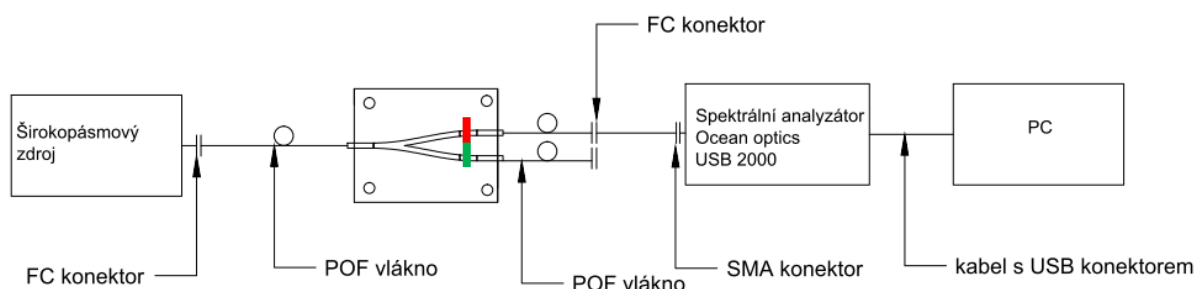
+ středový vlnovod s obdélníkem, * použita optická vlákna s FC konektorem

7.3 Měření vzorků pomocí spektrálního analyzátoru

U vzorků, které vykazovaly nejlepší hodnoty vloženého optického útlumu, byly změřeny jejich spektrální charakteristiky pomocí spektrálního analyzátoru a širokopásmového zdroje. Použity byly dva spektrální analyzátory a to spektrální analyzátor Ocean optics USB 2000 a spektrální analyzátor ANDO AQ6315B. Jako zdroj byl v obou případech použit širokopásmový zdroj Ocean optics Halogen Light Source HL 2000- FHSA.

Měření spektrálních charakteristik pomocí zařízení Ocean optics USB 2000

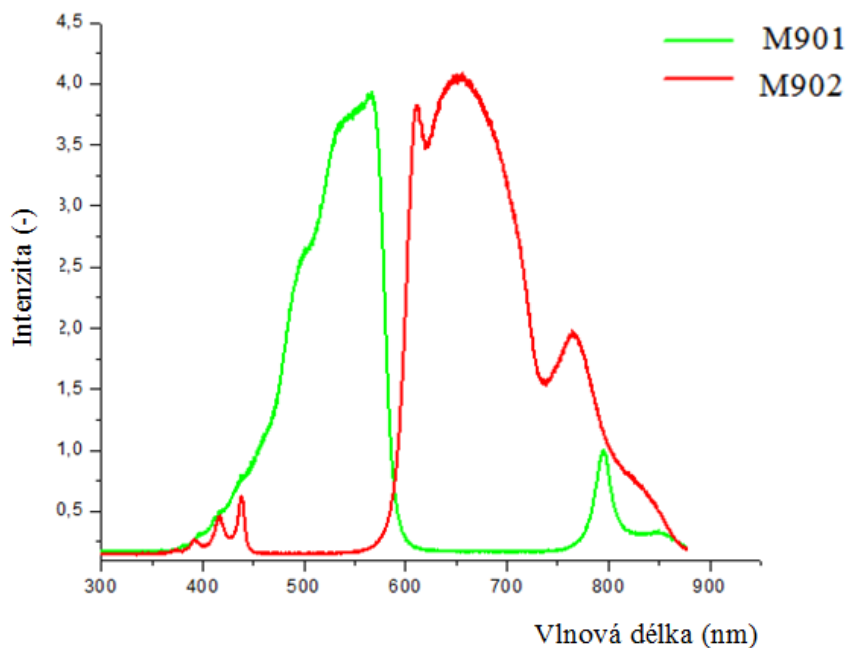
Měření spektrálních charakteristik pomocí spektrálního analyzátoru Ocean optics USB 2000 probíhalo v laboratoři planárních optoelektronických a optických integrovaných struktur (Planio) na Katedře mikroelektroniky na ČVUT. Schéma měřicího pracoviště je uvedeno na obr. 7.8. K širokopásmovému zdroji jsem pomocí FC konektoru připojil vstupní POF vlákno vzorku s testovacími drážkami nebo vstupní POF vlákno optické vlnově selektivní rozbočnice. Výstupní POF vlákno z testovacího kanálku, respektive z optické vlnově selektivní rozbočnice jsem připojil pomocí FC konektoru ke speciálnímu víceprůměrovému vláknu. Toto vlákno bylo poté připojeno pomocí SMA konektoru ke spektrálnímu analyzátoru Ocean optics USB 2000 a ten byl přes USB rozhraní připojen k počítači. Výsledkem tohoto měření je graf se spektrální charakteristikou, kde se ověřuje funkčnost jednotlivých filtrů, zda propouštějí jen to spektrum záření, pro které jsou určeny, a nevznikají nežádoucí přeslechy oproti jiným vlnovým délkám. Protože na ose y je pouze bezrozměrná intenzita závislá na vlnové délce (osa x), nelze pomocí tohoto měření určit například hodnotu optického výkonu (ze kterého by se určil vložený optický útlum) měřeného vzorku. Ale v našem případě toto měření sloužilo pouze jako ověření funkčnosti vzorků (filtru).



Obrázek 7.8: Schéma měřicího pracoviště pro měření spektrální charakteristiky se spektrálním analyzátozem Ocean Optics USB 2000.

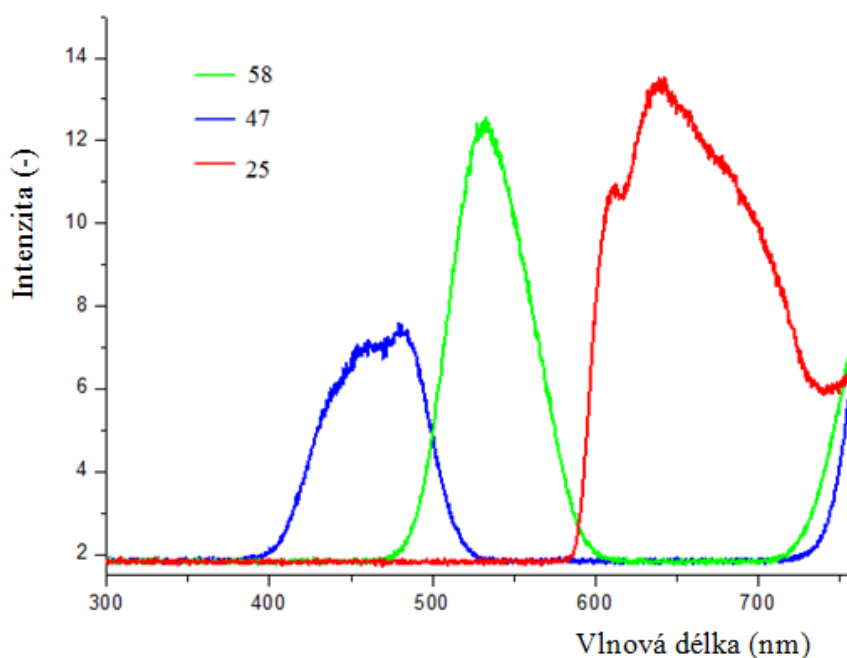
Na následujících obrázcích jsou ukázky spektrálních charakteristik vyrobených testovacích drážek a optických vlnově selektivních rozbočnic s plástovými filtry, tenkovrstvými filtry TFF z první sady (TFF 1) a z druhé sady (TFF 2) a tenkými fóliovými filtry.

Na obr 7.9 jsou spektrální charakteristiky vzorku RM103, který je osazen zeleným tenkovrstvým filtrem TFF 1 a vzorku RM104, který je osazen červeným tenkovrstvým filtrem TFF 1. U tohoto vzorku lze zelený filtr využít pro rozsah vlnových délek od 450 nm do 570 nm a červený filtr od 600 nm do 750 nm.



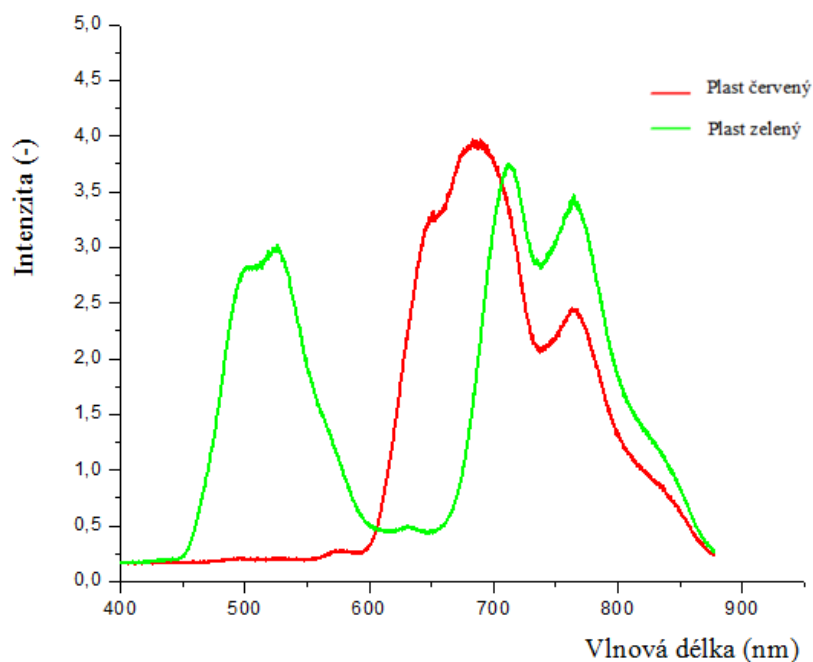
Obrázek 7.9: Naměřené spektrální charakteristiky vzorků RM103 a RM104 s tenkovrstvými filtry TFF 1.

Na obr. 7.10 je změřená spektrální charakteristika vzorku RM214, který byl osazen třemi tenkými fóliovými filtry (modrým, červeným a zeleným). Jak je z charakteristiky patrné, modrý filtr propouští spektrum záření od vlnové délky 420 nm do 460 nm a nejvyšší intenzitu má na vlnové délce 480 nm. Zelený filtr pracuje v rozsahu vlnových délek od 420 nm do 570 nm s nejvyšší intenzitou na vlnové délce 532 nm. Červený filtr je použit pro vlnovou délku 650 nm. Naměřená spektrální charakteristika pomocí spektrálního analyzátoru odpovídá naměřené charakteristice transmisních spekter (obr. 4.6)



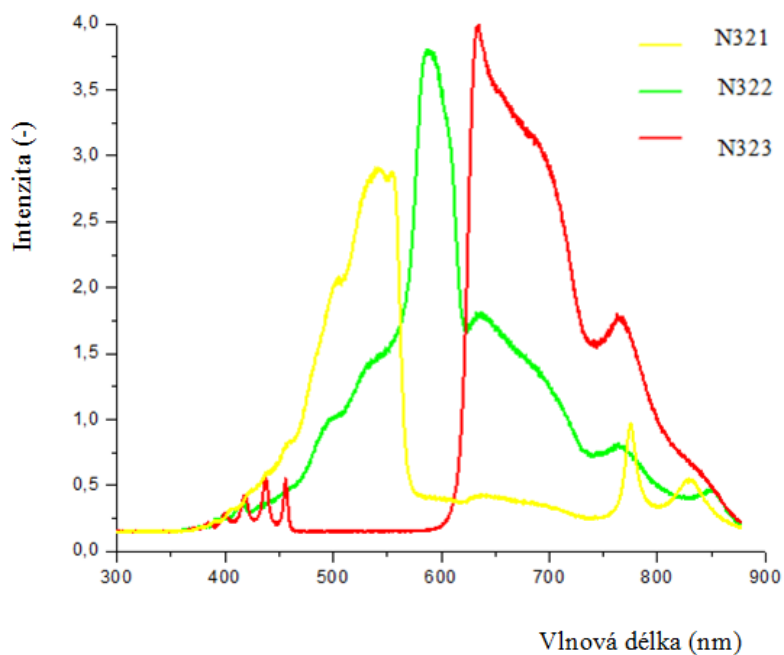
Obrázek 7.10: Naměřená spektrální charakteristika vzorku RM214 s třemi tenkými fóliovými filtry.

Na obr. 7.11 je naměřená spektrální charakteristika vzorku RM100, který je osazen zeleným a červeným plastovým filtrem. Z naměřené spektrální charakteristiky je patrné, že zelený filtr lze použít v rozsahu vlnových délek od 450 nm do 560 nm. Červený filtr lze použít od vlnové délky 620 nm do 670 nm. Naměřená charakteristika odpovídá naměřené charakteristice transmisních spekter (viz obr. 4.9).



Obrázek 7.11: Naměřená spektrální charakteristika vzorku RM100 se dvěma plastovými filtry.

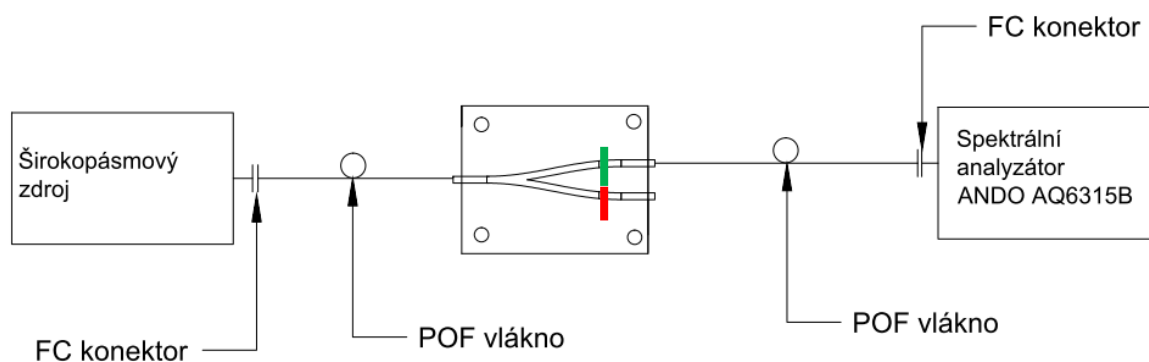
Na obr. 7.12 je naměřená spektrální charakteristika vzorku RM250, který byl osazen tenkovrstvými filtry TFF 2, kde byl již k dispozici žlutý filtr, který lze podle charakteristiky transmisních spekter (viz obr. 4.8) využít ve spektru vlnových délek od 580 nm do 650 nm. Jak již bylo popsáno v kapitole 7, vzorečky se žlutými filtry se kvůli technické nedokonalosti výroby substrátu do PMMA nepodařilo kvalitně vyrobit, proto můžeme na obr 7.13 vidět, že spektra všech tří použitých filtrů se vzájemně překrývají a nedošlo tak k požadovanému odfiltrování jednotlivých spekter.



Obrázek 7.12: Naměřená spektrální charakteristika vzorku RM250 se třemi tenkovrstvými filtry TFF 2.

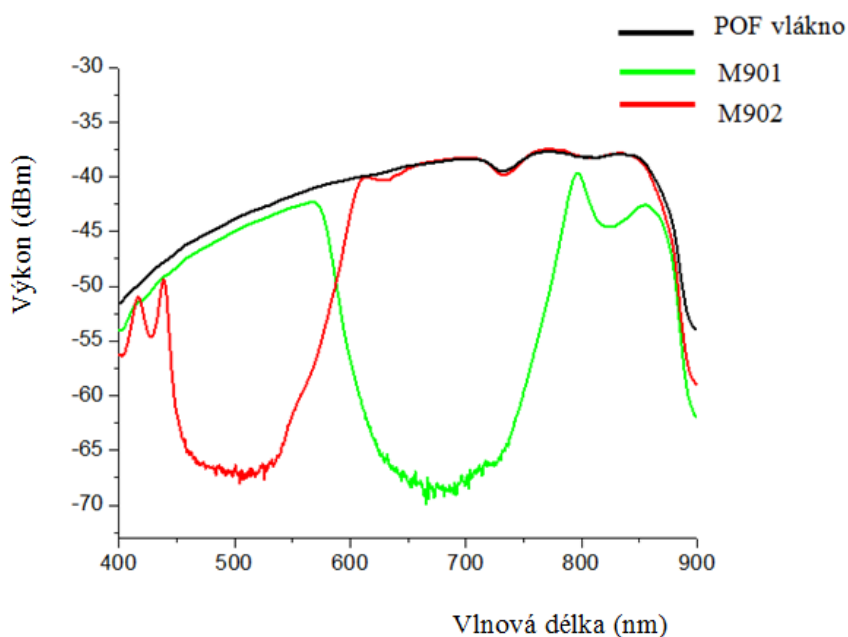
Měření spektrálních charakteristik pomocí zařízení ANDO AQ6315B

Měření spektrálních charakteristik pomocí spektrálního analyzátoru ANDO AQ6315B bylo provedeno na Ústavu fotoniky a elektroniky AV ČR, v. v. i. Schéma měřicího pracoviště je zobrazeno na obr. 7.13. Zde byl opět použit širokospektrální zdroj Ocean Optics HL-2000-FHSA, ke kterému byl pomocí FC konektoru připojen vstup měřeného vzorečku. Výstup z měřeného vzorečku byl připojen pomocí FC konektoru přímo ke spektrálnímu analyzátoru ANDO AQ6315B. Na tomto spektrálním analyzátoru naměříme rovnou intenzitu v dBm (výkon, který projde skrz daný filtr) v závislosti na vlnové délce. Měření bylo provedené v rozsahu vlnových délek od 400 nm do 900 nm.



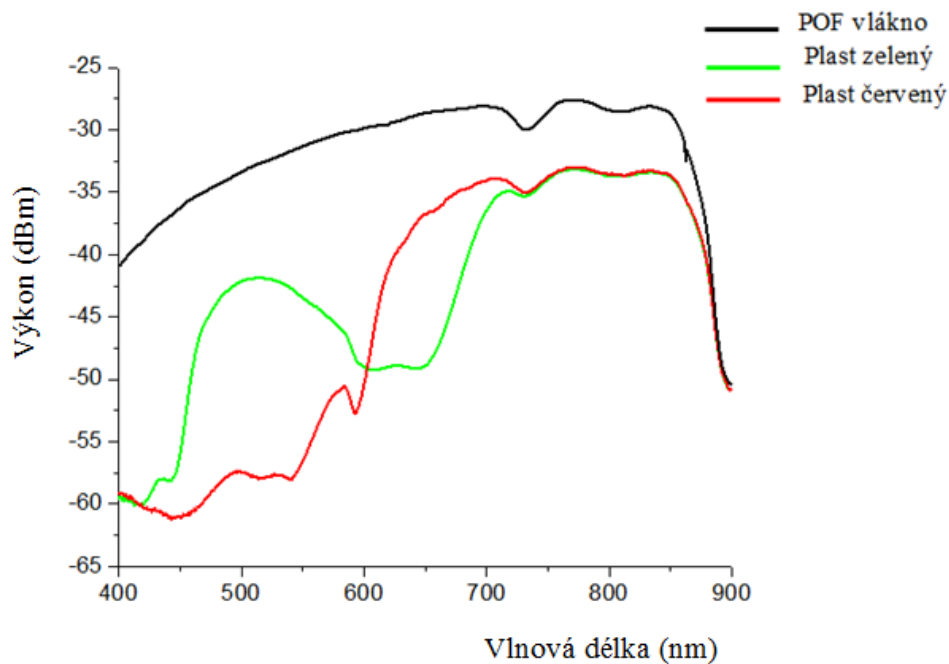
Obrázek 7.13: Schéma měřicího pracoviště se spektrálním analyzátor ANDO AQ6315B.

Na obr. 7.14 je zobrazena spektrální charakteristika změřených vzorků RM103 a RM104. Tyto vzorky jsou testovací drážky s jedním tenkovrstvým filtrem TFF1, s jedním vstupním a jedním výstupním POF vláknem. Pro vzorek RM103, který byl osazen zeleným filtrem, byl z naměřeného výkonu v dBm určen optický útlum 1,03 dB. U vzorku RM104 s červeným filtrem byl na vlnové délce 560 nm z naměřeného výkonu v dBm určen vložený optický útlum 1,21 dB.



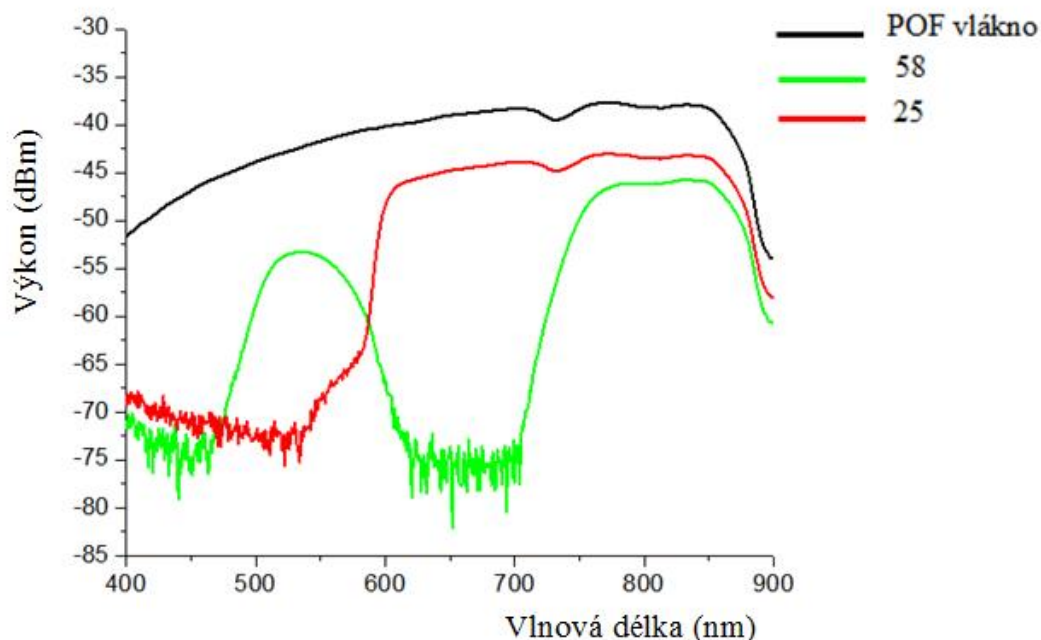
Obrázek 7.14: Spektrální charakteristika vzorku RM103 a RM104 s tenkovrstvými filtry TFF1.

Na obr. 7.15 je spektrální charakteristika vzorku RM100. Tento vzorek je testovací drážka se dvěma plastovými filtry o vlnových délkách 532 nm a 650 nm osazená dvěma vstupními a dvěma výstupními POF vlákny s FC konektory. Z naměřeného výkonu v dBm byl pro červený filtr (650 nm) určen vložený optický útlum 8,14 dB a pro zelený filtr (532 nm) 10,19 dB.



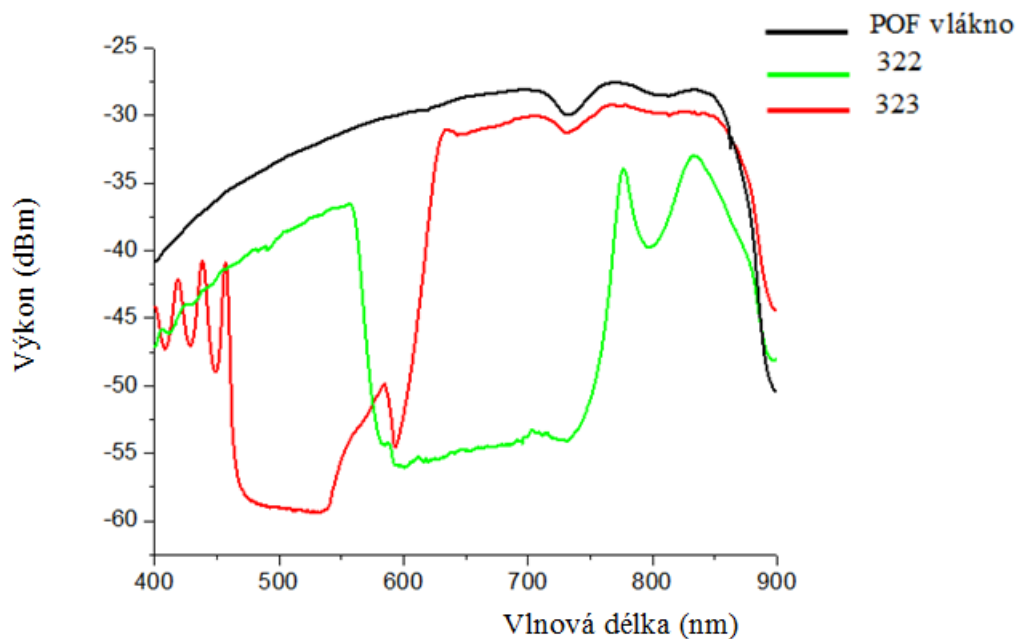
Obrázek 7.15: Spektrální charakteristika vzorku RM100 se dvěma plastovými filtry.

Optická vlnově selektivní rozbočnice s dělicím poměrem 1x2Y se dvěma tenkými fóliovými filtry je zobrazena na obr. 7.16. Jedná se o vzorek RM231, který byl osazen červeným filtrem (650 nm), zeleným filtrem (532 nm) a POF vlákny bez FC konektorů. Z naměřeného výkonu v dBm byl pro červený filtr určen vložený optický útlum 5,76 dB a pro zelený filtr 10,84 dB.



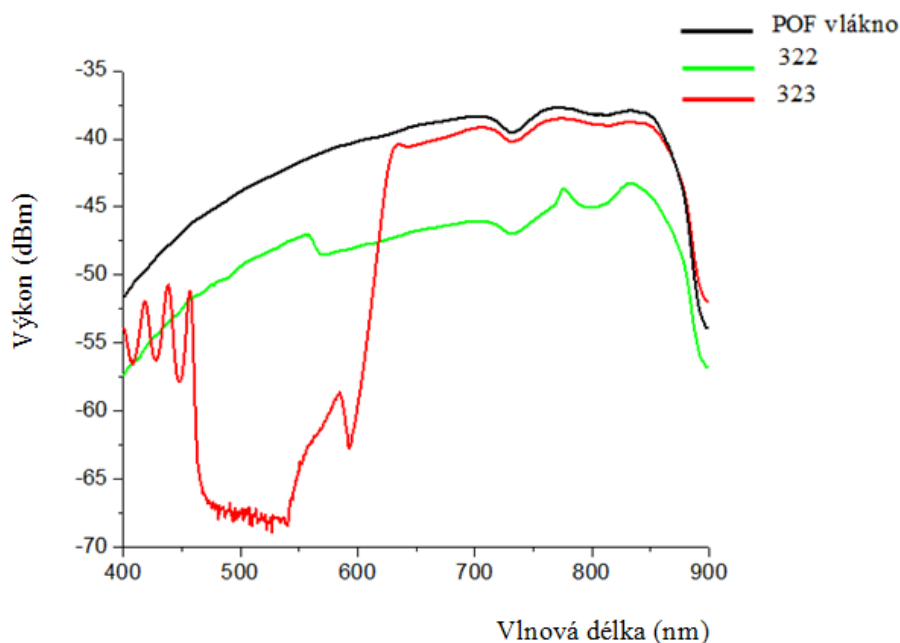
Obrázek 7.16: Spektrální charakteristika vzorku RM231 se dvěma tenkými fóliovými filtry.

Na obr 7.17 je zobrazen výsledek měření pro vzorek RM258, který byl osazen dvěma tenkovrstvými filtry TFF 2 a vstupně/výstupními POF vlákny s FC konektory. Jedná se o optickou vlnově selektivní rozbočnici s dělicím poměrem 1x2Y. U tohoto vzorku byl na vlnové délce 532 nm určen vložený optický útlum 5,37 dB a na vlnové délce 650 nm byla z naměřeného výkonu spočítána hodnota vloženého optického útlumu 2,7 dB.



Obrázek 7.17: Spektrální charakteristika vzorku RM258 se dvěma tenkovrstvými filtry TFF2.

Na obr. 7.18 je uvedena spektrální charakteristika pro optickou vlnově selektivní rozbočnici s dělicím poměrem 1x3Y (vzorek RM259) s POF vlákny bez FC konektorů. Určený vložený optický útlum je 5,46 dB (532 nm) a 1,43 dB (650 nm). Jak je z charakteristiky vidět, zelený filtr (532 nm) má špatnou hodnotu přeslechu vůči vlnové délce 650 nm (7,72 dB). To znamená, že filtr špatně odfiltroval vlnovou délku 650 nm. Tímto měřením se potvrdila nízká hodnota přeslechu pro tento vzorek (viz tab. 7.2).



Obrázek 7.18: Spektrální charakteristika vzorku RM259 se dvěma tenkovrstvými filtry TFF2.

V našem případě nemůžeme porovnávat hodnoty vloženého optického útlumu vypočítaného z výkonu, který byl změřen pomocí laserů o vlnových délkách 532 nm a 650 nm (viz kapitola 7.2) a detekován širokopásmovým detektorem Thorlabs S151C, a vložený optický útlum vypočítaný z naměřeného výkonu spektrálním analyzátozem ANDO AQ6315B. Důvodem proč nelze tyto výsledky porovnávat je, že při měření na spektrálním analyzátozu ANDO AQ6315B byl použit jako zdroj Ocean optics Source HL 2000- FHSA. Tento zdroj využívá halogenové lampy a je tedy širokopásmový. Další nepřesnost, která znemožňuje porovnat tyto dva druhy měření je, že optické záření bylo navazováno do multivídného vlákna. Navíc měření spektrálních charakteristik pomocí spektrálního analyzátozu ANDO AQ6315B bylo změřeno pouze jednou a pro přesnější určení vloženého optického útlumu by bylo nutné tato měření provést alespoň 3x. Dosažené výsledky jsou shrnuty v tabulce 7.9. Z tab. 7.9 vyplývá, že určené hodnoty vloženého optického útlumu se nejvíce liší u vzorku RM100, kde je rozdíl skoro 6 dB. Naopak u vzorku RM259 jsou na vlnové délce 532 nm výsledky skoro totožné. Za přesnější měření považují měření pomocí fotometru Thorlabs' PM200, protože zde byly všechny vzorky uvedené v tabulce 7.9 změřeny alespoň 3x a hodnoty při jednotlivých měřeních kolísaly pouze v řádu desetin jednotek dB.

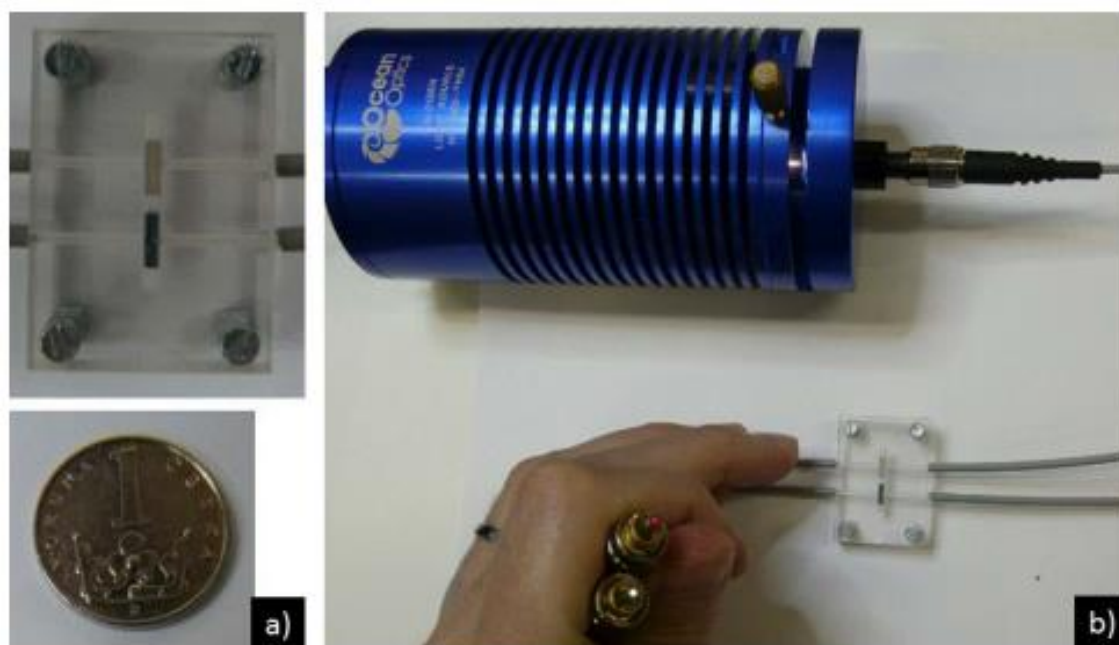
Tabulka 7.9: Porovnání vypočítaného vloženého optického útlumu pro vzorky změřené pomocí fotometru Thorlabs' PM200 a spektrálního analyzátozu ANDO.

		Thorlabs' PM200	Analyzátoz ANDO
Vzorek	vlnová délka (nm)	Útlum (dB)	Útlum (dB)
RM103	532	4,88	1,03
RM104	650	3,28	1,21
RM100*	532	3,85	10,19
	650	3,44	8,14
RM231	532	14,25	10,84
	650	10,33	5,76
RM258*	532	3,33	5,37
	650	3,03	2,7
RM259	532	5,46	5,83
	650	1,43	3,25

7.4 Vyrobené struktury

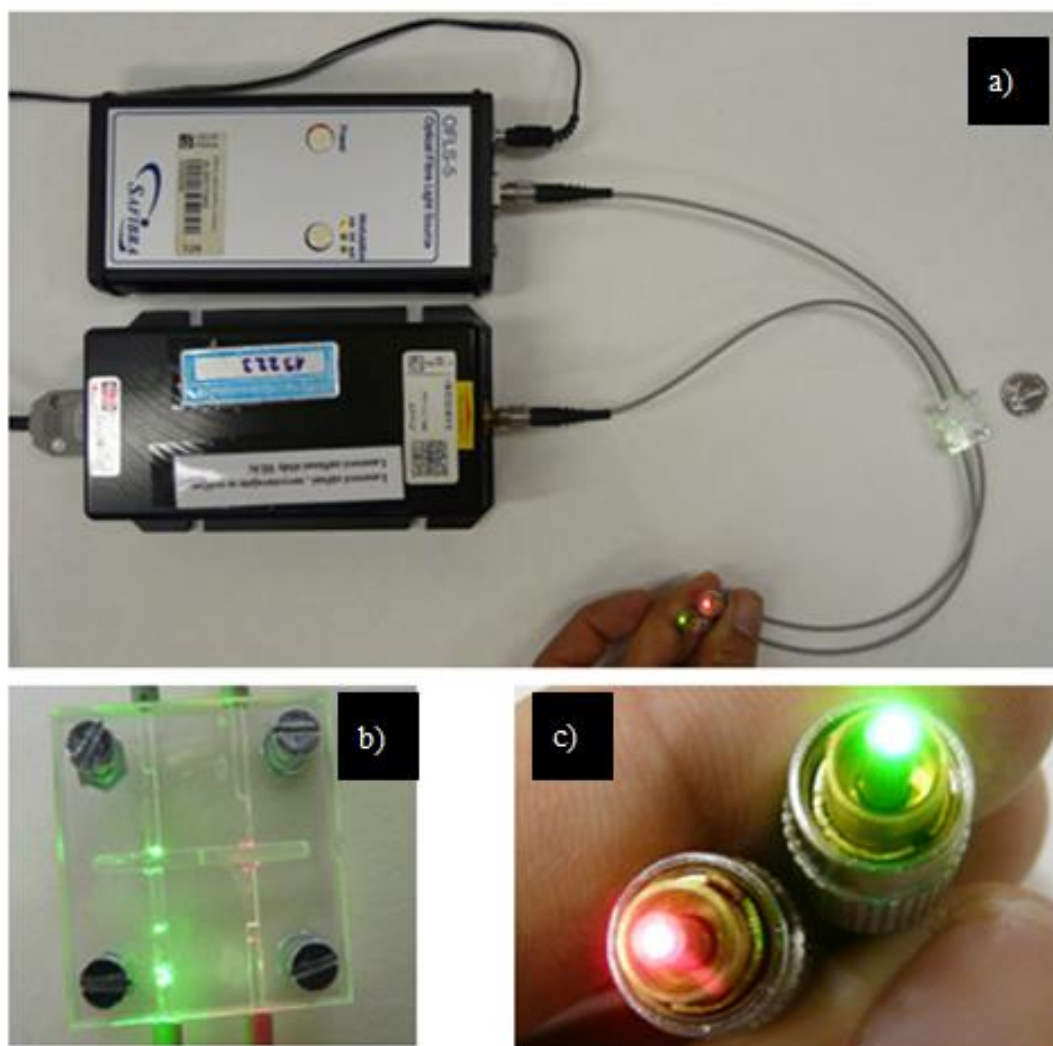
V této kapitole je uvedena fotodokumentace vybraných vzorků, které byly připojeny vstupním POF vláknem ke zdroji optického záření a z výstupních POF vláken je poté vidět, jaké spektrum daný filtr propustí.

Na obr. 7.19 je fotografie vzorku testovacích drážek (RM100), který byl osazen dvěma plastovými filtry a to zeleným a červeným filtrem. Na této fotografii byl vlnovod se zeleným filtrem připojen pomocí POF vlákna s FC konektorem ke zdroji optického záření o vlnové délce 532 nm a vlnovod s červeným filtrem ke zdroji optického záření o vlnové délce 650 nm.



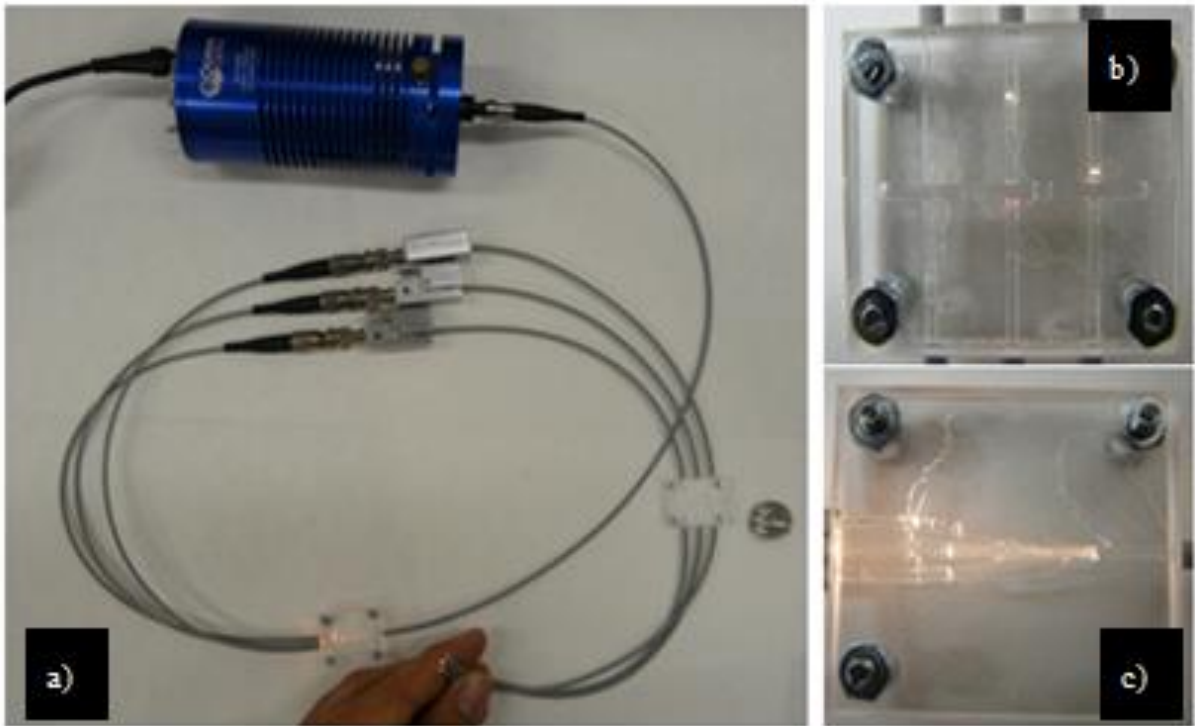
Obrázek 7.19: Fotografie vyrobeného vzorku RM100 a) detail vzorku RM100, b) připojení vzorku k širokopásmovému zdroji Light Source HL-2000-FSHA.

Na obr. 7.20 je fotografie vzorku RM258. Jedná se o testovací drážky s jedním zeleným a jedním červeným filtrem TFF 2. Na obr. 7.20a) je vzorek RM258 připojený k širokopásmovému zdroji Light Source HL-2000-FSHA a na obr 7.20b) je detail vyrobeného vzorku a na obr. 7.20c) je ukázka optického záření, které vystupuje z výstupních POF vláken s FC konektory.



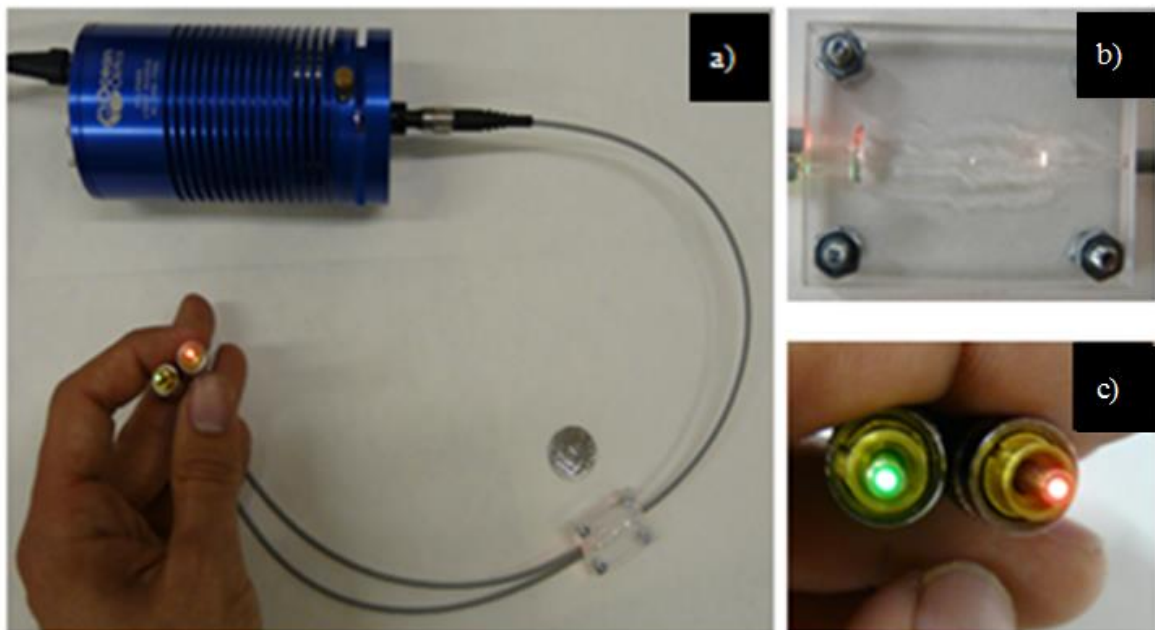
Obrázek 7.20: Fotografie vyrobeného vzorku RM258 a) Vzorek připojený ke zdroji optického záření o vlnové délce 532 nm a 650 nm, b) detail vzorku, c) detail výstupních vlnovodů.

Na obr. 7.21 a) je fotografie vzorku RM250, který byl osazen tenkovrstvými filtry TFF 2 pracujících ve spektru zelené, červené a žluté barvy. Tento vzorek (testovací drážky) se třemi vstupními a třemi výstupními filtry, byl k širokopásmovému zdroji připojen pomocí optické výkonové rozbočnice s dělicím poměrem 1x3Y (viz obr. 7.21a)). Na obr. 7.21b) je detail vzorku RM250 a na obr. 7.21c) je detail optické výkonové rozbočnice s dělicím poměrem 1x3Y.



Obrázek 7.21: Fotografie vyrobeného vzorku RM250 a) Vzorek připojený k širokopásmovému zdroji, b) detail vzorku RM250, c) detail optické výkonové rozbočnice 1x3Y.

Na obr. 7.22a) je fotografie optické vlnově selektivní rozbočnice s dělicím poměrem 1x2Y (vzorek RM230), který byl osazen tenkými fóliovými filtry (zelený a červený). Detail vzorku je uveden na obr. 7.22b) a detail výstupních vlnovodů je na obr. 7.22c).



Obrázek 7.22: Fotografie vyrobeného vzorku RM30 a) Vzorek připojený k širokopásmovému zdroji, b) detail vzorku.

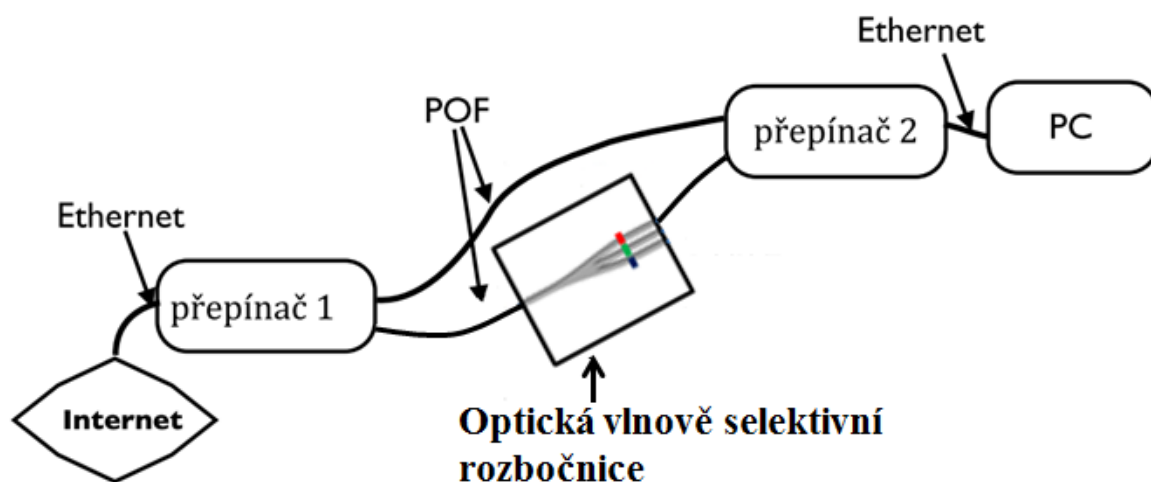
Na obr. 7.23 je fotografie vzorku RM214, který byl osazen třemi tenkými fóliovými filtry (zelená, červená a modrá barva). Jedná se o optickou vlnově selektivní rozbočnici s dělicím poměrem 1x3Y připojenou k širokopásmovému zdroji Light Source HL-2000-FSHA.



Obrázek 7.23: Fotografie vzorku RM214 připojeného k širokopásmovému zdroji.

7.5 Test rozbočnic pro připojení k internetu

U vybraných vyrobených struktur jsem na závěr provedl testování přenosu dat pomocí připojení k internetové síti pomocí dvou optoelektronických přepínačů KCD-303P-A2 s konvertory na elektrický/optický signál od firmy KTI Networks. Tyto přepínače umožňují přenos dat pomocí ethernetového kabelu (cat 5) v kombinaci se standardními POF vlákny. Schéma měřícího pracoviště je znázorněné na obr. 7.24.



Obrázek 7.24: Schéma měření přenosové rychlosti pomocí optoelektronických přepínačů KCD-303P-A2 [5].

Ethernetový kabel jsem připojil do ethernetového portu přepínače 1. Do optické části prvního přepínače jsem připojil vstupní POF vlákno optické vlnově selektivní rozbočnice. Tento první přepínač sloužil jako vysílací strana. Jako přijímací stranu jsem použil přepínač 2, do jehož vstupního optického portu jsem připojil výstup optické vlnově selektivní rozbočnice, kde byl osazen filtr propouštějící optické záření o vlnové délce 650 nm. Následně jsem POF vláknem propojil optický výstup druhého přepínače s optickým vstupem prvního přepínače. Pokud byl měřený vzorek osazen POF vláknem s FC konektorem, byl tento vzorek spojen pomocí FC spojky s dalším POF vláknem pomocí rychlokonektorů. Toto bylo zapotřebí udělat z toho důvodu, že do optické části přepínače nelze nasadit POF vlákna zakončené FC konektorem. Výsledky naměřených přenosových rychlostí vybraných struktur jsou uvedeny v tabulce 7.10.

Tabulka 7.10: Naměřené přenosové rychlosti vyrobených struktur pro vlnovou délku 650 nm. (Změřená referenční hodnota byla 83,25 Mb/s)

Vzorek	Přenosová rychlost (Mb/s)
POF vlákno	79,01
RM 100	71,35
RM104	69,36
RM258	68,12
RM259	64,02
RM231	70,98

V prvním kroku jsem místo optické vlnově selektivní rozbočnice změřil přenosovou rychlost pouze pro POF vlákno. Zde byla naměřená rychlost nižší o 4,24 Mb/s. Pokles přenosové rychlosti mohl být způsoben špatným nasazením POF vlákna do optické části přijímače/vysílače, neboť zde byl problém POF vlákno správně uchytit. Stejný problém nejspíše způsobil snížení přenosové rychlosti i u ostatních měřených struktur. V době měření byla změřena rychlost sítě 83,25 Mb/s. Přenosová rychlost sítě byla také ovlivněna kolísáním internetového připojení v závislosti na počtu připojených uživatelů.

Na základě dvou výše uvedených problémů při měření nelze jednoznačně říci, jak velký pokles rychlosti optická vlnově selektivní rozbočnice způsobí. Tímto měřením se ale prokázala funkčnost vyrobených struktur.

8 Závěr

Cílem mé diplomové práce bylo navrhnout, vyrobit a diagnostikovat optické planární vlnovodné struktury a optické vlnově selektivní struktury pro plastová optická vlákna (POF).

Při řešení diplomové práce jsem modeloval optické vlastnosti struktur mnohavidových optických rozbočnic a optických vlnově selektivních rozbočnic na podložkách z polymeru PMMA, který jsem kombinoval s polymerními vlnovodnými vrstvami z polymeru Norland Optical Adhesive (NOA73) a s antireflexním gelem. Návrh struktur jsem provedl pomocí metody BPM pomocí programu BeamPROPTM od firmy Rsoft Design Group pro vlnovou délku 650 nm. Před samotným návrhem optických vlnově selektivních rozbočnic jsem navrhl testovací drážky, na kterých jsem otestoval optické a mechanické vlastnosti dostupných filtrů.

V rámci řešení této práce jsem navrhl jeden motiv testovacích kanálků se dvěma drážkami a dva motivy testovacích kanálků se třemi drážkami. Jeden motiv optické rozbočnice s dělicím poměrem 1x2Y, ze které jsem poté navrhnul tři motivy optických vlnově selektivních rozbočnic s dělicím poměrem 1x2Y. Dále jsem navrhl jeden motiv optické neselektivní rozbočnice 1x3Y, na jehož základě jsem poté navrhl dvě optické vlnově selektivní rozbočnice s dělicím poměrem 1x3Y.

Na základě těchto návrhů byly struktury vyráběny pomocí CNC gravírování do substrátu z polymeru PMMA a použitá vlnovodná vrstva z polymeru NOA73 byla poté vytvrzena pomocí UV záření.

Vložený optický útlum byl měřen pomocí laserů, které pracovaly na vlnových délkách 532 nm a 650 nm, pomocí širokopásmového zdroje Ocean Optics HL-2000-FSHA a LED diody o vlnové délce 591 nm.

Nejlepších výsledků s plastovými filtry bylo dosaženo u vzorku s červeným a zeleným filtrem (RM100), kde byl změřen vložený optický útlum 3,85 dB pro vlnovou délku 532 nm, a hodnota přeslechu pro vlnovou délku 650 nm byla 23,42 dB. Vložený optický útlum pro vlnovou délku 650 nm byl 3,44 dB a přeslech měl hodnotu 21,09 dB (pro vlnovou délku 532 nm).

S tenkovrstvými filtry TFF 1 vykazoval nejlepší hodnoty vzorek RM222 se třemi filtry (zelený, červený a červený). Dva filtry byly určeny pro vlnové délky 650 nm a jeden pro vlnovou délku 532 nm. První filtr měl hodnotu vloženého optického útlumu 3,94 dB (650 nm) a přeslech 38,21 dB (532 nm). Druhý měl hodnotu vloženého optického útlumu 3,85 dB (650 nm) a přeslech 33,28 dB (532 nm). Třetí filtr určený pro vlnovou délku 532 nm měl hodnotu vloženého optického útlumu 4,40 dB a přeslech 39,62 dB (650 nm).

S tenkovrstvými filtry TFF 2 vykazoval nejlepší hodnoty vzorek s testovacími drážkami s červeným a zeleným filtrem (RM258). Tento vzorek má na vlnové délce 532 nm vložený optický útlum 3,33 dB a přeslech 25,21 dB (650 nm). Pro vlnovou délku 650 nm je vložený optický útlum 3,03 dB a přeslech dosahoval hodnoty 37,36 dB (532 nm).

Nejlepších výsledků s tenkými fóliovými filtry bylo dosaženo u vzorku s optickou vlnově selektivní rozbočnicí s dělicím poměrem 1x2Y (RM230). Vložený optický útlum u zeleného filtru dosahoval hodnoty 5,30 dB (532 nm) a přeslech 36,59 dB (650 nm). Červený filtr měl hodnotu vloženého optického útlumu 4,88 dB (650 nm) a přeslech 41,29 dB (532 nm).

9 Použitá literatura

- [1] CHLEBOUN, J. Spektrální charakteristiky ve vláknové optice. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 77s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Športík.
- [2] KOCOUREK, P., NOVÁK, J. *Přenos informace*. Praha: 2006. Skriptum, ČVUT, Fakulta elektrotechnická.
- [3] LAFATA, Pavel a Jiří VODRÁŽKA. *Optické přístupové sítě a přípojky FTTx*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014, 293 s. ISBN 978-80-01-05463-5.
- [4] MAŠTERA, R. Návrh optické planární mnohavidové POF rozbočnice s dělicím poměrem 1x2 a 1x3. Bakalářská práce, ČVUT, FEL, Praha 2013.
- [5] NGOC KIEN, Pham. *Návrh mnohavidové optické rozbočnice pomocí metody Ray Trancing*. Praha: ČVUT 2012. 83 s. Diplomová práce, ČVUT, Fakulta elektrotechnická, Katedra mikroelektroniky. Vedoucí diplomové práce Ing. Václav Prajzler, Ph.D.:-
- [6] NOVOTNÝ, Karel, Tomáš MARTAN a Jan ŠÍSTEK. Systémy pro optické komunikace. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02810-0.
- [7] PRAJZLER, V., NERUDA, M., ŠPIRKOVÁ, J. *Properties of planar large core polymer optical 1x2 and 1x4 splitters connectable to plastic optical fiber*. ČVUT Praha, 2009, vol. 18, no. 1, 4 s.
- [8] ZIEMANN, Olaf, Jürgen KRAUSER, Peter E. ZAMZOW a Werner DAUM. POF Handbook: Optical Short Range Transmission Systems. 2. vyd. Berlín: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. ISBN 978-3-540-76629-2.
- [10] *Crytur* [online]. 2015 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://www.crytur.cz>
- [11] Edmund Optics/worldwide. [online]. 2014 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://www.edmundoptics.com/optics/optical-filters/color-dichroic-filters/kodak-wratten-filters/1326/>.
- [11] GAUDINO, R. Plastic Optical Fiber Targets FTTH and HOME Networks. (online). (2015-03-26). Dostupnost z: ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/ist/docs/directorate_d/cnt/press-release-pof-all-sept-2006_en.pdf.

[12] Industrial Fiber Optics: POF and Large Core Silica Optics Products. [online]. 2014 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://www.i-fiberoptics.com>.

[13] Metricon Corporation, [online]. [2015-04-23] dostupné z [www: http://www.metricon.com](http://www.metricon.com).

[14] Norland Products. [online]. [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: www.norlandprod.com.

[15] POISEL, Hans a Olaf ZIEMANN. What are POF? [online]. 2005 [cit. 2014-05-22]. Dostupné: http://www.reichenbachintl.com/Ratioplast_What_is_POF_and_Applications.pdf.

[16] ZHANG, Z., KEIL, N., ZAWADZKI, C., WAGNER, C., SCHEIBE, A., EHLERS, H., RISTAU, D., WANG, J., BRINKER W., AND GROTE, N. *Ultra low-loss 1 x 2 multiplexer using thin-film filters on polymer integration platform*. The Institution of Engenieering and Technology, 2009. Doi: 10.1049/el.2009.2262. Dostupné z: www.ieeexplore.ieee.org.

10 Seznam obrázků

Obrázek 1.1: Vlnovodný optický multiplexor pro vlnové délky 1310/1550 nm [16].	11
Obrázek 2.1: Útlumová okna pro POF vlákna [15].	17
Obrázek 3.1: Rozvod optického vlákna ke koncovému zařízení [12].	19
Obrázek 3.2: Vizuální znázornění zkratky FTTx [5].	20
Obrázek 3.3: Příklad architektury sítě PON s optickou vlnově selektivní polymerní rozbočnicí [5].	22
Obrázek 4.1: Pohled na optickou vlnově selektivní rozbočnici s odkrytou krycí vrstvou. .	23
Obrázek 4.2: Změřené hodnoty indexu lomu s vlnovou délkou na zařízení Metricon a) pro substrát a horní krycí vrstvu PMMA, b) pro materiály NOA použitých vlnovodných vrstev.	24
Tabulka 4.1: Hodnoty indexu lomu pro PMMA a polymery NOA 1625 a NOA73 interpolované z obr 4.2.	25
Obrázek 4.3: Naměřená transmisní spektra polymeru NOA1625 a NOA73.	25
Obrázek 4.4: Útlumová charakteristika použitých POF vláken změřená spektrálním analyzátozem ANDO.	26
Obrázek 4.5: Transmisní spektra změřená pomocí spektrofotometru Shimadzu UV- 3600, a) modrý filtr Fomei 8802, b) žlutý filtr Fomei 8801.	27
Obrázek 4.6: Změřená transmisní spektra tenkých fóliových filtrů Edmund Optics spektrofotometrem Shimadzu UV- 3600.	28
Obrázek 4.7: Transmisní spektra první sady tenkovrstvých filtrů TFF Crytur 1 změřená spektrofotometrem Shimadzu UV- 3600.	29
Obrázek 4.8: Transmisní spektra druhé sady tenkovrstvých filtrů TFF Crytur 2 změřená spektrofotometrem Shimadzu UV- 3600.	30
Obrázek 4.9: Transmisní spektra plastových filtrů Edmund Optics změřená spektrofotometrem Shimadzu UV- 3600.	30
Obrázek 5.1: Drážky pro filtry a) tenké fóliové filtry, b) tenkovrstvé filtry TFF.	32
Obrázek 5.2: Model navržené struktury optické rozbočnice 1x2Y.	32

Obrázek 5.3: a) Profil indexu lomu optimalizované struktury PMMA/NOA73 1x2Y pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm při pohledu shora, b) šíření optického signálu ve struktuře pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm.	33
Obrázek 5.4: a) Profil indexu lomu optimalizované struktury PMMA/NOA73 1x2Y pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm při pohledu shora, b) šíření optického signálu ve struktuře pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm.	34
Obrázek 5.5: a) Profil indexu lomu optimalizované struktury PMMA/NOA73 1x2Y pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm při pohledu shora, b) Šíření optického signálu ve struktuře pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm.	34
Obrázek 5.6: a) Profil indexu lomu optimalizované struktury PMMA/NOA73 1x2Y pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm při pohledu shora, b) šíření optického signálu ve struktuře pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm.	35
Obrázek 5.7: a) Profil indexu lomu optimalizované struktury PMMA/NOA73 1x3Y pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm při pohledu shora, b) šíření optického signálu ve struktuře pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm.	36
Obrázek 5.8: a) Profil indexu lomu optimalizované struktury PMMA/NOA73 1x3Y pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm při pohledu shora, b) šíření optického signálu ve struktuře pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm.	36
Obrázek 5.9: a) Profil indexu lomu optimalizované struktury PMMA/NOA73 1x3Y pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm při pohledu shora, b) šíření optického signálu ve struktuře pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm.	37
Obrázek 5.10: a) Profil indexu lomu optimalizované struktury PMMA/NOA73 1x3Y pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm při pohledu shora, b) šíření optického signálu ve struktuře pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm.	38
Obrázek 6.1: Výrobní postup optických vlnově selektivních rozbočnic: a) gravírování Y drážek pro vlnovodnou vrstvu do PMMA podložky pro vstupní/výstupní POF vlákna a filtry, b) vložení filtrů a nanesení antireflexního gelu, c) vložení POF vláken, d) nanesení vlnovodné vrstvy.	39
Obrázek 6.2: Výrobní postup optických vlnově selektivních rozbočnic: e) vytvrzení vlnovodné vrstvy pod UV světlem, f) připevnění horní krycí vrstvou z PMMA.	40

Obrázek 6.3: a) Substrát pro testovací kanálek se dvěma tenkovrstvými filtry TFF vytvořený do PMMA substrátu, b) horní krycí vrstva z PMMA.....	42
Obrázek 6.4: Fotografie PMMA podložky a krycí vrstvy pro optickou rozbočnici s drážkami, a) se třemi fóliovými filtry, b) horní krycí vrstva.	43
Obrázek 6.5: Fotografie PMMA podložky a krycí vrstvy pro optickou rozbočnici s drážkami, a) se dvěma filtry TFF, b) horní krycí vrstva.	43
Obrázek 7.1: Fotografie vzorku RM204 (testovací drážky se třemi tenkými fóliovými filtry), a) pohled na celý vzorek b) detail špatně nasazeného vlákna, c) detail správně nasazeného vlákna.	46
Obrázek 7.2: Fotografie vzorků a) vzorek RM103 bez antireflexního gelu s tenkovrstvým filtrem TFF 1, b) vzorek RM258 s antireflexním gelem a tenkovrstvým filtrem TFF 2. ...	47
Obrázek 7.3: Fotografie vzorků a) vzorek RM 230 (PMMA/NOA73, 1x2Y s tenkými fóliovými filtry) b) vzorek RM231 (PMMA/NOA73, 1x2Y s tenkými fóliovými filtry)...	47
Obrázek 7.4: Fotografie vzorů RM232 (PMMA/NOA73, 1x2Y s tenkovrstvými filtry TFF 1, a) výstupní vlnovod s vytvořenou vzduchovou bublinou b) druhý výstupní vlnovod bez vzduchové bubliny.....	48
Obrázek 7.5: Fotografie detailního vložení tenkých fóliových filtrů ve vzorku RM205 (drážka se třemi tenkými fóliovými filtry).	48
Obrázek 7.6: Ukázka schématu zapojení pro měření optického útlumu a) měření referenčního výkonu P_{ref} , b) měření optického výkonu z výstupu rozbočnice P_{out1} , P_{out2} , P_{out3}	50
Obrázek 7.7: a) Přístroj Thorlabs' PM200, b) Si detektor S151C (Si Fotodioda).	51
Tabulka 7.1: Změřené hodnoty optických útlumů a přeslechů pro testovací kanálky s jedním filtrem.....	51
Tabulka 7.2: Změřené hodnoty optických útlumů a přeslechů pro testovací kanálky se dvěma filtry.	52
Tabulka 7.3: Změřené hodnoty optických útlumů a přeslechů pro testovací kanálky se třemi různými filtry.	53
Tabulka 7.5: Změřené hodnoty optických útlumů a přeslechů pro testovací kanálky se třemi filtry.....	54

Tabulka 7.6: Změřené hodnoty optických útlumů a přeslechů pro optické vlnově selektivní rozbočnice 1x2Y.....	56
Tabulka 7.7: Změřené hodnoty optických útlumů a přeslechů pro optické vlnově selektivní rozbočnice 1x3Y.....	57
Tabulka 7.8: Změřené hodnoty optických útlumů pro optické výkonové rozbočnice 1x3Y.	58
Obrázek 7.8: Schéma měřícího pracoviště pro měření spektrální charakteristiky se spektrálním analyzátozem Ocean Optics USB 2000.	59
Obrázek 7.9: Naměřené spektrální charakteristiky vzorků RM103 a RM104 s tenkovrstvými filtry TFF 1.....	59
Obrázek 7.10: Naměřená spektrální charakteristika vzorku RM214 s třemi tenkými fóliovými filtry.	60
Obrázek 7.11: Naměřená spektrální charakteristika vzorku RM100 se dvěma plastovými filtry.	61
Obrázek 7.12: Naměřená spektrální charakteristika vzorku RM250 se třemi tenkovrstvými filtry TFF 2.	61
Obrázek 7.13: Schéma měřícího pracoviště se spektrálním analyzátozem ANDO AQ6315B.....	62
Obrázek 7.14: Spektrální charakteristika vzorku RM103 a RM104 s tenkovrstvými filtry TFF1.	63
Obrázek 7.15: Spektrální charakteristika vzorku RM100 se dvěma plastovými filtry.	63
Obrázek 7.16: Spektrální charakteristika vzorku RM231 se dvěma tenkými fóliovými filtry.	64
Obrázek 7.17: Spektrální charakteristika vzorku RM258 se dvěma tenkovrstvými filtry TFF2.	65
Obrázek 7.18: Spektrální charakteristika vzorku RM259 se dvěma tenkovrstvými filtry TFF2.	65
Obrázek 7.19: Fotografie vyrobeného vzorku RM100 a) detail vzorku RM100, b) připojení vzorku k širokopásmovému zdroji Light Source HL-2000-FSHA.	67

Obrázek 7.20: Fotografie vyrobeného vzorku RM258 a) Vzorek připojený ke zdroji optického záření o vlnové délce 532 nm a 650 nm, b) detail vzorku, c) detail výstupních vlnovodů.	68
Obrázek 7.21: Fotografie vyrobeného vzorku RM250 a) Vzorek připojený k širokopásmovému zdroji, b) detail vzorku RM250, c) detail optické výkonové rozbočnice 1x3Y.	69
Obrázek 7.22: Fotografie vyrobeného vzorku RM30 a) Vzorek připojený k širokopásmovému zdroji, b) detail vzorku.	69
Obrázek 7.23: Fotografie vzorku RM214 připojeného k širokopásmovému zdroji.	70
Obrázek 7.24: Schéma měření přenosové rychlosti pomocí optoelektronických přepínačů KCD-303P-A2 [5].	70

11 Seznam tabulek

Tabulka 2.1: Kategorie kroucených dvoudrátů [4].....	12
Tabulka 2.2: Kategorie bezdrátové technologie Wi-Fi [3].....	13
Tabulka 4.1: Hodnoty indexu lomu pro PMMA a polymery NOA 1625 a NOA73 odečtené z obr 4.2.	25
Tabulka 6.1: Porovnání vyleštěného a nevyleštěného optického vlákna osazeného rychlokonektory.....	41
Tabulka 7.1: Změřené hodnoty optických útlumů a přeslechů pro testovací kanálky s jedním filtrem.....	51
Tabulka 7.2: Změřené hodnoty optických útlumů a přeslechů pro testovací kanálky se dvěma filtry.	52
Tabulka 7.3: Změřené hodnoty optických útlumů a přeslechů pro testovací kanálky se třemi filtry.....	53
Tabulka 7.4: Změřené hodnoty optických útlumů a přeslechů pro testovací kanálky se třemi filtry.....	54
Tabulka 7.5: Změřené hodnoty optických útlumů a přeslechů pro optické vlnově selektivní rozbočnice 1x2Y.....	56
Tabulka 7.6: Změřené hodnoty optických útlumů a přeslechů pro optické vlnově selektivní rozbočnice 1x3Y.....	57
Tabulka 7.7: Změřené hodnoty optických útlumů pro optické výkonové rozbočnice 1x3Y.	58
Tabulka 7.8: Naměřené přenosové rychlosti vyrobených struktur pro vlnovou délku 650 nm.	71

12 Seznam příloh

Příloha A

Příloha B

Příloha C

Příloha A

Tabulka A.1: Přehled vyrobených vzorků

Datum	Označení vzorku	Motiv	Vlnovodná vrstva	Poznámka
18.10.2014	RM100	2xPlast_spoj	gel	Užit.vzor, B1,B2
18.10.2014	RM101	1x2_plast_spoj	NOA72	Původně vzorek 92
18.10.2014	RM102	1x2_TFF_spoj	NOA72	Zničen při výrobě
18.10.2014	RM103	1xTFF 1	gel	Původně vzorek 2
18.10.2014	RM104	1xTFF 1	gel	Původně vzorek 1
18.10.2014	RM105	1xTFF 1	gel	Původně vzorek A
18.10.2014	RM106	2xTFF 1	gel	Zničen při výrobě
18.10.2014	RM107	1xTFF 1	gel	zničen, p.vz X
18.10.2014	RM108	2xTFF 1	gel	vyřazen, p.vz E1,E2
18.10.2014	RM109	1xTFF 1	gel	zničen, p.vz C
18.10.2014	RM110	1x2_plast	gel	vyřazen, p.vz 4A,4B
18.10.2014	RM111	1x2_plast	gel	Zničen při výrobě
18.10.2014	RM112	1x2_plast	gel	Původně vzorek D
18.10.2014	RM113	1x2_TFF	gel	vyřazen, p.vz 3
18.10.2014	RM114	2xplast_spoj	gel	Původně vzorek 5a, 5b
18.12.2014	RM200	3xfoliove_odděl	nic	filtry bez gelu, vyřazen
18.12.2014	RM201	3xfoliove_odděl	nic	filtry bez gelu, vyřazen
18.12.2014	RM202	3xfoliove_odděl	nic	filtry bez gelu, vyřazen
18.12.2014	RM203	3xfoliove_odděl	nic	filtry bez gelu, vyřazen
18.12.2014	RM204	3xfoliove_odděl	nic	filtry bez gelu, vyřazen
18.12.2014	RM205	3xfoliove_odděl	nic	filtry bez gelu, vyřazen
18.12.2014	RM206	1x2_TFF_spoj	NOA73	zničen
18.12.2014	RM207	1x2_TFF_spoj		nevyrobeno
18.12.2014	RM208	1x2_TFF_spoj		nevyrobeno
18.12.2014	RM209	1x2_TFF_spoj	NOA73 +ge	Nové TFF,sek.lep, 8 min UV
18.12.2014	RM210	1x2_TFF_spoj	NOA73 +gel	Nové TFF,sek.lep, 8 min UV
18.12.2014	RM211	1x2_TFF_spoj	NOA73 +gel	Nové TFF,sek.lep, 8 min UV
18.12.2014	RM212	1x3_foliove_odděl	NOA73	sek.lep, 8 min UV
18.12.2014	RM213	1x3_foliove_odděl	NOA73	sek.lep, 8 min UV
18.12.2014	RM214	1x3_foliove_odděl	NOA73	Lepidlo+izol,UV=12min
18.12.2014	RM215	1x3_foliove_odděl	NOA73	Lepidlo+izol,UV=12min
18.12.2014	RM216	1x3_foliove_odděl	NOA73	sek.lep, 8 min UV
18.12.2014	RM217	1x3_foliove_odděl	NOA73	Lepidlo+izol,UV=12min
18.12.2014	RM218	3x_TFF_spoj	Bez gelu	Málo sek. lepidla

Tabulka A.1: Přehled vyrobených vzorků

Datum	Označení vzorku	Motiv	Vlnovodná vrstva	Poznámka
18.12.2014	RM219	3x_TFF_spoj	Bez gelu	izolepa
18.12.2014	RM220	3x_TFF_spoj	gel	Sekundové lepidlo
18.12.2014	RM221	3x_TFF_spoj	Bez gelu	izolepa
18.12.2014	RM222	3x_TFF_spoj	gel	izolepa
18.12.2014	RM223	1x2_plast_oddel	NOA73	Zničen_upadlo vlákno
18.12.2014	RM224	1x2_plast_oddel	NOA73	Zničen_moc UV
18.12.2014	RM225	1x2_plast_oddel	NOA73	Zničen_upadlo vlákno
18.12.2014	RM226	1x2_nes_TFF_oddel	NOA73	Lepidlo+izol, vyřazen
18.12.2014	RM227	1x2_nes_TFF_oddel	NOA73	Lepidlo+izol, vyřazen
18.12.2014	RM228	1x2_nes_TFF_oddel	NOA73	Zničen při výrobě
18.12.2014	RM229	1x2_folie_spoj	NOA73	Lepidlo+izol, vyřazen
18.12.2014	RM230	1x2_folie_spoj	NOA73	Lepidlo+izol
18.12.2014	RM231	1x2_folie_spoj	NOA73	Lepidlo+izol
18.12.2014	RM232	1x2_TFF_oddel	NOA73	Lepidlo+izol, vyřazen
18.12.2014	RM233	1x2_TFF_oddel	NOA73	Sek. lepidlo, vyřazen
18.12.2014	RM234	1x2_TFF_oddel	NOA73	Lepidlo+izol, vyřazen
18.12.2014	RM235	1x3_klasik bez filtru	NOA73	Zničen, upadlo vlákno
18.12.2014	RM236	1x3_klasik bez filtru	NO73	Sek.lepidlo, vyřazen
18.12.2014	RM237	1x3_klasik bez filtru	NOA73	Zničen, upadlo vlákno
30.3.2015	RM275	1x3_klask_bez obdélníku	NOA73	Sek.lepidlo, 7 min
30.3.2015	RM276	1x3_klasic_s obdélníkem	NOA73	Sek.lepidlo, 7 min
18.12.2014	RM238	1x3_1xfole+2xTFF_odel	NOA73	Sek.lepidlo, vyřazen
18.12.2014	RM239	1x3_1xfole+2xTFF_odel	NOA73	Sek.lepidlo, vyřazen
18.12.2014	RM240	1x3_1xfole+2xTFF_odel	NOA73	Zničen při výrobě
18.12.2014	RM241	1x3_1xfole+2xTFF_odel	NOA73	Sek.lepidlo, vyřazen
10.3.2015	RM242	1x3_klasik bez filtru	NOA72	NOA 72 u vláken, zničen
10.3.2015	RM243	1x3_1xfole+2xTFF_odel	NOA73	Photobond 300, zničen
10.3.2015	RM244	1x3_1xfole+2xTFF_odel	NOA73	Zničen při výrobě
10.3.2015	RM245	1x3_1xfole+2xTFF_odel	NOA73	Photobond 300, zničen
10.3.2015	RM246	1x3_1xfole+2xTFF_odel	NOA73	NOA88(na vlákna)
10.3.2015	RM247	1x3_1xfole+2xTFF_odel	NOA73	Photobond 400 na vlák.
10.3.2015	RM248	3x dráčky_bez H.v, TFF	gel	nové TFF, sek.lepidl
10.3.2015	RM249	3x dráčky_bez H.v, TFF	gel	nové TFF, sek.lepidl
10.3.2015	RM250	3x dráčky_bez H.v, TFF	gel	nové TFF, sek. lepidlo
30.3.2015	RM251	2xdřážky, TFF	gel	nové TFF, sek. lepidlo
30.3.2015	RM252	2xdřážky, TFF	gel	nové TFF, sek. lepidlo
30.3.2015	RM253	2xdřážky, TFF	gel	nové TFF, sek. lepidlo
30.3.2015	RM254	3x dráčky, TFF	gel	nové TFF, zničen G filtr

Tabulka A.1: Přehled vyrobených vzorků

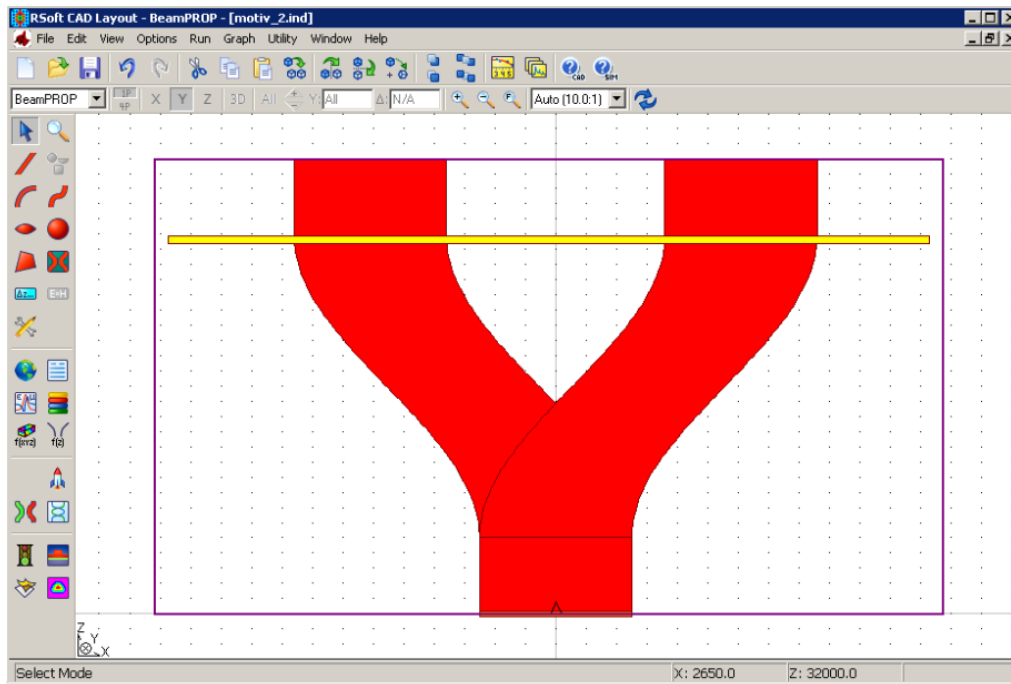
Datum	Označení vzorku	Motiv	Vlnovodná vrstva	Poznámka
30.3.2015	RM252	2xdrážky, TFF	gel	nové TFF, sek. lepidlo
30.3.2015	RM253	2xdrážky, TFF	gel	nové TFF, sek. lepidlo
30.3.2015	RM254	3x dráčky, TFF	gel	nové TFF, zničen G filtr
30.3.2015	RM255	3x dráčky, TFF	Bez gelu	nové TFF, zničen G filtr
30.3.2015	RM256	3x dráčky, TFF	Bez gelu	nové TFF, zničen G filtr
30.3.2015	RM257	2x dráčky_ bez H.v, TFF	gel	nové TFF, sek.lepidl
30.3.2015	RM258	2x dráčky_ H.v, TFF	gel	nové TFF, sek.lepidl
30.3.2015	RM259	2x dráčky_ H.v, TFF	gel	nové TFF, sek.lepidl
30.3.2015	RM260	1x3, TFF		nové TFF, nevyrobena
30.3.2015	RM261	1x3, TFF		nové TFF, nevyrobena
30.3.2015	RM262	1x3, TFF		nové TFF, nevyrobena
30.3.2015	RM263	1x3, TFF, bez H.v		nové TFF, nevyrobena
30.3.2015	RM264	1x3, TFF, bez H.v		nové TFF, nevyrobena
30.3.2015	RM265	1x3, TFF, bez H.v		nové TFF, nevyrobena
30.3.2015	RM266	1x2, TFF, bez H.v		nové TFF, nevyrobena
30.3.2015	RM267	1x2, TFF, bez H.v		nové TFF, nevyrobena
30.3.2015	RM268	1x2, TFF, bez H.v		nové TFF, nevyrobena
30.3.2015	RM269	1x2, TFF, bez H.v		nové TFF, nevyrobena
30.3.2015	RM270	1x2, TFF, bez H.v		nové TFF, nevyrobena

Tabulka A.2: Příklad změřených optických výkonů a určených útlumů a přeslechů.

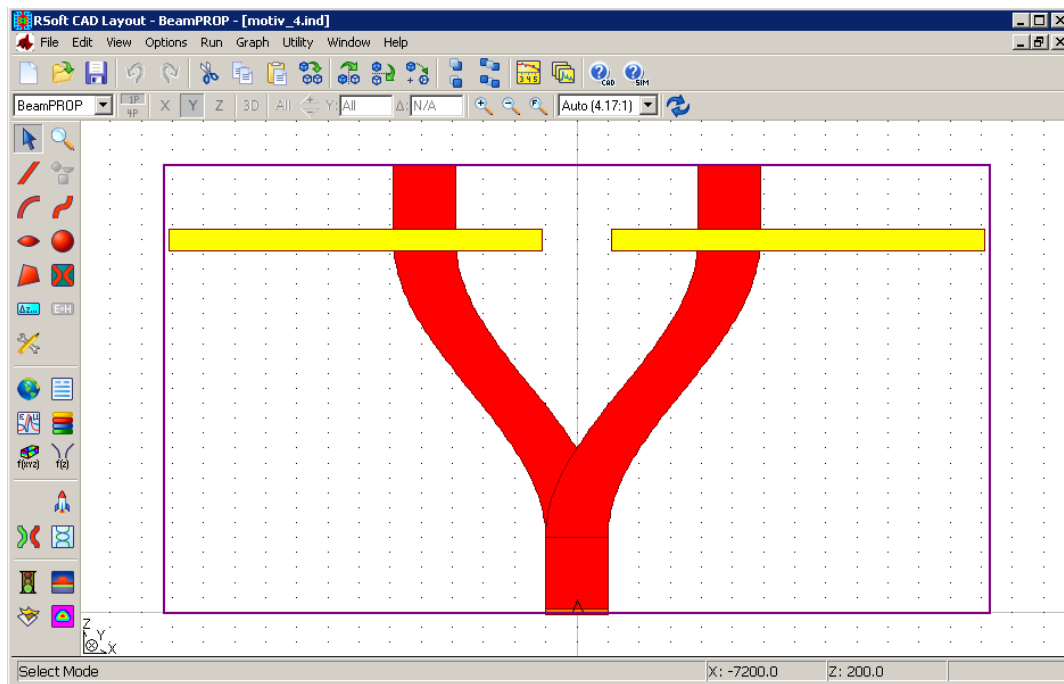
Vzorek	λ (nm)	P_{ref} (μm)	ZELENÝ FILTR		ČERVENÝ FILTR	
			P_{out} (μm)	Hodnota (dB)	P_{out} (μm)	Hodnota (dB)
RM100	532	2144	883,2	3,85	16,7	21,09
	650	280,5	1,04	23,42	127,1	3,44
RM103	532	1970	640,23	4,88	0,4	36,92
RM104	650	218,9	0,09	33,86	102,8	3,28
RM113	532	2300	950	3,84	0,26	39,47
	650	208	2,97	18,45	19,42	10,3
RM230*	532	2780	820,62	5,30	0,61	36,59
	650	269	0,02	41,29	87,38	4,88
RM231	532	1730	65,01	14,25	0,39	36,47
	650	192,32	0,012	42,05	17,84	10,33
RM251	532	1730	752,8	3,61	0,17	40,08
	650	192,32	0,34	27,53	116,44	2,18
RM258*	532	2780	1290	3,33	0,51	37,36
	650	269	0,81	25,21	133,9	3,03
RM259	532	1730	452,36	5,83	0,15	40,62
	650	192,32	6,72	14,57	91,09	3,25

Příloha B

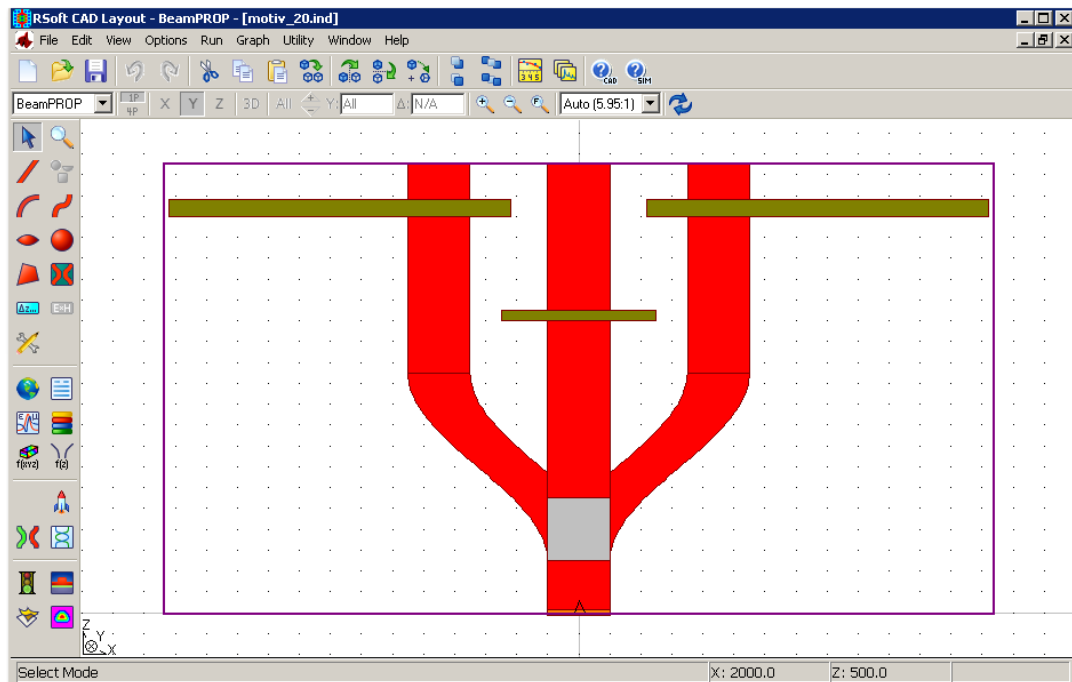
Ukázky z návrhového programu BeamPROP™.



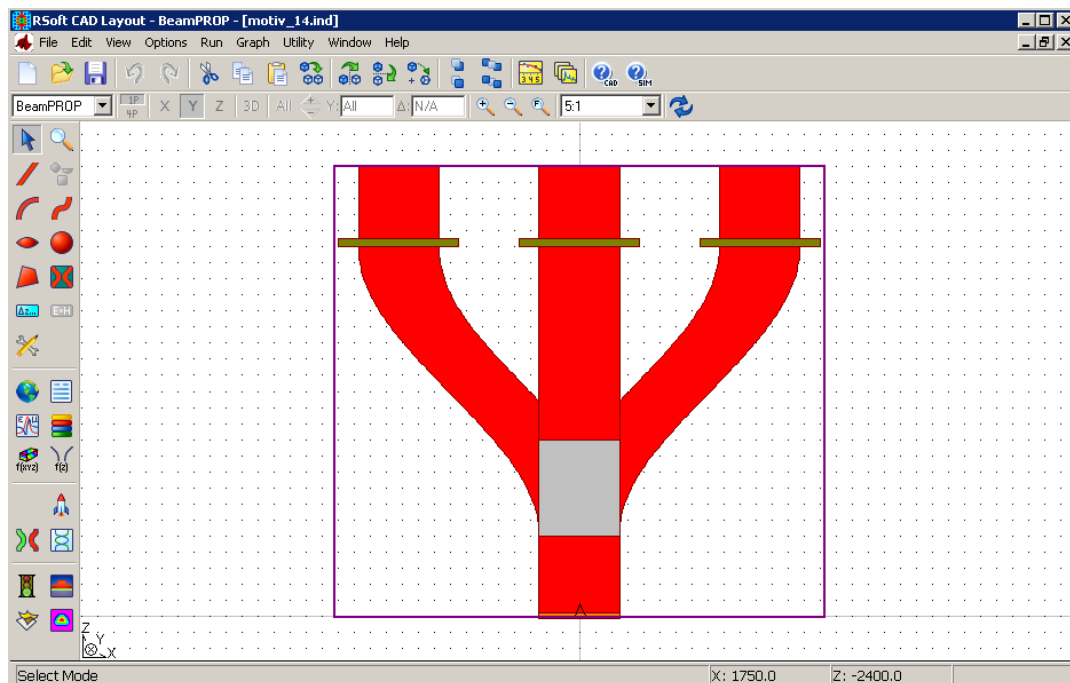
Obrázek B.1: Ukázka návrhu optické vlnově selektivní rozbočnice 1x2Y pro tenké fóliové filtry.



Obrázek B.2: Ukázka návrhu optické vlnově selektivní rozbočnice 1x2Y pro tenkovrstvé filtry TFF.



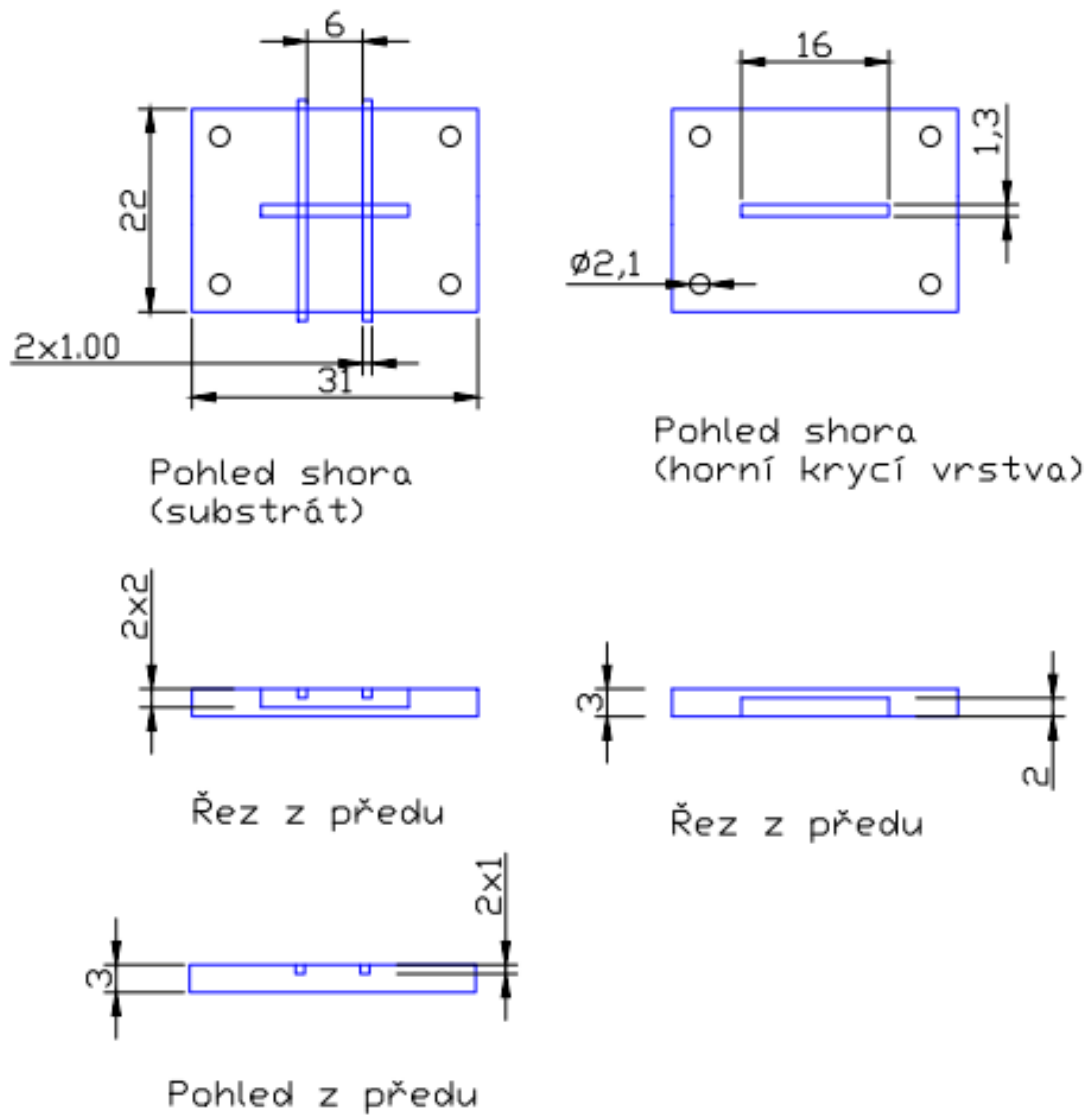
Obrázek B.3: Ukázka návrhu optické vlnově selektivní rozbočnice 1x3Y pro tenké fóliové filtry a tenkovrstvé filtry TFF.



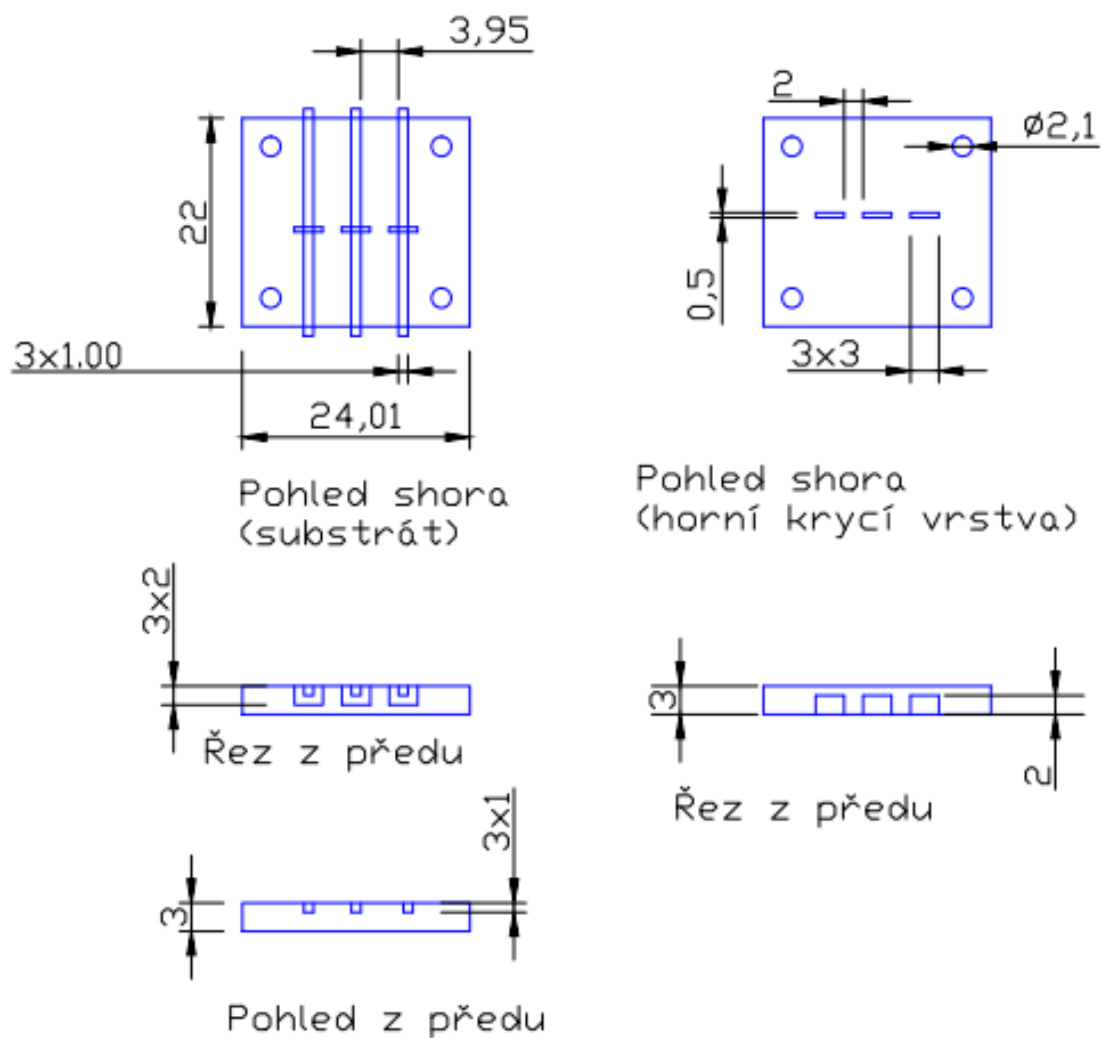
Obrázek B.4: Ukázka návrhu optické vlnově selektivní rozbočnice 1x3Y pro tenké fóliové filtry v programu BeamPROP™.

Příloha C

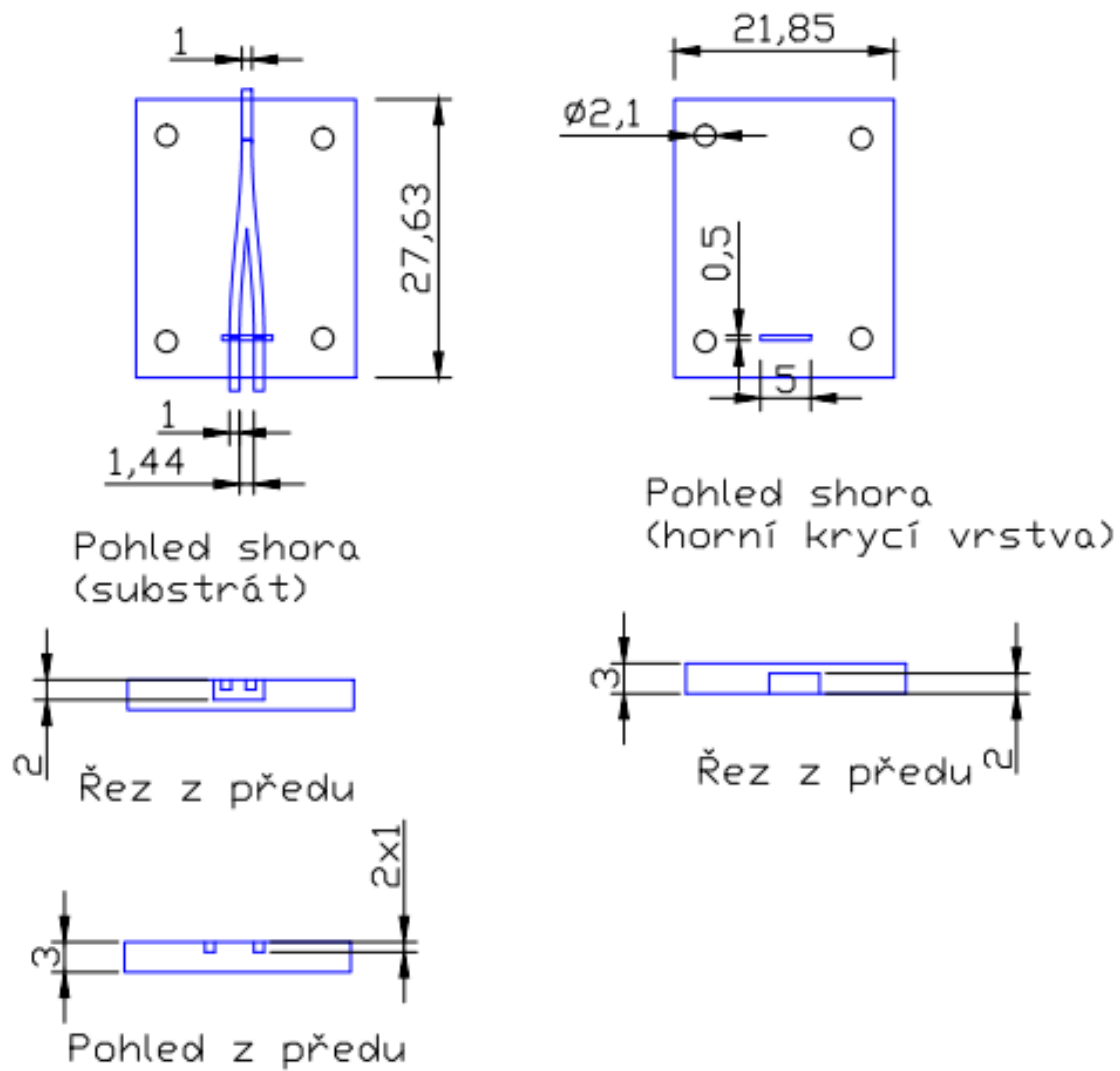
Technická dokumentace navržených struktur. Všechny rozměry v technické dokumentaci jsou uvedeny v mm.



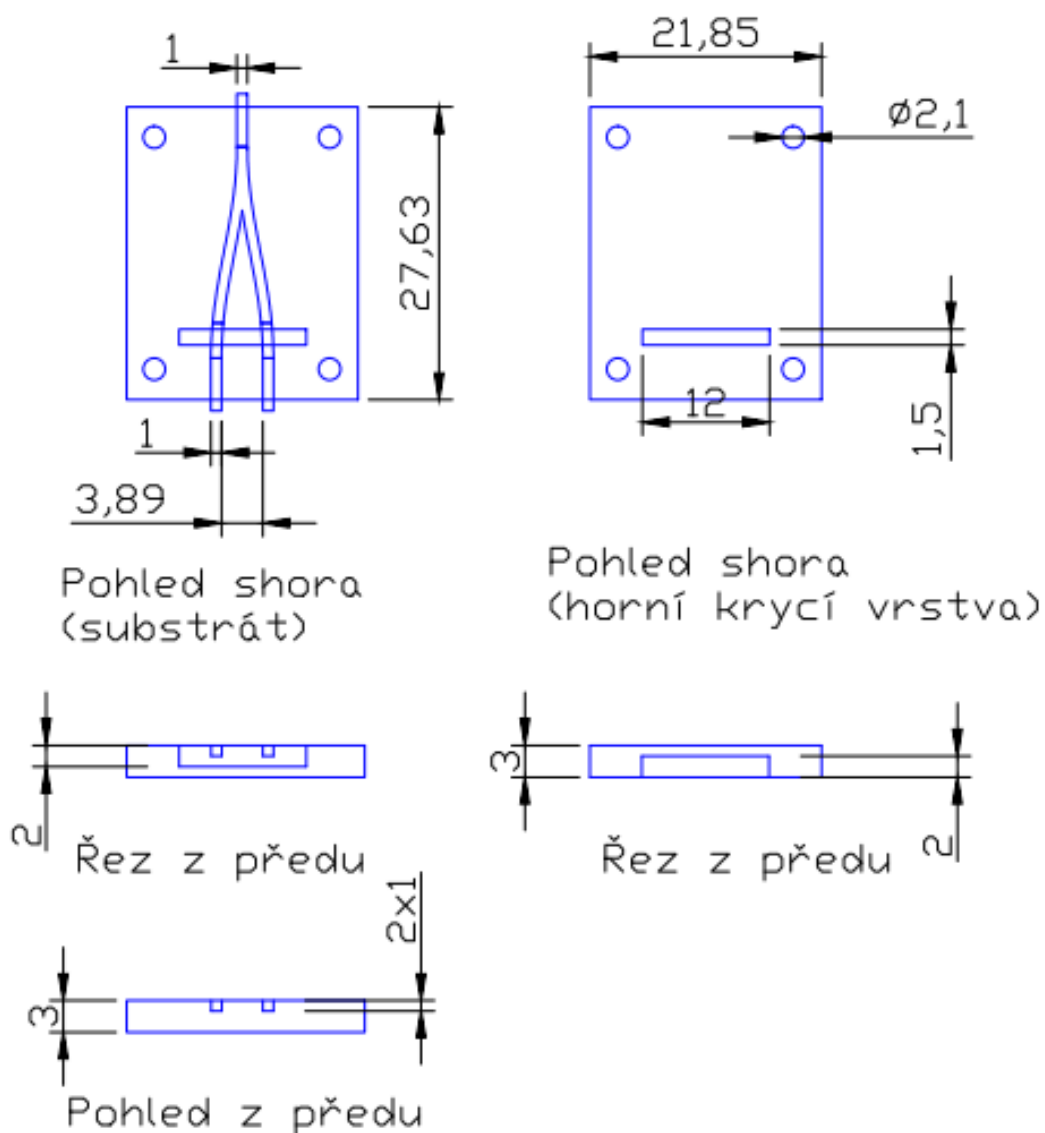
Obrázek C.1: Testovací kanálky se dvěma drážkami pro dvě vstupní a dvě výstupní POF vlákna a dva tenkovrstvé filtry TFF nebo plastové filtry.



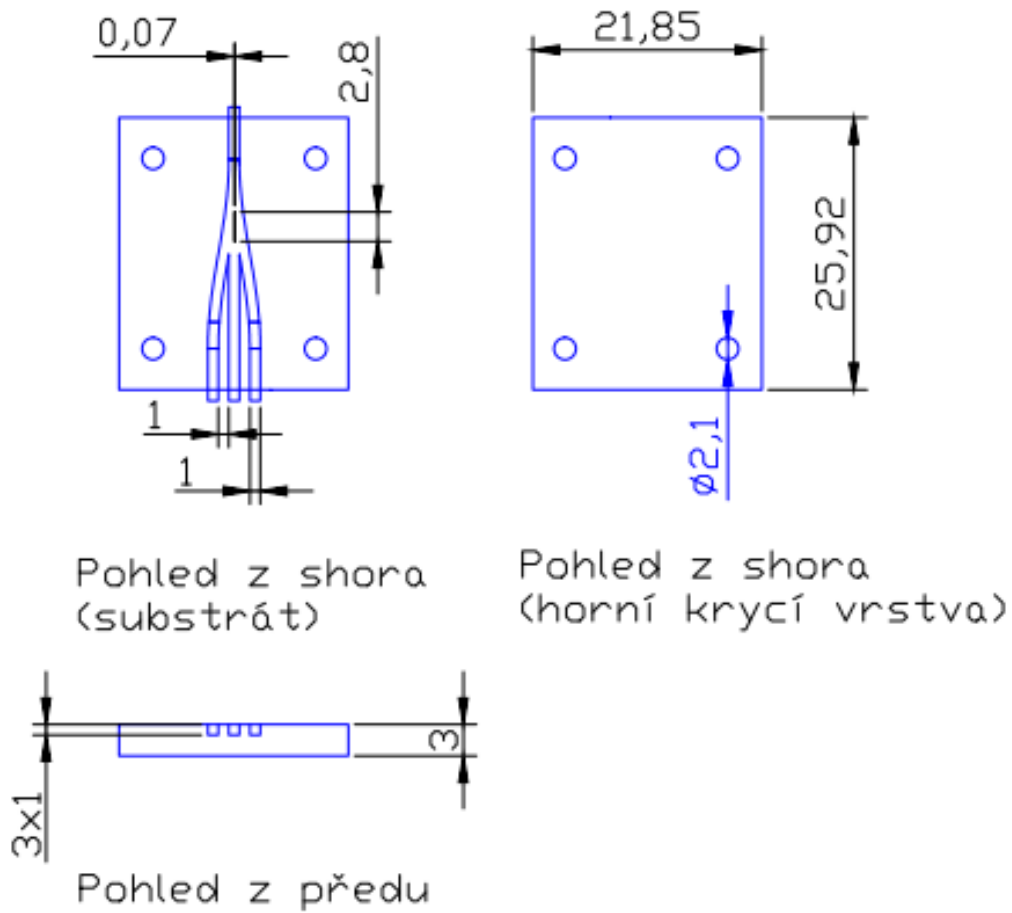
Obrázek C.2: Testovací kanálky se třemi drážkami pro tři vstupní a tři výstupní POF vlákna a tři tenké fóliové filtry.



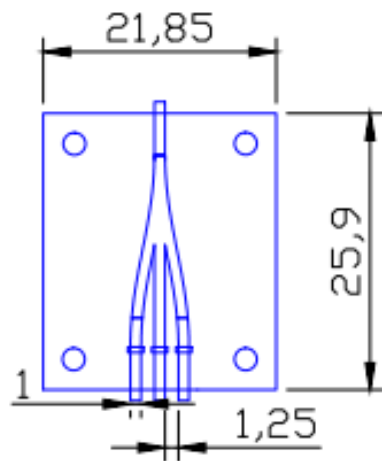
Obrázek C.3: Optická vlnově selektivní rozbočnice 1x2Y pro dva fóliové filtry se spojenými drážkami pro filtry.



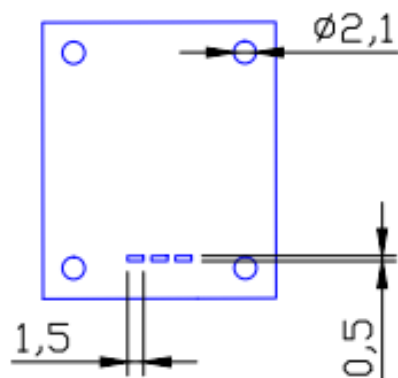
Obrázek C.4: Optická vlnově selektivní rozbočnice 1x2Y pro dva tenkovrstvé filtry TFF nebo plastové filtry se spojenými drážkami pro filtry.



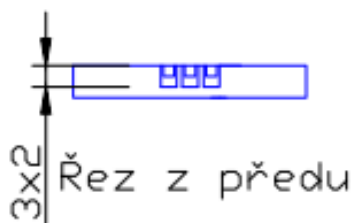
Obrázek C.5: Optická rozbočnice s dělicím poměrem 1x3Y s vloženým obdélníčkem pro symetrické rozdělení výstupního optického výkonu.



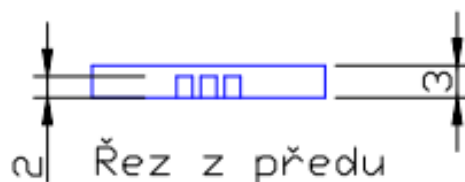
Pohled shora
(substrát)



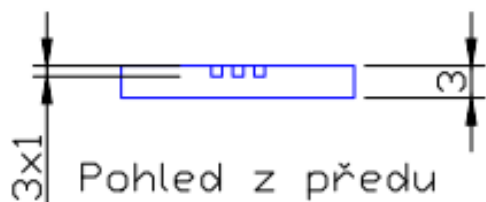
Pohled shora
(horní krycí vrstva)



Řez z předu

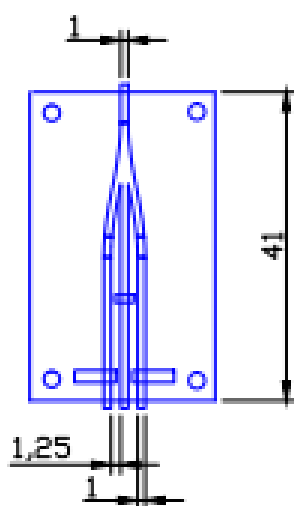


Řez z předu

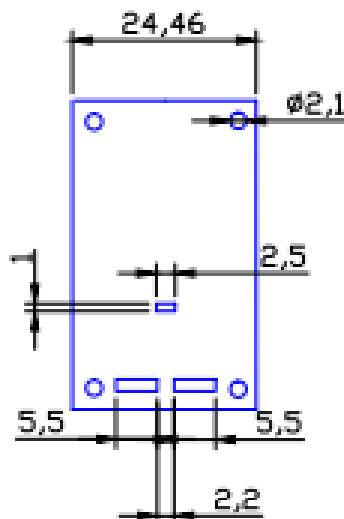


Pohled z předu

Obrázek C.6: Optická vlnově selektivní rozbočnice 1x3Y pro tři fóliové filtry s oddělenými drážkami pro filtry.



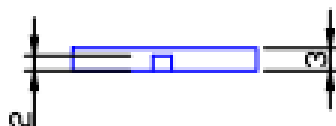
Pohled shora
(substrát)



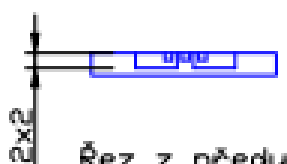
Pohled shora
(horní krycí vrstva)



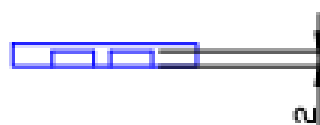
Řez z předu



Řez z předu



Řez z předu



Řez z předu



Pohled z předu

Obrázek C.7: Optická vlnově selektivní rozbočnice 1x3Y pro dva tenkovrstvé filtry TFF a jeden fóliový filtr s oddělenými drážkami pro filtry.