



Výroba optických polymerních struktur pomocí nových technologií

Fabrication optical polymer structures using new technologies

Diplomová práce

Studijní program: Elektronika a komunikace

Studijní obor: Radiová a optická technika

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

Bc. Jan Zázvorka

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zázvorka** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **420357**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Studijní obor: **Radiová a optická technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Výroba optických polymerních struktur pomocí nových technologií

Název diplomové práce anglicky:

Fabrication Optical Polymer Structures Using New Technologies

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s teoretickými principy optických planárních vlnodů.
- 2) Seznamte se s novými technologiemi používanými pro výrobu fotonických struktur.
- 3) Navrhněte optickou multivídrovou rozbočnici s polymerních materiálů pro provozní teploty vyšší než 80°C.
- 4) Navrhněte postup výroby pro navržené struktury a podílejte se na výrobě testovacích struktur.
- 5) Proveďte měření vyrobených struktur.
- 6) Dosažené výsledky shrňte do zprávy o rozsahu cca 50 až 70 stran.

Seznam doporučené literatury:

1. M. Kniatel: Optické planární struktury s možností připojení polymerních optických vláken, diplomová práce ČVUT 2017.
2. M. Záveský: Příprava a charakterizace tištěných elektronických struktur, Diplomová práce ČVUT 2016.
3. D.R. Selviah, et al.: Integrated optical and electronic interconnect PCB manufacturing research, Emerald Group Publishing Limited, 2010, pp.5-19, [ISSN 0305-6120].

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **07.02.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **25.05.2018**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2019**

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

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

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

V Praze dne 23.5. 2018

.....
Jan Zázvorka

Poděkování

Chtěl bych poděkovat především svému vedoucímu práce doc. Ing. Václavu Prajzlerovi Ph.D. za cenné rady, podnětné připomínky a čas, který mi věnoval při konzultacích. Za poskytnutí vzorků ZEONEX E48R, které byly použity pro plášťové vrstvy při realizaci optických rozbočnic děkuji panu Reinhardu Schellerovi ze Zeon Europe GmbH. Dále pak Ondřeji Rezkovi z katedry elektrotechnologie FEL ČVUT za umožnění měření v teplotní komoře a v neposlední řadě doc. Ing. Pavle Nekvindové Ph.D. za zprostředkování měření indexu lomu pomocí přístroje Metricon 2010/M.

Název práce: Výroba optických polymerních struktur pomocí nových technologií

Autor: Bc. Jan Zázvorka

Katedra: Katedra mikroelektroniky

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

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

Abstrakt: Diplomová práce se zaměřuje na návrh, výrobu a měření vlastností planárních mnohovidových optických výkonových rozbočnic 1x2Y s velkým rozměrem vlnovodného jádra a s teplotní odolností až 120°C. V první části jsou popsány přístupy k analýze šíření světla v planárních vlnovodech. Následuje návrh a výpočet geometrických rozměrů rozbočnic na základě analýzy publikované p. D. R. Beltramim. V další části jsou uvedeny výsledky optimalizovaných návrhů vytvořených za pomoci návrhového softwaru BeamPROP™ od společnosti RSoft. Dále jsou uvedeny postupy výroby planárních rozbočnic a výsledky měření vložného útlumu. V poslední části jsou pak uvedeny výsledky testů teplotní odolnosti a výsledky měření přenosové rychlosti datových toků a chybovosti vybraných optických rozbočnic.

Klíčová slova: optická planární rozbočnice, mnohovid, optický vložný útlum, teplotní odolnost

Title: Fabrication optical polymer structures using new technologies

Author: Bc. Jan Zázvorka

Department: Department of Microelectronics

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

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

Abstract: The diploma thesis focuses on the design, production and measurement of characteristics of planar multimode optical power splitters $1 \times 2Y$ with large core and temperature resistance up to 120°C . The first part describes approaches to light propagation analysis in planar waveguides. Following is the design and calculation of geometric dimensions of splitters based on the analysis published by D.R. Beltrami. In the next section are presented the results of optimized designs created with the help of RSoft BeamPROP™ design software from RSoft company. The following are the procedures for the production of planar splitters and the results of the insertion loss measurement. In the last part are presented the results of temperature resistance tests and the results of measurement of the bit rate of the data streams and error rates of the selected optical splitters.

Keywords: optical planar splitter, multimode, optical insertion loss, temperature resistance

Obsah

1. Úvod	12
2. Teoretická část	14
2.1 Analýza šíření světla pomocí klasické optiky	15
2.2 Analýza šíření světla pomocí geometrické optiky	16
2.3 Optická vlákna	18
3. Planární optická rozbočnice	19
3.1 Volba materiálů	20
3.2 Teoretické výpočty parametrů rozbočnic	21
3.3 Metoda šíření optického svazku (BPM)	24
3.4 Návrh rozbočnice pomocí metody BPM	26
4. Výroba planární optické rozbočnice	39
4.1 Postup výroby rozbočnic varianty Zeonex/Epocore	39
4.2 Postup výroby rozbočnic varianty Zeonex/NOA83H	39
4.3 Návrh výroby varianty Makrolon GP/Epocore	40
4.4 Návrh výroby varianty PDMS/PDMDPS	40
5. Výsledky	43
5.1 Měření indexů lomu	43
5.2 Optické vyhodnocení kvality vzorků	44
5.2.1 Optická kontrola vyrobených drážek	44
5.2.2 Optická kontrola po nanesení vlnovodné vrstvy	48
5.2.3 Optická kontrola vyrobených struktur pomocí 3D tisku	49
5.3 Měření vloženého optického útlumu:	51
5.4 Měření spektrálních charakteristik	56
5.5 Měření teplotní odolnosti	57
5.5.1 Testy v teplotní komoře	57
5.5.2 Teplotní testy vzorků s křemennými vlákny	60
5.5.3 Teplotní testy vzorků s plastovými vlákny	62
5.6 Měření přenosové rychlosti datových toků	63
6. Závěr	65
7. Literatura	67
Příloha A	

Seznam symbolů a zkratk

symbol	veličina	jednotka
B	magnetická indukce	T
c	rychlost světla	m/s
d	délka taperovaného vlnovodu	μm
D	elektrická indukce	C/m^2
E	intenzita elektrického pole	V/m
H	intenzita magnetického pole	A/m
j	komplexní číslo	-
k	vlnové číslo	m^{-1}
L_c	délka celé rozbočnice	μm
L_{in}	délka vstupního vlnovodu	μm
L_{out}	délka výstupního vlnovodu	μm
L_{Sbend}	délka vlnovodného ramena	μm
L_x	délka rozpětí rozbočnice	μm
n	index lomu	-
NA	numerická apertura	-
n_c	index lomu krycí vrstvy	-
n_f	index lomu jádra	-
n_h	index lomu hranolu	-
n_s	index lomu substrátu	-
P_{in}	vstupní výkon	W
P_{out1}	výstupní výkon z 1. ramene	W
P_{out2}	výstupní výkon z 2. ramene	W
t	čas	s
v	rychlost šíření v materiálu	m/s
w_f	šířka jádra na vstupu	μm
w_x	šířka mezery mezi rameny	μm
α	vložný optický útlum	dB
β	fázová konstanta	-
Δ	kontrast indexů lomu	-
ϵ	permitivita	F/m
ϵ_0	permitivita vakua	F/m
θ	komplementární kritický úhel	$^\circ$
λ	vlnová délka	nm

symbol	veličina	jednotka
μ	permeabilita	H/m
ρ	objemová hustota volného náboje	C/m ³
φ_1	úhel dopadajícího paprsku	°
φ_2	úhel lomeného paprsku	°
φ_{krit}	kritický úhel	°
φ_{odr}	úhel odraženého paprsku	°
ω	úhlová rychlost	s ⁻¹
Ω	úhel odklonu větve rozbočnice	°

zkratka	význam	český popis
ABS	Akrolylnitril butadien styren	akrylonitril-butadien-styrenový kopolymer
BPM	beam propagation method	metoda šíření optického svazku
CNC	Computer numerical control	počítačově číslicové řízení
NOA	Norland Optical Adhesive	americká společnost
PDMDPS	Polydimethyldiphenylsiloxane	polydimethyldiphenylsiloxan
PDMS	Polydimethylsiloxane	polydimethylsiloxan
PMMA	Polymethyl methacrylate	polymethylmethakrylát
POF	plastic optical fiber	plastové optické vlákno
UV	ultra violet	ultrafialové

1. Úvod

Se zvyšujícími se nároky zákazníků na množství přenesených dat a přenosovou rychlost je nutné nahrazovat čím dál tím častěji metalické a bezdrátové spoje optickými. Vznikla koncepce plně optických sítí. Jako příklad může posloužit poskytování služeb internetového připojení a snaha postupného přibližování optického signálu ke koncovému zákazníkovi. Dnes již není výjimkou, že optické vlákno je přivedeno až do obytného prostoru zákazníka (FTTH –Fiber To The Home), a poskytuje vysokorychlostní datové připojení, které dřívější metalické přípojky nebyly schopné umožnit. Optická vlákna navíc vykazují oproti metalickým kabelům nižší útlum, nižší provozní náklady a odolnost vůči elektromagnetickému rušení, přeslechům a vibracím.

Zvyšují se také nároky na přenosovou rychlost vnitřních spojení u superpočítačů a datových center. A proto se v současné době výzkum a vývoj zaměřuje i na využití optických vlnodů na deskách plošných spojů, propojujících funkční bloky čipů nebo jednotlivé čipy mezi sebou. Tyto optické spoje lze rozdělit podle dosahu přenášeného optického signálu na Short Reach (SR) s dosahem do 300 m, Extra Short Reach (ESR) s dosahem do 5 cm a také Ultra Short Reach (USR) s dosahem do 1 cm. Pro tyto zmíněné spojení je žádoucí nalézt takové materiály, které by umožňovaly vysoké přenosové rychlosti a zároveň jejich výroba a aplikace byla snadná a levná. Snahou této práce je přispět k nalezení těchto materiálů a postupů výroby s vhodnými vlastnostmi [1].

Další rozsáhlé využití se nachází pro optické spoje v automobilovém, leteckém a lodním průmyslu. Zejména v automobilovém průmyslu stojí za zmínku využití optických spojů v multimediálních přenosových systémech, jako je například MOST (Multimedia Oriented System Transport), který se již stal standardem pro skoro všechny významné automobilové značky a koncerny jako je například: Audi, BMW, General Motors, Hyundai, Mercedes-Benz, Porsche, Toyota, Volkswagen, SAAB, ŠKODA atd. [2].

Tato diplomová práce navazuje na práci Ing. Mariána Knietla, který se zabýval návrhem a výrobou mnohovidových planárních výkonových rozbočnic typu 1x2Y pro POF (Plastic Optical Fiber) vlákna. Jím navržené struktury jsou limitovány teplotní odolností a použitelným spektrálním rozsahem užitých materiálů a přírodních POF vláken. Udává, že jím vyrobené vzorky jsou použitelné ve spektrální oblasti 400 až 850 nm s teplotní odolností do 60°C [3].

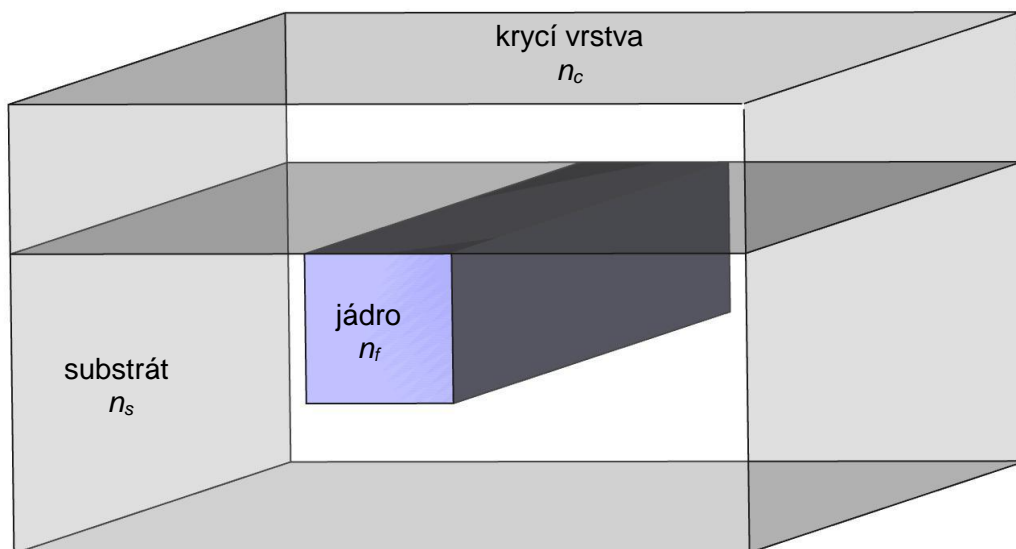
Cílem této práce je navrhnout a vyrobit struktury použitelné i na vyšších vlnových délkách, konkrétně v druhém a třetím tzv. „telekomunikačním oknu“ pro křemenná vlákna okolo vlnové délky 1310 nm a 1550 nm, které bude možné provozovat při vyšších teplotách. Takto vysoká

teplotní odolnost je vyžadována pro aplikaci v motorové části vozidel, kde teplota může dosahovat teplot až 135°C.

2. Teoretická část

Optické vlnovody lze rozdělit do dvou základních skupin na válcové a planární. Základní vlastností vlnovodu je podélně vést elektromagnetické pole. Válcový optický vlnovod je častěji známý pod pojmem optické vlákno a využívá se pro transport záření na dlouhé vzdálenosti až tisíce kilometrů a využívají se například na propojení jednotlivých kontinentů. Oproti tomu planární se nejčastěji využívají na krátké vzdálenosti v řádu milimetrů a centimetrů [4].

Na obrázku 2.1 je vidět nejčastější typ planárních optických vlnovodů, tzv. „utopený“ vlnovod, kdy tři strany obdélníkové vlnovodné vrstvy s indexem lomu n_f sousedí se substrátem s indexem lomu n_s . Čtvrtá stěna sousedí s krycí vrstvou s indexem lomu n_c . Vlnovodná vrstva, označovaná také jako jádro, je transparentní dielektrická struktura s vysokou čistotou, schopná na základě úplného odrazu podélně vést optický signál. Nevýhodou takto vytvořeného vlnovodu je velký měrný útlum, který lze na krátkých vzdálenostech mezi čipy tolerovat, ale pro telekomunikační účely na přenos signálu přes kilometrové vzdálenosti, je neakceptovatelný [4].



Obrázek 2.1: Tzv. „utopený“ (buried) planární optický vlnovod.

K analýze šíření světla v optických vlnovodech lze použít 2 přístupy. První přístup je označován jako geometrická optika, v níž je šíření optického záření popsáno jako soubor paprsků, jejichž trajektorie jsou zkoumány pro každý paprsek zvlášť. Výhodou tohoto přístupu je jednoduché vysvětlení základního principu vedení světla napříč vlnovody na základě zákonů o odrazu a lomu. Jedná se o přístup matematicky jednodušší, avšak nelze s jeho pomocí jednoduše vysvětlit všechny fyzikální jevy, objevující se při šíření světla vlnovodem jako například interference záření, nelineární, disperzní a polarizační mechanismy. K řešení těchto jevů se používá druhý matematicky složitější přístup, založený na řešení šířícího se pole v uzavřené struktuře optického vlnovodu pomocí Maxwellových rovnic. Tento přístup je označován jako klasická optika. V praxi se využívá kombinace obou přístupů [4].

2.1 Analýza šíření světla pomocí klasické optiky

Šíření vedených vln lze analyzovat řešením vlnové rovnice při splnění okrajových podmínek. Vlnovou rovnici lze odvodit z Maxwellových rovnic. Maxwellovy rovnice (2.2-2.5) jsou uvedeny v diferenciálním tvaru s uvážením pouze harmonického průběhu vektorů pole a využití fázorů (komplexních amplitud). Uvažováno je také, že materiály, kterými se šíří záření jsou ideální dielektrika. Vzájemné přiřazení časoprostorové funkce např. $\mathbf{E}(x,y,z,t)$ a odpovídajícího fázoru $\mathbf{E}(x,y,z)$, který je funkcí prostorovou, je uvažováno ve tvaru [5]:

$$\mathbf{E}(x, y, z, t) = \text{Im}\{\mathbf{E}(x, y, z) e^{j\omega t}\} \quad (2.1)$$

Maxwellovy rovnice při uvedených vymezeních:

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\epsilon\mathbf{E} \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H} \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.5)$$

kde \mathbf{H} je intenzita magnetického pole, \mathbf{D} je elektrická indukce, \mathbf{E} je intenzita elektrického pole, \mathbf{B} je magnetická indukce, ∇ je divergence, ϵ je permitivita prostředí, μ je permeabilita prostředí, ρ je objemová hustota volného náboje a ω je úhlová rychlost.

Doplňující materiálové vztahy [5]:

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} = \epsilon_0 n^2 \mathbf{E} \quad (2.6)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2.7)$$

kde n je index lomu a ϵ_0 permitivita vakua.

Z rovnic 2.2 a 2.3 lze vyjádřit:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\nabla \times \mathbf{H} = \omega^2\mu\varepsilon\mathbf{E} \quad (2.6)$$

Za předpokladu homogenního, izotropního prostředí bez náboje ($\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$) lze 2.6 upravit a vyjádřit vlnové rovnice pro harmonickou vlnu:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0 \quad (2.7)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = 0 \quad (2.8)$$

kde k je vlnová konstanta šíření dána vztahem:

$$k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} = \beta - j\alpha \quad (2.9)$$

kde β je fázová konstanta a α měrný útlum.

Vlnovou rovnici můžeme vyjádřit pro jednotlivé složky pole, například pro složku E_x :

$$\frac{\delta^2 E_x}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 E_x}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 E_x}{\delta z^2} + k^2 E_x = 0 \quad (2.10)$$

Nejjednodušším řešením vlnové rovnice je rovinná uniformní vlna, u které vektory \mathbf{E} a \mathbf{H} leží v rovině kolmé na směr šíření a jsou konstantní. Tato vlna se využívá pro řešení „složitějších“ vln. Celkové elektromagnetické pole ve vlnovodu lze nahradit součtem dílčích elementárních polí šířících se strukturou, které se označují jako elektromagnetické vidy [4,5].

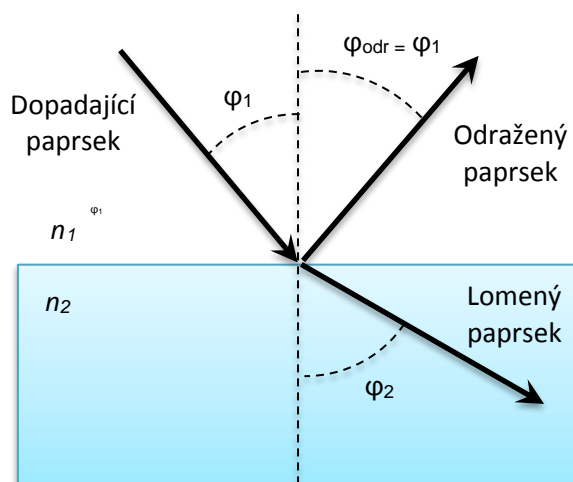
2.2 Analýza šíření světla pomocí geometrické optiky

Geometrická optika vychází z představy, že optický svazek lze chápat jako soubor šířících se paprsků. Když některý z těchto paprsků narazí na překážku, definuje jeho chování zákonem o odrazu, který říká, že dopadající paprsek na rozhraní dvou opticky odlišných materiálů svírá

stejný úhel s rovinou dopadu jako odražený. Část paprsku se odrazit nemusí a může se lámat do druhého materiálu. Toto chování popisuje Snellův zákon lomu [4]:

$$n_1 \sin \varphi_1 = n_2 \sin \varphi_2 \quad (2.11)$$

kde n_1 je index lomu materiálu, ve kterém se šíří paprsek dopadající, n_2 je index lomu materiálu, ve kterém se šíří paprsek lomený, φ_1 je úhel, který dopadající paprsek svírá s kolmicí na rovinu dopadu (rozhraní materiálů), φ_2 je úhel, který lomený paprsek svírá s kolmicí na rovinu dopadu. Situace je znázorněna na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Znázornění zákona lomu.

Index lomu vyjadřuje, kolikrát pomaleji se daným prostředím paprsek šíří, než by se šířil vakuem a může být vyjádřen:

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.12)$$

kde n je index lomu, c vyjadřuje rychlost šíření světla ve vakuu a v vyjadřuje rychlost šíření v daném materiálu. Pokud vlna dopadá z prostředí opticky hustšího na prostředí opticky řidší ($n_1 > n_2$), tak ze Snellova zákona lomu vyplývá, že při postupném zvětšování úhlu φ_1 nastane

situace, kdy se lomený paprsek bude šířit v rovině dopadu ($\varphi_2 = 90^\circ$). Nejmenší úhel φ_1 , kdy tato situace nastane, se označuje jako mezní nebo kritický úhel a je dán vztahem:

$$\varphi_{krit} = \arccos \frac{n_2}{n_1} \quad (2.13)$$

kde φ_{krit} je kritický úhel, n_2 je index lomu prostředí, ve kterém se šíří lomený paprsek a n_1 je index lomu prostředí, ve kterém se šíří dopadající paprsek.

Tato situace je zajímavá v tom, že všechna energie dopadajícího paprsku se transformuje do paprsku odraženého (totální odraz). Aby to bylo možné, je nutné volit materiály tak, aby index lomu jádra byl vyšší než index lomu okolního pláště. Tato informace je zásadní při návrhu optických vlnodů, kdy je snaha udržet všechnu energii v jádře.

2.3 Optická vlákna

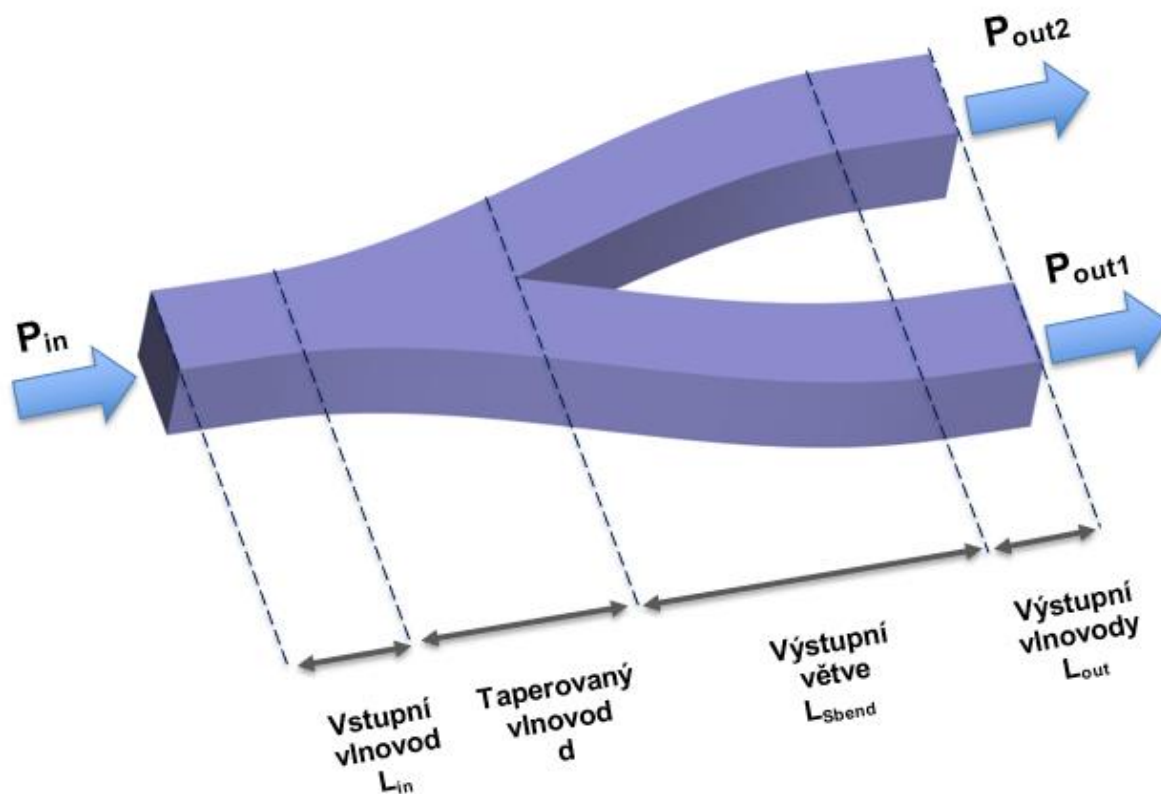
Jsou dva základní způsoby, jakým jsou vlnovody navrhovány, aby se z nich paprsky nevyvázaly. Prvním z nich jsou vlnovody se skokovou změnou indexu lomu, kdy se index lomu na rozhraní jádra a okolních vrstev mění skokově, nebo vlnovody s gradientní změnou indexu lomu. V nich se mění indexy lomu pozvolna a paprsek se pomalu ohýbá zpět do jádra. Gradientní vlákna se využívají například na potlačení vidové disperze.

Optické vlnovody lze rozdělit také podle toho, jestli jsou určeny pro provoz v jednovidovém nebo mnohovidovém režimu. Jednovidový přenos je výhodnější z hlediska disperze a z toho vyplývající podstatně větší šířka přenosového pásma a vyšší přenosová rychlost. Zato do mnohovidových vlnodů lze, vzhledem k větším rozměrům, snadněji navázat optický paprsek, a proto lze použít levnější a konstrukčně méně složitě zdroje záření. Typické rozměry jednovidového optického vlákna jsou 9 μm pro jádro a 125 μm pro plášť. Takto malé rozměry neumožňují existenci vyšších vidů. Mnohavidové mají rozměr pláště typicky 50 nebo 62,5 μm a rozměr pláště 125 μm . Dále existují mnohavidová vlákna s velkým rozměrem jádra jako jsou POF vlákna, která mají rozměr jádra 750 a 980 μm [4].

V rámci této práce byla použita mnohavidová vlákna s rozměry jádra 550, 635 a 750 μm , z důvodu snadného navázání optického svazku a snazší výroby drážek rozbočnic o těchto rozměrech.

3. Planární optická rozbočnice

Planární optická rozbočnice je planární struktura, jejímž úkolem je rozdělit vstupní optický výkon na několik výstupů s ideálně nulovými ztrátami. Tyto rozbočnice lze rozdělit podle několika parametrů. Jedním z nich je počet vedených vidů, v případě jednoho vedeného vidu mluvíme o jednovidové rozbočnici. Když je počet vedených vidů více, mluvíme o mnohovidové rozbočnici. Dále lze rozbočnice rozdělit podle počtu výstupních větví. Základním typem rozbočnice je struktura označovaná $1 \times 2Y$ (obr. 3.1), tedy rozbočnice s jedním vstupním vlnovodem, který je rozdělen do dvou výstupních větví. Pomocí kaskádového řazení struktur $1 \times 2Y$ lze jednoduše vytvořit struktury $1 \times 4Y$, $1 \times 8Y$ a vyšší, které rovnoměrně dělí vstupní výkon na výstupní větve. Mezi méně běžné rozbočnice patří ty, které mají lichý počet výstupních větví. U nich je složitější dosáhnout rovnoměrného rozdělení vstupního výkonu, a proto je návrh komplikovanější. Samostatnou skupinou jsou atypické struktury, jež dělí vstupní výkon nesymetricky, které jsou navrženy pro konkrétní aplikace.



Obr. 3.1: Planární optická rozbočnice $1 \times 2Y$.

Pro tuto práci byla zvolena pro všechny případy planární optická rozbočnice 1x2Y se skokovou změnou indexu lomu, z důvodu nejjednodušší realizace. Tato struktura se skládá z následujících částí: vstupní obdélníkový vlnovod, do kterého se vkládá vlákno bez primární ochrany. Následuje část podélně se rozšiřujícího se vlnovodu nazývaná „taperovaný“ vlnovod, který rovnoměrně dělí vstupní optický výkon do obou větví. Následují 2 větve, vytvořené ze zatočených vlnovodů, vedoucí signál do výstupních vlnovodů. Poslední částí jsou výstupní obdélníkové vlnovody, do kterých se vkládají výstupní vlákna bez primární ochrany.

3.1 Volba materiálů

Aby byla splněna podmínka šíření světla ve vlnovodu, musí mít vlnovodná vrstva vyšší hodnotu indexu lomu než okolní prostředí. Ze zadání dále vyplývá, že použité materiály musí být odolné teplotám do 125°C.

Jedním z vybraných materiálů pro vlnovodnou vrstvu byl epoxidový polymer Epocore od firmy ©micro resist technology GmbH. Výrobce udává teplotní odolnost až do 230°C [6].

Jako další vhodný materiál pro vlnovodnou vrstvu byl zvolen polymer NOA83H od firmy Norland Optical Adhesive. U tohoto polymeru výrobce udává teplotní odolnost až do 150°C [7].

Polydimethyldiphenylsiloxan (PDMDPS) s obchodním označením LS-6943 byl vybrán jako další materiál pro vlnovodnou vrstvu. Výrobce je firma NuSil Technology a udává maximální provozní teplotu 260°C [8].

Jako jeden z materiálů pro substrát a krycí vrstvu byl zvolen polymer ZEONEX® E48R od firmy ZEON Corporation, u kterého výrobce udává teplotní odolnost až do 139°C [9].

Dalším vhodným materiálem pro substrát a krycí vrstvu je polykarbonát Makrolon® GP od firmy Bayer, u kterého výrobce udává teplotní odolnost až do 148°C [10].

Polydimethylsiloxan (PDMS) s obchodním označením Sylgard 184 byl vybrán jako další materiál pro plášťovou vrstvu. Jedná se o materiál od firmy Dow Corning s maximální doporučenou provozní teplotou 200°C [11].

Z výše uvedených materiálů byly zvoleny kombinace substrátu a vlnovodných vrstev splňující podmínku šíření světla ve vlnovodu. Tyto kombinace jsou uvedeny tabulce Tab.1, kde jsou rovněž uvedeny indexy lomu jednotlivých materiálů.

Tab. 3.1: Parametry zvolených kombinací substrátu a vlnovodných vrstev

Označení varianty	Označení substrátu	Index lomu* substrátu pro $\lambda=650$ nm [-]	Označení vlnovodné vrstvy	Index lomu* vlnovodné vrstvy pro $\lambda=650$ nm [-]
V1	Zeonex 48	1,530	Epocore	1,595
V2	Zeonex 48	1,530	NOA83H	1,555
V3	Makrolon GP	1,583	Epocore	1,595
V4	PDMS	1,4123	PDMDPS	1,428

*Indexy lomu byly naměřeny pomocí metody popsané v podkapitole 5.1.

Jako přírodní vlákna byly zvoleny tyto tři druhy se skokovou změnou indexu lomu:

Křemenné vlákno FIP500550590 s šířkou jádra 500 ± 10 μm , pláště 550 ± 10 μm a primární ochranou 590 ± 10 μm od firmy Molex[®] s doporučenou maximální provozní teplotou 300°C [12].

Křemenné vlákno JTFLH6006301040 s šířkou jádra 600 ± 10 μm , pláště $630 +5/-10$ μm a primární ochranou 1040 ± 30 μm od firmy Molex[®] s doporučenou maximální provozní teplotou 140°C [13].

Plastové vlákno ESKA SH 3001 738 s šířkou jádra 738 μm , šířkou pláště 750 μm a šířkou primární ochrany $2,2$ mm. Vlákno je použitelné pro teploty až 70°C [3]. Toto vlákno sice nedosahuje požadované teploty odolnosti, ale je velmi levné, a proto vhodné na testování nových výrobních postupů optických rozbočnic.

3.2 Teoretické výpočty parametrů rozbočnic

K následujícím návrhům parametrů optické rozbočnice bylo postupováno podle analýzy, která byla publikována p. D. R. Beltramim v roce 1999 [14]. Tato analýza mimo jiné popisuje základní parametry optické rozbočnice typu 1x2Y a jejich omezující podmínky, které zaručí maximální přenos výkonu.

Komplementární maximální úhel, při kterém ještě dochází k totálnímu odrazu, je určen následujícím vztahem [14]:

$$\theta \leq \sin^{-1} \frac{\sqrt{n_f^2 - n_s^2}}{n_f} \quad (3.1)$$

kde n_f je index lomu jádra a n_s index lomu pláště. Důležitým parametrem je maximální úhel Ω , který svírá rameno s hlavní osou rozbočnice, aby přenos byl bezztrátový:

$$\Omega \leq \frac{\theta D}{D + 1} \quad (3.2)$$

kde D je normovaná délka ($D = 1$). Minimální délka podélně se rozšiřujícího vlnovodu (taper) je udávána vztahem:

$$d = \frac{D \rho_w (2 - \cos \Omega)}{\sin \Omega} \quad (3.3)$$

kde ρ_w je polovina šířky vstupního vlnovodu w_f . Kontrast indexů lomu lze získat ze vztahu:

$$\Delta = \frac{n_f^2 - n_s^2}{2n_f^2} \quad (3.4)$$

Numerická apertura určuje, pod jakým maximálním úhlem je možné do vlnovodu navázat paprsek, aby nedošlo k radiačním ztrátám. Je dána vztahem:

$$NA = \sqrt{n_f^2 - n_s^2} \quad (3.5)$$

Parametry Ω a d jsou znázorněny na obrázku 3.1.

Na základě vzorců 3.1 až 3.5 byly vypočítané ideální rozměry rozbočnic na základě indexů lomů materiálů, získaných z měření uvedených v podkapitole 5.1. Výsledky těchto výpočtů jsou uvedeny v tabulkách 3.2 až 3.5.

Tab. 3.2: Vypočítané parametry rozbočnice 1x2Y při použití materiálů Zeonex E48R/Epocore (V1).

λ [nm]	n_s^* [-]	n_f^* [-]	NA [-]	Δ [-]	Θ [°]	Ω [°]	d [mm] ($w_f=550 \mu\text{m}$)**	d [mm] ($w_f=635 \mu\text{m}$)**
532	1,536	1,610	0,482	0,045	17,44	8,72	1,83	2,12
650	1,530	1,595	0,451	0,040	16,41	8,21	1,95	2,25
850	1,525	1,586	0,436	0,038	15,94	7,97	2,00	2,31
1310	1,521	1,578	0,420	0,035	15,45	7,72	2,06	2,38
1550	1,519	1,574	0,412	0,034	15,19	7,60	2,10	2,42

*Indexy lomu byly naměřeny pomocí metody popsané v podkapitole 5.1.

** w_f je šířka vstupního a výstupních vlnovodů a zároveň průměr použitého vlákna.

Tab. 3.3: Vypočítané parametry rozbočnice 1x2Y při použití materiálů Zeonex E48R/NOA83H (V2).

λ [nm]	n_s^* [-]	n_f^* [-]	NA [-]	Δ [-]	Θ [°]	Ω [°]	d [mm] ($w_f=550 \mu\text{m}$)**	d [mm] ($w_f=635 \mu\text{m}$)**
532	1,536	1,564	0,295	0,018	10,86	5,43	2,92	3,37
650	1,530	1,555	0,278	0,016	10,29	5,14	3,08	3,56
850	1,525	1,550	0,277	0,016	10,30	5,15	3,07	3,55
1310	1,521	1,541	0,247	0,013	9,24	4,62	3,42	3,95
1550	1,519	1,539	0,247	0,013	9,25	4,62	3,42	3,95

*Indexy lomu byly naměřeny pomocí metody popsané v podkapitole 5.1.

** w_f je šířka vstupního a výstupních vlnovodů a zároveň průměr použitého vlákna.

Tab. 3.4: Vypočítané parametry rozbočnice 1x2Y při použití materiálů Makrolon GP/Epocore (V3).

λ [nm]	n_s^* [-]	n_f^* [-]	NA [-]	Δ [-]	Θ [°]	Ω [°]	d [mm] ($w_f=550 \mu\text{m}$)**	d [mm] ($w_f=635 \mu\text{m}$)**
532	1,597	1,610	0,204	0,008	7,29	3,64	4,34	5,01
650	1,583	1,595	0,195	0,007	7,03	3,52	4,49	5,19
850	1,576	1,586	0,178	0,006	6,44	3,22	4,91	5,66
1310	1,566	1,578	0,194	0,008	7,07	3,54	4,47	5,16
1550	1,564	1,574	0,177	0,006	6,46	3,23	4,89	5,64

*Indexy lomu byly naměřeny pomocí metody popsané v podkapitole 5.1.

** w_f je šířka vstupního a výstupních vlnovodů a zároveň průměr použitého vlákna.

Tab. 3.5: Vypočítané parametry rozbočnice 1x2Y při použití materiálů PDMS/PDMDPS (V4).

λ [nm]	n_s^* [-]	n_f^* [-]	NA [-]	Δ [-]	Θ [°]	Ω [°]	d [mm] ($w_f=550 \mu\text{m}$)**	d [mm] ($w_f=635 \mu\text{m}$)**	d [mm] ($w_f=750 \mu\text{m}$)**
532	1,417	1,435	0,227	0,012	9,08	4,54	3,48	4,02	4,75
650	1,413	1,428	0,206	0,010	8,31	4,16	3,80	4,39	5,19
850	1,407	1,424	0,219	0,012	8,86	4,43	3,57	4,12	4,87
1310	1,402	1,419	0,219	0,012	8,88	4,44	3,56	4,11	4,86
1550	1,401	1,417	0,212	0,011	8,62	4,31	3,67	4,24	5,00

*Indexy lomu byly naměřeny pomocí metody popsané v podkapitole 5.1.

** w_f je šířka vstupního a výstupních vlnodů a zároveň průměr použitého vlákna.

Z teoretického návrhu optických rozbočnic uvedených v tab. 3.2-3.5 vyplývá, že nejmenší rozměry podélně se rozšiřujícího se vlnovodu (d) je dosaženo pro optickou rozbočnici s vlnovodnou vrstvou Epocore a plášťovou vrstvou Zeonex E48R. Kde pro optimalizovanou pracovní délku 650 nm je rozměr taperu (d) 1,95 mm pro $w_f = 550 \mu\text{m}$ a 2,25 mm pro $w_f = 635 \mu\text{m}$. Kontrast indexů lomu u tohoto návrhu je $\Delta = 0,04$ (viz tab. 3.2). Největší rozměr pro rozbočnici je v případě rozbočnice s vlnovodnou vrstvou Epocore a plášťovou vrstvou Makrolon GP, kdy je rozměr taperu (d) 3,8 mm pro $w_f = 550 \mu\text{m}$, 4,39 mm pro $w_f = 635 \mu\text{m}$ a 5,19 mm pro $w_f = 750 \mu\text{m}$ pro vlnovou délku 650 nm. Z hlediska kontrastu indexu lomu Δ vyplývá, že čím větší kontrast lomu, tím lze dosáhnout menších rozměrů optických rozbočnic. Nejmenší rozměr $d = 1,83 \text{ mm}$ je pro typ Epocore/Zeonex E48R s $w_f = 550 \mu\text{m}$ pro vlnovou délku 532 nm, kdy $\Delta = 0,045$ (viz tab. 3.2) a naopak největší rozměr $d = 5,66 \text{ mm}$, kdy $\Delta = 0,006$, je pro kombinaci materiálů Makrolon GP/Zeonex E48R s $w_f = 635 \mu\text{m}$ pro vlnovou délku 850 nm (viz tab. 3.4).

3.3 Metoda šíření optického svazku (BPM)

K přesnému návrhu parametrů rozbočnice byl využit program BeamPROP™ od společnosti RSoft, který dokáže simulovat průchod světla rozbočnicí pomocí metody šíření optického svazku, anglicky Beam Propagation Method (BPM). Tento přístup dokáže aproximovat šíření monochromatické vlny ve skalárním poli a řešit jej numericky. Využívá k tomu metodu konečných diferencí pro řešení Helmholtzových vlnových rovnic v paraxiálním nebo parabolickém přiblížení [3,15,16].

Ve skalárním poli (zanedbáme polarizační efekty) lze Helmholtzovu rovnici pro šíření monochromatické vlny vyjádřit jako [3,15,16]:

$$\frac{\delta^2 \phi}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \phi}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 \phi}{\delta z^2} + k(x, y, z)^2 \phi = 0 \quad (3.6)$$

Kde Φ je proměnné elektrické pole šířící se strukturou, k je vlnové číslo a x, y, z jsou prostorové souřadnice. Když uvažujeme malé změny pole, lze toto pomalu se měnící se pole u vyjádřit ve směru šíření z [3,15,16]:

$$\Phi(x, y, z) = u(x, y, z) e^{j\bar{k}z} \quad (3.7)$$

kde \bar{k} vyjadřuje střední změnu fáze šířícího se pole Φ a je označováno referenčním vlnovým číslem.

S použitím vzorců 3.6 a 3.7 lze vyjádřit Helmholtzovu rovnici pro pomalu měnící se pole [3,15,16]:

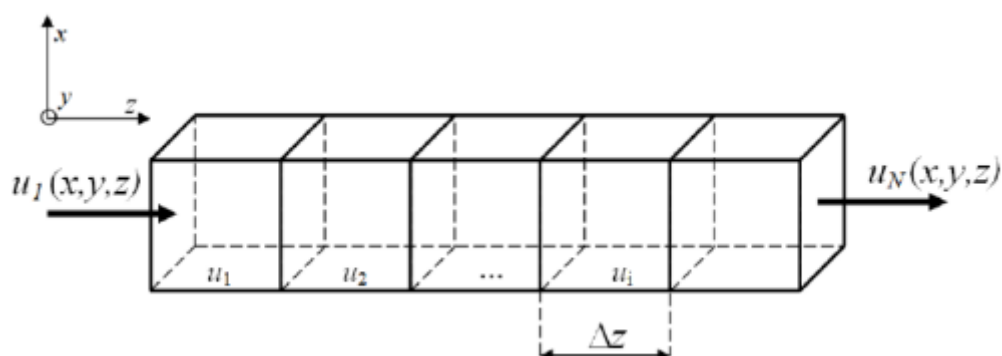
$$\frac{\delta^2 u}{\delta z^2} + 2i\bar{k} \frac{\delta u}{\delta z} + \frac{\delta^2 u}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 u}{\delta y^2} + (k^2 - \bar{k}^2) u = 0 \quad (3.8)$$

Ke zjednodušení rovnice 3.8 se využije takzvané paraxiální nebo parabolické přiblížení, kdy je zanedbána druhá derivace členu u podle souřadnice z , jelikož šířící se paprsky svírají velmi malý úhel s osou šíření z a jedná se o pomalu se měnící se pole. Z takto zjednodušené rovnice lze vyjádřit základní rovnici pro metodu BPM v 3D prostoru [15]:

$$\frac{\delta u}{\delta z} = \frac{j}{2\bar{k}} \left(\frac{\delta^2 u}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 u}{\delta y^2} + (k^2 - \bar{k}^2) u \right) \quad (3.9)$$

Tento přístup přináší řešení šíření optického svazku pomocí jednoduché integrace a s tím nízkou výpočetní náročnost v porovnání s číselným řešením Helmholtzových vlnových rovnic v základním tvaru. Na druhou stranu se výše popsaným zanedbáním druhé derivace členu u podle souřadnice z ztrácí tento přístup možnost řešit zpětné šíření a proto struktury s významnými odrazy nebudou modelovány zcela přesně.

Program BeamPROP™ využívá k řešení rovnice 3.9 metodu konečných diferencí založenou na Crank-Nicholsonově schématu zobrazeném na obrázku 3.2. Jedná se o metodu, která ze znalosti pole šířícího se ve směru z v diskrétní rovině u nachází číselné rovnice určující pole v následující rovině $u+1$. Po opakování těchto elementárních kroků lze určit výsledné pole procházející celou strukturou.



Obr. 3.2: Crank-Nicholsonovo schéma. [16]

Crank-Nicholsonovo metoda lze vyjádřit rovnicí:

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta z} = \frac{j}{2k} \left(\frac{\delta^2}{\Delta x^2} + \left(k(x_i, z_{n+1/2})^2 - \bar{k}^2 \right) \right) \frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{2} \quad (3.10)$$

kde δ^2 je standardní diferenční operátor určený vztahem:

$$\delta^2 u_i = (u_{i+1} + u_{i-1} - 2u_i) \quad (3.11)$$

3.4 Návrh rozbočnice pomocí metody BPM

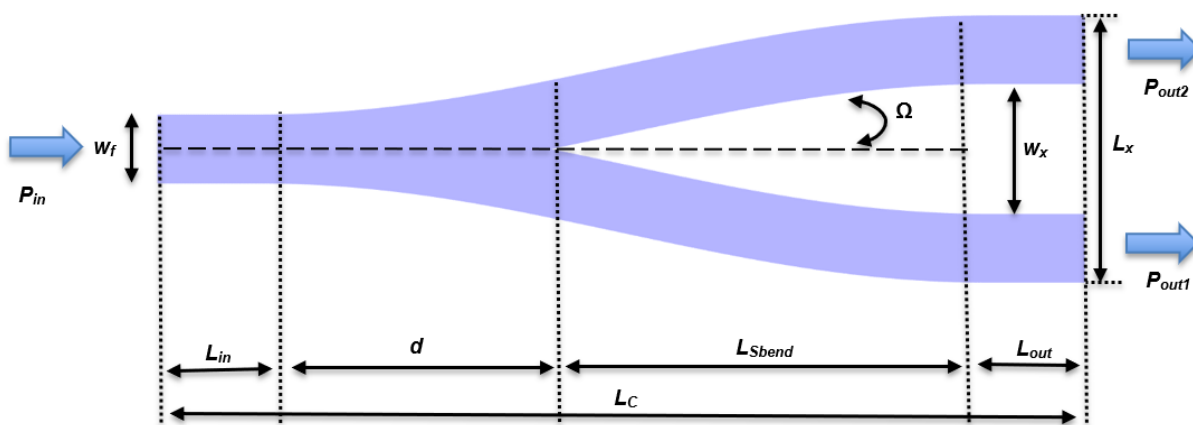
K optimalizaci rozměrů 1x2Y rozbočnic byl použit program BeamPROP™ od společnosti RSoft. V tomto programu lze navrhnout 2D motiv rozbočnice a simulovat její přenosové vlastnosti. Bylo navrženo dohromady 10 motivů pro zvolené kombinace materiálů (viz tab. 3.1) a různá přívodní vlákna.

Pomocí tohoto programu lze navrhnout a optimalizovat rozbočnici tak, aby rovnoměrně rozdělovala vstupní výkon na oba dva výstupy a zároveň měla co nejmenší rozměry, což sníží celkový vložný útlum.

Návrh motivu rozbočnice probíhá ve dvou krocích. Prvním krokem je zadání vstupních parametrů rozbočnice jako jsou základní rozměry vlnovodu, znázorněné na obrázku 3.3, indexy lomu substrátu a vlnovodné vrstvy a vlnová délka, pro kterou je rozbočnice primárně

určená. Šířka a výška vlnovodu w_f byla vždy nastavena jako průměr vstupních a výstupních vláken. Rozbočnice byly navrhovány pro vlnovou délku 650 nm.

Druhým krokem je simulace přenosových vlastností navržené rozbočnice. Výstupem simulace je graf rozložení optického normovaného výkonu ve struktuře. Cílem je získat na výstupu obou ramen hodnotu optického normovaného výkonu rovné 0,5. Tuto hodnotu lze dosáhnout optimalizací délky rozbočnice L_{Sbend} a změnou vyvazovacího úhlu Ω , který určuje, jak moc se rozbočnice „rozevívá“. Při návrhu bylo respektováno pravidlo, že mezera mezi výstupními vlnovody w_x bude alespoň tak veliká jako vstupní šířka vlnovodu w_f .



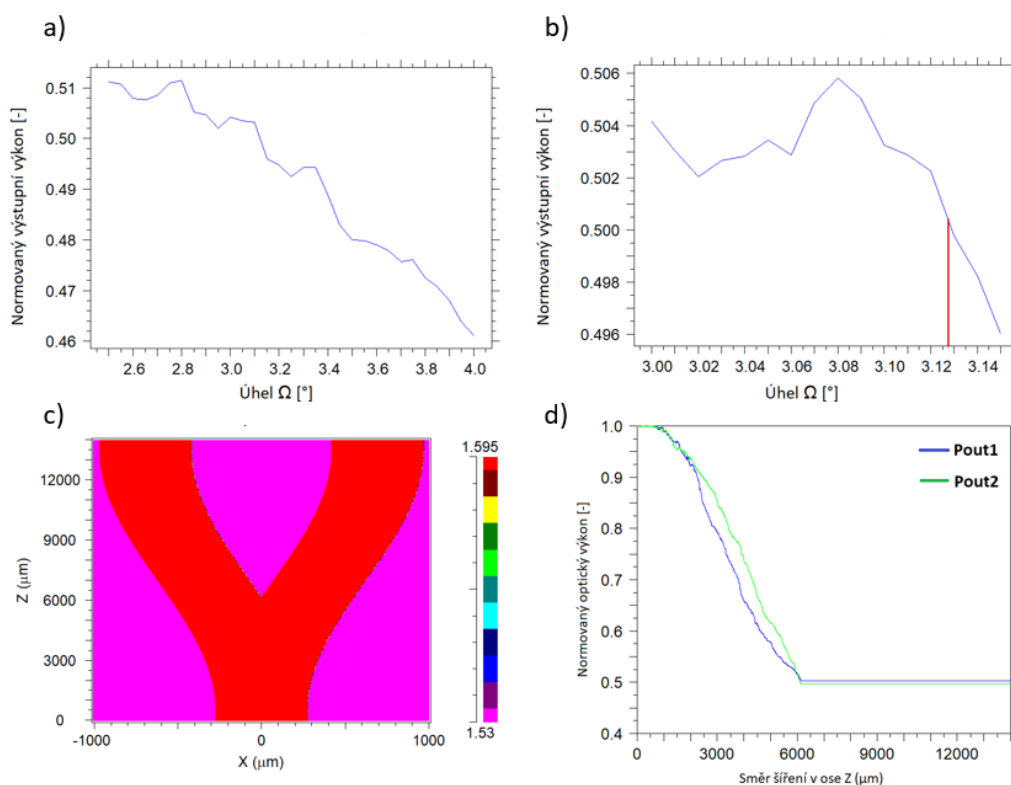
Obr. 3.3: Rozbočnice typu 1x2Y s vybranými parametry.

Na následujících obrázcích 3.4 až 3.13 jsou vždy uvedeny profily indexů lomu a průběh normovaného optického výkonu podél rozbočnice vytvořených pomocí programu BeamPROP™ pro optimalizované geometrické rozměry pro vlnovou délku 650 nm. Také jsou uvedeny závislosti optického normovaného výstupního výkonu na úhlu Ω (viz obr. 3.3), podle kterých byl stanoven optimalizovaný rozměr pro úhel Ω , tak aby optický normovaný výkon vystupující z každého ramene byl ideálně roven hodnotě 0,5 a bylo tedy rozdělení optického výkonu symetrické.

Pro optickou rozbočnici s vlnovodnou vrstvou Epocore a plášťovou vrstvou Zeonex E48R (variantu V1) byly vytvořeny dva motivy, kde u prvního je šířka vstupního a výstupních vlnovodů $w_f = 550 \mu\text{m}$ a u druhého $w_f = 635 \mu\text{m}$.

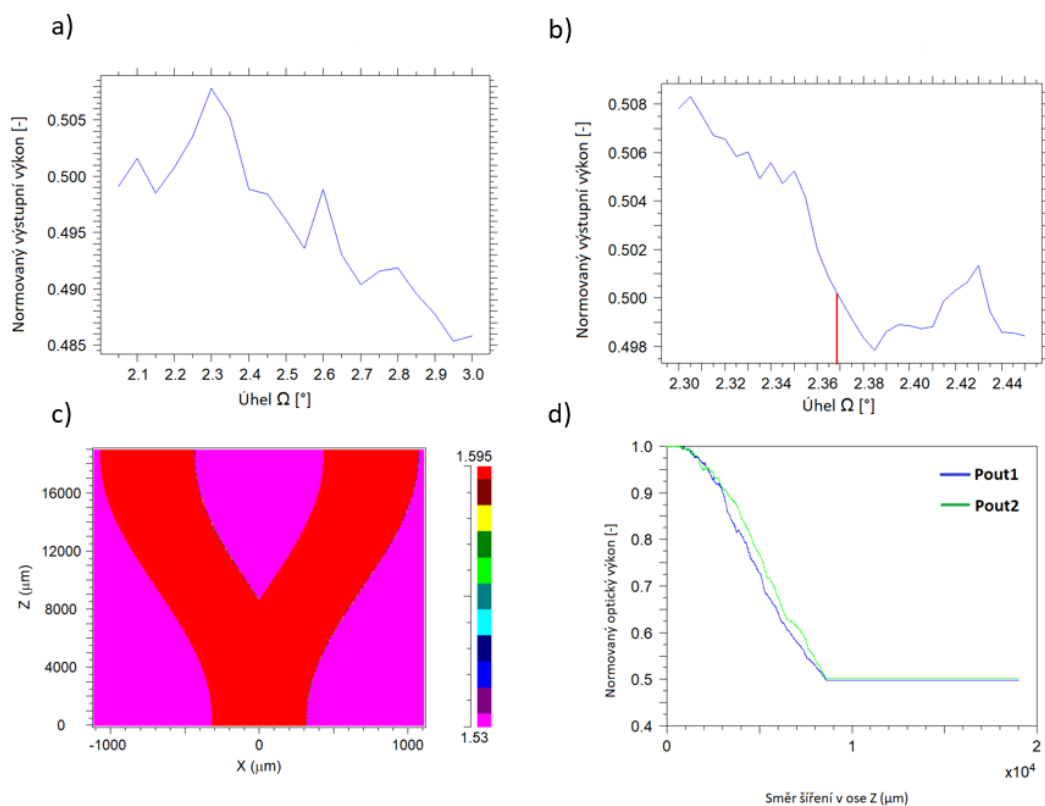
Pro rozbočnici se šířkou vstupního vlnovodu 550 μm je na obrázku 3.4.a uveden graf závislosti normovaného výstupního výkonu z prvního ramene na úhlu rozevírání rozbočnic Ω . Hrubým odhadem byl stanoven jako optimalizovaný úhel 3,055°. Avšak po zpřesňující simulaci této závislosti s jemnějším krokem okolo hodnoty 0,5 normovaného výkonu (Obr. 3.4.b), vyplývá,

že lepšího výsledku je dosaženo s úhlem odpovídající hodnotě $3,127^\circ$ pro celkovou délku rozbočnice $L_c = 14$ mm. Na obrázku 3.4.c je uveden profil indexu lomu této kombinace materiálů. I s touto nepřesností je dosaženo rozložení optického normovaného výkonu $P_{out1} = 50,3\%$ a $P_{out2} = 49,7\%$ (Obr. 3.4.d).



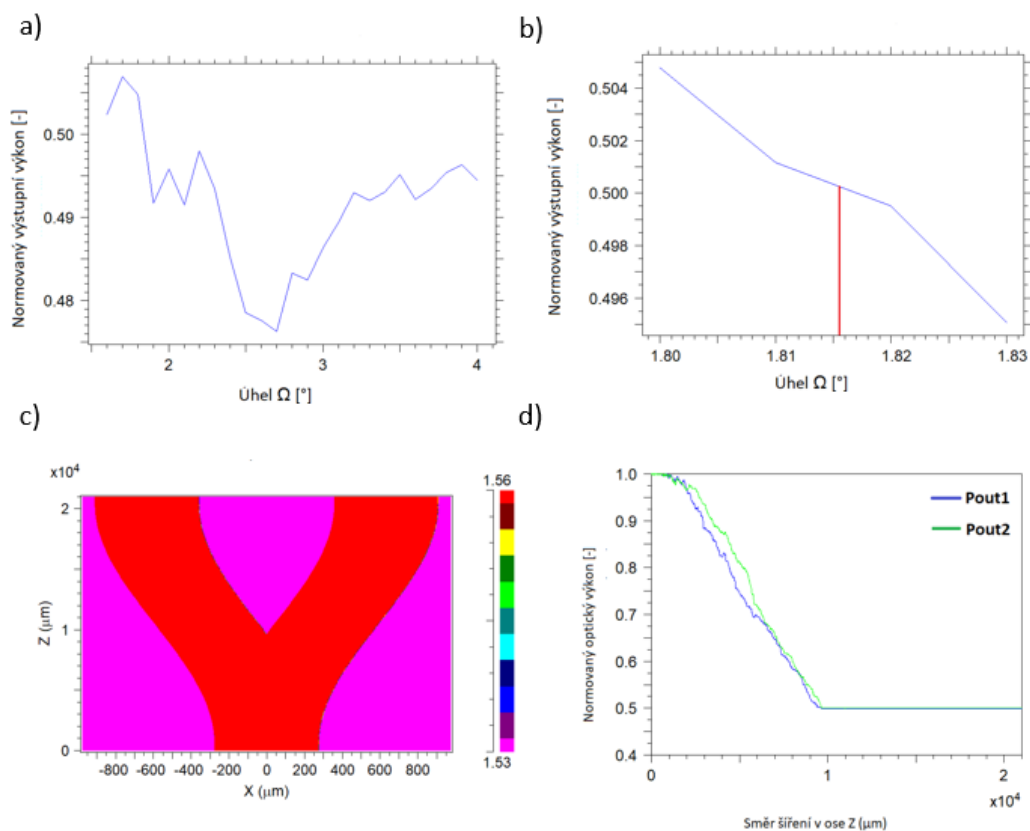
Obr. 3.4: Návrh rozbočnice s vlnovodnou vrstvou Epcore a plášťovou vrstvou Zeonex (varianta V1) s $w_f = 550 \mu\text{m}$, a) závislost výstupního normovaného výkonu na úhlu Ω , b) detail závislosti výstupního výkonu na úhlu Ω , c) profil indexu lomu, d) rozložení optického normovaného výkonu.

Pro případ rozbočnice s šířkou vstupního vlnovodu $635 \mu\text{m}$ je uvedena závislost normovaného vstupního vlnovodu z prvního ramene na obrázku 3.5.a. Hrubým odhadem byl stanoven jako ideální úhel $2,388^\circ$. Avšak po zpřesňující simulaci této závislosti s jemnějším krokem okolo hodnoty 0,5 normovaného výkonu (Obr. 3.5.b), vyplývá, že lepšího výsledku by bylo dosaženo s úhlem odpovídající hodnotě $3,368^\circ$ pro celkovou délku rozbočnice $L_c = 19$ mm. Na obrázku 3.5.c je uveden profil indexu lomu této kombinace materiálů. I s touto nepřesností je dosaženo rozložení optického normovaného výkonu $P_{out1} = 49,8\%$ a $P_{out2} = 50,2\%$ (Obr. 3.5.d).



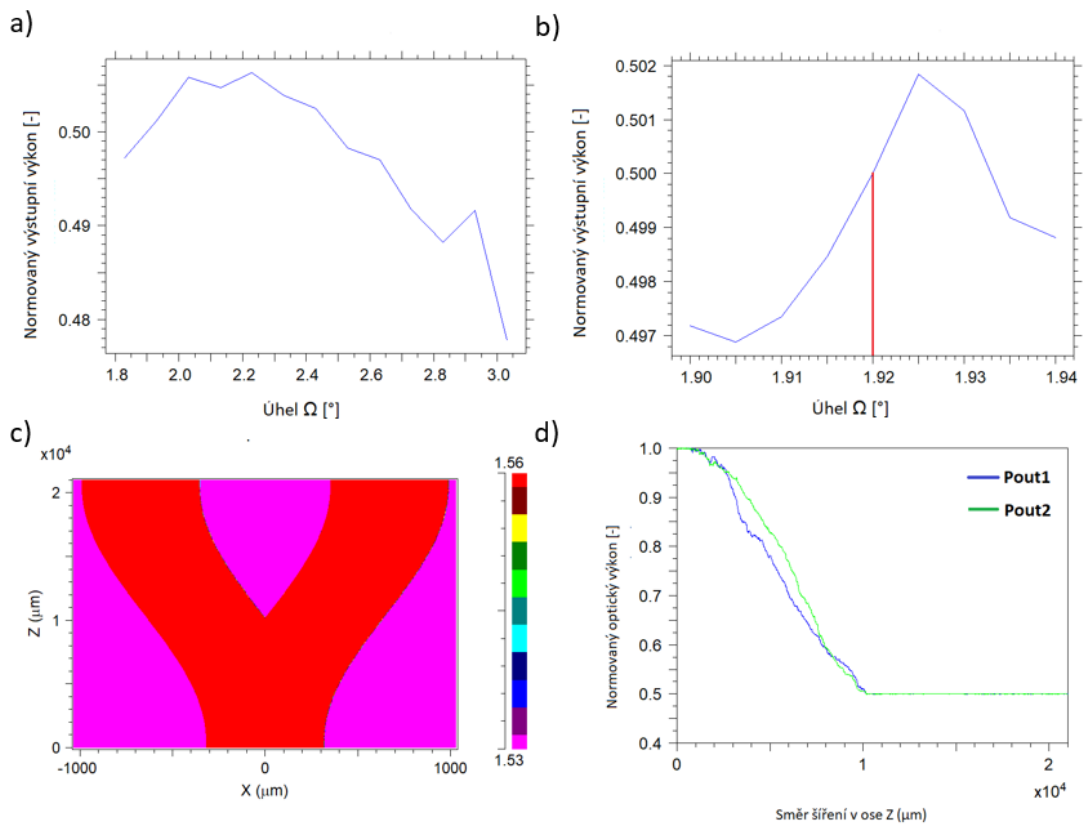
Obr 3.5: Návrh rozbočnice s vlnovodnou vrstvou Epocore a plášťovou vrstvou Zeonex (varianta V1) s $w_f = 635 \mu\text{m}$, a) závislost výstupního normovaného výkonu na úhlu Ω , b) detail závislosti výstupního výkonu na úhlu Ω , c) profil indexu lomu, d) rozložení optického normovaného výkonu.

Pro optickou rozbočnici s vlnovodnou vrstvou NOA83H a plášťovou vrstvou Zeonex E48R (variantu V2) byly vytvořeny dva motivy, kde u prvního je šířka vstupního a výstupních vlnovodů $w_f = 550 \mu\text{m}$ a u druhého $w_f = 635 \mu\text{m}$. Pro rozbočnici se šířkou vstupního vlnovodu $550 \mu\text{m}$ je na obrázku 3.6.a uveden graf závislosti normovaného výstupního výkonu z prvního ramene na úhlu rozevírání rozbočnic Ω . Po simulaci této závislosti s jemnějším krokem okolo hodnoty 0,5 normovaného výkonu (Obr. 3.6.b), vyplývá, že jako ideální se jeví úhel odpovídající hodnotě $1,817^\circ$ pro celkovou délku rozbočnice $L_c = 21 \text{ mm}$. Na obrázku 3.6.c je uveden profil indexu lomu této kombinace materiálů. S tímto úhlem a délkou je dosaženo rozložení optického normovaného výkonu $P_{\text{out1}} = 50\%$ a $P_{\text{out2}} = 50\%$ (Obr. 3.6.d).



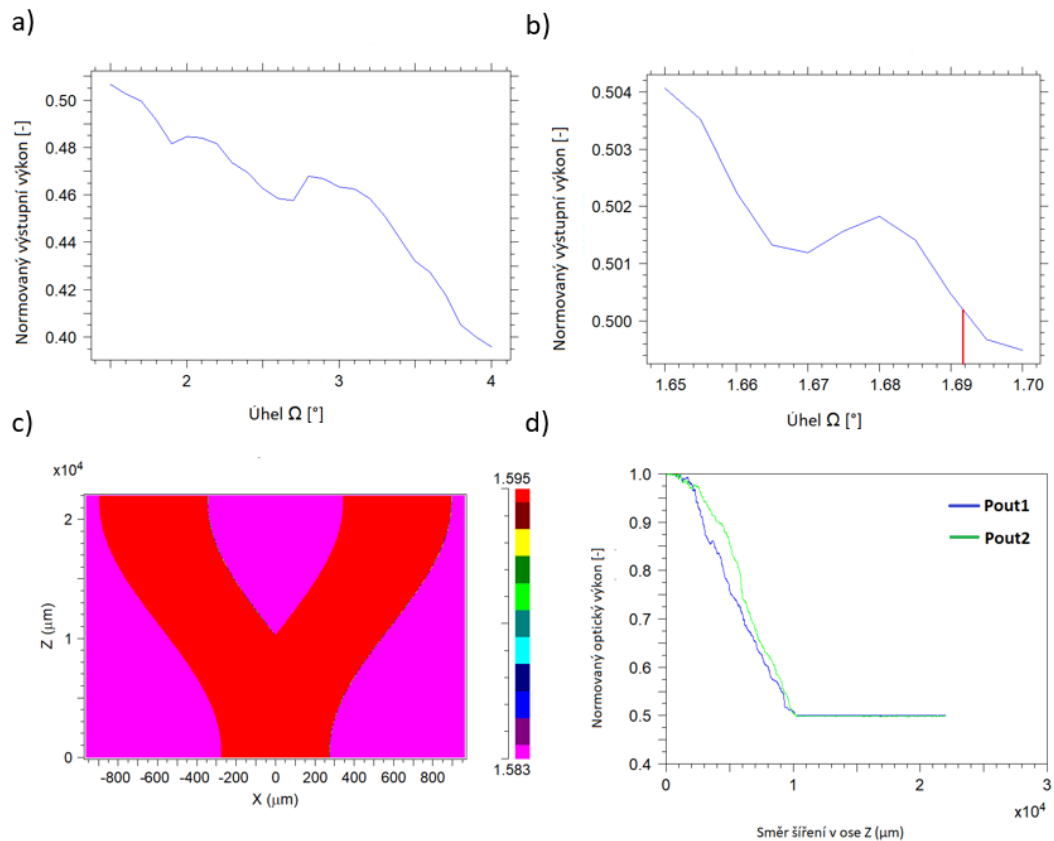
Obrázek 3.6: Návrh rozbočnice s vlnovodnou vrstvou NOA83H a plášťovou vrstvou Zeonex (varianta V2) s $w_f = 550 \mu\text{m}$, a) závislost výstupního normovaného výkonu na úhlu Ω , b) detail závislosti výstupního výkonu na úhlu Ω , c) profil indexu lomu, d) rozložení optického normovaného výkonu.

Pro případ rozbočnice s šířkou vstupního vlnovodu $635 \mu\text{m}$ je uvedena závislost normovaného vstupního vlnovodu z prvního ramene na obrázku 3.7.a. Po simulaci této závislosti s jemnějším krokem okolo hodnoty 0,5 normovaného výkonu (Obr. 3.7.b), vyplývá, že jako ideální se jeví úhel odpovídající hodnotě $1,92^\circ$ pro celkovou délku rozbočnice $L_c = 21 \text{ mm}$. Na obrázku 3.7.c je uveden profil indexu lomu této kombinace materiálů. S tímto úhlem a délkou je dosaženo rozložení optického normovaného výkonu $P_{\text{out}1} = 50\%$ a $P_{\text{out}2} = 50\%$ (Obr. 3.7.d).



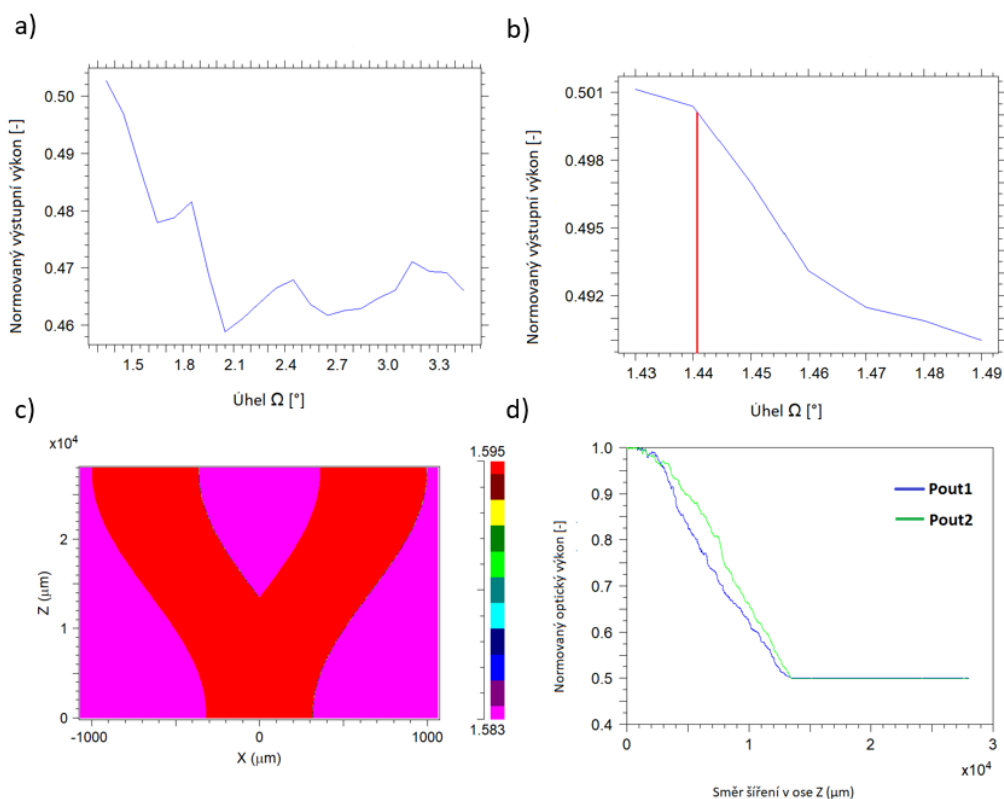
Obrázek 3.7: Návrh rozbočnice s vlnovodnou vrstvou NOA83H a plášťovou vrstvou Zeonex (varianta V2) s $w_f = 635 \mu\text{m}$, a) závislost výstupního normovaného výkonu na úhlu Ω , b) detail závislosti výstupního výkonu na úhlu Ω , c) profil indexu lomu, d) rozložení optického normovaného výkonu.

Pro optickou rozbočnici s vlnovodnou vrstvou Epocore a plášťovou vrstvou Makrolon GP (variantu V3) byly vytvořeny dva motivy, kde u prvního je šířka vstupního a výstupních vlnovodů $w_f = 550 \mu\text{m}$ a u druhého $w_f = 635 \mu\text{m}$. Pro rozbočnici se šířkou vstupního vlnovodu $550 \mu\text{m}$ je na obrázku 3.8.a uveden graf závislosti normovaného výstupního výkonu z prvního ramene na úhlu rozevírání rozbočnic Ω . Po simulaci této závislosti s jemnějším krokem okolo hodnoty 0,5 normovaného výkonu (Obr. 3.8.b), vyplývá, že jako ideální se jeví úhel odpovídající hodnotě $1,69^\circ$ pro celkovou délku rozbočnice $L_c = 22 \text{ mm}$. Na obrázku 3.8.c je uveden profil indexu lomu této kombinace materiálů. S tímto úhlem a délkou je dosaženo rozložení optického normovaného výkonu $P_{\text{out1}} = 50,1\%$ a $P_{\text{out2}} = 49,9\%$ (Obr. 3.8.d).



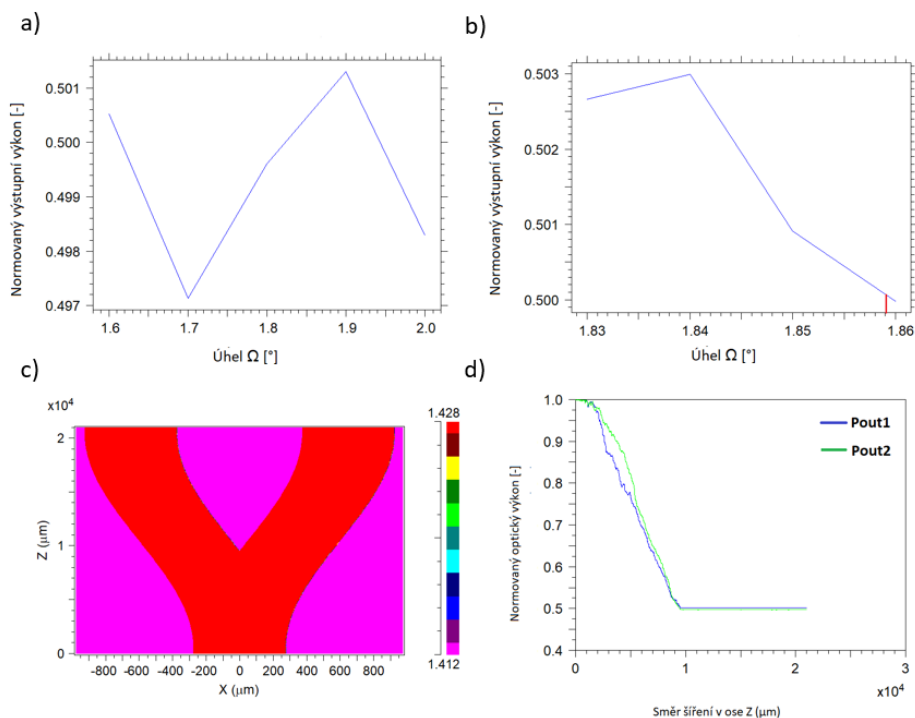
Obrázek 3.8: Návrh rozbočnice s vlnovodnou vrstvou Epocore a plášťovou vrstvou Makrolon GP (varianta V3) s $w_f = 550 \mu\text{m}$, a) závislost výstupního normovaného výkonu na úhlu Ω , b) detail závislosti výstupního výkonu na úhlu Ω , c) profil indexu lomu, d) rozložení optického normovaného výkonu.

Pro případ rozbočnice s šířkou vstupního vlnovodu $635 \mu\text{m}$ je uvedena závislost normovaného vstupního vlnovodu z prvního ramene na obrázku 3.9.a. Po simulaci této závislosti s jemnějším krokem okolo hodnoty 0,5 normovaného výkonu (Obr. 3.9.b), vyplývá, že jako ideální se jeví úhel odpovídající hodnotě $1,411^\circ$ pro celkovou délku rozbočnice $L_c = 28 \text{ mm}$. Na obrázku 3.9.c je uveden profil indexu lomu této kombinace materiálů. S tímto úhlem a délkou je dosaženo rozložení optického normovaného výkonu $P_{\text{out1}} = 50\%$ a $P_{\text{out2}} = 50\%$ (Obr. 3.9.d).



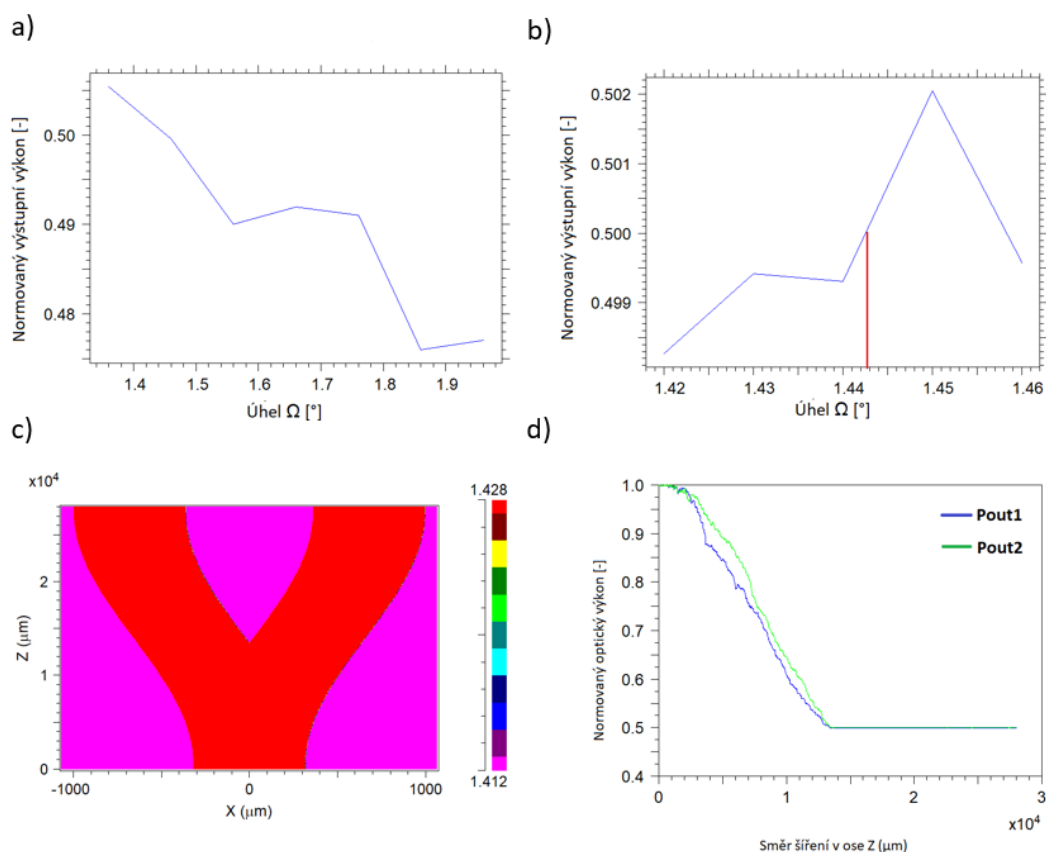
Obrázek 3.9: Návrh rozbočnice s vlnovodnou vrstvou Epocore a plášťovou vrstvou Makrolon GP (varianta V3) s $w_f = 635 \mu\text{m}$, a) závislost výstupního normovaného výkonu na úhlu Ω , b) detail závislosti výstupního výkonu na úhlu Ω , c) profil indexu lomu, d) rozložení optického normovaného výkonu.

Pro optickou rozbočnici s vlnovodnou vrstvou PDMDPS a plášťovou vrstvou PDMS (variantu V4) byly vytvořeny celkem čtyři motivy, kde u prvního je šířka vstupního a výstupních vlnovodů $w_f = 550 \mu\text{m}$ a u druhého $w_f = 635 \mu\text{m}$, pro zbylé dva je $w_f = 750 \mu\text{m}$. Pro rozbočnici se šířkou vstupního vlnovodu $550 \mu\text{m}$ je na obrázku 3.10.a uveden graf závislosti normovaného výstupního výkonu z prvního ramene na úhlu rozevírání rozbočnic Ω . Po simulaci této závislosti s jemnějším krokem okolo hodnoty 0,5 normovaného výkonu (Obr. 3.10.b), vyplývá, že jako ideální se jeví úhel odpovídající hodnotě $1,859^\circ$ pro celkovou délku rozbočnice $L_c = 21 \text{ mm}$. Na obrázku 3.10.c je uveden profil indexu lomu této kombinace materiálů. S tímto úhlem a délkou je dosaženo rozložení optického normovaného výkonu $P_{\text{out}1} = 50\%$ a $P_{\text{out}2} = 50\%$ (Obr. 3.10.d).



Obrázek 3.10: Návrh rozbočnice s vlnovodnou vrstvou PDMDPS a plášťovou vrstvou PDMS (varianta V4) s $w_f = 550 \mu\text{m}$, a) závislost výstupního normovaného výkonu na úhlu Ω , b) detail závislosti výstupního výkonu na úhlu Ω , c) profil indexu lomu, d) rozložení optického normovaného výkonu.

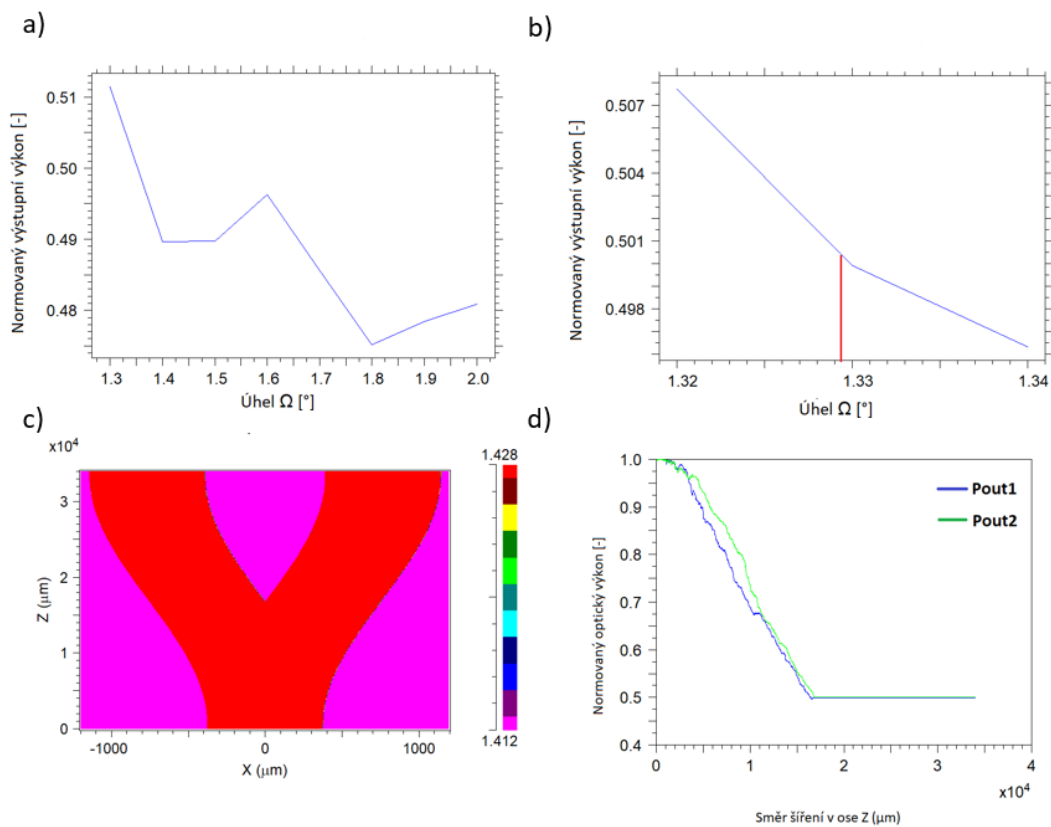
Pro případ rozbočnice s šířkou vstupního vlnovodu $635 \mu\text{m}$ je uvedena závislost normovaného vstupního vlnovodu z prvního ramene na obrázku 3.11.a. Po simulaci této závislosti s jemnějším krokem okolo hodnoty 0,5 normovaného výkonu (Obr. 3.11.b), vyplývá, že jako ideální se jeví úhel odpovídající hodnotě $1,4425^\circ$ pro celkovou délku rozbočnice $L_c = 28 \text{ mm}$. Na obrázku 3.11.c je uveden profil indexu lomu této kombinace materiálů. S tímto úhlem a délkou je dosaženo rozložení optického normovaného výkonu $P_{\text{out1}} = 50,1\%$ a $P_{\text{out2}} = 49,9\%$ (Obr. 3.11.d).



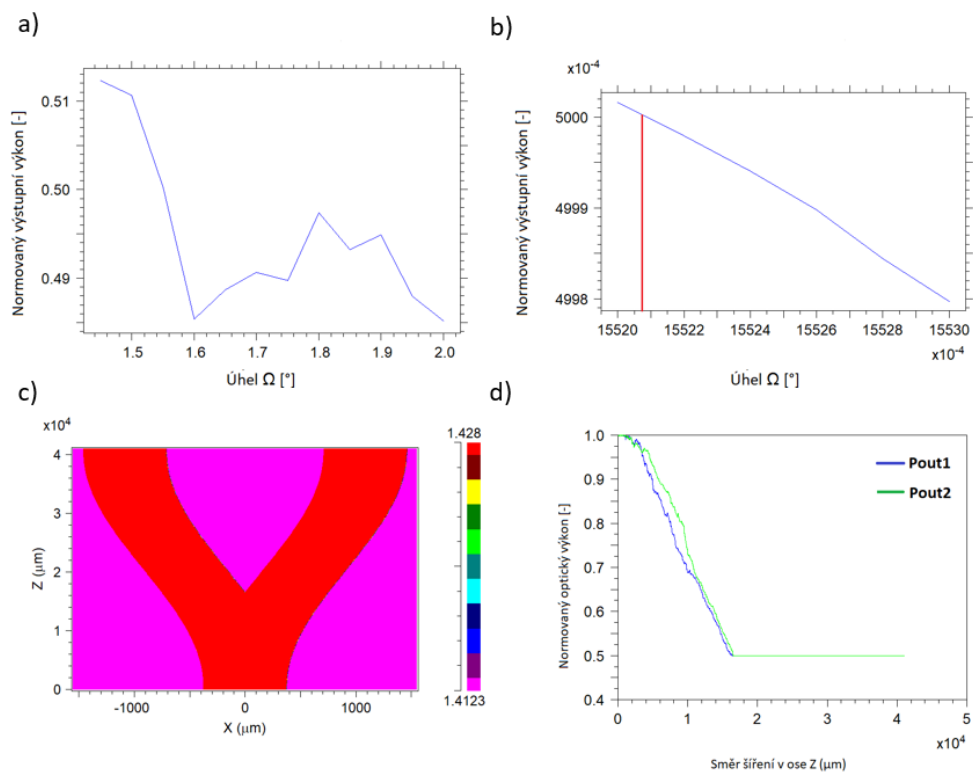
Obrázek 3.11: Návrh rozbočnice pro variantu V4(PDMS/PDMDPS) $w_f = 635 \mu\text{m}$, a) závislost výstupního normovaného výkonu na úhlu Ω , b) detail závislosti výstupního výkonu na úhlu Ω , c) profil indexu lomu, d) rozložení optického normovaného výkonu.

Pro případ rozbočnice s šířkou vstupního vlnovodu $750 \mu\text{m}$ je uvedena závislost normovaného vstupního vlnovodu z prvního ramene na obrázku 3.12.a. Po simulaci této závislosti s jemnějším krokem okolo hodnoty 0,5 normovaného výkonu (Obr. 3.12.b), vyplývá, že jako ideální se jeví úhel odpovídající hodnotě $1,3299^\circ$ pro celkovou délku rozbočnice $L_c = 34 \text{ mm}$. Na obrázku 3.12.c je uveden profil indexu lomu této kombinace materiálů. S tímto úhlem a délkou je dosaženo rozložení optického normovaného výkonu $P_{\text{out1}} = 50\%$ a $P_{\text{out2}} = 50\%$ (Obr. 3.12.d). Po vytištění tohoto motivu na 3D tiskárně bylo zjištěno, že ramena jsou příliš blízko sebe a tištěný materiál se z obou ramen slévá do jednoho a motiv rozbočnice je velice nepřesný (Obr. 5.11.a). Z tohoto důvodu byl navržen další motiv pro případ rozbočnice s šířkou vstupního vlnovodu $750 \mu\text{m}$, který je delší a vzdálenost mezi rameny je větší. Závislost normovaného vstupního vlnovodu z prvního ramene je uvedena na obrázku 3.13.a. Po simulaci této závislosti s jemnějším krokem okolo hodnoty 0,5 normovaného výkonu (Obr. 3.13.b), vyplývá, že jako ideální se jeví úhel odpovídající hodnotě $1,5521^\circ$ pro celkovou délku rozbočnice $L_c = 40 \text{ mm}$. Na obrázku 3.13.c je uveden profil indexu lomu této kombinace

materiálů. S tímto úhlem a délkou je dosaženo rozložení optického normovaného výkonu $P_{out1} = 50\%$ a $P_{out2} = 50\%$ (Obr. 3.13.d).



Obrázek 3.12: Návrh rozbočnice pro variantu V4(PDMS/PDMDPS) $w_f = 750 \mu\text{m}$ (užší), a) závislost výstupního normovaného výkonu na úhlu Ω , b) detail závislosti výstupního výkonu na úhlu Ω , c) profil indexu lomu, d) rozložení optického normovaného výkonu.



Obrázek 3.13: Návrh rozbočnice pro variantu V4(PDMS/PDMDPS) $w_f = 750 \mu\text{m}$ (širší), a) závislost výstupního normovaného výkonu na úhlu Ω , b) detail závislosti výstupního výkonu na úhlu Ω , c) profil indexu lomu, d) rozložení optického normovaného výkonu.

V tabulce 3.6 jsou shrnuty pro přehlednost rozměry optimalizovaných návrhu rozbočnic, získaných pomocí počítačové simulace metodou BPM. Délka vstupních a výstupních vlnovodů vždy odpovídá hodnotě $0,5 \text{ mm}$.

Tab. 3.6: Navrhnuté rozměry rozbočnic pro varianty V1-V4.

Varianta	L_c [μm]	L_x [μm]	w_f [μm]	L_{sbend} [μm]	Ω [$^\circ$]	d [μm]	P_{out1} [-]	P_{out2} [-]
V1	14000	1940	550	7840	3,055	6160	0,503	0,4966
V1	19000	2136	635	10870	2,388	8130	0,4982	0,5017
V2	21000	1820	550	11840	1,817	9160	0,4995	0,5002
V2	21000	1976	635	11330	1,92	9670	0,5	0,4998
V3	22000	1790	550	12220	1,69	9780	0,5005	0,4986
V3	28000	1993	635	15060	1,4411	12940	0,5001	0,4996
V4	21000	1850	550	11970	1,859	9030	0,5021	0,4972
V4	28000	1993	635	15062	1,4425	12938	0,4994	0,5002
V4-úzká*	34000	2282	750	17713	1,3299	16287	0,499	0,5008
V4-široká*	40000	2916	750	23980	1,5521	16020	0,5	0,4999

*Varianta V4-úzká označuje variantu, která byla špatně vytištěná na 3D tiskárně a proto byla vytvořena ještě varianta V4-široká s větší vzdáleností mezi rameny.

Všechny navržené motivy pomocí programu BeamPROP™ uvedené v tabulce 3.6 splňují omezující podmínky stanovené na základě analýzy p. Beltramiho uvedených v tabulkách 3.2 až 3.5. Všechny úhly Ω jsou menší než jím stanovené maximální úhly, kdy je přenos ještě bezztrátový a všechny délky podélně se rozšiřujícího vlnovodu (d) jsou delší než jím stanovené minimální délky.

Z návrhů vyplývá, že nejmenších rozměrů je dosaženo u rozbočnice s jádrem Epocore a plášťovou vrstvou Zeonex E48R (V1), kdy celková délka rozbočnice odpovídala hodnotě $L_c = 14$ mm pro $w_f = 550$ μm a $L_c = 19$ mm pro $w_f = 635$ μm .

4. Výroba planární optické rozbočnice

4.1 Postup výroby rozbočnic varianty Zeonex/Epocore

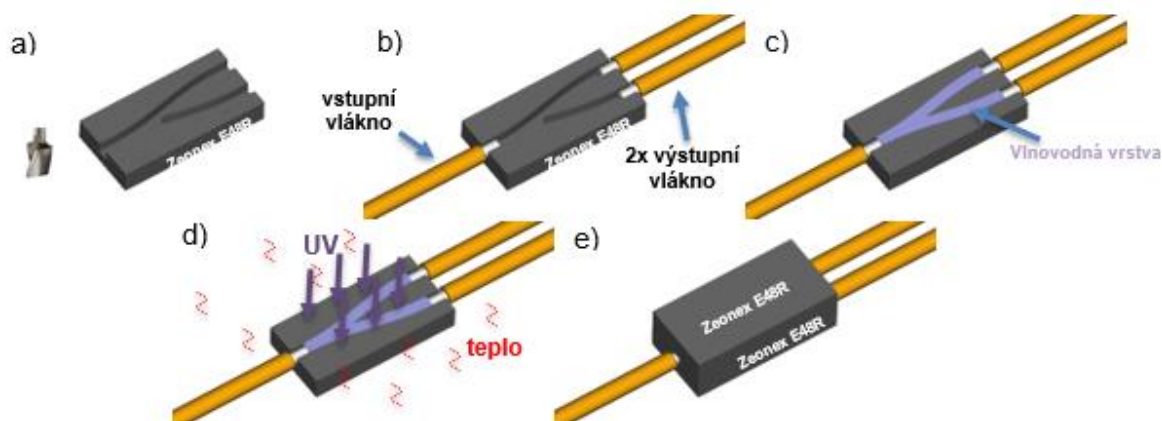
Na základě návrhů vytvořených v programu BeamPROP™ byly do substrátu Zeonex E48R o tloušťce 3 mm vytvořeny drážky pomocí CNC gravírování. K tomu byl použit frézovací stroj CNC NONCO Kx3, se šířkou frézy 0,5 nebo 0,6 mm, rychlostí otáčení 1800 ot/min a rychlostí posunu 36 mm/min (obr. 4.1.a). Pro asemblaci vstupních a výstupních vláken byly vstupní a výstupní vlnovody prodlouženy o 5 mm. Drobné nečistoty z těchto drážek byly mechanicky odstraněny a vyčištěny pomocí polyvinylalkoholu. Do vstupního a dvou výstupních vlnovodů byly vloženy optická vlákna bez primární ochrany (obr. 4.1.b). Následovalo zalití drážky polymerem Epocore (obr. 4.1.c). Negativně fotorezistivní polymer byl vytvrzován teplotně a pomocí UV záření (obr. 4.1.d). Nejdříve byl vystaven teplotě 50°C po dobu deseti minut. Poté se tato teplota navyšovala o 10°C každou minutu až do teploty 90°C, při které byl ponechán deset minut. Následovalo tvrzení tohoto polymeru pomocí UV paprsků, kterým byl vystaven 10 minut. Poté byl znovu zopakován proces teplotního tvrzení (50°C 10 min, +10°C 1 min, 90°C 10 min). Tento postup tvrzení je v souladu s doporučením výrobce. Na takto vytvrzenou strukturu byla upevněna horní krycí vrstva Zeonex E48R (obr. 4.1.e).

Tímto postupem bylo vyrobeno celkem šest rozbočnic typu 1x2Y. Z toho čtyři s šířkou vstupního vlnovodu $w_f = 550 \mu\text{m}$ určená pro vlákna FIP500550590 a dvě s $w_f = 635 \mu\text{m}$ určená pro vlákna JTFLH6006301040.

4.2 Postup výroby rozbočnic varianty Zeonex/NOA83H

Postup výroby byl obdobný jako u kombinace materiálů Zeonex/Epocore (V1) byly drážky v substrátu Zeonex E48R vyrobeny pomocí CNC gravírování (obr. 4.1.a) a očištěny polyvinylalkoholem. V dalším kroku byly vloženy vlákna do vstupních a výstupních vlnovodů (obr. 4.1.b) a nanesena vlnovodná vrstva NOA83H (obr. 4.1.c). Dále byl respektován doporučený postup vytvrzení uváděn výrobcem [7]. Tedy deset minut ozařování UV paprsky a poté tři hodiny vytvrzování při teplotě 80°C (obr. 4.1.d). Na takto vytvrzenou strukturu byla pevněna horní krycí vrstva ze stejného materiálu, jako je substrát (obr. 4.1.e).

Tímto postupem bylo vyrobeno celkem 9 rozbočnic typu 1x2Y. Z toho 4 s šířkou vstupního vlnovodu $w_f = 550 \mu\text{m}$ určená pro vlákna FIP500550590 a 5 s šířkou $w_f = 635 \mu\text{m}$ určená pro vlákna JTFLH6006301040.



Obr. 4.1: Postup výroby rozbočnic pro s vlnovodnou vrstvou Epocore nebo NOA83H a plášťové vrstvy Zeonex E48R (varianta V1a V2): a) CNC gravírování motivu rozbočnice, b) vložení vláken, c) zalití vlnovodnou vrstvou, d) vytvrzení, e) upevnění krycí vrstvy.

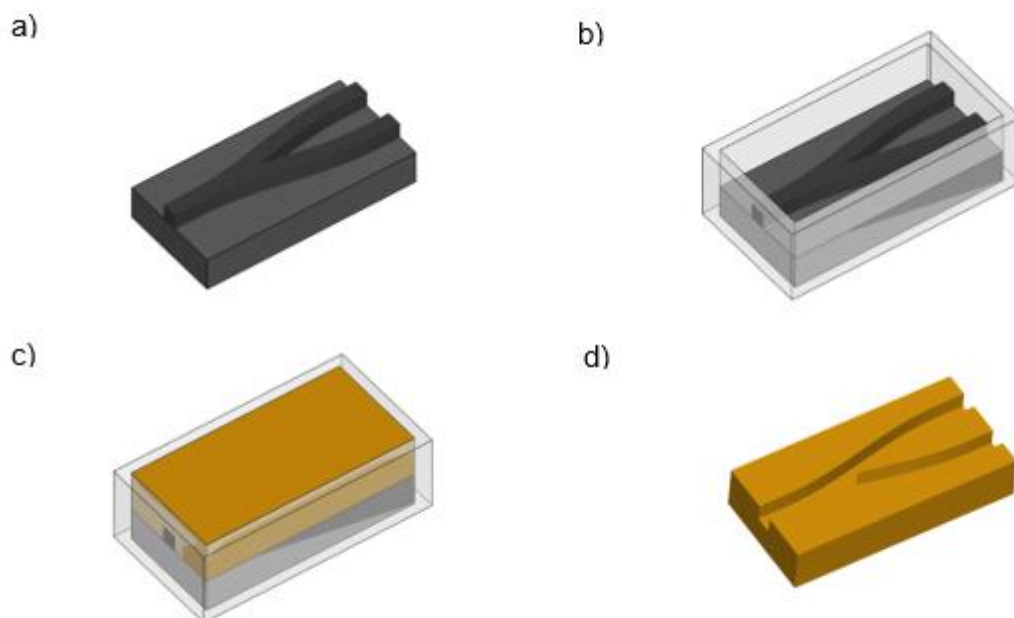
4.3 Návrh výroby varianty Makrolon GP/Epocore

Postup výroby měl být obdobný jako u kombinace materiálů Zeonex/Epocore (V1). Rozdíl byl jen v použití materiálu Makrolon GP o tloušťce 1,5 mm a využitím jiné vlnovodné vrstvy. Při optické kontrole vyrobených drážek pomocí CNC gravírování (podkapitola 5.2) bylo zjištěno, že materiál v okolí drážek je velmi roztržený a tedy drsnost povrchu je příliš vysoká (obr. 5.5 a 5.6) a je nutné přidat další krok leštění.

4.4 Návrh výroby varianty PDMS/PDMDPS

Na základě návrhů vytvořených v programu BeamPROP™ byly vytvořeny 3D modely rozbočnic v programu FreeCad. Pod tyto rozbočnice byly přidány v tomto návrhovém prostředí podkladové destičky a tato rozbočnice spolu s podkladovou destičkou byly vytištěny na 3D tiskárně Prusa MK2 - 2016 jako jeden objekt z akrylonitril-butadien-styrenového kopolymeru (ABS), využívaného jako tiskový materiál pro 3D tisk (obr. 4.2.a). Dále byla vytištěna „forma“ do které by se rozbočnice s podložkou zasunula (obr. 4.2.b). Tuto strukturu lze zalít polymerem

PDMS (obr. 4.2.c). Následným vytvrzením polymeru a rozebráním formy lze vyndat vrstvu substrátu s vytvořenou drážkou ve tvaru navržené rozbočnice. (obr. 4.2.d).



Obrázek 4.2. Postup výroby rozbočnice s vlnovodnou vrstvou PDMDPS a plášťovou vrstvou PDMS (varianta V4): a) 3D tisk motivu a destičky, b) 3D tisk formy, c) zalití formy vrstvou PDMS, d) výsledná rozbočnice vyndaná z formy.

Následný postup by byl podobný jako v případě vyrobených drážek pomocí gravírování CNC u kombinace materiálů Zeonex/Epocore (V1). Povrch vytištěných struktur však vykazoval velkou drsnost a bylo by nutné ještě před zalitím vyrobené formy (obr. 4.2.b) povrch vyleštit například pomocí acetonových par, které se na leštění kopolymeru ABS využívají.

Tyto deposiční testy ale z důvodu časové náročnosti nebyly dokončeny a budou pravděpodobně námětem na další bakalářskou nebo diplomovou práci.

V tabulce 4.1 jsou uvedeny všechny vyrobené rozbočnice.

Tab 4.1: Seznam všech vyrobených rozbočnic.

Varianta	Označení vzorku	Plášť	Vlnovodná vrstva	Typ přívodních vláken
V1	ZAZ100	Zeonex E48R	Epocore	FIP500550590
V1	ZAZ101	Zeonex E48R	Epocore	FIP500550590
V1	ZAZ102	Zeonex E48R	Epocore	FIP500550590
V1	ZAZ103	Zeonex E48R	Epocore	FIP500550590
V2	ZAZ105	Zeonex E48R	NOA83H	JTFLH6006301040
V2	ZAZ106	Zeonex E48R	NOA83H	JTFLH6006301040
V1	ZAZ107	Zeonex E48R	Epocore	JTFLH6006301040
V1	ZAZ108	Zeonex E48R	Epocore	JTFLH6006301040
V2	ZAZ110	Zeonex E48R	NOA83H	FIP500550590
V2	ZAZ111	Zeonex E48R	NOA83H	FIP500550590
V2	ZAZ112	Zeonex E48R	NOA83H	FIP500550590
V2	ZAZ113	Zeonex E48R	NOA83H	FIP500550590
V2	ZAZ114	Zeonex E48R	NOA83H	JTFLH6006301040
V2	ZAZ115	Zeonex E48R	NOA83H	JTFLH6006301040
V2	ZAZ116	Zeonex E48R	NOA83H	JTFLH6006301040

5. Výsledky

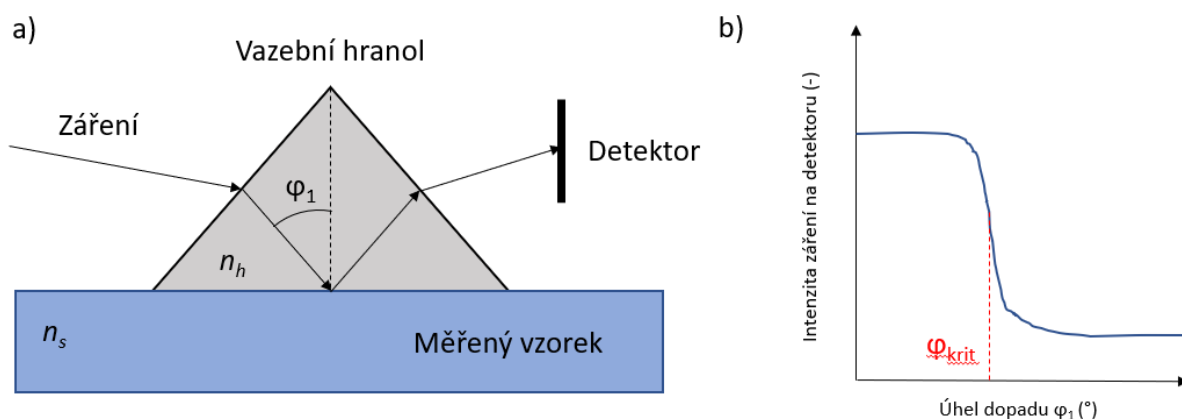
5.1 Měření indexů lomu

K měření indexu lomu použitých materiálů byla využita metoda zvaná jednohranolová vidová spektroskopie (5.1.a). K měření byl využit přístroj Metricon 2010. Metoda spočívá v navázání optického svazku do měřicího hranolu s indexem lomu n_h , který je přiložen k měřenému materiálu s indexem lomu n_s . Na druhé straně hranolu je fotodetektor sledující intenzitu odraženého záření. Se změnou úhlu dopadajícího záření může na rozhraní hranolu a vlnovodné vrstvy docházet k odrazu paprsku na fotodetektor a lomu světla do vlnovodné vrstvy. Když vyneseme závislost naměřené intenzity záření na úhlu dopadu (5.1.b), lze určit kritický úhel pro tuto kombinaci indexů lomu materiálů. Jelikož index lomu materiálu měřicího hranolu je znám od výrobce, lze na základě naměřeného kritického úhlu určit index lomu vlnovodné vrstvy podle vztahu [3,17]:

$$\varphi_{krit} = \frac{n_s}{n_h} \quad (5.1)$$

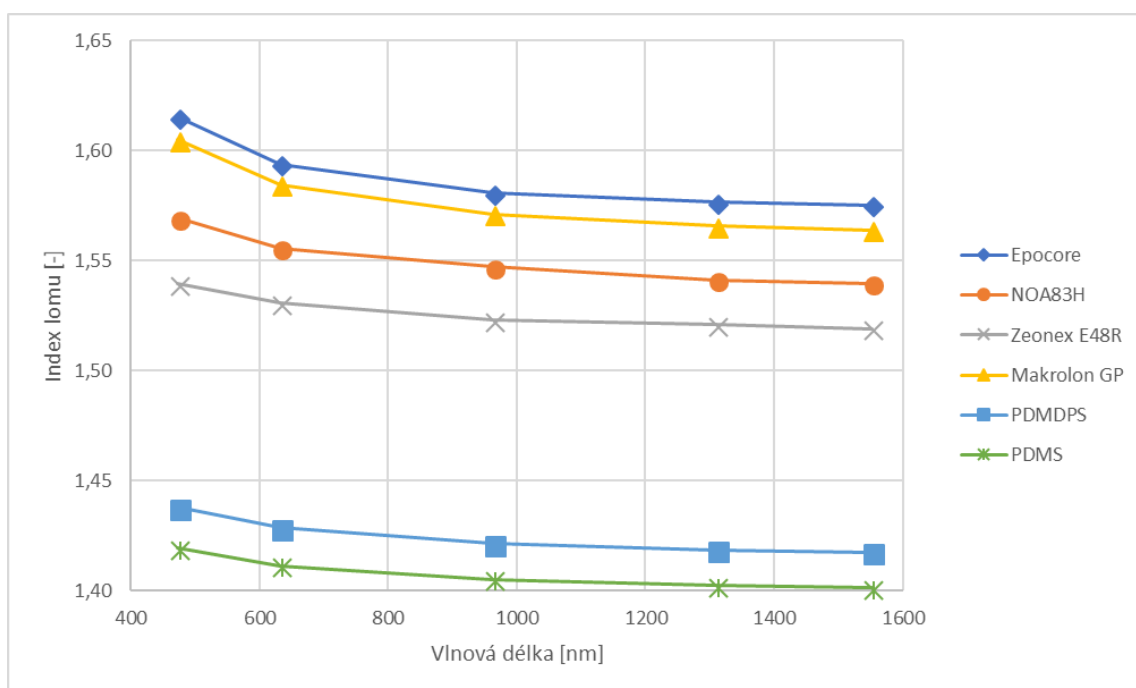
kde φ_{krit} je kritický úhel, n_s je index lomu vlnovodné vrstvy a n_h je index lomu vazebního hranolu.

Na obrázku 5.1.a je uvedeno uspořádání měření indexu lomu a na 5.1.b je uvedena závislost intenzity záření na detektoru a úhlu dopadu s vyznačeným kritickým úhlem.



Obrázek 5.1: Princip měření indexu lomu: a) uspořádání měření, b) určení kritického úhlu.

Index lomu byl změřen pro všechny použité materiály pro výrobu optických rozbočnic: Epocore, Zeonex E48R, NOA83H, Makrolon GP, PDMDPS a PDMS. Měření proběhlo na vlnových délkách 473, 633, 964, 1311 a 1552 nm a z aproximovaných průběhů (Obr. 5.2) byly odečteny hodnoty indexy lomů pro 532, 650, 850, 1310 a 1550 nm, použité při návrhu motivů rozbočnic (kapitola 3.4). Na obrázku 5.2. jsou uvedeny průběhy závislosti indexu lomu na vlnové délce použitých materiálů (Epocore, Zeonex E48R, NOA83H, Makrolon GP, PDMDPS a PDMS).



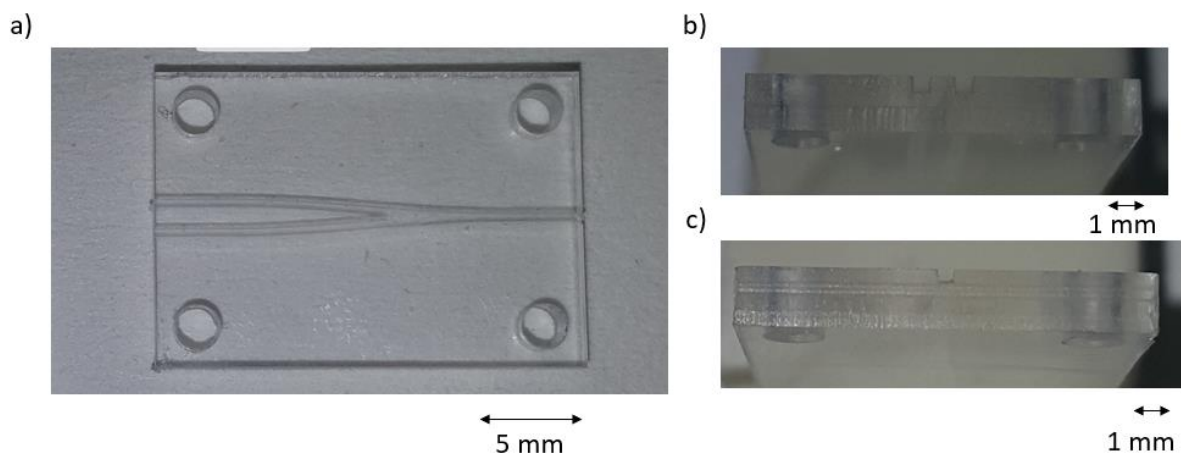
Obrázek 5.2: Průběhy závislosti indexu lomu na vlnové délce použitých materiálů.

5.2 Optické vyhodnocení kvality vzorků

5.2.1 Optická kontrola vyrobených drážek

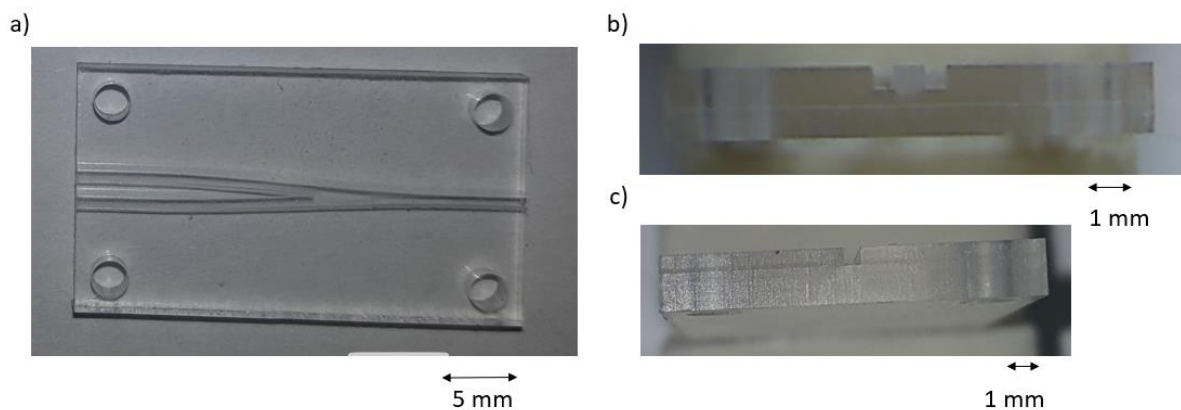
Před nanesením vlnovodné vrstvy byla každá vyrobená drážka opticky zkontrolována, zdali se na ní nevyskytují defekty. Na obrázcích 5.3. až 5.8. jsou fotky drážek pro výrobu rozbočnic.

Na obrázku 5.3.a je fotografie vyrobené drážky s tvarem 1x2Y z materiálu Zeonex E48R určenou pro zalití vlnovodnou vrstvou Epocore, s šířkou vstupních vlnovodů $w_f = 550 \mu\text{m}$. Na obrázku 5.3.b je fotografie z výstupní hrany, kde jsou vidět dvě výstupní drážky. Na obrázku 5.3.c je fotografie ze vstupní hrany, kde je vidět vstupní drážka.



Obrázek 5.3: Fotografie drážky rozbočnice 1x2Y z materiálu Zeonex určenou pro zalití vlnovodnou vrstvou Epocore (V1) s $w_f = 550 \mu\text{m}$ z různých úhlů, a) pohled shora, b) pohled z boku na 2 výstupní vlnovody, c) pohled z boku na 1 výstupní vlnovod.

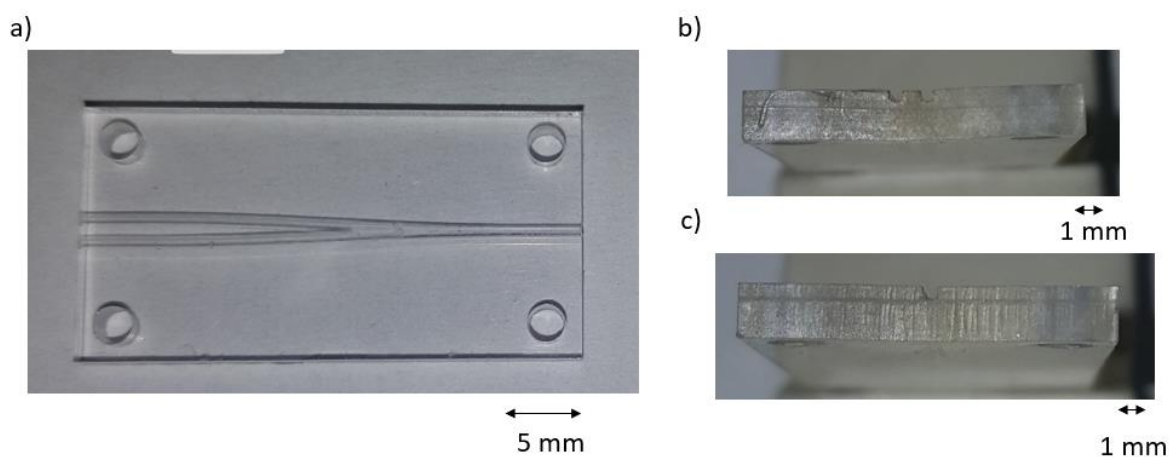
Na obrázku 5.4.a je fotografie vyrobené drážky s tvarem 1x2Y z materiálu Zeonex E48R určenou pro zalití vlnovodnou vrstvou Epocore, s šířkou vstupních vlnovodů $w_f = 635 \mu\text{m}$. Na obrázku 5.4.b je fotografie z výstupní hrany, kde jsou vidět dvě výstupní drážky. Na obrázku 5.4.c je fotografie ze vstupní hrany, kde je vidět vstupní drážka.



Obrázek 5.4: Fotografie drážky rozbočnice 1x2Y z materiálu Zeonex určenou pro zalití vlnovodnou vrstvou Epocore (V1) s $w_f = 635 \mu\text{m}$ z různých úhlů, a) pohled shora, b) pohled z boku na 2 výstupní vlnovody, c) pohled z boku na 1 výstupní vlnovod.

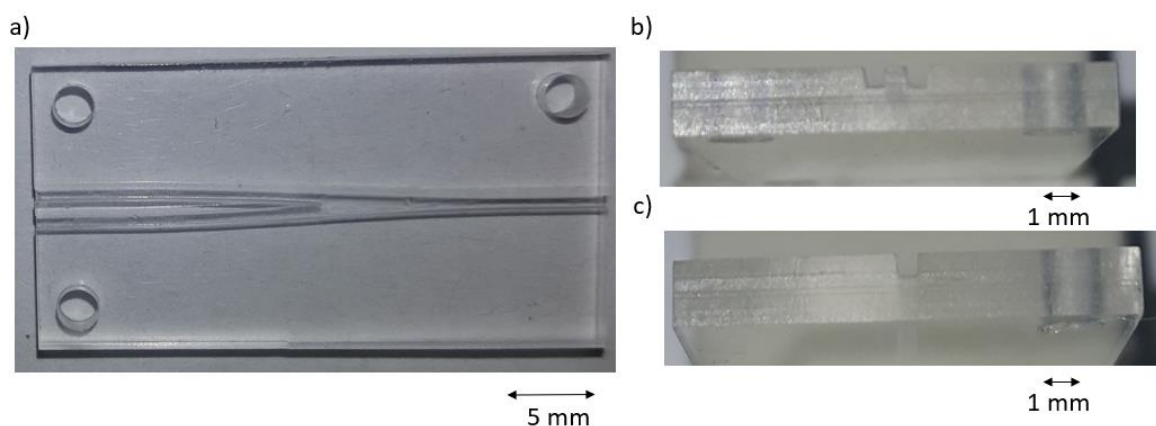
Na obrázku 5.5.a je fotografie vyrobené drážky s tvarem 1x2Y z materiálu Zeonex E48R určenou pro zalití vlnovodnou vrstvou NOA83H, s šířkou vstupních vlnovodů $w_f = 550 \mu\text{m}$. Na

obrázku 5.5.b je fotografie z výstupní hrany, kde jsou vidět dvě výstupní drážky. Na obrázku 5.5.c je fotografie ze vstupní hrany, kde je vidět vstupní drážka.



Obrázek 5.5: Fotografie drážky rozbočnice 1x2Y z materiálu Zeonex určenou pro zalití vlnovodnou vrstvou NOA83H (V2) s $w_f = 550 \mu\text{m}$ z různých úhlů, a) pohled shora, b) pohled z boku na 2 výstupní vlnovody, c) pohled z boku na 1 výstupní vlnovod.

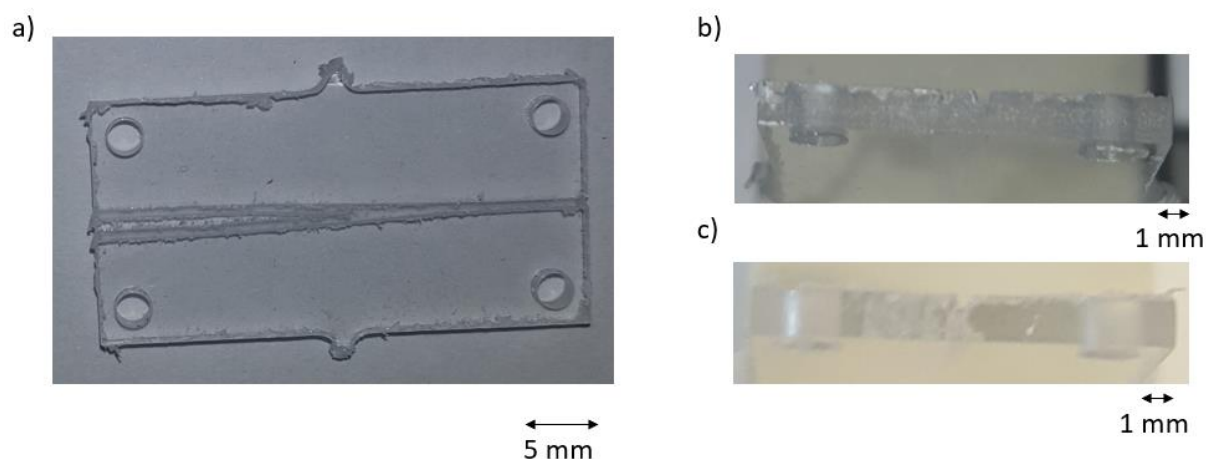
Na obrázku 5.6.a je fotografie vyrobené drážky s tvarem 1x2Y z materiálu Zeonex E48R určenou pro zalití vlnovodnou vrstvou NOA83H, s šířkou vstupních vlnovodů $w_f = 635 \mu\text{m}$. Na obrázku 5.6.b je fotografie z výstupní hrany, kde jsou vidět dvě výstupní drážky. Na obrázku 5.6.c je fotografie ze vstupní hrany, kde je vidět vstupní drážka.



Obrázek 5.6: Fotografie drážky rozbočnice 1x2Y z materiálu Zeonex určenou pro zalití vlnovodnou vrstvou NOA83H (V2) s $w_f = 635 \mu\text{m}$ z různých úhlů, a) pohled shora, b) pohled z boku na 2 výstupní vlnovody, c) pohled z boku na 1 výstupní vlnovod.

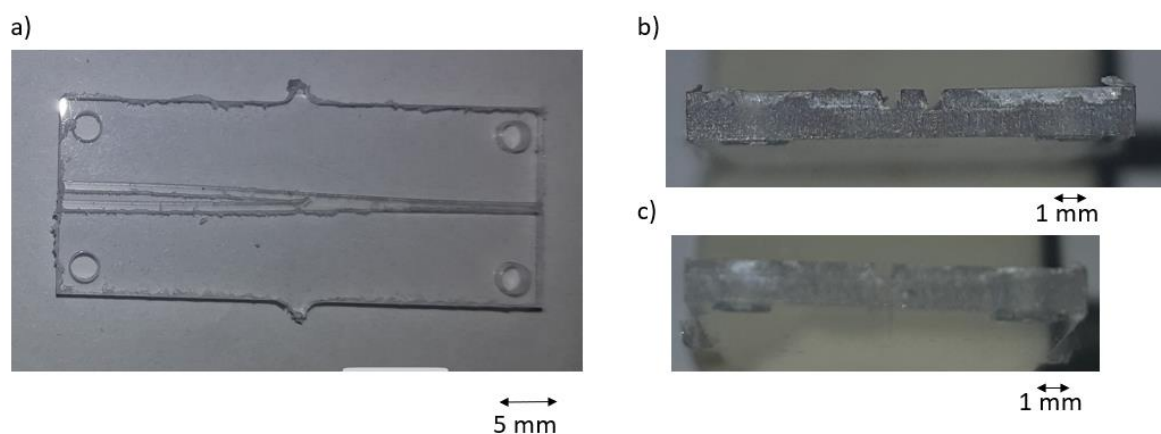
Z obrázků vyplývá, že drážky vyrobené z materiálu Zeonex E48R jsou kvalitní, bez povrchových vad a geometrické rozměry jsou blízké provedeným návrhům.

Na obrázku 5.7.a je fotografie vyrobené drážky s tvarem 1x2Y z materiálu Makrolon GP určenou pro zalití vlnovodnou vrstvou Epocore, s šířkou vstupních vlnovodů $w_f = 550 \mu\text{m}$. Na obrázku 5.7.b je fotografie z výstupní hrany, kde jsou vidět dvě výstupní drážky. Na obrázku 5.7.c je fotografie ze vstupní hrany, kde je vidět vstupní drážka.



Obrázek 5.7: Fotografie drážky rozbočnice 1x2Y z materiálu Makrolon GP určenou pro zalití vlnovodnou vrstvou Epocore (V3) s $w_f = 550 \mu\text{m}$ z různých úhlů, a) pohled shora, b) pohled z boku na 2 výstupní vlnovody, c) pohled z boku na 1 výstupní vlnovod.

Na obrázku 5.8.a je fotografie vyrobené drážky s tvarem 1x2Y z materiálu Makrolon GP určenou pro zalití vlnovodnou vrstvou Epocore, s šířkou vstupních vlnovodů $w_f = 635 \mu\text{m}$. Na obrázku 5.8.b je fotografie z výstupní hrany, kde jsou vidět dvě výstupní drážky. Na obrázku 5.8.c je fotografie ze vstupní hrany, kde je vidět vstupní drážka.

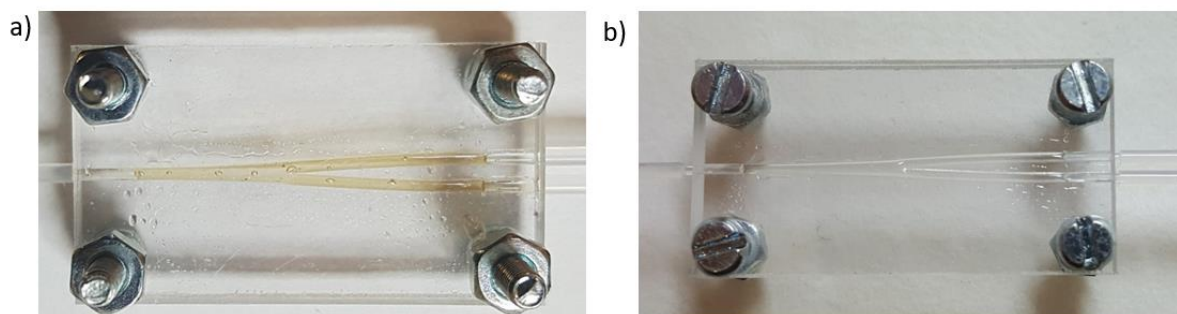


Obrázek 5.8: Fotografie drážky rozbočnice 1x2Y z materiálu Makrolon GP určenou pro zalití vlnovodnou vrstvou Epocore (V3) s $w_f = 635 \mu\text{m}$ z různých úhlů, a) pohled shora, b) pohled z boku na 2 výstupní vlnovody, c) pohled z boku na 1 výstupní vlnovod.

Na základě optické kontroly vyrobených drážek lze říci, že drážky vyrobené z materiálu Zeonex E48R jsou hladké a kvalitně vyrobené až na jeden chybějící otvor pro asemblační šroub u některých drážek určený pro zalití vlnovodnou vrstvou NOA83H, s šířkou vstupních vlnovodů $w_f = 635 \mu\text{m}$. Drážky vyrobené z materiálu Makrolon GP vykazovali příliš vysokou drsnost a před zalitím vlnovodnou vrstvou by bylo nutné je vyleštit. Ovšem ani po několika pokusech se leštění nezdařilo a proto tyto vzorky dostatečně vyleštit, a proto vlnovodnou vrstvou zality nebyly.

5.2.2 Optická kontrola po nanesení vlnovodné vrstvy

Na obrázku 5.9.a je uvedena fotografie vyrobené rozbočnice s vlnovodnou vrstvou Epocore a plášťovou vrstvou Zeonex E48R (ZAZ107). Z obrázku je patrné, že ve vlnovodné vrstvě se během procesu tvrzení vyskytují nehomogenity ve formě vzduchových „bublin“. Pro porovnání je na obrázku 5.9.b uvedena fotografie vyrobené rozbočnice s vlnovodnou vrstvou NOA83H a plášťovou vrstvou Zeonex E48R (ZAZ114). Z obrázku je patrné, že se ve vlnovodné vrstvě nevyskytují vady.

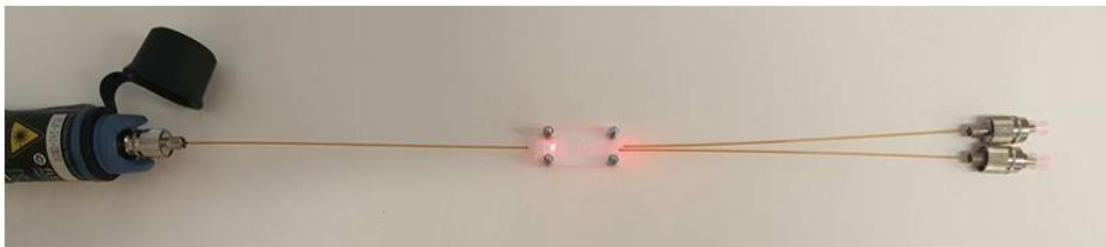


Obrázek 5.9: a) Fotografie vyrobené rozbočnice ZAZ107 s vlnovodnou vrstvou Epocore a plášťovou vrstvou Zeonex E48R. Jsou zde viditelné vzduchové nehomogenity uvnitř vlnovodné vrstvy, b) Fotografie vyrobené rozbočnice ZAZ114 s vlnovodnou vrstvou NOA83H a plášťovou vrstvou Zeonex E48R. Bez viditelných vad ve vlnovodné vrstvě.

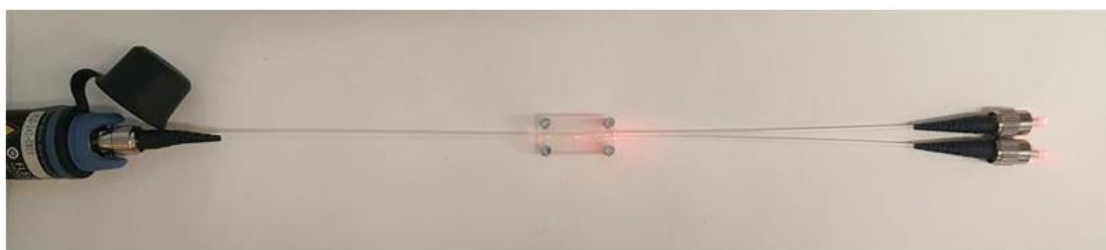
Na obrázku 5.10 jsou uvedeny přehledové fotky pro rozbočnice s vlnovodnou vrstvou NOA83H a plášťovou vrstvou Zeonex E48R. Vybrány byly vzorky s nejnižším vložným útlumem (podkapitola 5.4) pro obě šířky vlnovodné vrstvy $w_f = 550 \mu\text{m}$ a $w_f = 635 \mu\text{m}$. Na obrázku 5.10.a je vidět přehledová fotografie vyrobené rozbočnice ZAZ113 s vlnovodnou vrstvou NOA83H a plášťovou vrstvou Zeonex E48R s přívodními vlákny FIP500550590. Na obrázku 5.10.b je

vidět přehledová fotografie vyrobené rozbočnice ZAZ115 s vlnovodnou vrstvou NOA83H a plášťovou vrstvou Zeonex E48R s přívodními vlákny JTFLH6006301040.

a)



b)

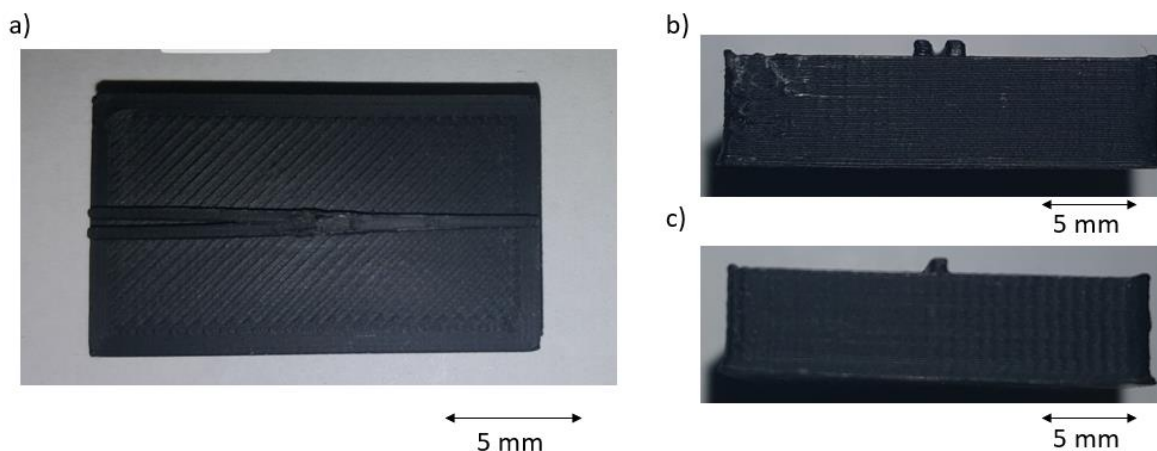


Obrázek 5.10: Přehledové fotografie vyrobených rozbočnic: a) ZAZ113 s vlnovodnou vrstvou NOA83H a plášťovou vrstvou Zeonex E48R s přívodními vlákny FIP500550590, b) ZAZ115 s vlnovodnou vrstvou NOA83H a plášťovou vrstvou Zeonex E48R s přívodními vlákny JTFLH6006301040.

5.2.3 Optická kontrola vyrobených struktur pomocí 3D tisku

Na obrázcích 5.11. a 5.12. jsou vidět rozbočnice vytištěné pomocí 3D tiskárny z materiálu ABS. Jedná se o první krok popsáný v podkapitole 4.4. kdy je vytištěn motiv rozbočnice na pomocnou podložku.

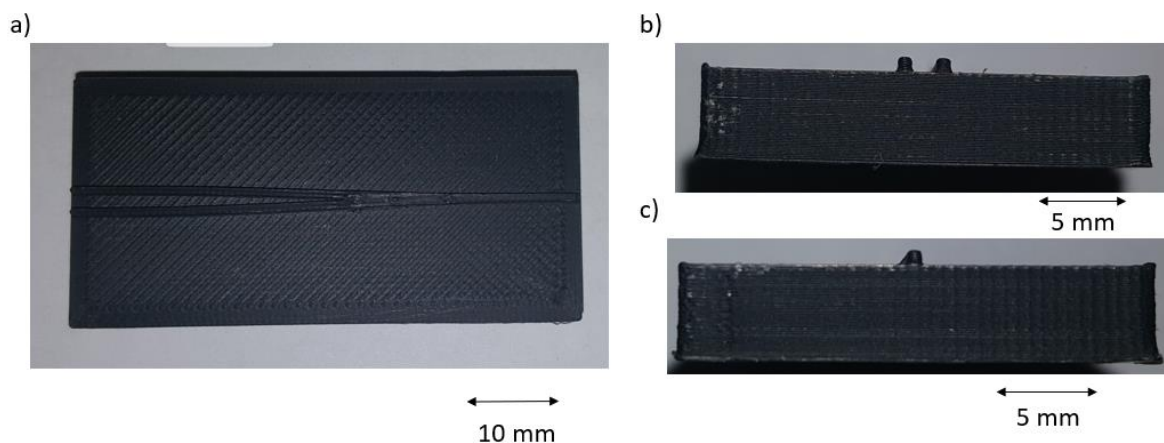
Na obrázku 5.11.a je fotografie vytištěné drážky s tvarem 1x2Y z materiálu ABS určenou pro výrobu drážky z plášťového materiálu PDMS, který by se zalil vlnovodnou vrstvou PDMDPS, s šířkou vstupních vlnovodů $w_f = 750 \mu\text{m}$. Na obrázku 5.11.b je fotografie z výstupní strany, kde jsou vidět dvě výstupní drážky. Na obrázku 5.11.c je fotografie ze vstupní strany, kde je vidět vstupní drážka.



Obrázek 5.11: Fotografie vytištěného motivu rozbočnice 1x2Y z materiálu PDMS/PDMDPS (V4) s $w_f = 750 \mu\text{m}$ „užší“ z různých úhlů, a) pohled shora, b) pohled z boku na 2 výstupní vlnovody, c) pohled z boku na 1 výstupní vlnovod.

Z obrázku 5.11.a je vidět, že ramena se slévají, a proto byl vytištěn další motiv s větší šířkou mezi rameny, který je vidět na obrázku 5.12.

Na obrázku 5.12.a je fotografie vytištěné drážky s tvarem 1x2Y z materiálu ABS určenou pro výrobu drážky z plášťového materiálu PDMS, který by se zalil vlnovodnou vrstvou PDMDPS, s šířkou vstupních vlnovodů $w_f = 750 \mu\text{m}$. Na obrázku 5.11.b je fotografie z výstupní hrany, kde jsou vidět dvě výstupní drážky. Na obrázku 5.11.c je fotografie ze vstupní drážky, kde je vidět vstupní drážka.

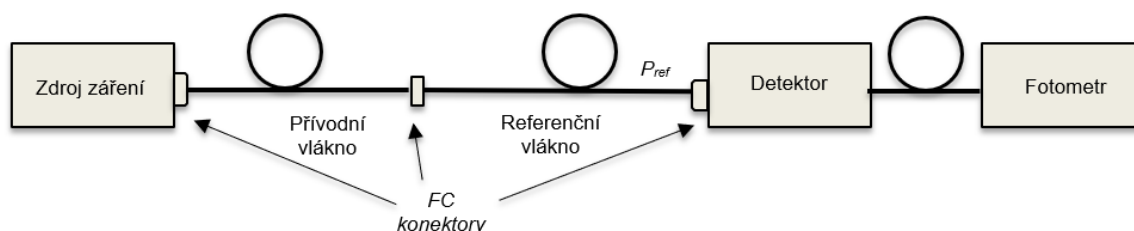


Obrázek 5.12: Fotografie vytištěného motivu rozbočnice 1x2Y z materiálu PDMS/PDMDPS (V3) s $w_f = 750 \mu\text{m}$ „širší“ z různých úhlů, a) pohled shora, b) pohled z boku na 2 výstupní vlnovody, c) pohled z boku na 1 výstupní vlnovod.

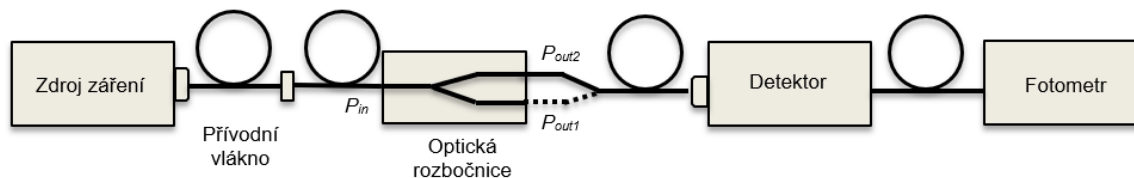
5.3 Měření vloženého optického útlumu:

K měření optického vloženého útlumu vyrobených rozbočnic byla využita soustava měřících zařízení schematicky znázorněná na obrázku 5.13.a. Jako zdroj záření byly využity lasery na vlnových délkách 532, 650, 850, 1300 a 1550 nm. Pro tyto vlnové délky byly využity zdroje záření: 532 nm (Nd:YVO4), 650 nm (laser Safibra OFLS-5 FP-650), 850 nm (laser Safibra OFLS-5 DFB-850), 1300 nm (Safibra OFLS-5 DFB-1300), 1550 nm (laser Safibra OFLS-5-DFB-1550). K určení výstupního optického výkonu byl použit fotometr Thorlabs PM200 s dvěma detektory pro různé vlnové délky. Pro 532, 650 a 850 nm byl použit křemíkový detektor S151C a pro 1300 a 1550 nm byl použit indium-galium-arsenidový detektor S155C.

a)



b)



Obrázek 5.13: Schéma zapojení měřícího pracoviště pro měření vloženého útlumu: a) pro měření hodnoty referenčního výkonu, b) pro měření výstupních výkonů P_{out1} a P_{out2} .

Měření vloženého optického útlumu probíhalo ve dvou krocích. První spočíval ve změření útlumu referenčního vlákna stejně dlouhého jako délka rozbočnice s připojenými přívodními vlákny. Tyto referenční vlákna jsou dodávána výrobcem společně s vlákny přívodními a jsou opatřena z obou stran FC/PC konektory. Stejně tak všechna používaná přívodní vlákna byla z jedné strany opatřena FC/PC konektory. Jelikož bylo pracováno s vlákny, které jsou velmi náchylná ke zlomení (především FIP500550590), bylo před referenční vlákno zařazeno přívodní optické vlákno, které je odolnější vůči mechanickému namáhání. Toto vlákno bylo zapojeno z jedné strany do zdroje záření a z druhé přes FC/PC spojku do referenčního. K druhé straně referenčního vlákna byl připojen detektor fotometru. V tomto zapojení byl změřen referenční výkon P_{ref} (Obr. 5.13.a).

Ve druhém kroku bylo referenční vlákno odpojeno a nahrazeno optickou rozbočnicí. Přívodní vlákno bylo připojeno k vstupnímu vláknu a detektor fotometru byl připojen k jedné výstupní větvi rozbočnice (Obr. 5.13.b). Byl změřen optický výkon P_{out1} vystupující z připojené větve a následně došlo k přepojení detektoru na druhou větev a změření výstupního výkonu P_{out2} . S indexem jedna byl vždy označen optický výkon vystupující z pravé větve, když se díváme na rozbočnice shora a výstupní větve vyzařují doprava, jako je znázorněno na obrázku (Obr. 5.13.b).

Z takto změřených výkonů lze spočítat vložný optický útlum rozbočnice α následujícím vztahem:

$$\alpha = -10 \log \left(\frac{P_{out1} + P_{out2}}{P_{ref}} \right) \quad (5.2)$$

kde P_{out1} je výstupní optický výkon z pravého ramen, P_{out2} je výstupní optický výkon z levého ramene a P_{ref} je výstupní referenční optický výkon.

V tabulce 5.1 jsou uvedeny výsledky měření vložného útlumu vybraných rozbočnic s vlnovodnou vrstvou Epocore a plášťovou vrstvou Zeonex E48R a šířkou vstupního a výstupního vlnovodu s $w_f = 550 \mu\text{m}$ (ZAZ100, ZAZ101 a ZAZ102). Uváděny jsou změřené hodnoty referenčních a výstupních optických výkonů, poměr výstupních výkonů a hodnota vložného útlumu spočítaná podle vzorce (5.2).

Tabulka 5.1: Výsledky měření vložného útlumu rozbočnic s vlnovodnou vrstvou Epocore a plášťovou vrstvou Zeonex E48R a šířkou vstupního a výstupního vlnovodu s $w_f = 550 \mu\text{m}$.

Vzorek	λ [nm]	P_{ref} [μW]	P_{out1} [μW]	P_{out2} [μW]	$P_{out1}:P_{out2}$ [%]	α [dB]
ZAZ100	650	3400	9,7	9,6	50,3:49,7	22,46
	850	687	4,7	4,6	50,5:49,5	18,68
	1300	3300	21,4	16,9	55,9:44,1	19,35
	1550	378	1,2	0,79	60,3:39,7	22,79
ZAZ101	650	3400	7,2	11,4	38,7:61,3	22,62
	850	687	2,5	4,2	37,3:62,7	20,11
	1300	3300	11,9	24,8	32,4:67,6	19,54
	1550	378	0,56	0,98	36,4:63,6	23,90
ZAZ102	650	667	3,18	2,47	56,3:43,7	20,72
	850	635	23,19	16,8	58:42	12,01
	1300	3257	169	97	63,5:36,5	10,88

Nejnižšího vložného útlumu z rozbočnic s vlnovodnou vrstvou Epocore a plášťovou vrstvou Zeonex E48R s šířkou vstupních vlnovodů $w_f = 550 \mu\text{m}$ bylo dosaženo u rozbočnice ZAZ102,

kteřá na vlnové délce 1300 nm vykazovala celkový vložný útlum 10,9 dB. Nejrovnoměrnější rozdělení výkonu do obou ramen vykazovala rozbočnice ZAZ100 s dělicím poměrem 50,3:49,7. Na vlnové délce 532 nm byl útlum tak velký, že výstupní výkony P_{out1} a P_{out2} nebylo možné změřit.

V tabulce 5.2 jsou uvedeny výsledky měření vložného útlumu vybraných rozbočnic s vlnovodnou vrstvou Epocore a plášťovou vrstvou Zeonex E48R a šířkou vstupního a výstupního vlnovodu s $w_f = 635 \mu\text{m}$ (ZAZ107 a ZAZ108). Uváděny jsou změřené hodnoty referenčních a výstupních optických výkonů, poměr výstupních výkonů a hodnota vloženého útlumu spočítaná podle vzorce (5.2).

Tabulka 5.2: Výsledky měření vloženého útlumu rozbočnic s vlnovodnou vrstvou Epocore a plášťovou vrstvou Zeonex E48R a šířkou vstupního a výstupního vlnovodu s $w_f = 635 \mu\text{m}$.

Vzorek	λ [nm]	P_{ref} [μW]	P_{out1} [μW]	P_{out2} [μW]	$P_{out1}:P_{out2}$ [%]	α [dB]
ZAZ107	650	722	2,44	1,55	61,2:38,8	22,58
	850	616	20,9	10,2	67,2:32,8	12,97
	1300	1894	68,8	40	63,2:36,8	12,41
ZAZ108	650	722	0,53	1,72	23,6:76,4	25,06
	850	616	1,57	13,2	10,6:89,4	16,20
	1300	1894	4,79	48	9,1:90,9	15,55

Nejnižšího vložného útlumu z rozbočnic s vlnovodnou vrstvou Epocore a plášťovou vrstvou Zeonex E48R s šířkou vstupních vlnovodů $w_f = 635 \mu\text{m}$ bylo dosaženo u rozbočnice ZAZ107, která na vlnové délce 1300 nm vykazovala celkový vložný útlum 12,41 dB. Nejrovnoměrnější rozdělení výkonu do obou ramen vykazovala rozbočnice ZAZ107 s dělicím poměrem 61,2:38,8. Na vlnové délce 532 nm byl útlum tak velký, že výstupní výkony P_{out1} a P_{out2} nebylo možné změřit.

Vyrobené rozbočnice s vlnovodnou vrstvou Epocore a plášťovou vrstvou Zeonex E48R vykazují velmi vysoké hodnoty vložného útlumu. Způsobeno to může být vzduchovými nehomogenitami viditelných na obrázku 5.9.a, na kterých dochází k velkému rozptylu záření mimo strukturu. Jak se ukázalo, tak ani rozbočnice ZAZ102 s nejnižším vložným útlumem neobstála při měření přenosové rychlosti datových toků, kdy byla sledována chybovost přenosu na vlnové délce 650nm (podkapitola 5.7). V tomto měření vykazovala chybovost 100%, a proto není použitelná k přenosu datových toků.

V tabulce 5.3 jsou uvedeny výsledky měření vložného útlumu vybraných rozbočnic s vlnovodnou vrstvou NOA83H a plášťovou vrstvou Zeonex E48R a šířkou vstupního a výstupního vlnovodu s $w_f = 635 \mu\text{m}$ (ZAZ105 a ZAZ106).

Tabulka 5.3: Výsledky měření vloženého útlumu rozbočnic s vlnovodnou vrstvou NOA83H a plášťovou vrstvou Zeonex E48R a šířkou vstupního a výstupního vlnovodu s $w_f = 635 \mu\text{m}$.

Vzorek	λ [nm]	P_{ref} [μW]	P_{out1} [μW]	P_{out2} [μW]	$P_{\text{out1}}:P_{\text{out2}}$ [%]	α [dB]
ZAZ105	532	12,8	1,7	1,4	54,8:45,2	6,2
	650	657	59	50	54,1:45,9	7,8
	850	700	162	132	55,1:44,9	3,8
	1300	192	31	29	51,7:48,3	5,1
ZAZ106	532	12,8	0,41	0,37	52,6:47,4	12,2
	650	657	12	14	46,2:53,8	14,0
	850	700	34	37	47,9:52,1	9,9
	1300	192	7,5	10,8	41:59	10,2

Při výrobě rozbočnic ZAZ105 a ZAZ106 došlo k záměně drážek a tyto rozbočnice byly vytvořeny z drážek určených pro vlnovodnou vrstvu Epcore. Po zpětné simulaci v programu BeamPROP™ se ukázalo, že se nejedná o zásadní chybu, která by výrazně ovlivnila poměr výkonů vystupujících z ramen rozbočnice. S použitím správné drážky, by byl poměr rozložení výstupního výkonu 50:50%. Takto vyrobené drážky vykazují rozložení 50,2:49,8%.

V tabulce 5.4 jsou uvedeny výsledky měření vloženého útlumu vybraných rozbočnic s vlnovodnou vrstvou NOA83H a plášťovou vrstvou Zeonex E48R a šířkou vstupního a výstupního vlnovodu s $w_f = 550 \mu\text{m}$ (ZAZ111, ZAZ112 a ZAZ113).

Tabulka 5.4: Výsledky měření vloženého útlumu rozbočnic s vlnovodnou vrstvou NOA83H a plášťovou vrstvou Zeonex E48R a šířkou vstupního a výstupního vlnovodu s $w_f = 550 \mu\text{m}$.

Vzorek	λ [nm]	P_{ref} [μW]	P_{out1} [μW]	P_{out2} [μW]	$P_{\text{out1}}:P_{\text{out2}}$ [%]	α [dB]
ZAZ111	532	10	0,65	0,7	48,1:51,9	8,7
	650	3659	380	350	52,1:47,9	7,0
	850	697	96	87	52,5:47,5	5,8
	1300	3370	500	480	51:49	5,4
ZAZ112	532	10	0,35	0,52	40,2:59,8	10,6
	650	3659	210	310	40,4:59,6	8,5
	850	697	47	78	37,6:62,4	7,5
	1300	3370	280	450	38,4:61,6	6,6
ZAZ113	532	6,3	0,4	0,68	37:63	7,7
	650	708	53,3	75,4	41,4:58,6	7,4
	850	600	53	87	37,9:62,1	6,3
	1300	1910	184,2	265	41:59	6,3
	1550	354,6	28,4	40	41,5:58,5	7,1

V tabulce 5.5 jsou uvedeny výsledky měření vloženého útlumu vybraných rozbočnic s vlnovodnou vrstvou NOA83H a plášťovou vrstvou Zeonex E48R a šířkou vstupního a výstupního vlnovodu s $w_f = 635 \mu\text{m}$ (ZAZ114, ZAZ115 a ZAZ116).

Tabulka 5.5: Výsledky měření vloženého útlumu rozbočnic s vlnovodnou vrstvou NOA83H a plášťovou vrstvou Zeonex E48R a šířkou vstupního a výstupního vlnovodu s $w_f = 635 \mu\text{m}$.

Vzorek	λ [nm]	P_{ref} [μW]	P_{out1} [μW]	P_{out2} [μW]	$P_{\text{out1}}:P_{\text{out2}}$ [%]	α [dB]
ZAZ114	532	7,33	1,35	1,22	52,5:47,5	4,6
	650	622	112,3	111,3	50,2:49,8	4,4
	850	687	122	133	47,8:52,2	4,3
	1300	3230	492	627	44:56	4,6
	1550	387	50	53	48,5:51,5	5,7
ZAZ115	532	7,33	1,32	1,59	45,4:54,6	4,0
	650	622	134,5	147,6	47,7:52,3	3,4
	850	687	184	196	48,4:51,6	2,6
	1300	3230	744	749	49,8:50,2	3,4
	1550	387	60	60,8	49,7:50,3	5,1
ZAZ116	532	6,312	1,41	1,05	57,3:42,7	4,1
	650	236	33,4	35,4	48,5:51,5	5,4
	850	557	117	91,8	56:44	4,3
	1300	1580	390	309	55,8:44,2	3,5
	1550	422	63,7	45,8	58,2:41,8	5,9

Z hlediska nejnižšího optického vloženého útlumu rozbočnice s vlnovodnou vrstvou NOA83H měla nejnižší útlum rozbočnice ZAZ115, která na vlnové délce 850nm vykazovala celkový vložený útlum 2,6 dB. Na vlnové délce 532 nm tato rozbočnice vykazovala vložený útlum 4 dB, na vlnové délce 650 nm pak 3,7 dB. Na vlnové délce 1300 nm, vykazovala rozbočnice vložený útlum 3,4 dB a na vlnové délce 1550 nm pak hodnotu 5,1 dB.

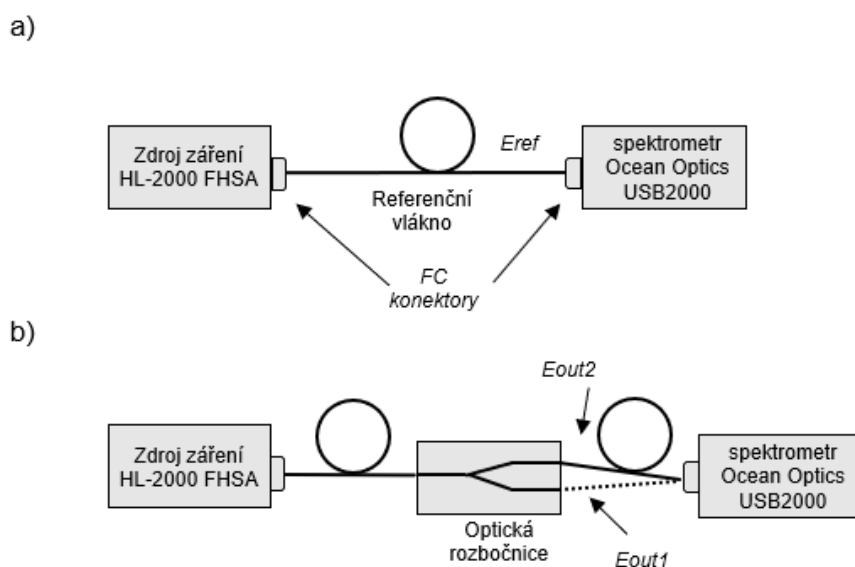
Nejrovnoměrnější rozdělení výkonu do obou ramen vykazovala rozbočnice ZAZ114 s dělicím poměrem 50,2:49,8.

Z uvedených výsledků měření vloženého útlumu rozbočnic s vlnovodnou vrstvou NOA83H a plášťovou vrstvou Zeonex E48R vychází, že nižší útlum vykazují vzorky s šířkou vlnovodné vrstvy $w_f = 635 \mu\text{m}$ a použitými vlákny JTFLH6006301040. Bylo provedeno statistické vyhodnocení čtyř rozbočnic s nejnižšími vloženými útlumy ZAZ105, ZAZ114, ZAZ115 a ZAZ116. Z tohoto vyhodnocení byla vyřazena rozbočnice ZAZ106, která vykazovala oproti ostatním daleko vyšší útlum. Všechny tyto rozbočnice mají přírodní vlákna JTFLH6006301040. Průměrná hodnota vloženého útlumu těchto čtyř rozbočnic je na vlnové délce 532 nm rovná 4,7 dB. Na vlnové délce 650 nm je průměrná hodnota 5,3 dB. Na vlnové délce 850 nm je průměrná hodnota 3,8 dB a na vlnové délce 1300 nm je 4,2 dB. Vložený útlum pro vlnovou délku 1550 nm nebyl měřen pro rozbočnici ZAZ105, ale ze zbylých tří rozbočnic vychází průměrná hodnota 5,6 dB.

5.4 Měření spektrálních charakteristik

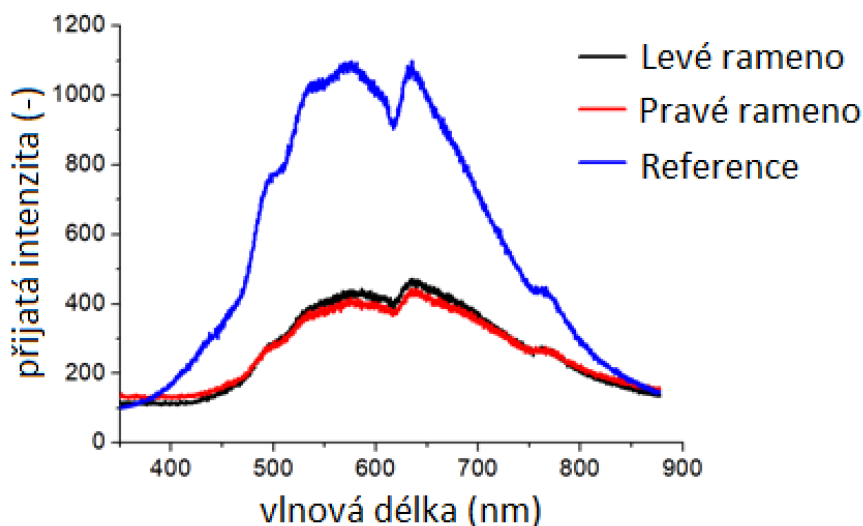
Měření spektrálních charakteristik bylo provedeno pomocí spektrometru Ocean Optics USB2000. Měření bylo provedeno pro vzorek vykazující nejnižší vložný útlum ZAZ115 z materiálů Zeonex E48R/NOA83H s přívodními vlákny JTFLH6006301040. Nejdříve bylo pomocí FC/PC konektorů připojeno odpovídající referenční vlákno ke zdroji záření (HL-2000 FHSA) a k spektrometru (obr. 5.14.a). V tomto zapojení byla změřena referenční hodnota intenzity záření E_{ref} . Místo referenčního vlákna byla přepojena měřená optická rozbočnice a každá větev byla měřena zvlášť (5.14.b). Takto byly získány hodnoty intenzity záření z výstupních větví rozbočnice $E_{out1,2}$.

Na obrázku 5.14.a je znázorněno schéma zapojení pro měření referenční intenzity záření a na 5.14.b je zobrazeno schéma zapojení pro měření výstupní intenzity záření z jednotlivých ramen.



Obrázek 5.14: Měření spektrálních charakteristik: a) Měření referenční intenzity záření, b) Měření výstupní intenzity záření z jednotlivých ramen.

Na obrázku 5.15 je uveden změřený průběh závislosti intenzity záření na vlnové délce pro optickou rozbočnici ZAZ115 (Zeonex E48R/NOA83H) s přívodními vlákny JTFLH6006301040.



Obrázek 5.15: Závislost normované intenzity záření na vlnové délce optické rozbočnice ZAZ115 (Zeonex E48R/NOA83H) s přívodními vlákny JTFLH6006301040.

Rozbočnice z materiálů Zeonex E48R/NOA83H s přívodními vlákny JTFLH6006301040 (ZAZ115) vykazovala téměř symetrické hodnoty přijaté intenzity napříč celým měřeným spektrem. Z uvedené závislosti 5.15 vyplývá, že vzorek je použitelný v oblasti vlnových délek přibližně 400 až 850 nm. Tento rozsah je shora omezen měřícím rozsahem spektrometru, který měří pouze do vlnové délky 900 nm.

5.5 Měření teplotní odolnosti

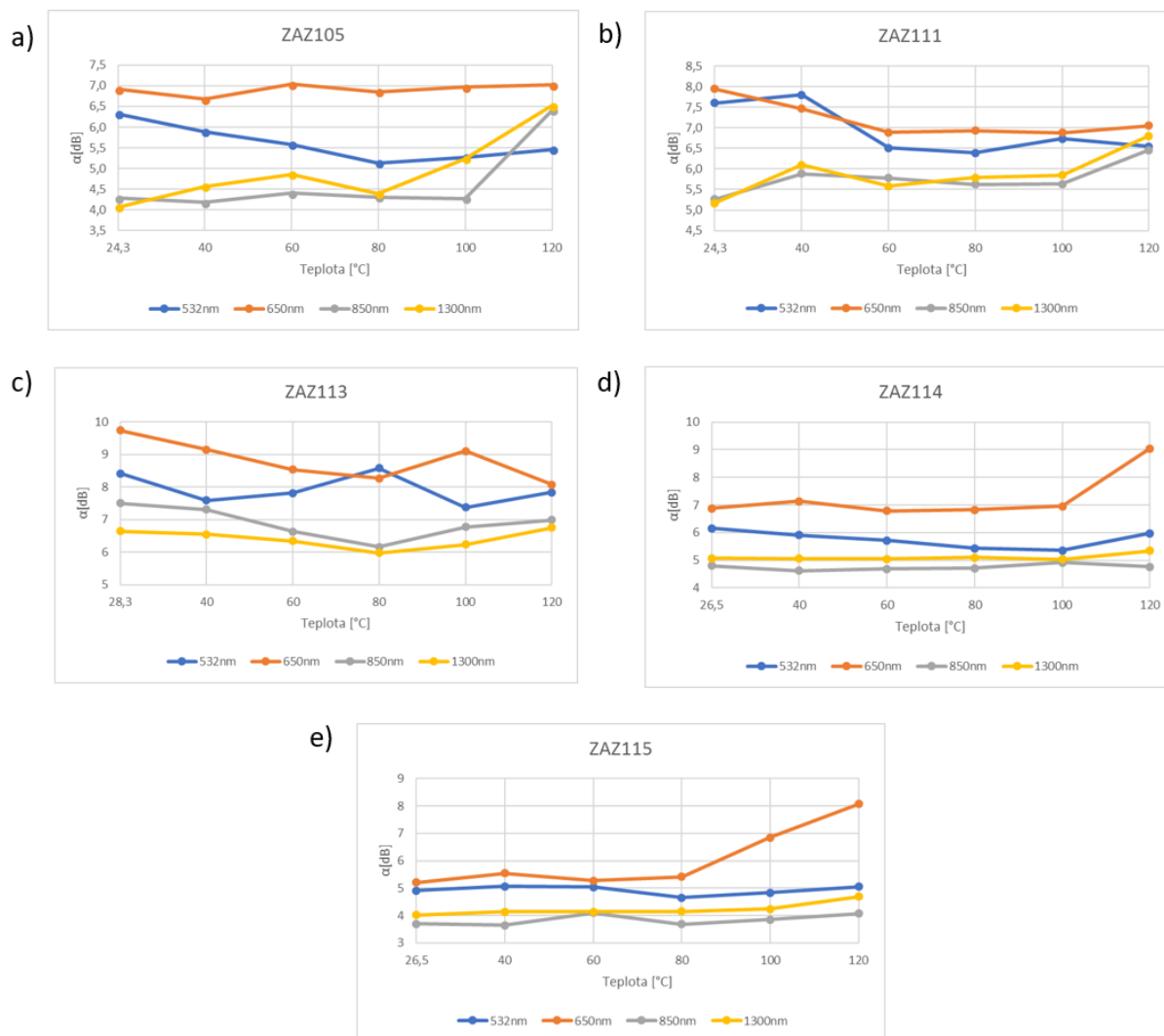
Teplotní odolnost vyrobených rozbočnic byla zkoumána v teplotní komoře, kde rozbočnice byly krátkodobě vystaveny teplotám až do 120°C a při těchto teplotách byl měřen celkový vložný útlum. Druhým způsobem testování bylo vystavením rozbočnic teplotám až 120°C až po dobu 24 hodin a po vychladnutí změření celkového vložného útlumu.

5.5.1 Testy v teplotní komoře

Zkoumání teplotních vlastností bylo provedeno v teplotní komoře TSS 70/66 s teplotní rozsahem -80 až 220°C, měření bylo však prováděno pro teplotní rozsah 20 až 120°C [18]. Zdroje záření a vhodný detektor fotometru Thorlabs PM200 byly napojeny na rozbočnici, umístěnou v teplotní komoře, přes vlákna JTFLH6006301040 dlouhá 5 m protaženými průchodkou komory. Měření probíhalo na vlnových délkách 532, 650, 850 a 1300 nm se stejnými zdroji záření a detektory jako v případě měření vložného útlumu (viz podkapitola 5.3).

Měření probíhalo nejdříve při pokojové teplotě a poté na teplotách 40, 60, 80, 100 a 120°C, kdy se vždy nechaly rozbočnice při této teplotě deset minut stabilizovat a až poté bylo provedeno měření. Tomuto měření byly podrobeny vzorky s vlnovodnou vrstvou NOA83H a plášťovou vrstvou Zeonex E48R (ZAZ105, ZAZ111, ZAZ113, ZAZ114 a ZAZ115).

Výsledky těchto měření jsou uvedeny na obrázku 5.16. Všechny vzorky jsou optické rozbočnice s vlnovodnou vrstvou NOA83H a plášťovou vrstvou Zeonex E48R. Liší se přívodními vlákny. Na obrázku 5.16.a je uveden průběh závislosti vložného útlumu na teplotě v komoře pro rozbočnici s přívodními vlákny JTFLH6006301040 (ZAZ105). Na obrázku 5.16.b je uveden průběh závislosti vložného útlumu na teplotě v komoře pro rozbočnici s přívodními vlákny FIP500550590 (ZAZ111). Na obrázku 5.16.c je uveden průběh závislosti vložného útlumu na teplotě v komoře pro rozbočnici s přívodními vlákny FIP500550590 (ZAZ113). Na obrázku 5.16.d je uveden průběh závislosti vložného útlumu na teplotě v komoře pro rozbočnici s přívodními vlákny JTFLH6006301040 (ZAZ114). Na obrázku 5.16.e je uveden průběh závislosti vložného útlumu na teplotě v komoře pro rozbočnici s přívodními vlákny JTFLH6006301040 (ZAZ115).



Obr. 5.16: Výsledky měření v teplotní komoře pro rozbočnice pro rozbočnice s vlnovodnou vrstvou NOA83H a plášťovou vrstvou Zeonex E48R: a) ZAZ105, b) ZAZ111, c) ZAZ113, d) ZAZ114, e) ZAZ115.

Velké kolísání průběhů závislostí u rozbočnic ZAZ105, ZAZ111 a ZAZ113 uvedených na obrázcích 5.16.a až 5.16.c lze částečně vysvětlit chybou měření, která byla způsobena častým přepojováním FC/PC konektorů a nedostatečným vyčištěním čel vláken. Na základě tohoto zjištění byl při měření vzorků ZAZ114 a ZAZ115 kladen důraz na čistotu konektorů, která byla zajištěna několika čištěními čel vláken za sebou.

Z obrázku 5.16. je patrné, že nejstabilnější průběhy vložného útlumu na aktuální teplotě v místnosti vykazují vzorky ZAZ114 a ZAZ115. Hodnoty vložného útlumu pro vlnové délky 532, 850, 1300 a 1550 nm jsou pro všechny teploty přibližně konstantní. Výjimkou je vlnová délka

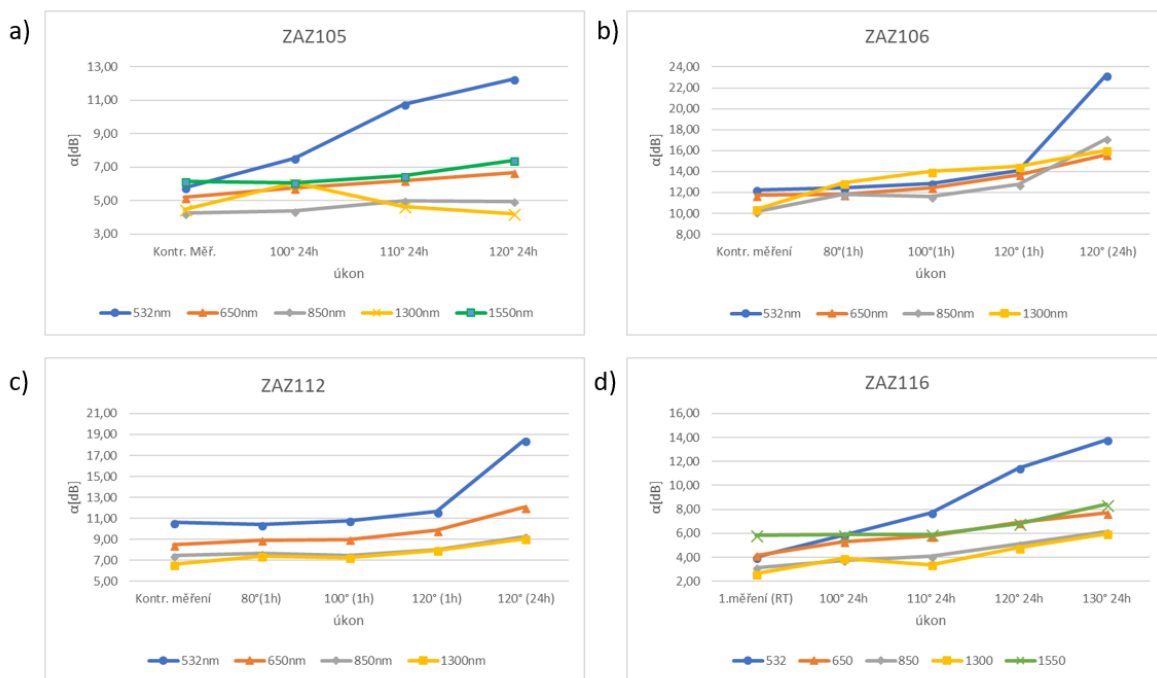
650 nm, kde vložný útlum začíná u rozbočnice ZAZ114 růst při teplotě 100°C a u rozbočnice ZAZ115 při teplotě 80°C.

5.5.2 Teplotní testy vzorků s křemennými vlákny

K dalšímu zkoumání teplotní odolnosti byla použita laboratorní pec Memmert UF30 plus [19]. Vybrané vzorky byly podrobeny vysokým teplotám až na hranici teplotní odolnosti použitých materiálů udávanou výrobcí (podkapitola 3.1). Těmto testům byly vystaveny optické rozbočnice s vlnovodnou vrstvou NOA83H a plášťovou vrstvou Zeonex E48R se šířkou vstupních a výstupních vlnovodů $w_f = 635 \mu\text{m}$ (ZAZ105, ZAZ106, ZAZ112 a ZAZ116). Těmto vzorkům byl nejdříve změřen vložný optický útlum a poté byly umístěny do laboratorní pece na danou dobu při dané teplotě. Po uplynutí doby se vzorky vyndali a nechali stabilizovat při pokojové teplotě. Poté se opět změřil optický vložný útlum vzorku.

Vzorek ZAZ105 byl vystaven teplotám 100, 110 a 120°C vždy po dobu 24 hodin. Vzorky ZAZ106 a ZAZ112 byly vystaveny teplotám 80, 100 a 120°C vždy po dobu jedné hodiny a poté znovu teplotě 120°C po dobu 24 hodin. Vzorek ZAZ116 byl vystaven teplotám 100, 110, 120 a 130°C vždy po dobu 24 hodin.

Výsledky těchto měření jsou uvedeny na obrázku 5.17. Všechny vzorky jsou optické rozbočnice s vlnovodnou vrstvou NOA83H a plášťovou vrstvou Zeonex E48R. Liší se přívodními vlákny. Na obrázku 5.17.a je vidět průběh závislosti vložného útlumu na vystavené teplotě v laboratorní peci pro rozbočnici ZAZ105 s přívodními vlákny JTFLH6006301040. Na obrázku 5.17.b je vidět průběh závislosti vložného útlumu na vystavené teplotě v laboratorní peci pro rozbočnici ZAZ106 s přívodními vlákny JTFLH6006301040. Na obrázku 5.17.c je vidět průběh závislosti vložného útlumu na vystavené teplotě v laboratorní peci pro rozbočnici ZAZ112 s přívodními vlákny FIP500550590. Na obrázku 5.17.d je vidět průběh závislosti vložného útlumu na vystavené teplotě v laboratorní peci pro rozbočnici ZAZ116 s přívodními vlákny JTFLH6006301040.



Obr. 5.17: Výsledky měření odolnosti pomocí laboratorní pece pro rozbočnice s vlnovodnou vrstvou NOA83H a plášťovou vrstvou Zeonex E48R se šířkou vstupních a výstupních vlnovodů $w_f = 635 \mu\text{m}$: a) ZAZ105, b) ZAZ106, c) ZAZ112, d) ZAZ116.

Optická rozbočnice ZAZ105, která již prošla vysokými teplotami během měření v teplotní komoře vykazovala teplotní odolnost na všech vlnových délkách kromě vlnové délky 532 nm. Velké zvětšení útlumu po teplotním namáháním 100°C 24 hodin a následné snížení lze vysvětlit špatným vyčištěním konektorů během měření. Výraznými změnami hodnoty vložného útlumu po všech teplotních testech u rozbočnice ZAZ105 oproti stavu před nimi, byl na vlnové délce 532 nm nárůst o 6,5 dB a na vlnové délce 650 nm nárůst o 1,5 dB.

Rozbočnice ZAZ106 a ZAZ112, které byly vystaveny teplotám 80 a 100°C po dobu jedné hodiny, nevykazovali výraznou změnu vložného útlumu na vlnových délkách 532, 650 a 850 nm. Změna byla pozorována na vlnové délce 1300 nm u rozbočnice ZAZ106, kde se vložný útlum zvětšil o přibližně 4 dB. U těchto dvou rozbočnic začal výrazně růst vložný útlum všech vlnových délkách až po vystavení teplotě 120°C po dobu jedné hodiny. Největší změnu vložného útlumu u těchto rozbočnic lze pozorovat po vystavení teplotě 120°C po dobu 24 hodin. Výrazná změna hodnoty vložného útlumu po všech teplotních testech oproti stavu před nimi byla pozorována u obou rozbočnic ZAZ106 a ZAZ112. Na vlnové délce 532 nm u rozbočnice ZAZ106 došlo k nárůstu vložného útlumu o 11,1 dB, na vlnové délce 650 nm byl nárůst 1,6 dB, na vlnové délce 850 nm byl nárůst 7,2 dB a na vlnové délce 1300 nm byl nárůst 5,8 dB. U rozbočnice ZAZ112 došlo k nárůstu vložného útlumu o 7,9 dB na vlnové délce

532 nm, nárůstu o 3,6 dB na vlnové délce 650 nm, nárůstu o 1,8 dB na vlnové délce 850 nm a nárůstu o 2,5 nm na vlnové délce 1300 nm.

U rozbočnice ZAZ116 byl pozorován konstantní nárůst vložného útlumu na všech vlnových délkách, kromě délky 1300 nm. Měření na této vlnové délce pravděpodobně zkresluje chyba měření, způsobená špatně vyčištěnými konektory po prvním nebo druhém teplotním testu (100°C na 24 hodin nebo 110°C na 24 hodin). Výrazná změna hodnoty vložného útlumu po všech teplotních testech oproti stavu před nimi byla pozorována na všech vlnových délkách. Na vlnové délce 532 nm u rozbočnice ZAZ116 došlo k nárůstu vložného útlumu o 9,8 dB, na vlnové délce 650 nm byl nárůst 3,5 dB, na vlnové délce 850 nm byl nárůst 3 dB, na vlnové délce 1300 nm byl nárůst 3,3 dB a na vlnové délce 1550 nm byl nárůst o 2,6 dB.

5.5.3 Teplotní testy vzorků s plastovými vlákny

Teplotním testům odolnosti byly podrobeny také rozbočnice 1x2Y vyrobené v předchozí diplomové práci kolegy Ing. Mariána Knieta s názvem *Optické planární struktury s možností připojení polymerních optických vláken* [3]. Tyto rozbočnice byly vytvořeny z materiálů odolných teplotám do 80°C. Jednalo se o vzorky s označením KN102, 186391 a Motiv 11 s vlnovodnou vrstvou NOA73, podobné NOA83H jenom s nižší teplotní odolností, a plášťové vrstvy z polymeru PMMA. Vzorky 186391 a Motiv 11 měly jako přívodní vlákna použitá POF o průměru 1 mm, v případě vzorku KN102 o průměru 750 μm. Vzorek Motiv 11 nebyl opatřen FC/PC konektory, a proto byl při měření vložného útlumu opatřen rozebíratelnými BAR konektory. Všechny tyto vzorky byly podrobeny teplotním testům v laboratorní peci Memmert UF30 plus a postup testů a měření byl stejný jako v podkapitole 5.5.2. Měření vložného útlumu bylo provedeno na vlnové délce 532 a 650 nm.

Nejdříve bylo měření provedeno při pokojové teplotě a pak byly vzorky teplotně namáhány při teplotě 80°C na 24 hodin. Poté byly opět změřeny vlastnosti a následně byly vzorky namáhány při teplotě 100 °C po dobu 24 hodin. Vzorky 186391 a Motiv 11 byly ještě teplotně namáhány při teplotě 110 °C po dobu 24 hodin a znovu změřeny. Výsledky měření vložného útlumu jsou uvedeny v tabulce 5.6.

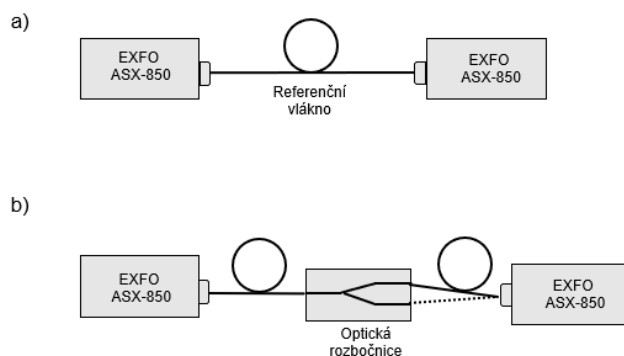
Tab. 5.6: Výsledky měření vložného útlumu rozbočnic s POF vlákny.

Označení vzorku	λ [nm]	α [dB] pokojová teplota	α [dB] 80°C na 24 h	α [dB] 100°C na 24 h
186391	532	9,1	11,4	13,7
	650	9,0	11,3	13,6
KN102	532	4,7	6,2	nezměřeno
	650	4,8	5,8	29,1
Motiv 11	532	6,7	13,4	13,6
	650	9,6	12,4	14,9

Výrazný nárůst vložného útlumu byl pozorován u všech měřených vzorků na obou vlnových délkách po každém teplotním testu. Po vystavení teplotě 80°C na 24 hodin se u měřených vzorků zvýšil vložný útlum v průměru o 2,7 dB. V průběhu dalšího namáhání při teplotě 100°C na 24 hodin došlo ke zničení vzorku KN102, kdy vložný útlum na vlnové délce 532 nm nebylo možné změřit a na vlnové délce 650 nm došlo k nárůstu o 23,3 dB. U vzorků 186391 a Motiv 11 došlo k průměrnému zvýšení vložného útlumu o dalších 1,8 dB. Během dalšího teplotního namáhání při teplotě 110°C na 24 hodin došlo ke zničení zbývajících dvou vzorků. Tato teplota se ukázala jako kritická především pro POF vlákna, která se začala kroutit a zvětšovat. Byl proveden pokus s POF vlákny, která byla samotná namáhána při teplotě 110°C a bylo změřeno, že se zvětšil jejich rozměr průměrně o 33%.

5.6 Měření přenosové rychlosti datových toků

Optické rozbočnice ZAZ102 a ZAZ105 byly podrobeny měření přenosové rychlosti datových toků a byla sledována chybovost přenosu na vlnové délce 650 nm. Tyto rozbočnice jsou tvořené plášťovou vrstvou Zeonex E48R, ale liší se vlnovodnou vrstvou. V případě ZAZ102 se jedná o vlnovodnou vrstvu Epcocore, v případě ZAZ105 se jedná o vrstvu NOA83H. Měření bylo provedeno pomocí dvou přístrojů EXFO ASX-850, které dokáží sledovat tyto parametry [20]. V prvním kroku byly změřeny referenční vlákna k daným vzorkům (5.18.a) a v dalším kroku optické rozbočnice (5.18.b).



Obrázek 5.18: Měření datového toku: a) referenčního vlákna, b) optické rozbočnice.

Referenční vlákna vykazovala bezchybný a bezeztrátový přenos při datovém toku 100 Mbit/s. Rozbočnice ZAZ102 s vlnovodnou vrstvou Epcocore vykazovala 100% chybovost při datovém

toku 100 Mbit/s. Rozbočnice ZAZ105 s vlnovodnou vrstvou NOA83H vykazovala bezchybný a bezztrátový přenos při datovém toku 100 Mbit/s. Výpisy z měřících přístrojů pro oba kanály ZAZ105 a ZAZ115 jsou uvedeny v příloze A.

6. Závěr

V diplomové práci jsem se zabýval návrhem a výrobou optických planárních rozbočnic typu 1x2Y určeným pro připojení k optickým vláknům s velkým průměrem (550, 635 nebo 750 μm). Pro teoretické výpočty základních parametrů rozbočnic jsem postupoval podle analýzy publikované p. D. Beltramim. Na základě této analýzy jsem stanovil maximální úhel mezi výstupními vlnovody a minimální délku podélně se rozšiřující (taperované) části vlnovodu, při kterých je přenos bezztrátový. Přesný návrh jsem pak provedl pomocí specializovaného softwaru BeamPROP od společnosti Rsoft (nyní Synopsys).

Pomocí tohoto softwaru bylo navrženo celkem deset motivů. Dva návrhy pro rozbočnice s vlnovodnou vrstvou Epocore a plášťovou vrstvou Zeonex E48R s šířkou vstupních a výstupních vlnovodů 550 μm pro vlákna FIP500550590 a šířkou 635 μm pro vlákna JTFLH6006301040. S těmito dvěma rozměry vlnovodů byly navrženy také dva motivy rozbočnic s vlnovodnou vrstvou NOA83H a plášťovou vrstvou Zeonex E48R a dva motivy rozbočnic s vlnovodnou vrstvou Epocore a plášťovou vrstvou Makrolon GP. Pro rozměry vstupních a výstupních vlnovodů 550 a 635 μm byly navrženy také dva motivy pro rozbočnice s vlnovodnou vrstvou PDMDPS a plášťovou vrstvou PDMS. Pro tuto kombinaci materiálů byly dále navrženy 2 motivy s rozměry vstupních a výstupních vlnovodů o šířce 750 μm , s odlišnou vzdáleností mezi výstupními rameny.

Následovala výroba struktur podle provedených optimalizačních návrhů. Nejdříve proběhla výroba drážek do substrátů Zeonex E48R a Makrolon GP pro vlnovodné jádro a vstupní/výstupní vlnovody pomocí CNC gravírování. Byl také navržen postup výroby drážek pomocí 3D tisku pro rozbočnice s vlnovodnou vrstvou PDMDPS a plášťovou vrstvou PDMS. Z důvodu velké drsnosti vytištěných struktur a nedostatku materiálu PDMDPS nebyly tyto vzorky realizovány. V případě materiálu Makrolon GP, bylo zjištěno, že není vhodný pro výrobu drážek pomocí CNC gravírování z důvodu silného třepení materiálu, které způsobilo vysokou drsnost povrchu drážek pro vlnovodnou vrstvu. Celkem bylo takto vyrobeno deset upravených podložek, z důvodu výše zmíněné vyšší drsnosti ale nebylo přistoupeno k výrobě rozbočnic.

Do vyrobených drážek do podložky z polymeru Zeonex E48R následovalo vložení vstupních a výstupních optických vláken a nanesení vlnovodné vrstvy NOA83H nebo Epocore. Poté byly polymery vytvrzeny a byla připevněna horní krycí vrstva. Vyrobeno bylo celkem 31 drážek podle 8 navrhnutých motivů, z nichž 15 bylo zalito vlnovodnou vrstvou.

Po výrobě rozbočnic následovalo měření jejich vloženého optického útlumu. Měření proběhlo na vlnových délkách 532, 650, 850, 1300 a u vybraných vzorků na vlnové délce 1550 nm. Z rozbočnic vyrobených z kombinace materiálů Zeonex E48R a Epocore byl naměřen

nejmenší vložný útlum rozbočnici na vlnové délce 1300 nm 10,9 dB (vz. ZAZ102). Poměr dělicích výkonů byl 63,5:36,5%. Nejnižší vložný útlum z rozbočnic, které byly vyrobené z materiálů Zeonex E48R a NOA83H, vykazovala rozbočnice ZAZ115, které byl naměřen útlum 2,6 dB na vlnové délce 850nm a její dělicí poměr byl 48,4:51,6%.

Vybrané rozbočnice s vlnovodnou vrstvou Epocore a plášťovou vrstvou Zeonex E48R (ZAZ102) a rozbočnice s vlnovodnou vrstvou NOA83H a plášťovou vrstvou Zeonex E48R (ZAZ105 a ZAZ115) byly podrobeny měření přenosové rychlosti datových toků a byla sledována chybovost přenosu na vlnové délce 650 nm. Z výsledků měření vyplývá, že vzorky ZAZ105 a ZAZ115 dovolují bezchybný přenos při přenosové rychlosti 100 Mbit/s.

Vybrané rozbočnice byly také podrobeny testům teplotní odolnosti. Pět rozbočnic s vlnovodnou vrstvou NOA83H a plášťovou vrstvou Zeonex E48R bylo tepelně namáháno v teplotní komoře a během tohoto teplotního namáhání byl u rozbočnic měřen vložný optický útlum. Vzorky ZAZ114 a ZAZ115, které vykazovaly před tepelným namáháním nejnižší vložný útlum, vykazovaly přibližně stejný vložný útlum na všech vlnových délkách až do teploty 80°C. Při této teplotě začal růst vložný útlum na vlnové délce 650 nm u rozbočnice ZAZ115. U ZAZ114 začal růst vložný útlum na vlnové délce 650 nm. Na jiných vlnových délkách vykazovaly optické rozbočnice teplotní stabilitu až do 120°C.

Dalším způsobem testování teplotní odolnosti probíhal za pomoci laboratorní pece, ve které byly vybrané vzorky s vlnovodnou vrstvou NOA83H namáhány při různých teplotách až po dobu 24 hodin. Bylo zjištěno, že dlouhodobé tepelné namáhání při vysokých teplotách má za následek výrazný nárůst vložného optického útlumu měřených rozbočnic. Nejvíce je ovlivněn přenos na vlnové délce 532 nm, kdy rozdíl měrného útlumu před teplotním namáháním a po něm činil průměrně 8,8 dB.

Teplotním testům byly také podrobeny tři optické rozbočnice s POF vlákny vyrobené v rámci diplomové práce *Optické planární struktury s možností připojení polymerních optických vláken* kolegy Ing. Mariána Knieta s vlnovodnou vrstvou NOA73 a plášťovou vrstvou PMMA. Vzorek KN102 byl zničen při vystavení teplotě 100°C na 24 hodin a zbylé dva při vystavení teplotě 110°C na 24 hodin.

Z výsledků dosažených při řešení diplomové práce vyplývá, že se podařilo vyrobit optické rozbočnice s velkým rozměrem jádra vlnovodné vrstvy, které vydrží vyšší teploty než běžné rozbočnice s POF vlákny a zároveň umožňují přenos optického signálu na vyšších vlnových délkách. Ve srovnání s rozbočnicemi s plastovými vlákny dokáží tyto rozbočnice plnit svůj účel i po vystavení tepelnému namáhání 120°C po dobu 24 hodin a přenášet optický signál na vlnových délkách 1300 a 1550 nm.

7. Literatura

- [1] PRAJZLER, V., M. NERUDA, P. NEKVINDOVA a P. MIKULIK. *Properties of Multimode Optical Epoxy Polymer Waveguides Deposited on Silicon and TOPAS Substrate*. Radioengineering [online]. Společnost pro radioelektronické inženýrství, 2017, 26(1), 10-15 [cit. 2018-05-19]. DOI: 10.13164/re.2017.0010. ISSN 1210-2512. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/64700>
- [2] MOST members list [online].[cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://www.mostcooperation.com/membership/members-list/>
- [3] KNIETEL, M. *Optické planární struktury s možností připojení polymerních optických vláken*, Praha: ČVUT 2017. Diplomová práce, ČVUT, Fakulta elektrotechnická
- [4] BOHÁČ, Leoš a Michal LUCKI. *Optické komunikační systémy*. V Praze: České vysoké učení technické, 2010. ISBN 978-80-0104484-1.
- [5] NOVOTNÝ, Karel, Tomáš MARTAN a Jan ŠÍSTEK. *Systémy pro optické komunikace*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02810-0.
- [6] Epocore & Epoclad Datasheet [online].[cit. 2018-05-09]. Dostupné z: http://microchem.com/products/images/uploads/PI_EpoCoreClad.pdf
- [7] NOA83H Datasheet[online].[cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://www.norlandprod.com/adhesives/noa%2083h.html>
- [8] LS-6943 Datasheet[online].[cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://nusal.com/services/downloadfile.ashx?productcode=LS-6943&originalname=LS6943P.pdf>
- [9] ZEONEX® E48R Datasheet[online].[cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://www.zeon.co.jp/content/200181690.pdf>
- [10] Makrolon® GP Solid polycarbonate sheet[online].[cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://www.sheets.covestro.com/Products/Europe/Makrolon-Solid-Sheets/Makrolon-GP/Product-List.aspx?pid=C4FD07202D0F4F80BA8533A2F629E5AC®ion=0AE0AB7820064D0FA21EB96EB3D0C088>

- [11] Sylgard 184 a Sylgard 18[online].[cit. 2018-05-09]. Dostupné z:
<http://www.elchemco.cz/zbozi/25/sylgard-184-a-sylgard-182/>
- [12] Polymicro Silica/Silica Optical Fiber FI[online]. [cit. 2018-05-09]. Dostupné z:
https://www.cmscientific.com/info_sheets/fi.pdf
- [13] Silica/Polyclad Optical Fiber JTLFH-Low-OH [online]. [cit. 2018-05-09]. Dostupné z:
https://www.lasercomponents.com/de/?embedded=1&file=fileadmin/user_upload/home/Data_sheets/polymicro/jtflh-low-oh.pdf&no_cache=1
- [14] Beltrami, D.: *Planar multimode waveguides and devices*, Optical and Quantum Electronics, Vol. 31, 1999, pp. 307 – 326.
- [15] RSoft design group, BeamPROP 8.1 User Guide, 2008.
- [16] DLOUHÝ, J. *Studium možnosti přípravy optických struktur pomocí technologie 3D tisku*, Praha: ČVUT 2018. Bakalářská práce, ČVUT, Fakulta elektrotechnická
- [17] Metricon, Model 2010/M Overview [online]. [cit. 2018-05-09]. Dostupné z:
<http://www.metricon.com/model-2010-m-overview/>
- [18] Thermal Shock Test Chambers, Series TSS, TSS 70/66 [online]. [cit. 2018-05-09].
Dostupné z: <https://www.cts-umweltsimulation.de/en/products/shock-tss.html>
- [19] Product specification, Universal Oven UF30 [online]. [cit. 2018-05-09]. Dostupné z:
<https://www.memmert.com/products/heating-drying-ovens/universal-oven/UF30/pdf/>
- [20] AXS-200/805/855 User guide [online]. [cit. 2018-05-09]. Dostupné z:
[https://documents.exfo.com/Products/UserGuides/User%20Guide%20AXS-805-855%20\(200\)%20English%20\(1058077\).pdf](https://documents.exfo.com/Products/UserGuides/User%20Guide%20AXS-805-855%20(200)%20English%20(1058077).pdf)

Příloha A

Prototypový vzorek č. ZAZ105-rozbočnice, větev 1.:

Měření datového toku pro 650nm:

Výpis z měřicího zařízení EXFO ASX-850:

-----Test Results-----

Start Time: 13:17:15 Duration: 0d 00:02:01

Global Pass/Fail Verdict: Pass

BER Pass/Fail Verdict: Pass

Bit Error Count: 0

Bit Error Rate: 0.0E00

SDT Pass/Fail Verdict: Pass

Longest SDT (ms): 0

Shortest SDT (ms): 0

Last SDT (ms): 0

Average SDT (ms): 0

Total SDT (s): 0

Service Disruption Count: 0

-----Alarms-----

Alarm	Seconds
-------	---------

LOS	N/A
-----	-----

Link Down	0
-----------	---

Frequency	0
-----------	---

No Traffic	0
------------	---

Pattern Loss	0
--------------	---

-----Errors-----

Error	Count	Error	Count
-------	-------	-------	-------

Symbol	0	Jabber	0
--------	---	--------	---

Undersize	0	FCS	0
-----------	---	-----	---

Runt	0
------	---

Alignment	0
-----------	---

-----Statistics-----

RX Rate (%): 100.0

Item	Count	Rate
------	-------	------

Mismatch '0'	0	0.0E00
--------------	---	--------

Mismatch '1'	0	0.0E00
--------------	---	--------

Prototypový vzorek č. ZAZ105-rozbočnice, větev 2.:

Měření datového toku pro 650nm:

Výpis z měřicího zařízení EXFO ASX-850:

-----Test Results-----

Start Time: 13:38:04 Duration: 0d 00:02:01

Global Pass/Fail Verdict: Pass

BER Pass/Fail Verdict: Pass

Bit Error Count: 0

Bit Error Rate: 0.0E00

SDT Pass/Fail Verdict: Pass

Longest SDT (ms): 0

Shortest SDT (ms): 0

Last SDT (ms): 0

Average SDT (ms): 0

Total SDT (s): 0

Service Disruption Count: 0

-----Alarms-----

Alarm Seconds

LOS N/A

Link Down 0

Frequency 0

No Traffic 0

Pattern Loss 0

-----Errors-----

Error Count Error Count

Symbol 0 Jabber 0

Undersize 0 FCS 0

Runt 0

Alignment 0

-----Statistics-----

RX Rate (%): 100.0

Item Count Rate

Mismatch '0' 0 0.0E00

Mismatch '1' 0 0.0E00

Prototypový vzorek č. ZAZ115-rozbočnice, větev 1.:

Měření datového toku pro 650nm:

Výpis z měřicího zařízení EXFO ASX-850:

-----Test Results-----

Start Time: 13:49:07 Duration: 0d 00:01:01

Global Pass/Fail Verdict: Pass

BER Pass/Fail Verdict: Pass

Bit Error Count: 0

Bit Error Rate: 0.0E00

SDT Pass/Fail Verdict: Pass

Longest SDT (ms): 0

Shortest SDT (ms): 0

Last SDT (ms): 0

Average SDT (ms): 0

Total SDT (s): 0

Service Disruption Count: 0

-----Alarms-----

Alarm	Seconds
-------	---------

LOS	N/A
-----	-----

Link Down	0
-----------	---

Frequency	0
-----------	---

No Traffic	0
------------	---

Pattern Loss	0
--------------	---

-----Errors-----

Error	Count	Error	Count
-------	-------	-------	-------

Symbol	0	Jabber	0
--------	---	--------	---

Undersize	0	FCS	0
-----------	---	-----	---

Runt	0		
------	---	--	--

Alignment	0		
-----------	---	--	--

-----Statistics-----

RX Rate (Mbps): 95.0

Item	Count	Rate
------	-------	------

Mismatch '0'	0	0.0E00
--------------	---	--------

Mismatch '1'	0	0.0E00
--------------	---	--------

Prototypový vzorek č. ZAZ115-rozbočnice, větev 2.:

Měření datového toku pro 650nm:

Výpis z měřicího zařízení EXFO ASX-850:

-----Test Results-----

Start Time: 13:57:55 Duration: 0d 00:01:01

Global Pass/Fail Verdict: Pass

BER Pass/Fail Verdict: Pass

Bit Error Count: 0

Bit Error Rate: 0.0E00

SDT Pass/Fail Verdict: Pass

Longest SDT (ms): 0

Shortest SDT (ms): 0

Last SDT (ms): 0

Average SDT (ms): 0

Total SDT (s): 0

Service Disruption Count: 0

-----Alarms-----

Alarm	Seconds
-------	---------

LOS	N/A
-----	-----

Link Down	0
-----------	---

Frequency	0
-----------	---

No Traffic	0
------------	---

Pattern Loss	0
--------------	---

-----Errors-----

Error	Count	Error	Count
-------	-------	-------	-------

Symbol	0	Jabber	0
--------	---	--------	---

Undersize	0	FCS	0
-----------	---	-----	---

Runt	0		
------	---	--	--

Alignment	0		
-----------	---	--	--

-----Statistics-----

RX Rate (Mbps): 95.0

Item	Count	Rate
------	-------	------

Mismatch '0'	0	0.0E00
--------------	---	--------

Mismatch '1'	0	0.0E00
--------------	---	--------