



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromagnetického pole**

Optické planární struktury s možností připojení polymerních optických vláken

Optical Planar Structures with Connection of Plastic Optical Fibers

diplomová práce

Bc. Marian Knietel

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Studijní obor: Bezdrátové komunikace

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

Praha 2017

Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne v súlade s Metodickým pokynom č. 1/2009 O dodržovaní etických princípů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací. Nemám důvod pro použití tohoto díla v zmysle Zákona č. 121/2000 Sb. § 60, o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů.

V Praze dňa 20.5.2017

Marian Knieta

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kniatel** Jméno: **Marian** Osobní číslo: **406075**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Bezdrátové komunikace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Optické planární struktury s možností připojení polymerních optických vláken

Název diplomové práce anglicky:

Optical Planar Structures with Connection of Plastic Optical Fibers

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s teoretickými principy planárních mnohavidových optických vlnodů.
- 2) Seznamte se s postupy návrhu fotonických struktur pomocí dostupných návrhových počítačových programů.
- 3) Navrhněte výkonové mnohavidové optické rozbočnice ze zvolených polymerních materiálů.
- 4) Navrhněte zatočený vlnod s velkým rozměrem vlnovodného jádra.
- 5) Navrhněte postupy pro výrobu navržených struktur a proveďte jejich výrobu.
- 6) Proveďte diagnostiku vyrobených struktur.
- 7) Dosažené výsledky shrňte do zprávy o rozsahu cca 50 až 70 stran.

Seznam doporučené literatury:

1. K. Novotný: Optická telekomunikační technika, ČVUT 1998, skripta.
2. M. Neruda: Optické planární vlnovody, ČVUT 2016, Diplomová práce.
3. R. Maštera: Pasivní optické polymerní planární struktury pro optický přenos dat, ČVUT 2015, Diplomová práce.
4. O. Ziemann, J. Krauser, P.E. Zamzow, W. Daum: POF Handbook, 2nd Edition Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **01.02.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **25.05.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

Pod'akovanie

Rád by som pod'akoval vedúcemu diplomovej práce, pánovi doc. Ing. Václavovi Prajzlerovi, Ph.D., za rady pri návrhu a výrobe planárnych štruktúr a za čas, ktorý mi venoval pri konzultáciách. Pod'akovanie tiež patrí pánovi Ing. Pavlovi Kulhovi, Ph.D. z Katedry mikroelektroniky za výrobu substrátov a krycích vrstiev rozbočníc, pánovi Ing. Martinovi Horákovi z Katedry elektrotechnologie FEL ČVUT v Prahe za spoluprácu pri meraní vybraných vzoriek v teplotnej komore, pánovi doc. Ing. Zdeňkovi Burianovi, Csc. za konzultácie týkajúce sa teoretických výsledkov a pánovi Herbertovi Enserovi z Institute for Microelectronics and Microsensors, Johannes Kepler University Linz za výrobu planárnych štruktúr pomocou 3D tlače z materiálu VEROCLEAR RGD810.

Názov práce: Optické planární struktury s možností připojení optických polymerních vláken

Autor: Marian Knietel

Katedra (ústav): Katedra mikroelektroniky

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

E-mail vedúceho práce: xprajzlv@fel.cvut.cz

Abstrakt: Diplomová práca sa zameriava na návrh, simuláciu, výrobu a meranie planárnych mnohovidových optických výkonových rozbočníc 1x2Y a 90° zatočených vlnovodov pre POF (Plastic Optical Fiber) vlákna. V prvej časti práce je popísaný princíp šírenia svetla v planárnych štruktúrach, rozdelenie optických rozbočníc a zatočených vlnovodov. Následne je uvedený návrh štruktúr, ktorý zahŕňa dva spôsoby: prvým je teoretický návrh na základe vzťahov pre výpočet geometrických parametrov mnohovidových štruktúr odvodených pánom Bertramim a druhým návrh v simulačných programoch BeamPROP™ a OptiCAD. Na základe týchto simulácií bolo vybraných desať navrhnutých motívov 1x2Y rozbočníc so substrátmi PMMA (polymetylmetakrylát) a VEROCLEAR RGD810, ktoré boli rozdelené na tri typy odlišujúce sa riešením tvaru a rozmerov vlnovodov. Urobil som tiež návrh štyroch motívov zatočených vlnovodov. Navrhnuté štruktúry boli vyrobené dvomi spôsobmi: vytvorením U-drážok do PMMA substrátu pomocou CNC gravírovania a 3D tlačou z materiálu VEROCLEAR RGD810. Ako vlnovodné materiály boli použité polyméry NOA (Norland Optical Adhesive), ktoré boli nanosené do drážok a vytvrdené UV žiarením. Popísané je tiež meranie parametrov navrhnutých štruktúr a dosiahnuté výsledky.

Kľúčové slová: mnohovid, optická planárna rozbočnica, zatočený vlnovod, vložný optický útlm

Title: Optical Planar Structures with Connection of Plastic Optical Fibers

Author: Marian Knietel

Department: Department of Microelectronics

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

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

Abstract: This diploma thesis deals with design, simulation, construction and measurement of planar multimode power splitters with dividing power ratio 1:2 and 90° planar bends for plastic optical fibers. In the first part of the project the principle of light propagation in planar structures is described and types of optical waveguides are characterized. Then design of planar structures is described, which includes two methods: the first is theoretical design based on relations for calculation of geometric parameters of the multimode structures and the second is using BeamPROP™ and OptiCAD simulation programs. Subsequently ten types of simulated 1x2Y splitters with PMMA (Polymethyl methacrylate) or VEROCLEAR RGD810 substrate and with different dimensions and shapes of waveguides were chosen. Four types of 90° bends were also designed. Two ways of construction were used: creating grooves into the PMMA substrate using CNC engraving and 3D printing of VEROCLEAR RGD810 substrates with U-grooves. Polymers NOA (Norland Optical Adhesive) were used as waveguide materials and were applied to the U-grooves and cured by UV light. In the last part of the project the measurement of parameters of designed splitters is described and achieved results are given.

Keywords: multimode, optical planar splitter, bent waveguide, optical insertion loss

Zoznam symbolov a skratiek

symbol	veličina	jednotka
α	vložný optický útlm	dB
A	merný útlm	dB/cm
A_L	straty nesúlalom planárneho vlnovodu a vlákna	dB
B	magnetická indukcia	T
β	pozdĺžna zložka vlnového vektora	m^{-1}
c	polomer vlákna	μm
d	dĺžka taperovaného vlnovodu	mm
D	elektrická indukcia	C/m^2
Δ	kontrast indexu lomu	-
E	intenzita elektrického poľa	V/m
ε	permitivita	F/m
ε_0	permitivita vákua	F/m
h_f	výška jadra vlnovodu	μm
H	intenzita magnetického poľa	A/m
j	imaginárna jednotka	-
k_0	konštanta šírenia vo voľnom priestore	m^{-1}
k_1	vlnový vektor dopadajúcej vlny	m^{-1}
k_2	vlnový vektor odrazenej vlny	m^{-1}
k_f	vlnový vektor	m^{-1}
L_c	celková dĺžka rozbočnice	μm
L_{couple}	väzobný útlm	dB
L_{in}	dĺžka vstupného vlnovodu	μm
L_{out}	dĺžka výstupného vlnovodu	μm
L_{Sbend}	dĺžka vlnovodného ramena	μm
L_{sc}	straty rozptylom	dB
L_x	celková šírka rozbočnice	μm
λ	vlnová dĺžka	nm
μ	permeabilita prostredia	H/m
n	index lomu materiálu	-
n_c	index lomu krycej vrstvy	-
n_f	index lomu vlnovodnej vrstvy	-
n_k	komplexný index lomu	-
n_s	index lomu substrátu	-
NA	numerickej apertúra	-
NA_L	straty v dôsledku rozdielnej numerickej apertúry	dB
∇	gradient	-
p_{out1}	výstupný normovaný výkon	-
p_{out2}	výstupný normovaný výkon	-
P_1	výstupný výkon v 1. vetve	μW

symbol	veličina	jednotka
P_2	výstupný výkon v 2. vetve	μW
P_3	výstupný výkon v 3. vetve (pre zatočený vlnovod)	μW
P_{det}	detekovaný výkon	μW
P_{in}	vstupný výkon	μW
P_{out}	výstupný výkon	μW
P_{ref}	referenčný výkon	μW
PR_L	prenosové straty	dB
R	polomer zatočeného vlnovodu	m
R_L	Fresnelove straty	dB
RD_L	straty prechodom priamy - - zatočený vlnovod	dB
ρ	hustota náboja	Cm^{-2}
TL	prenosový útlm	dB
T_L	celkový útlm	dB
ϑ_c	kritický uhol	°
ϑ_i	uhol dopadu	°
ϑ_r	uhol odrazu	°
ϑ_t	uhol prestupu	°
v_f	fázová rýchlosť	ms^{-1}
v_s	skupinová rýchlosť	ms^{-1}
w_f	šírka jadra vlnovodu	μm
w_x	vzdialenosť výstupných vlnovodov	μm
ω	uhlová rýchlosť	s^{-1}

skratka	význam skratky	slovenský popis
BPM	Beam Propagation Method	Metóda šírenia opt. zväzku
NOA	Norland Optical Adhesive	spoločnosť v USA
PDMS	Polydimethylsiloxane	polydimetylsiloxán
PMMA	Polymethyl methacrylate	polymetylmetakrylát
POF	Plastic Optical Fiber	plastové optické vlákno
UV	Ultra Violet	ultrafialové žiarenie

Obsah

1.	Úvod	11
2.	Princíp vedenia svetla v planárnych optických vlnovodoch	13
3.	Straty v planárnych optických vlnovodoch	18
4.	Planárne optické 1x2Y rozbočnice	20
	4.1 Voľba materiálov	21
	4.2 Teoretické výpočty parametrov rozbočníc	22
	4.3 Metóda šírenia optického zväzku	24
	4.4 Návrh 1x2Y rozbočníc	26
5.	Zatočené planárne optické vlnovody	32
6.	Návrh planárneho optického zatočeného vlnovodu	34
	6.1 Výpočty útlmu zatočeného vlnovodu	34
	6.2 Metóda sledovania lúča (Ray-tracing)	35
	6.3 Návrh zatočeného vlnovodu pomocou programu OptiCAD	36
	6.4 Návrh zatočeného vlnovodu pomocou programu BeamPROP	39
7.	Výroba navrhnutých planárnych štruktúr	41
	7.1 Výroba štruktúr s použitím CNC gravírovania	41
	7.2 Výroba štruktúr s použitím 3D tlače	42
8.	Diagnostika a meranie útlmu vyrobených štruktúr	43
	8.1 Meranie indexu lomu	43
	8.2 Optická kontrola vyrobených štruktúr	44
	8.3 Meranie vložného optického útlmu	48
	8.4 Výsledky merania vložného optického útlmu 1x2Y rozbočníc	50
	8.5 Výsledky merania vložného optického útlmu zatočených vlnovodov	52
	8.6 Meranie spektrálnych charakteristík	56
	8.7 Meranie v teplotnej komore	58
9.	Záver	60
10.	Použitá literatúra	62
	Príloha A	
	Príloha B	
	Príloha C	
	Príloha D	
	Príloha E	

1. Úvod

Planárne optické štruktúry sa používajú tam, kde je potrebné určitým spôsobom ovplyvniť prechádzajúci optický signál – napríklad ho rozdeliť či zosilniť, a tam, kde je použitie vláknových vlnovodov nevýhodné, napríklad z priestorových dôvodov. Mnohovidové planárne štruktúry sú vhodné na prenos dát vysokými prenosovými rýchlosťami. V rámci tejto práce som sa zamerlal na dva druhy takýchto štruktúr – mnohovidové optické rozbočnice a zatočené vlnovody. Tieto štruktúry sa využívajú napríklad v dopravných prostriedkoch (automobiloch, lietadlách), aj v telekomunikačných sieťach FTTH (Fiber To The Home).

Planárne polymérové rozbočnice (označované 1x2Y) sú pasívne prvky, podobne ako napríklad optické rozvádzače alebo optické väzobné členy. Rozdeľujú optický výkon rovnomerne v pomere 50:50 alebo tiež nerovnomerne, napríklad v pomere 80:20. Sú tvorené substrátom, vlnovodnou vrstvou (jadrom) a krycou vrstvou. Výkon prechádzajúci rozbočnicou býva ovplyvnený jej optickým útlmom.

Vstupnými a výstupnými vlnovodmi môžu byť POF (Plastic Optical Fiber) vlákna, prípadne planárne optické vlnovody. Najbežnejšia šírka POF vlákien (priemer jadra spolu s krycou vrstvou) je 1 mm.

V rámci práce bolo používané vlákno ESKA SH 3001 so skokovou zmenou indexu lomu, ktorého jadro má priemer typicky 738 μm a je vyrobené z polymetylmetakrylátovej živice, plášť jadra z fluórovaného polyméru má priemer asi 750 μm a primárna ochrana vlákna je z polyetylénu a dosahuje priemer asi 2,2 mm. Index lomu jadra je 1,49, numerická apertúra dosahuje hodnotu 0,5. Vložný útlm vlákna dosahuje 200 dB/km na vlnovej dĺžke 650 nm. Vlákno je použiteľné pri širokom rozsahu teplôt, od -55°C do $+70^{\circ}\text{C}$ [1].

Planárne zatočené vlnovody sú rovnako ako 1x2Y rozbočnice pasívne prvky. Ich drážky, vytvorené v substráte, môžu mať napríklad tvar štvrtkruhu s určitým polomerom. Týmto riešením je možné dosiahnuť zmenu smeru prechádzajúceho signálu o 90° . Môžu byť umiestnené na doskách plošných spojov na optické prepojenie jednotlivých častí.

Táto diplomová práca nadväzuje na bakalársku prácu *Optické planárne mnohovidové výkonové rozbočnice*, v rámci ktorej boli riešené planárne 1x2Y a 1x4Y štruktúry s POF vláknami so šírkou 1 mm (980 μm jadro a 20 μm hrúbka plášťa) a so substrátom výlučne z polymetylmetakrylátu (PMMA). Planárne štruktúry používané v tejto práci boli optimalizované pre priemer vlákna 750 μm .

Na základe teoretických výpočtov parametrov rozbočníc, v ktorých boli použité hodnoty indexu lomu materiálov zmerané pomocou vidovej spektroskopie, som navrhol v programe BeamPROP™ rozbočnice 1x2Y pre substráty polymetylmetakrylát (PMMA) a VEROCLEAR RGD810 a vlnovodnú vrstvu tvorenú polyméromi NOA (Norland Optical Adhesive).

Podľa vypočítanej závislosti vložného útlmu zatočeného vlnovodu na polomere vlnovodu som v programe ProgeCAD navrhol zatočené vlnovody so zvolenými polomermi drážok.

Drážky v tvare písmena U boli v prípade 1x2Y rozbočníc aj zatočených vlnovodov vytvorené pomocou CNC gravírovania v substráte z PMMA, respektíve pomocou 3D tlače v substráte VEROCLEAR. Každá vzorka zatočeného vlnovodu bola tvorená 3 drážkami s rôznymi polomermi. Drážky boli vyplnené polyméromi NOA, konkrétne NOA72, NOA73, NOA88 a NOA1625 a tieto polyméry boli vytvrdené UV žiarením.

Diagnostika vyrobených štruktúr spočívala predovšetkým v meraní výstupných optických výkonov, z ktorých bolo možné vypočítať vložný optický útlm.

Vybrané vzorky 1x2Y rozbočníc boli podrobené spektrálnej analýze, z ktorej bolo možné určiť rozsah vlnových dĺžok, v ktorom sú štruktúry použiteľné.

Vybrané vzorky boli tiež podrobené meraniu v teplotnej šokovej komore na Katedre elektrotechnologie FEL ČVUT. Výsledkom tohto merania boli hodnoty vložného útlmu štruktúr v závislosti na teplote.

V rámci diplomovej práce boli tiež analyzované jednotlivé zložky optických strát vznikajúce v uvedených štruktúrach.

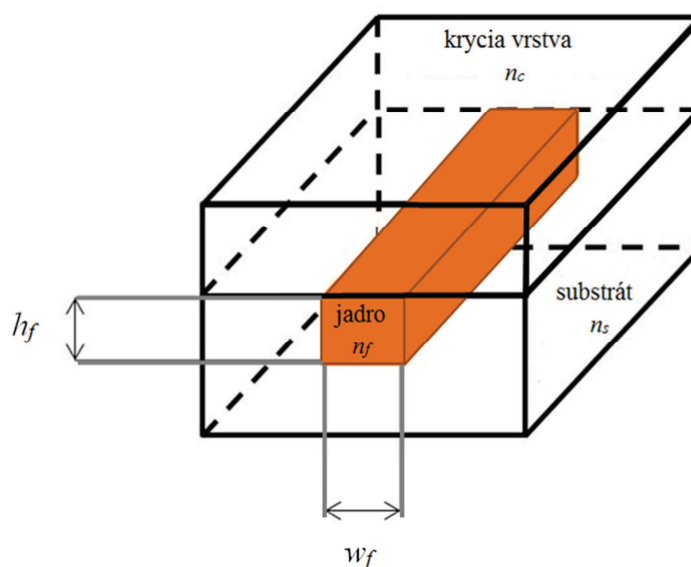
2. Princíp vedenia svetla v planárnych optických vlnovodoch

Optické vlnovody používané v komunikačnej technike je možné rozdeliť na dva základné typy – planárne a vláknové. Hlavný rozdiel medzi uvedenými typmi spočíva vo vzdialenosti, na akú je prenášaný optický signál. Planárne vlnovody sa používajú na prenos signálu na veľmi krátke vzdialenosti, väčšinou niekoľko milimetrov alebo centimetrov a prepájajú napríklad jednotlivé funkčné bloky čipu. Vláknové vlnovody prenášajú optické signály na vzdialenosť až tisíce kilometrov, napríklad sa používajú aj na prepojenie jednotlivých kontinentov pomocou podmorských káblov [2,3].

Optické vlnovody majú nízky merný útlm v troch rozmedziach vlnových dĺžok (tzv. telekomunikačné okná, I. okno v oblasti $\lambda=850$ nm, II. okno v oblasti $\lambda=1310$ nm a III. v oblasti $\lambda=1550$ nm). V prípade planárnych vlnovodov s POF vláknami je využívaná oblasť vlnovej dĺžky okolo 650 nm, ktorá síce nepatrí medzi oblasti s najnižším útlmom, ale tieto vlákna sú výhodné najmä z hľadiska nízkej ceny, preto sa využívajú na komunikáciu na krátke vzdialenosti, maximálne do 100 až 200 m.

Planárny optický vlnovod je väčšinou tvorený substrátom s indexom lomu n_s , vlnovodnou vrstvou s indexom lomu n_f a krycou vrstvou s indexom lomu n_c (planárny vlnovod je na obr. 2.1). V prípade vlnovodnej vrstvy (jadra) sa jedná o transparentnú dielektrickú vrstvu, do ktorej je naviazaný a mechanizmom totálneho odrazu vedený optický signál. Krycia vrstva chráni vlnovodnú vrstvu pred vonkajšími vplyvmi a vytvára vlnovodný efekt štruktúry.

Pokiaľ je veľkosť jedného z priečných rozmerov vlnovodnej štruktúry neobmedzená, jedná sa o dvojrozmerný vlnovod. Rozloženie poľa vlny je v tomto prípade funkciou iba dvoch premenných – jednej priečnej a jednej pozdĺžnej vzhľadom k smeru šírenia vlny. Pokiaľ je vlna v oboch priečných rozmeroch planárnou vlnovodnou štruktúrou obmedzená, jedná sa o trojrozmerný (3D) vlnovod [3].

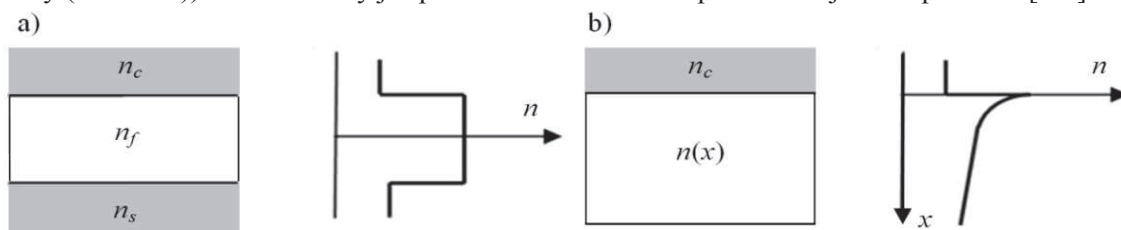


Obr. 2.1: Planárny vlnovod.

Ďalšie dôležité delenie planárnych vlnovodov spočíva v počte vedených vidov, rozlišujeme vlnovody jednovidové a mnohovidové, ktoré majú výrazne väčší rozmer jadra. V prípade kremenných vlákien má jadro jednovidového vlnovodu priemer 4 až 9 μm a plášť 125 μm , jadro

mnohovidového vlnovodu má priemer 50 μm resp. 62,5 μm a plášť v oboch prípadoch 125 μm . U polymérnych vlákien má jadro najčastejšie priemer 980 μm a plášť má hrúbku 20 μm .

Podľa homogenity vlnovodnej vrstvy môžeme vlnovody rozdeliť na tri druhy. Prvým druhom sú vlnovody so skokovým indexom lomu, v prípade ktorých dochádza k úplnému odrazu vlny na rozhraní, pokiaľ je index lomu vlnovodnej vrstvy väčší ako index lomu prostredia po oboch stranách (obr. 2.2a). V priečnom reze majú jednoznačne definovanú hranicu medzi vlnovodnou vrstvou a substrátom. Ďalším druhom sú nehomogénne vlnovody, ktoré sa vyznačujú plynulým poklesom indexu lomu zo stredu vlnovodu k rozhraniam (označujú sa tiež ako gradientné vlnovody). Vlnovodný efekt spôsobuje ohyb šíriacej sa vlny. Tretím a najrozšírenejším druhom sú gradientné vlnovody s indexom lomu plynule klesajúcim od okraja vlnovodu do hĺbky vlnovodnej vrstvy (obr. 2.2b)). Vedenie vlny je spôsobené kombináciou predchádzajúcich spôsobov [2-7].



Obr. 2.2: Priebeh indexu lomu v prípade: a) vlnovodu so skokovým indexom lomu, b) vlnovodu s indexom lomu klesajúcim od okraja vlnovodu [3].

Na riešenie mechanizmov vedenia vln v planárnych štruktúrach sa používajú dva prístupy. Prvým je metóda geometrickej optiky. Tento prístup zahŕňa použitie Snellovho zákona odrazu a lomu. Druhý prístup spočíva v použití vlnovej optiky, ktorá využíva Maxwellove rovnice. Pri uvažovaní iba harmonických priebehov vektorov poľa, vzájomného priradenia časopriestorovej funkcie intenzity el. poľa a zodpovedajúceho fázora v tvare $\mathbf{E}(x,y,z,t) = \text{Im}\{\mathbf{E}(x,y,z)e^{j\omega t}\}$ a v prípade výhradne dielektrických prostredí je možné Maxwellove rovnice napísať v tvare [3]:

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\epsilon\mathbf{E} \quad (2.1)$$

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

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.4)$$

kde \mathbf{H} je intenzita magnetického poľa, \mathbf{D} je vektor elektrickej indukcie ($\mathbf{D}=\epsilon\mathbf{E}$), \mathbf{B} je vektor magnetickej indukcie ($\mathbf{B}=\mu\mathbf{H}$) a ρ je objemová hustota náboja.

Pre charakterizovanie správania sa optického signálu vo vedení je dôležité poznať základné vzťahy platné pre optické prostredie.

Pre popis optického prostredia sa často používa index lomu n , ktorý určuje rýchlosť šírenia signálu. Je definovaný vzťahom [3]:

$$\epsilon = \epsilon_0 n^2 \quad (2.5)$$

kde ϵ_0 je permitivita vákua.

Pokiaľ uvažujeme straty, teda pohlcovanie určitej energie materiálom, platí vzťah [3]:

$$\epsilon_k = \epsilon_0 \epsilon_{rk} = \epsilon_0 n_k^2 \quad (2.6)$$

kde n_k je komplexný index lomu.

Index lomu je závislý na frekvencii (vlnovej dĺžke), aj na intenzite elektrického poľa \mathbf{E} .

Fázová rýchlosť vlny (rýchlosť zmeny fázy) vo vlnovode je definovaná nasledovne [3]:

$$v_f = \frac{\omega}{\beta} \quad (2.7)$$

kde ω je uhlová rýchlosť a β je pozdĺžna zložka vlnového vektora.

Každý signál spojený s prenosom informácie je tvorený úzkym pásmom kmitočtov rozprestreným okolo kmitočtu nosnej vlny. Signál obsahuje skupinu kmitočtov a vytvára tzv. vlnový balík. Rýchlosť šírenia obalovej krivky vlnového balíka sa nazýva skupinová rýchlosť. Pre skupinovú rýchlosť vlny vo vlnovode platí vzťah:

$$v_s = \frac{d\omega}{d\beta} \quad (2.8)$$

Vo vlnovode definujeme efektívny index lomu, ktorý vyjadruje, aký by musel byť index lomu voľného prostredia, aby sa ním vlna šírila rovnakou (fázovou) rýchlosťou ako vo vlnovode:

$$n_{ef} = \frac{\beta}{k_0} \quad (2.9)$$

kde k_0 je konštanta šírenia vo voľnom priestore.

Pre zjednodušenie popisu šírenia vln sa používa vlnový vektor \mathbf{k} :

$$\mathbf{k} = k\mathbf{n}_0, \quad (2.10)$$

kde k je konštanta šírenia a \mathbf{n}_0 jednotkový vektor normálový k vlnoploche (ploche, ktorej body knitajú s rovnakou fázou).

Zákon odrazu a zákon lomu

Šírenie vlny v planárnom vlnovode je teoreticky riešené pomocou Snellových zákonov - zákona odrazu a lomu, ktoré patria k základným zákonom geometrickej optiky.

Pri dopade na rovinu rozhrania dvoch prostredí sa lúč čiastočne odráža a čiastočne láme (obr. 2.3 a 2.4).

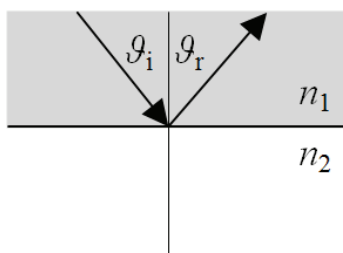
Podľa zákona odrazu sa uhol odrazu vlny ϑ_r na rozhraní rovná uhlu jej dopadu ϑ_i [3]:

$$\vartheta_r = \vartheta_i. \quad (2.11)$$

Zákon lomu je vyjadrený vzťahom [3]:

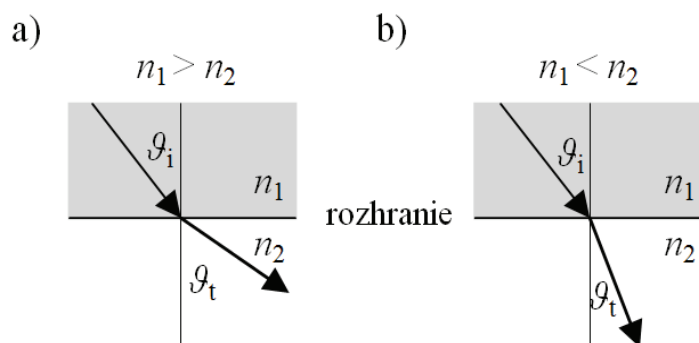
$$k_1 \cdot \cos \vartheta_i = k_2 \cdot \cos \vartheta_t \quad (2.12)$$

kde k_1 je vlnový vektor dopadajúcej vlny, k_2 je vlnový vektor prenikajúcej vlny a ϑ_t je uhol lomu.



Obr. 2.3: Odraz vlny na rozhraní [3].

Pokiaľ lúč prechádza z opticky hustejšieho prostredia (s vyšším indexom lomu n_1) do prostredia opticky redšieho (s nižším indexom lomu n_2), uhol lomu ϑ_t je väčší ako uhol dopadu ϑ_i (obr. 2.4a)). V tomto prípade sa jedná o lom od kolmice dopadu. V opačnom prípade, pri prechode lúča z opticky redšieho prostredia do opticky hustejšieho, teda keď $n_1 < n_2$, je uhol lomu ϑ_t menší ako uhol dopadu ϑ_i a nastáva lom ku kolmici dopadu (obr. 2.4b)) [2,3,8].



Obr. 2.4: a) Lom od kolmice dopadu, b) lom ku kolmici dopadu [9].

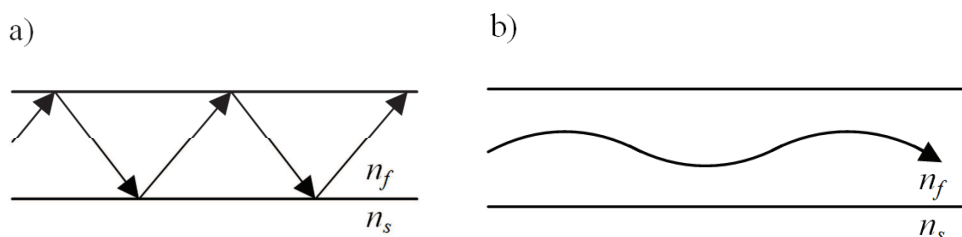
Vedenie vln vo vlnovode

U optických vln sa stretávame s dvomi mechanizmami vedenia vln v planárnych vlnovodoch, je to totálny odraz a ohyb vln (obr. 2.5). Pokiaľ $n_1(n_f) > n_2(n_s)$, môže nastať prípad, kedy $\vartheta_t = 0$. V prípade totálneho odrazu vzniká superpozíciou vln odrážajúcich sa od rozhraní jadro-krycia vrstva a jadro-substrát stojatá vlna. Uhol ϑ_i , ktorý zodpovedá tomuto stavu, je kritický (medzný) uhol, ktorý je určený vzťahom [3]:

$$\vartheta_c = \arccos \frac{n_s}{n_f} \quad (2.13)$$

Lúč sa odráža na rozhraní, pokiaľ je uhol dopadu menší ako ϑ_c .

Po oboch stranách rozhraní vzniká evanescentná (povrchová) vlna, ktorej amplitúda so vzdialenosťou od rozhrania klesá [3].



Obr. 2.5: Šírenie vlny vo vlnovode: a) totálny odraz, b) ohyb vlny [2,3,10].

Aby mohol nastať totálny odraz a vlna sa vlnovodnou vrstvou šíriť, musí byť index lomu vlnovodnej vrstvy – jadra n_f väčší ako indexy lomu substrátu n_s a krycej vrstvy n_c , teda $n_s < n_f > n_c$. V prípade kanálikového vlnovodu sa vlna šíri, ak vlnová dĺžka šíriaceho sa žiarenia je porovnateľná s hĺbkou a šírkou vlnovodnej vrstvy a zmena indexu lomu je dostatočná [2,11].

Pri prechode lúča vlnovodnou štruktúrou sa mení jeho fáza (obr. 2.6). Pri postupe lúča o vzdialenosť ds sa zmení jeho fáza o $d\Phi = \mathbf{k}_f ds = k_0 n_f ds$, kde \mathbf{k}_f je vlnový vektor. Pri odrazoch na rozhraní sa fáza mení skokovo o hodnotu Φ^{TE} alebo Φ^{TM} . Aby mohol vzniknúť vedený vid, musí mať vlnoplocha, ktorá dosiahne bod D po priamej dráhe z bodu C (čiarkovane vyznačená) rovnakú fázu alebo fázu líšiacu sa o násobok 2π , ako vlnoplocha vlny, ktorá sa do tohto bodu dostane po odrazoch v bodoch A a B.

Túto podmienku možno vyjadriť nasledovne [3]:

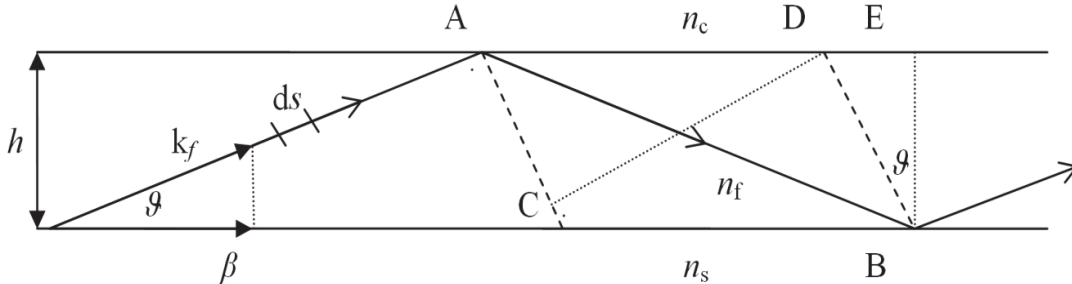
$$\mathbf{k}_f \overline{AB} + \Phi_{12} + \Phi_{13} = \mathbf{k}_f \overline{CD} + 2o\pi \quad (2.14)$$

kde \mathbf{k}_f je vlnový vektor, Φ_{12} , Φ_{13} sú fázové posuny pri totálnom odraze, $\overline{AB} = h/\sin\vartheta$, $\overline{CD} = (htg\vartheta - htg\vartheta)\cos\vartheta$ (podľa obr. 2.5), h je hrúbka vlnovodu a $o = 0, 1, 2, \dots$

Celková zmena fázy pri prestupe naprieč celou štruktúrou a späť do východzieho bodu pri rešpektovaní posunu fázy na rozhraní sa rovná celočíselnému násobku 2π . Tento poznatok sa nazýva princíp priečnej rezonancie a vyplýva z disperznej rovnice [3]:

$$2hk_{fx} + \Phi_{12} + \Phi_{13} = 2o\pi \quad (2.15)$$

kde h je hrúbka vlnovodu, k_{fx} je zložka vlnového vektora do priečného smeru. Tento vzťah je dôležitý pre 2D vlnovody, dá sa z neho určiť napr. kritická vlnová dĺžka vlnovodu alebo kritická hrúbka vlnovodu [2,5].



Obr. 2.6: Šírenie lúča vo vlnovodnej vrstve s vyznačenými vlnoplochmi vlny (čiarkovane) [3].

Pre vedenie signálu vlnovodnou štruktúrou sú dôležité vidy vedené. Vidy zodpovedajúce lúčom, ktoré sa šíria do okolia, nazývame priestorové vidy a vidy, ktoré sa úplne odrážajú na rozhraní vrstvy s okolím, ale nie na rozhraní so substrátom, nazývame substrátové. Substrátové vidy sa využívajú na určenie indexu lomu podložky. Priestorové a substrátové vidy sú však zvyčajne zdrojom strát [11].

Počet vedených vidov je možné určiť zo vzťahu [3]:

$$m = \text{Int} \left\{ \frac{2}{\lambda_0} h \sqrt{n_f^2 - n_s^2} - \frac{1}{\pi} \arctg \left[p_{13} \sqrt{\frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2}} \right] \right\} \quad (2.16)$$

kde Int je funkcia zaokrúhľujúca dané číslo v zátvorke nadol, λ_0 je vlnová dĺžka vo vákuu, h je hrúbka vlnovodnej vrstvy, n_f je index lomu jadra, n_s a n_c sú indexy lomu substrátu a krycej vrstvy a p_{13} je parameter závislý na orientácii vln vzhľadom k smeru šírenia, v prípade TE (transverzálne elektrických) vln je $p_{13} = 1$, v prípade vln TM (transverzálne magnetických) je $p_{13} = (n_f/n_c)^2$.

Na základe vzťahu 2.16 je možné určiť kritickú hrúbku vlnovodnej vrstvy (jadra), pri ktorej je určitý vid vedený [3]:

$$h = \frac{\lambda_0}{2\pi \sqrt{n_f^2 - n_s^2}} \left\{ o\pi + \arctg \left[p_{13} \sqrt{\frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2}} \right] \right\} \quad (2.17)$$

kde λ_0 je vlnová dĺžka vo vákuu a $o = 0, 1, 2, \dots$

3. Straty v planárnych optických vlnovodoch

Pre planárne vlnovody sú charakteristické tri základné mechanizmy vzniku strát, ktoré sa podieľajú na vložnom útlme štruktúry:

1. absorpcia,
2. rozptyl na nehomogenitách v objeme vlnovodu (praskliny, hranice zrna),
3. rozptyl na nerovnostiach na oboch rozhraniach vlnovodu s okolím (jadra a substrátu/krycej vrstvy) [7, 11].

Pri uvažovaní strát v zatočenom vlnovode (kap. 5), sú jednou zo zložiek aj straty spôsobené konverziou vidov v mieste prechodu rovného vlnovodu do zatočeného.

Útlm planárnych štruktúr je v porovnaní s optickými vláknami vyšší, a to predovšetkým z dôvodu absorpčných strát vo vlnovodnom materiáli.

Zatiaľ čo u vláknových vlnovodov sa väčšinou rozptylové straty významnejšie uplatňujú až vtedy, ak sa zmenšia absorpčné straty na úroveň niekoľko dB/km, u planárnych vlnovodov môžu rozptylové straty prispievať výrazne k celkovému útlmu už pri úplne bežných podmienkach [7, 11].

V POF vláknach existujú aj ďalšie straty. Jedná sa o straty závislé na vidoch šíriacich sa vo vlákne, vyššie vidy vykazujú vyšší útlm ako základný vid, útlm je spôsobený rôznou dĺžkou dráhy vlny pri šírení vláknom a vplyvom krycej vrstvy, do ktorej čiastočne preniká elektrické pole. Potrebne je aj uvažovať vplyv disperzie (chromatickej, vidovej) v optických vláknach. Na rozdiel od optických vlákien sa vplyv disperzie u planárnych optických vlnovodov neuvažuje, pretože je zanedbateľná [12].

K ďalším príčinám strát prispievajúcich k útlmu celej planárnej štruktúry vrátane pripojených POF vlákien možno zaradiť aj Fresnelove odrazy, rozdiely v numerickej apertúre medzi planárnou štruktúrou a POF vláknom alebo nepresným naviazaním jadra vlákna do jadra planárneho vlnovodu. Tieto straty možno súhrnne označiť ako väzobné straty [13].

Fresnelove straty R_L na dvoch rozhraniach prostredí je možné vypočítať zo vzťahu [14, 15]:

$$R_L = 20 \cdot \log_{10} \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (3.1)$$

kde n_1 je index lomu jadra vlákna a n_2 je index lomu jadra planárneho vlnovodu.

Straty spôsobené nesúlalom jadra a krycej vrstvy medzi optickým vláknom a planárnym vlnovodom v priečnom reze A_L je možné vypočítať podľa vzťahu [14]:

$$A_L = 10 \cdot \log_{10} \frac{\pi c^2}{w_f h_f} \quad (3.2)$$

kde c je polomer jadra POF vlákna a w_f, h_f sú rozmery jadra planárneho vlnovodu.

Odlíšnosť numerickej apertúry vlákna a planárneho vlnovodu je daná vzťahom [14, 15]:

$$NA_L = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{NA_1}{NA_2} \right)^2 \quad (3.3)$$

kde NA_1 a NA_2 je numerická apertúra vlákna resp. planárneho vlnovodu.

Numerická apertúra, ktorá určuje, pod akým najväčším uhlom je možné do rozbočnice naviazať optický signál tak, aby bol vedený bez radiačných strát, je definovaná ako:

$$NA = \sqrt{n_f^2 - n_s^2} \quad (3.4)$$

kde n_f je index lomu vlnovodnej vrstvy a n_s index lomu substrátu.

Celkové straty zatočeného vlnovodu je potom možné vyjadriť vzťahom [14]:

$$T_L = L_{couple} + PR_L + TR_L + RD_L \quad (3.5)$$

kde $L_{couple} = R_L + A_L + NA_L + L_{sc}$, L_{sc} sú straty rozptylom, PR_L sú prenosové straty, TR_L straty spôsobené prechodom medzi rovným a zatočeným vlnovodom a RD_L straty vyžarovaním.

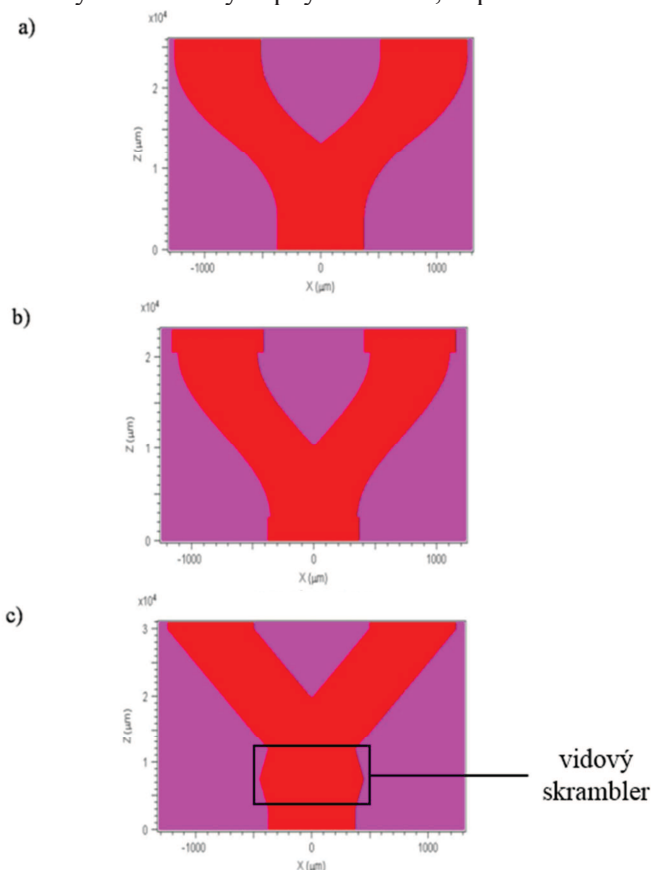
Uvedené zložky strát boli vypočítané pre prípad zatočeného vlnovodu. Výsledky pre vybrané kombinácie materiálov sú uvedené v kap. 8.5 na str. 56 a v Prílohe B.

4. Planárne optické 1x2Y rozbočnice

Optické rozbočnice sú pasívne planárne fotonické štruktúry, ktoré sa používajú na rozdelenie vstupného optického výkonu do niekoľkých vetiev, ktorých môže byť párny alebo nepárny počet. Rozlišujeme planárne rozbočnice jednovidové a mnohovidové podľa počtu vedených vidov. Základnými druhmi sú rozbočnice 1x2Y, tzn. s 1 vstupným kanálom a dvomi výstupnými, ktoré rozdeľujú vstupujúci výkon do dvoch vetiev ideálne v rovnakom pomere (obr. 4.1a)), potom 1x4Y so štyrmi výstupnými kanálmi, ktoré bývajú vytvorené kaskádovým spojením rozbočníc 1x2Y. Netypickým riešením sú štruktúry s nepárnym počtom výstupov a odlišným deliacim pomerom.

Planárna optická rozbočnica je tvorená nasledujúcimi základnými časťami: vstupný vlnovod, do ktorého sa vkladá časť vstupného optického vlákna bez primárnej ochrany, naň nadväzuje rozširujúci sa tzv. taperovaný vlnovod, v ktorom dochádza k rozvetveniu optického signálu a nasledujú vlnovodné ramená, na ktoré nadväzujú výstupné optické vlákna (2D model 1x2Y rozbočnice základného typu je na obr. 4.1a)). Vstupné a výstupné kanálikové vlnovody rozbočníc navrhovaných v rámci tejto práce majú šírku 750 μm z dôvodu priemeru jadra POF vlákna, ktoré do nich bolo vkladané.

Vlnovodné ramená nemusia mať rovnakú šírku ako vstup a výstupy vlnovodu. Šírka vlnovodných ramien môže byť napr. 0,5 mm a vstupné a výstupné vlnovody môžu byť širšie podľa príkladu rozbočnice navrhutej p. T. Klotzbücherom a jeho spolupracovníkmi (obr. 4.1b)) [16]. Súčasťou rozbočnice môže byť aj tzv. dvojitý vidový skrambler vložený medzi vstupný a výstupné vlnovody, cieľom ktorého je zvýšiť väzbu vidov a zlepšiť deliace vlastnosti štruktúry (obr. 4.1c)) [17]. Existuje tiež viacero tvarových riešení výstupných ramien, napr. tvaru S alebo lomeného tvaru.



Obr. 4.1: Planárna optická rozbočnica typu 1x2Y: a) základný typ (motívy 1, 3, 4, V1, V2, VC, VD), b) s rôznou šírkou vlnovodov (motív VA) [16], c) s módomým skramblerom (motív VB) [17].

Základnému typu na obr. 4.1a) prislúchali navrhnuté a vyrobené motívy 1, 3, 4, V1, V2, VC a VD, typu rozbočnice s rôznou šírkou vlnovodov na obr. 4.1b) prislúchal motív VA a typ rozbočnice s vidovým skramblerom (obr. 4.1c)) bol označený ako VB. Tieto rozbočnice boli navrhnuté v programe BeamPROP (kap. 4.4) a vyrobené postupom uvedeným v kap 7.1 resp. 7.2. Zoznam všetkých vyrobených motívov 1x2Y rozbočníc je uvedený v tab. 4.11 na str. 31.

4.1 Voľba materiálov

Pred výrobou optických rozbočníc je dôležité vybrať vhodné materiály substrátu, vlnovodnej a krycej vrstvy tak, aby boli splnené podmienky pre vedenie vlny štruktúrou.

Pri výrobe rozbočníc som používal ako substrát priehľadný materiál polymetylmakrylát (PMMA), resp. materiál VEROCLEAR RGD810, ktorý bol zvolený z dôvodu, že je to komerčne dostupný materiál vhodný pre 3D tlač. Niektoré rozbočnice boli najskôr navrhnuté aj so substrátom z materiálu polydimetylsiloxán (PDMS), následne bol ich návrh upravený pre použitie substrátu PMMA.

Vlnovodnými materiálmi boli polyméry NOA od firmy Norland Optical Adhesive, ktoré sú vytvrditeľné UV svetlom. Použité polyméry NOA72, NOA73, NOA88 a NOA1625 sa líšili hodnotou indexu lomu, viskozitou a dobou vytvrdzovania.

PMMA je akrylát a patrí medzi najpoužívanejšie polymérne materiály. Jeho výhodami je odolnosť voči nárazu a poškrabaniu, nízka cena a hmotnosť. Má však vysoký optický útlm v infračervenej oblasti, medzi jeho nevýhody patrí aj nízka odolnosť voči teplotám, chemickým vplyvom či opotrebeniu. Má nízku hodnotu indexu lomu [8,18].

PDMS je priehľadný organický, hydrofóbny polymér. Má nižší index lomu v porovnaní s materiálmi PMMA a VEROCLEAR RGD810 [19].

Materiál NOA73, od firmy Norland Optical Adhesive, ktorý bol pri zalievaní vyrobených substrátov najpoužívanejší, je opticky číre tekuté lepidlo, ktoré sa rýchlo vytvrdzuje pri vystavení UV žiareniu s veľkou vlnovou dĺžkou. Je vhodné pre lepenie jemných častí alebo častí, u ktorých dochádza k namáhaniu. Má nízku viskozitu. K maximálnej absorpcii UV svetla dochádza pri vlnových dĺžkach od 350 nm do 380 nm [20].

VEROCLEAR RGD810 je číry, takmer bezfarebný, akrylátový prípravok vyznačujúci sa rozmerovou stabilitou, je vhodný na použitie pri 3D tlači [21].

V tab. 4.1 sú uvedené parametre uvedených materiálov – index lomu pri definovanej vlnovej dĺžke uvedenej v zátvorke a teplotný rozsah, v ktorom sú použiteľné.

Tab. 4.1: Parametre vybraných polymérov.

polymér	n (-)	teplotný rozsah (°C)
PMMA	1,489 ($\lambda=650$ nm) [22]	-55 až 70 [23]
PDMS	1,423 ($\lambda=632,8$ nm) [24]	-45 až 200 [24]
NOA73	1,560 ($\lambda=632,8$ nm) [20]	-60 až 90 [20]
VEROCLEAR RGD810	1,531 ($\lambda=650$ nm) [21]	-20 až 50 [21]

kde n je index lomu materiálu na vybranej vlnovej dĺžke.

4.2 Teoretické výpočty parametrov rozbočníc

Pred návrhom rozbočníc v simulačnom programe BeamPROP™ od firmy RSoft som urobil základný teoretický návrh podľa analýzy, ktorú publikoval p. D. Beltrami v článku *Planar multimode waveguides and devices* v roku 1999 [25].

Medzi dôležité parametre pri návrhu rozbočnice patrí maximálny uhol θ (obr. 4.2), ktorý zvierajú výstupné vlnovody:

$$\theta \leq \sin^{-1} \frac{\sqrt{n_f^2 - n_s^2}}{n_f} \quad (4.1)$$

Minimálna dĺžka spoločného – taperovaného vlnovodu d , v ktorom dochádza k rozvetveniu vstupujúceho signálu (obr. 4.2), sa vypočíta zo vzťahu:

$$d = \frac{D\rho_w(2 - \cos\Omega)}{\sin\Omega} \quad (4.2)$$

kde D je normovaná dĺžka ($D = 1$), w_f je šírka vlnovodu, $\rho_w = w_f/2$.

Uhol Ω vypočítame zo vzťahu:

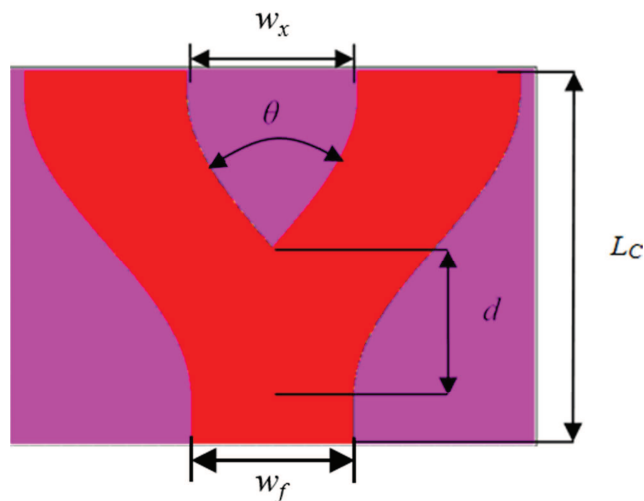
$$\Omega \leq \frac{\theta D}{D + 1} \quad (4.3)$$

Relatívny kontrast indexu lomu Δ získame zo vzťahu:

$$\Delta = \frac{n_f^2 - n_s^2}{2n_f^2} \quad (4.4)$$

Relatívny kontrast indexu lomu je dôležitý z hľadiska hustoty integrácie planárnych štruktúr na čipe, čím dosahuje vyššie hodnoty, tým je možné dosiahnuť väčšiu hustotu integrácie.

Dôležitá je tiež vzdialenosť výstupných vlnovodov rozbočnice (na obr. 4.2 označená ako w_x), ktorá musí umožňovať do nich vedľa seba bezproblémovo vložiť optické vlákna.



Obr. 4.2: Rozbočnica 1x2Y s vyznačenou dĺžkou taperovaného vlnovodu d , uhlom θ a ďalšími vybranými parametrami.

Podľa vzťahov 3.4 na str. 19 a 4.1 až 4.4 na str. 22 som vypočítal parametre rozbočnice 1x2Y pre rôzne kombinácie substrát/vlnovodný materiál (tab. 4.2 až 4.8). Hodnoty indexu lomu n_f a n_s boli odčítané z grafu hodnôt zmeraných pomocou zariadenia Metricon (kap. 7.1) [22]. Okrem uvedených materiálov bol používaný aj materiál NOA72, ktorý má hodnoty indexu lomu približne rovnaké ako NOA73. Dĺžky rozbočnic L_c boli určené na základe simulácii v programe BeamPROP (kap. 4.4).

Tab. 4.2: Vypočítané parametre rozbočnice 1x2Y pri použití materiálov PMMA/NOA73.

λ (nm)	n_s (-)	n_f (-)	NA (-)	Δ (-)	Θ (°)	Ω (°)	d (mm)	L_c (mm)
532 nm	1,495	1,564	0,459	0,043	17,08	8,54	2,55	31,56
650 nm	1,489	1,555	0,450	0,042	16,83	8,41	2,59	31,60
850 nm	1,486	1,550	0,440	0,040	16,51	8,26	2,64	31,65
1311 nm	1,481	1,543	0,432	0,039	16,25	8,12	2,68	31,69
1551 nm	1,480	1,540	0,426	0,038	16,07	8,04	2,71	31,72

Tab. 4.3: Vypočítané parametre rozbočnice 1x2Y pri použití materiálov PMMA/NOA88.

λ (nm)	n_s (-)	n_f (-)	NA (-)	Δ (-)	Θ (°)	Ω (°)	d (mm)	L_c (mm)
532 nm	1,495	1,566	0,466	0,044	17,32	8,66	2,52	31,53
650 nm	1,489	1,557	0,455	0,043	17,00	8,50	2,57	31,58
850 nm	1,486	1,553	0,451	0,042	16,89	8,45	2,58	31,59
1311 nm	1,481	1,548	0,450	0,042	16,92	8,46	2,58	31,59
1560 nm	1,479	1,546	0,450	0,042	16,93	8,46	2,58	31,59

Tab. 4.4: Vypočítané parametre rozbočnice 1x2Y pri použití materiálov PMMA/NOA1625.

λ (nm)	n_s (-)	n_f (-)	NA (-)	Δ (-)	Θ (°)	Ω (°)	d (mm)	L_c (mm)
532 nm	1,495	1,637	0,666	0,083	24,02	12,01	1,84	22,52
650 nm	1,489	1,625	0,653	0,081	23,67	11,83	1,87	22,55
850 nm	1,486	1,618	0,641	0,078	23,33	11,67	1,89	22,57
1311 nm	1,481	1,608	0,626	0,076	22,92	11,46	1,93	22,61
1551 nm	1,480	1,607	0,626	0,076	22,92	11,46	1,93	22,61

Tab. 4.5: Vypočítané parametre rozbočnice 1x2Y pri použití materiálov VEROCLEAR/NOA73.

λ (nm)	n_s (-)	n_f (-)	NA (-)	Δ (-)	Θ (°)	Ω (°)	d (mm)	L_c (mm)
532 nm	1,540	1,564	0,274	0,015	10,09	5,05	4,28	31,51
650 nm	1,531	1,555	0,273	0,015	10,12	5,06	4,27	31,50
850 nm	1,525	1,550	0,276	0,016	10,24	5,12	4,22	31,45
1311 nm	1,518	1,543	0,275	0,016	10,27	5,13	4,21	31,44
1551 nm	1,515	1,540	0,275	0,016	10,28	5,14	4,20	31,40

Tab. 4.6: Vypočítané parametre rozbočnice 1x2Y pri použití materiálov VEROCLEAR/NOA88.

λ (nm)	n_s (-)	n_f (-)	NA (-)	Δ (-)	Θ (°)	Ω (°)	d (mm)	L_c (mm)
532 nm	1,540	1,566	0,284	0,016	10,46	5,23	4,13	31,36
650 nm	1,531	1,557	0,283	0,017	10,49	5,24	4,12	31,35
850 nm	1,525	1,553	0,294	0,018	10,90	5,45	3,97	31,20
1311 nm	1,518	1,548	0,303	0,019	11,30	5,65	3,83	31,06
1560 nm	1,515	1,546	0,308	0,020	11,49	5,75	3,76	30,96

Tab. 4.7: Vypočítané parametre rozbočnice 1x2Y pri použití materiálov VEROCLEAR/NOA1625.

λ (nm)	n_s (-)	n_f (-)	NA (-)	Δ (-)	Θ (°)	Ω (°)	d (mm)	L_C (mm)
532 nm	1,540	1,637	0,555	0,058	19,81	9,91	2,21	22,98
650 nm	1,531	1,625	0,546	0,056	19,61	9,81	2,23	23,00
850 nm	1,525	1,618	0,541	0,056	19,53	9,77	2,24	23,01
1311 nm	1,518	1,608	0,530	0,054	19,26	9,63	2,27	23,04
1551 nm	1,515	1,607	0,534	0,055	19,41	9,70	2,26	23,03

Tab. 4.8: Vypočítané parametre rozbočnice 1x2Y pri použití materiálov PDMS/VEROCLEAR.

λ (nm)	n_s (-)	n_f (-)	NA (-)	Δ (-)	Θ (°)	Ω (°)	d (mm)	L_C (mm)
532 nm	1,417	1,540	0,603	0,077	23,06	11,53	1,91	22,59
650 nm	1,411	1,531	0,594	0,075	22,84	11,42	1,93	22,61
850 nm	1,408	1,525	0,587	0,074	22,62	11,31	1,95	22,63
1311 nm	1,403	1,518	0,579	0,073	22,42	11,21	1,97	22,65
1551 nm	1,402	1,515	0,575	0,072	22,32	11,16	1,97	22,65

Z uvedených hodnôt uvedených v tab. 4.2 až 4.8 vyplýva, že v prípade použitia takej kombinácie materiálov substrát/vlnovodná vrstva, kedy je dosiahnutý väčší kontrast indexu lomu, sú geometrické rozmery 1x2Y rozbočnic menšie. Najvyšší kontrast indexu lomu je dosiahnutý v prípade substrátu PMMA a vlnovodnej vrstvy NOA1625, kedy jeho hodnota dosahuje $\Delta=0,083$ pri $\lambda=532$ nm. V tomto prípade je dĺžka taperovaného vlnovodu $d=1,84$ mm a celková dĺžka rozbočnice $L_C=22,52$ mm. Najmenší kontrast indexu lomu je dosiahnutý z uvedených kombinácií materiálov v prípade substrátu VEROCLEAR a vlnovodnej vrstvy NOA73, kedy je jeho hodnota $\Delta=0,015$ pri $\lambda=532$ nm a pri $\lambda=650$ nm. V tomto prípade dosahuje dĺžka taperovaného vlnovodu $d=4,28$ mm resp. $d=4,27$ mm a celková dĺžka rozbočnice $L_C=31,51$ mm resp. $L_C=31,50$ mm.

4.3 Metóda šírenia optického zväzku

Názov tejto metódy pochádza z anglického spojenia Beam Propagation Method (BPM). Jedná sa o metódu založenú na simulácii šírenia lúča vo vlnovodných štruktúrach. Pomocou metódy konečných diferencií rieši vlnovú rovnicu v parabolickom alebo paraxiálnom priblížení [22, 26, 27].

Pokiaľ je pole skalár, má Helmholtzova rovnica pre monochromatickú vlnu tvar [2, 22, 26, 27]:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + k(x, y, z)^2 \phi = 0 \quad (4.5)$$

kde ϕ je premenné elektromagnetické pole šíriace sa štruktúrou, x, y, z sú priestorové súradnice a k je vlnové číslo.

Ak uvažujeme malé zmeny poľa, jeho šírenie v smere osi z vyjadríme ako [2, 22, 26, 27]:

$$\phi(x, y, z) = u(x, y, z) e^{j\bar{k}z} \quad (4.6)$$

kde \bar{k} je referenčné vlnové číslo, ktoré vyjadruje strednú zmenu fázy v poli $\phi(x, y, z)$.

Helmholtzovu rovnicu môžeme pre pomaly sa meniace pole vyjadriť rovnicou [2, 22, 26, 27]:

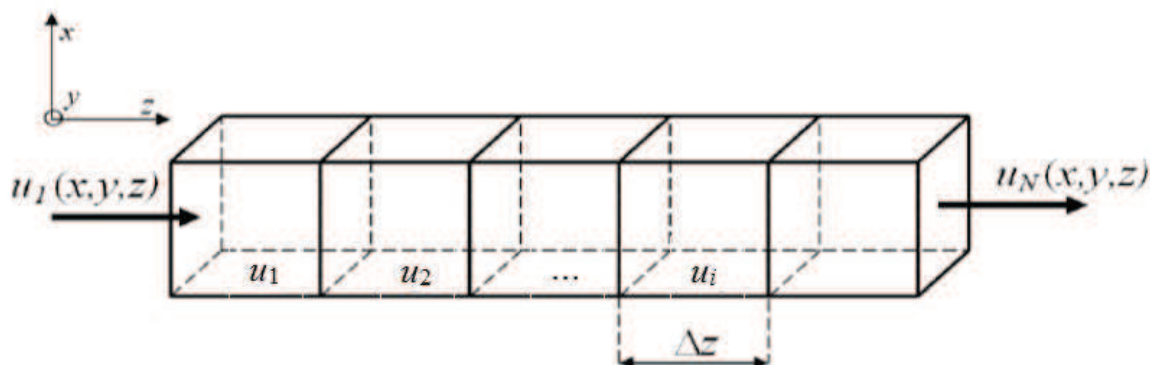
$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + 2jk \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + (k^2 - \bar{k}^2)u = 0 \quad (4.7)$$

Pokiaľ lúče zvierajú s osou šírenia veľmi malý uhol a je splnená podmienka pomaly sa meniaceho elektromagnetického poľa, môže byť zanedbaná druhá derivácia podľa z a dostaneme rovnicu, ktorá je základom metódy BPM pre 3D prostredie [2, 22, 26, 27]:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{j}{2\bar{k}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + (k^2 - \bar{k}^2)u \right) \quad (4.8)$$

Táto metóda sa vyznačuje nižšou výpočtovou náročnosťou. Šírenie optického zväzku je riešené pomocou jednoduchej integrácie, zavedením predpokladu pomaly sa meniaceho šírenia elektromagnetického poľa pozdĺž osi z je zmenšený počet vstupných hodnôt. Nevýhodou tejto metódy je to, že v dôsledku zanedbania druhej derivácie neumožňuje riešiť šírenie elektromagnetického poľa v štruktúrach, kde je nevyhnutné brať do úvahy spätné šírenie a odrazy [2, 6, 22, 27].

Integráciu parabolickej parciálnej rovnice možno vyriešiť napr. metódou konečných diferencií, ktorá je založená na Crank-Nicholsonovej schéme. Cieľom tejto metódy je nájsť numerické rovnice, z ktorých sa vypočíta elektromagnetické pole u_1^{n+1} v nasledujúcej diskretnej rovine. Tento postup sa opakuje až do vypočítania šírenia elektromagnetického poľa v celej štruktúre. Metóda je naznačená na obr. 4.3 [2, 22, 26, 27].



Obr. 4.3: Crank-Nicholsonova schéma [2, 22, 26, 27].

Crank-Nicholsonovu schému možno popísať vzťahom [2, 22, 26, 27]:

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta z} = \frac{j}{2\bar{k}} \left(\frac{\delta^2}{\Delta x^2} \left(k(x_i, z_{n+1/2})^2 - \bar{k}^2 \right) \right) \frac{u_i^{n+1} + u_i^n}{2} \quad (4.9)$$

kde δ^2 je štandardný diferenciálny operátor, ktorý je určený vzťahom [2, 22, 26, 27]:

$$\delta^2 u_i = (u_{i+1} + u_{i-1} - 2u_i). \quad (4.10)$$

4.4 Návrh 1x2Y rozbočnic

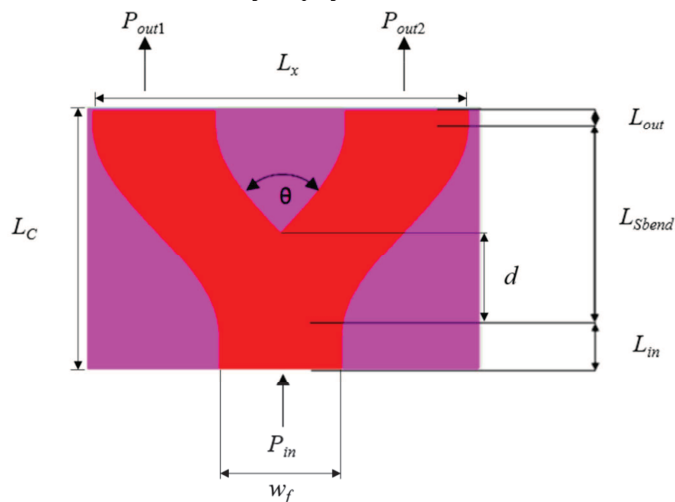
V simulačnom programe BeamPROPTM som postupne vytvoril desať 2D motívov planárnych 1x2Y rozbočnic – 7 motívov rozbočnic základného typu s rovnakou šírkou vlnovodov pozdĺž celej štruktúry (motívy, 1, 3, 4, V1, V2, VC, VD), ďalší motív mal rozdielnu šírku vlnovodov na vstupe/výstupe a v strednej časti rozbočnice (motív VA) a ďalší obsahoval dvojitý módový skrambler (motív VB), pričom všetky tieto motívy mali symetrický pomer výstupných výkonov 50:50. Jeden navrhnutý motív mal pomer výstupných výkonov nesymetrický (80:20, motív 2).

Pred vytvorením 2-rozmernej štruktúry v programe BeamPROP boli zadefinované základné parametre (indexy lomu substrátu a vlnovodnej vrstvy, rozmery vlnovodu, vlnová dĺžka, na ktorej prebiehala simulácia). Po vytvorení 2D profilu 1x2Y rozbočnice boli definované zdroje žiarenia a jednotlivé vetvy rozbočnice. Nakoniec bola štruktúra simulovaná pre rôzne hodnoty parametrov (napr. veľkosť uhla zvieraného výstupnými ramenami, dĺžka vybraných častí vlnodov). Popis nastavenia simulácie v programe BeamPROP je uvedený v prílohe C.

V uvedenom programe bol simulovaný prenos výkonu zo vstupu na výstup každej štruktúry.

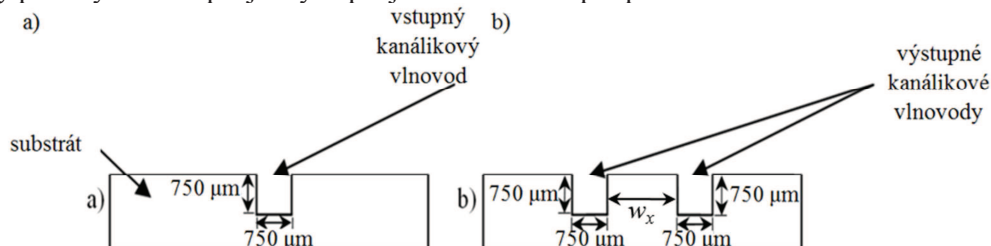
Dôležitým parametrom navrhovanej rozbočnice sú vždy jej rozmery, v prípade ktorých sa snažíme dosiahnuť čo najmenšiu šírku a celkovú dĺžku pri súčasnom zachovaní dobrých výsledkov simulácie, teda čo najlepšej symetrie a čo najvyšších výstupných výkonov.

Na nasledujúcom profile rozbočnice (obr. 4.4) je uvedené používané označenie dĺžok základných komponentov a veľkosti uhla zvieraného výstupnými ramenami rozbočnic 1x2Y.



Obr. 4.4: Pozdĺžny rez rozbočnice s vyznačenými dĺžkami jednotlivých komponentov rozbočnice 1x2Y.

Navrhované boli rozbočnice s kanálikovými vlnovodmi (drážkami), ktoré mali priečne rozmery 750x750 μm . Do týchto drážok sú pri výrobe rozbočnice vkladané POF vlákna. Hrúbka plášťa týchto vlákien ovplyvňuje vzdialenosť výstupných kanálikových vlnovodov w_x . Je dôležité, aby ich bolo možné bezproblémovo vložiť vedľa seba pri pripevňovaní do substrátu. Na obr. 4.5 je uvedený priečný rez vstupnej a výstupnej časti substrátu pre planárne 1x2Y rozbočnice.



Obr. 4.5: Priečný rez substrátu 1x2Y rozbočnice, a) vstupný pohľad, b) výstupný pohľad.

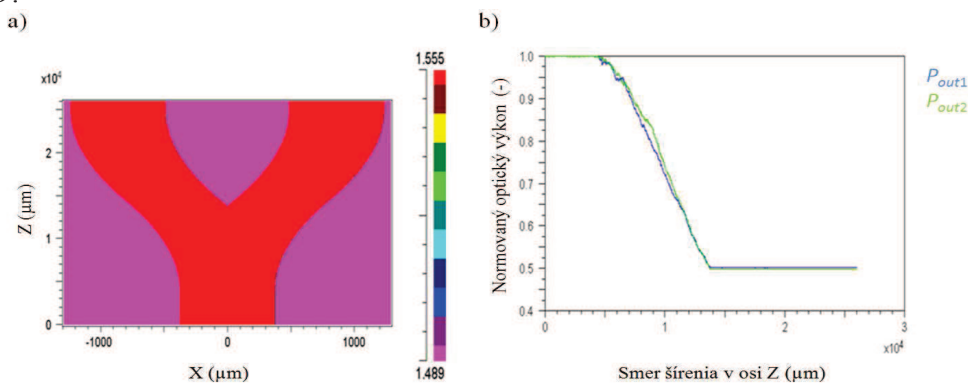
Na obr. 4.6 až 4.13 sú uvedené príklady rozbočnic 1x2Y navrhnutých v programe BeamPROP™. U každej navrhutej rozbočnice je okrem profilu indexu lomu s farebnou stupnicou, ktorej zodpovedá hodnota indexu lomu jadra rozbočnice a okolitého substrátu, uvedený aj grafický výstup simulácie priebehu veľkosti normovaného optického výkonu pozdĺž štruktúry, kde p_{out1} (v grafe P_{out1}) zodpovedá normovanému optickému výkonu na výstupe ľavého ramena a p_{out2} (v grafe P_{out2}) normovanému optickému výkonu na výstupe pravého ramena.

Prvé štyri motívy (motívy 1 až 4) majú substrát z materiálu PMMA, s indexom lomu $n_s=1,489$ a vlnovodnú vrstvu NOA73 s indexom lomu $n_f=1,555$ pri $\lambda=650$ nm (obr. 4.6 až 4.9).

Základom ďalších štyroch motívov (V1, V2, VA, VB) je substrát z materiálu VEROCLEAR, s $n_s=1,531$ pri $\lambda=650$ nm a vlnovodná vrstva tvorená polymérom NOA73 (obr. 4.10, 4.12 a 4.13) alebo NOA1625 s indexom lomu $n_f=1,626$ pri $\lambda=650$ nm (obr. 4.11). Dva z týchto motívov sú rozbočnice základného, konvenčného typu a ďalšie dva s odlišným tvarovým riešením – zúženými vlnovodmi v oblasti medzi vstupným a výstupnými vlnovodmi resp. s dvojitém vidovým skramblerom. Pri každej rozbočnici je uvedená aj tabuľka s rozmermi podľa obr. 4.4. Všetky uvedené výsledky zodpovedajú simuláciám pri zvolenej vlnovej dĺžke 650 nm.

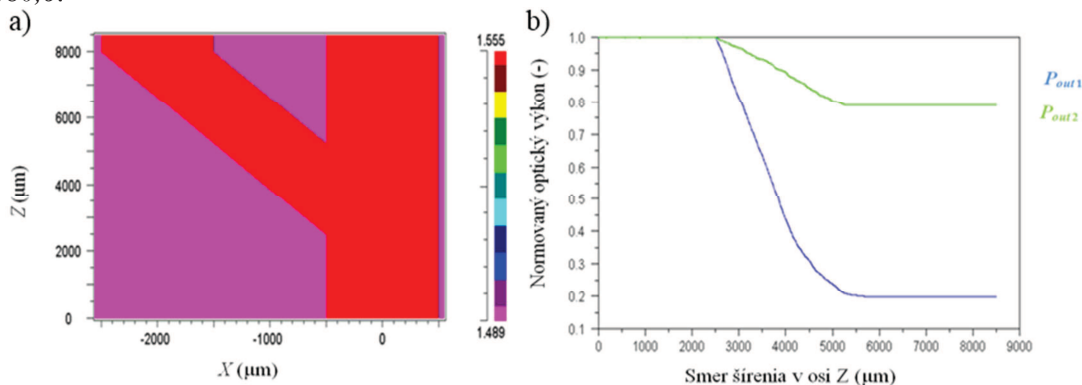
Prvé dva motívy (1 a 2) sa líšia deliacom pomerom (50:50 resp. 80:20) a tvarom vlnovodných ramien (motív 1 má ramená tvaru S, motív 2 má lomené ramená).

V prípade motívu 1 (obr. 4.6a)) boli pri simulácii v programe BeamPROP™ dosiahnuté výstupné normované výkony na úrovni $p_{out1}=0,5008$ a $p_{out2}=0,4983$ (obr. 4.6b)) a pomer výstupných výkonov 50,1:49,9.



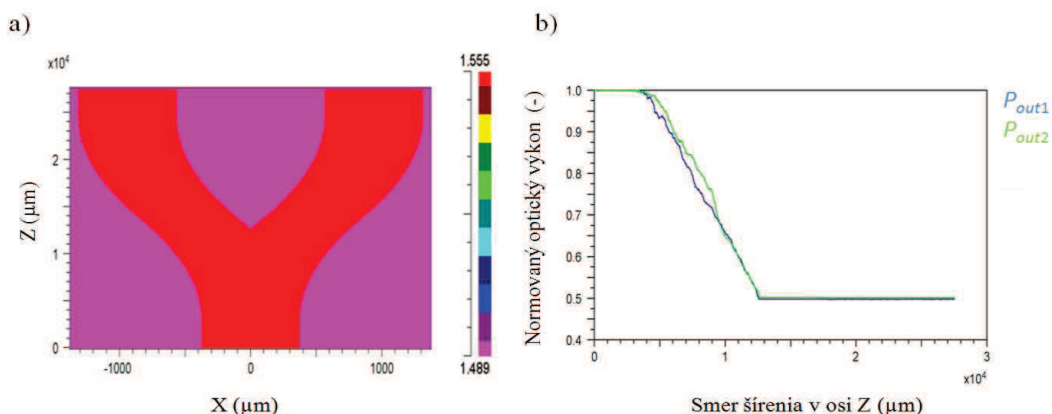
Obr. 4.6: Rozbočnica 1x2Y - motív 1, substrát PMMA, vlnovodná vrstva NOA73 ($\lambda=650$ nm, $n_f=1,555$, $n_s=1,489$): a) profil indexu lomu, b) výsledok simulácie v programe BeamPROP.

V prípade motívu 2 (obr. 4.7a)) bolo cieľom navrhnuť rozbočnicu 1x2Y s nesymetrickým pomerom výstupných výkonov 80:20. Pri simulácii v programe BeamPROP™ boli dosiahnuté výstupné normované výkony na úrovni 0,1910 a 0,7916 (obr. 4.7b)) a pomer výstupných výkonov 19,4:80,6.



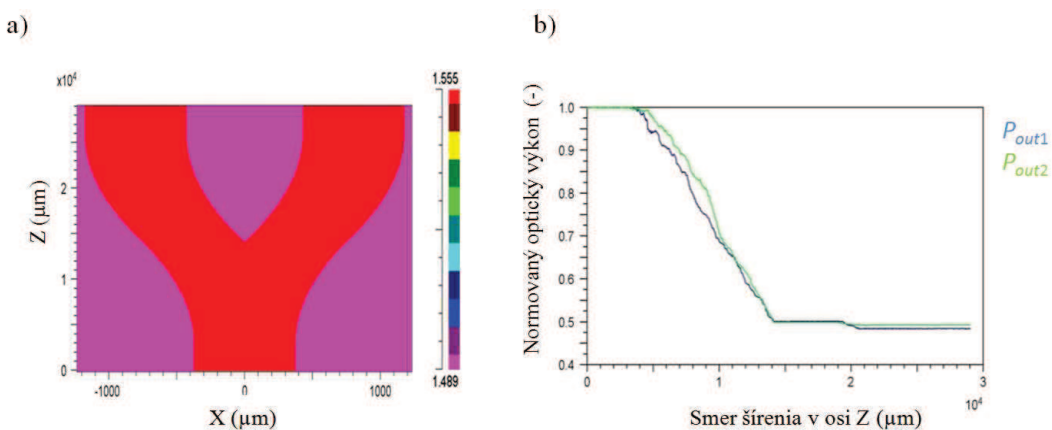
Obr. 4.7: Rozbočnica s deliacim pomerom 80:20 - motív 2, substrát PMMA, vlnovodná vrstva NOA73 ($\lambda=650$ nm, $n_f=1,555$, $n_s=1,489$): a) profil indexu lomu, b) výsledok simulácie v programe BeamPROP.

Rozbočnica prislúchajúca motívu 3 (obr. 4.8a)) dosahovala výstupné normované výkony na úrovni 0,4983 a 0,5009 (obr. 4.8b)) a pomer výstupných výkonov 49,9:50,1.



Obr. 4.8: Rozbočnica 1x2Y - motív 3, substrát PMMA, vlnodná vrstva NOA73 ($\lambda=650$ nm, $n_f=1,555$, $n_s=1,489$): a) profil indexu lomu, b) výsledok simulácie v programe BeamPROP.

V prípade motívu 4 (obr. 4.9a)) boli dosiahnuté výstupné normované výkony na úrovni 0,4843 a 0,4932 (obr. 4.9b)) a pomer výstupných výkonov 49,5:50,5.



Obr. 4.9: Rozbočnica 1x2Y - motív 4, substrát PMMA, vlnodná vrstva NOA73 ($\lambda=650$ nm, $n_f=1,555$, $n_s=1,489$): a) profil indexu lomu, b) výsledok simulácie v programe BeamPROP.

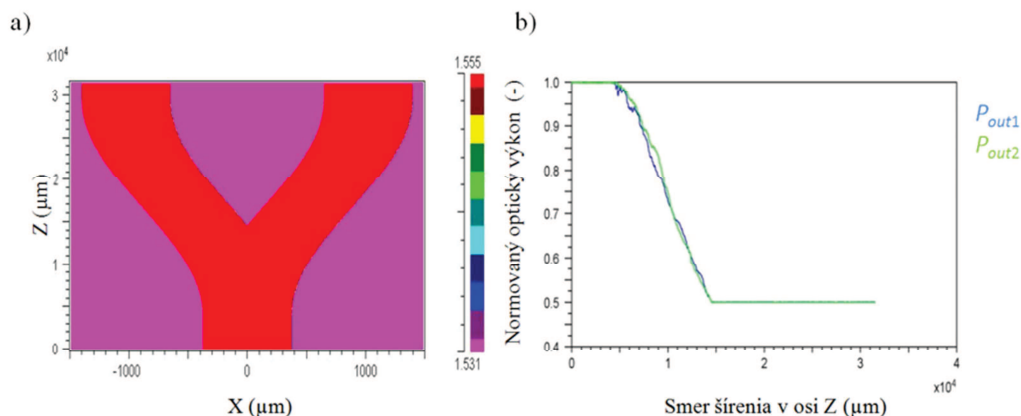
V tab. 4.9 sú uvedené rozmery motívov 1 až 4 zodpovedajúce obr. 4.4.

Tab. 4.9: Rozmery motívov 1 až 4 so substrátom PMMA ($n_s=1,489$) a vlnodnou vrstvou NOA73 ($n_f=1,555$), $\lambda=650$ nm.

motív	tvar rozbočnice	L_C (μm)	L_x (μm)	w_x (μm)	L_{in} (μm)	L_{out} (μm)	L_{Sbend} (μm)	θ ($^\circ$)	d (mm)	P_{out1} (-)	P_{out2} (-)
1		26000	2400	980	4000	4000	21000	2,4	10000	0,5008	0,4983
2		8500	3000	915	2500	2500	5850	3,7	2800	0,1910	0,7916
3		27600	2600	1120	3000	3000	21500	2,5	9500	0,4983	0,5009
4		29000	2300	860	3000	3000	23000	2,0	11000	0,4843	0,4932

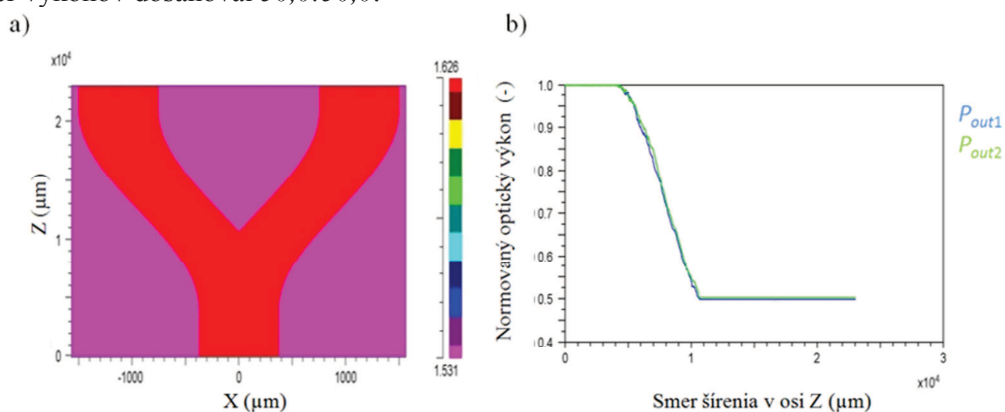
V prípade ďalších dvoch motívov V1 a V2 bol použitý substrát VEROCLEAR RGD810 a vlnovodná vrstva NOA73. Jednalo sa o rozbočnice základného typu.

Normované výstupné optické výkony motívu V1 (obr. 4.10a)) boli na úrovni 0,4996 a 0,5001 (obr. 4.10b)) a pomer výkonov bol 50,0:50,0.



Obr. 4.10: Rozbočnica 1x2Y - motív V1, substrát VEROCLEAR, vlnovodná vrstva NOA73 ($\lambda=650$ nm, $n_f=1,555$, $n_s=1,531$): a) profil indexu lomu, b) výsledok simulácie v programe BeamPROP.

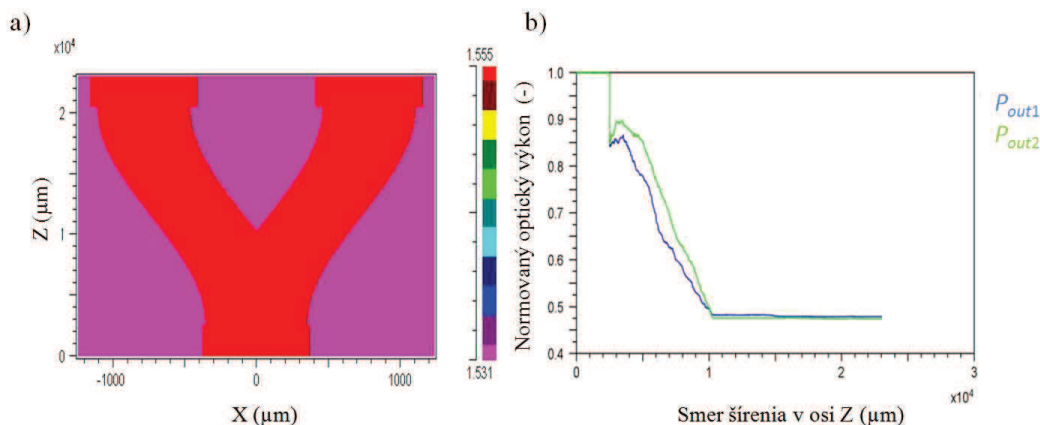
Motív V2 (obr. 4.11a)) vykazoval výstupné výkony na úrovni 0,4995 a 0,5002 (obr. 4.11b)) a pomer výkonov dosahoval 50,0:50,0.



Obr. 4.11: Rozbočnica 1x2Y - motív V2, substrát VEROCLEAR, vlnovodná vrstva NOA1625 ($\lambda=650$ nm, $n_f=1,626$, $n_s=1,531$): a) profil indexu lomu, b) výsledok simulácie v programe BeamPROP.

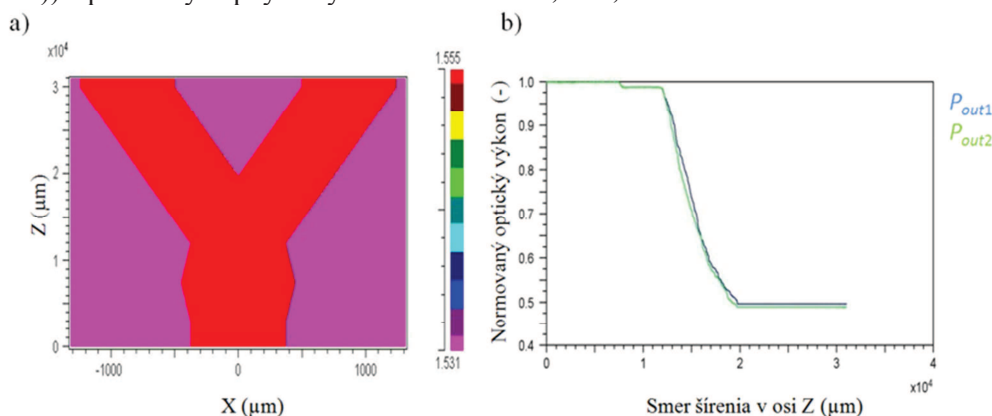
Nasledujúce dva motívy označené ako VA a VB sa od predchádzajúcich líšia rôznou šírkou vlnovodov (motív VA) a dvojitým vidovým skramblerom (motív VB). V prípade motívu VA sa jedná o rozbočnicu so šírkou vstupného a výstupných vlnovodov 750 μm a vlnovody v strede štruktúry (vlnovodné ramená rozbočnice) majú šírku 650 μm . Motív VB má za vstupným vlnovodom zaradený dvojitý vidový skrambler, cieľom ktorého je zvýšiť väzbu vidov a zlepšiť deliace vlastnosti štruktúry [16, 17].

Rozbočnica prislúchajúca motívu VA s rôznou šírkou vlnovodov (650 μm vlnovodné ramená a 750 μm vstupný a výstupné vlnovody, obr. 4.12a)) mala na výstupe hodnoty normovaných výkonov 0,4779 a 0,4740 (obr. 4.12b)), pomer výkonov dosahoval 50,2:49,8.



Obr. 4.12: Rozbočnica 1x2Y - motív VA, substrát VEROCLEAR, vlnovodná vrstva NOA73 ($\lambda=650$ nm, $n_f=1,555$, $n_s=1,531$): a) profil indexu lomu, b) výsledok simulácie v programe BeamPROP.

V prípade motívu VB (obr.4.13a)) boli normované výstupné výkony na úrovni 0,4957 a 0,4894 (obr.4.13b)) a pomer výstupných výkonov bol teda 50,3:49,7.



Obr. 4.13: Rozbočnica 1x2Y - motív VB, substrát VEROCLEAR, vlnovodná vrstva NOA73 ($\lambda=650$ nm, $n_f=1,555$, $n_s=1,531$): a) profil indexu lomu, b) výsledok simulácie v programe BeamPROP.

Vyrobené tiež boli motívy VC a VD základného typu navrhnuté v programe FreeCAD. Motívy VA až VD boli vytvorené v dvoch vyhotoveniach, po dva vzorky z každého motívu s drážkami vytvorenými s menšou presnosťou pri 3D tlači a po jednej vzorke s drážkami, ktoré boli vytvorené presnejším spôsobom.











V tab. 4.10 sú uvedené rozmery jednotlivých motívov zodpovedajúce obr. 4.4.

Tab. 4.10: Rozmery motívov V1, V2, VA a VB so substrátom VEROCLEAR RGD810 ($n_s=1,531$, $\lambda=650$ nm) a vlnovodnou vrstvou NOA73 ($n_f=1,555$, $\lambda=650$ nm) v prípade motívov V1, VA, VB, resp. NOA1625 ($n_f=1,626$, $\lambda=650$ nm) v prípade motívu V2.

motív	tvar rozbočnice	L_C (μm)	L_x (μm)	w_x (μm)	L_{in} (μm)	L_{out} (μm)	L_{Sbend} (μm)	θ (°)	d (mm)	P_{out1} (-)	P_{out2} (-)
V1		31600	2800	1360	4000	4000	25500	2,3	10750	0,4996	0,5001
V2		23000	3000	1640	4000	4000	17000	4,0	6800	0,4995	0,5002
VA		23000	2320	820	2500	2500	18000	2,4	7850	0,4779	0,4740
VB		31000	3000	1000	4000	4000	23000	2,0	8000	0,4957	0,4894

V tab. 4.11 je uvedený prehľad všetkých motívov planárnych 1x2Y rozbočníc vrátane počtu vyrobených vzoriek prislúchajúcich jednotlivým motívom. Uvedený vlnovodný materiál zodpovedá materiálu uvažovanému pri návrhu daného motívu rozbočnice, pri zalievaní štruktúr boli použité aj iné polyméry NOA. Deliaci pomer rozbočníc je 50:50, pokiaľ nie je uveden inak.

Tab. 4.11: Vyrobené motívy planárnych rozbočníc 1x2Y.

motív	tvar	substrát a krycia vrstva	vlnovodná vrstva	popis	počet vyrobených vzoriek
1		PMMA	NOA73	vlnovody tvaru S	5
2		PMMA	NOA73	lomené vlnovody, deliaci pomer 80:20	4
3		PMMA	NOA73	vlnovody tvaru S	2
4		PMMA	NOA73	vlnovody tvaru S	4
V1		VEROCLEAR	NOA73	vlnovody tvaru S	2
V2		VEROCLEAR	NOA1625	vlnovody tvaru S	2
VA		VEROCLEAR	NOA73	vlnovody tvaru S, rôzna šírka vlnovodov	3
VB		VEROCLEAR	NOA73	vlnovody tvaru S, módový skrambler	3
VC		VEROCLEAR	NOA73	vlnovody tvaru S	3
VD		VEROCLEAR	NOA73	vlnovody tvaru S	3

Zoznam všetkých vyrobených vzoriek vrátane použitých materiálov substrátu a vlnovodnej vrstvy je uvedený v Prílohe A.

5. Zatočené planárne optické vlnovody

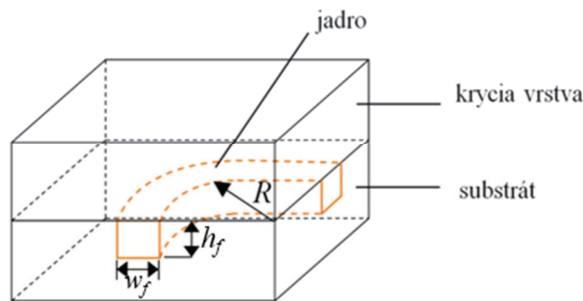
Planárne zatočené vlnovody sú pasívne štruktúry, ktoré menia smer vstupujúceho optického signálu o určitý uhol.

V rámci tejto práce boli navrhnuté a vyrobené vlnovody meniace smer signálu o uhol 90° . V prípade takéhoto typu vlnovodu je v substráte vytvorená drážka v tvare štvrtkruhu, do ktorej sú vložené konce optických vlákien. Drážka je vyplnená vlnovodnou vrstvou a následne je pripevnená krycia vrstva. Riešenie šírenia vlny v tomto druhu vlnovodu vychádza z geometrickej optiky (odraz a lom vlny na rozhraní).

Podobne ako v prípade 1x2Y rozbočníc musí byť pre vedenie signálu vlnovodom splnená podmienka totálneho odrazu a nerovnosť $n_c < n_f > n_s$. V prípade zatočených vlnovodov je dôležité sa zaoberať závislosťou vložného útlmu na polomere zatočenia vlnovodu.

Optické straty v tomto druhu vlnovodu sú závislé na vlnovej dĺžke. Evanescentné vlny prislúchajúce predovšetkým vyšším vidom prenikajú hlboko do krycej vrstvy vlnovodu. Čím vyššia je vlnová dĺžka, tým sa evanescentná vlna šíri ďalej do krycej vrstvy. V určitej vzdialenosti od stredu vlnovodu by časť poľa v krycej vrstve musela prekročiť rýchlosť svetla a preto musí byť vyzharená, pričom dochádza k zníženiu výkonu vo vedenom vide [28].

V rámci diplomovej práce boli navrhnuté a vyrobené zatočené vlnovody podľa obr. 5.1, pričom do jedného substrátu boli vždy vytvorené 3 drážky s rôznymi polomerami. Vyrobené boli motívy s polomerami $R = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 20, 30$ mm. Do drážok v tvare písmena U, vytvorených v substráte, bola nanosená a vytvrdená vlnovodná vrstva a na substrát bola následne pripevnená krycia vrstva.



Obr. 5.1: Zatočený vlnovod s jadrom v substráte.

Pre výpočet pomeru výkonu na výstupe a výkonu na vstupe zatočeného vlnovodu platí vzťah vychádzajúci z teórie geometrickej optiky [28, 29]:

$$T = \frac{P_{out}}{P_{in}} = 1 - \frac{1}{2}K - \frac{1}{6}K^2 - \frac{1}{8}K^3 - \frac{1}{8}K^4 \quad (5.1)$$

kde P_{out} je výkon na výstupe a P_{in} výkon na vstupe zatočeného vlnovodu. K je konštanta definovaná ako:

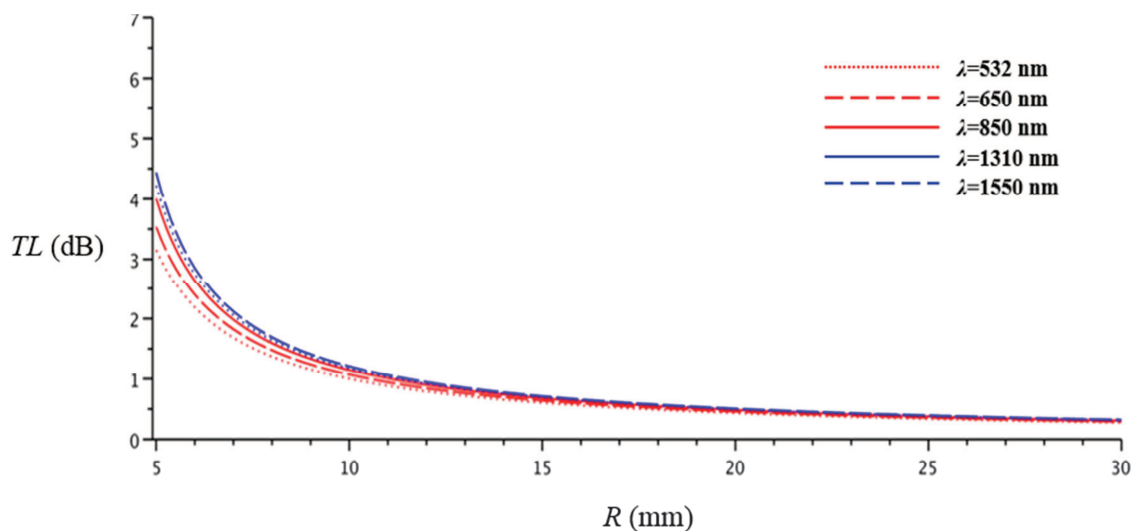
$$K = \frac{w_f}{NA^2 R} \quad (5.2)$$

kde w_f je šírka vlnovodu, NA numerická apertúra použitých materiálov a R polomer vlnovodu.

Prenosový útlm zatočeného vlnovodu je možné určiť podľa vzťahu:

$$TL = -10 \log \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (5.3)$$

Na obr. 5.2 je priebeh útlmu zatočeného vlnovodu v závislosti na polomere drážky a vlnovej dĺžke pre vlnové dĺžky 532 nm, 650 nm, 850 nm, 1310 nm a 1550 nm, ktorý bol vypočítaný podľa vzťahov uvedených vyššie pre prípad zatočeného vlnovodu so substrátom PMMA a vlnovodnou vrstvou NOA73.



Obr. 5.2: Závislosť vložného útlmu na polomere zatočeného vlnovodu so substrátom PMMA a vlnovodnou vrstvou NOA73, ($n_f=1,555$, $n_s=1,489$).

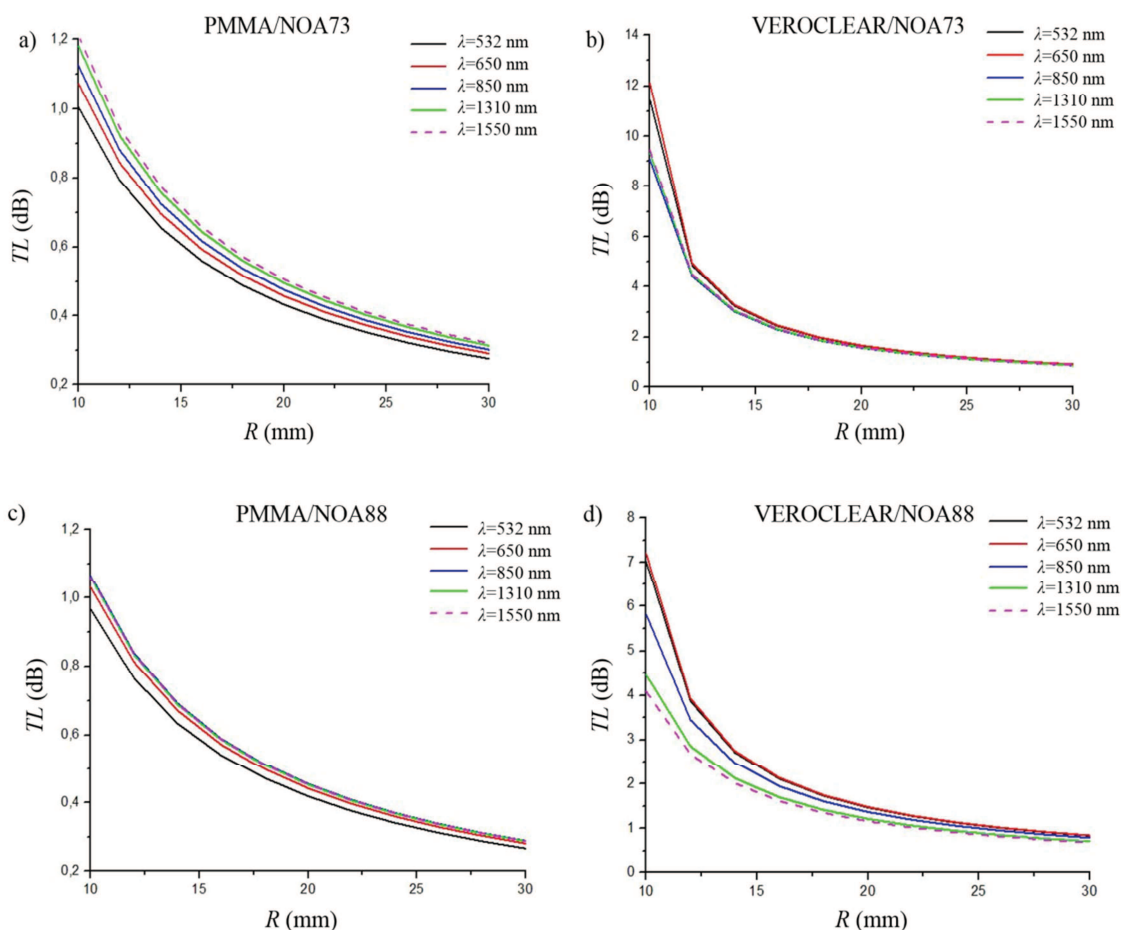
Podľa uvedeného grafu prenosový útlm vlnovodu s rastúcim polomerom klesá, najvýraznejší pokles je dosiahnutý najmä pri menších polomeroch do 10 mm. Najväčší rozdiel v hodnote vložného útlmu z hľadiska vlnovej dĺžky je v prípade malých polomerov, od polomeru asi 25 mm sa hodnota útlmu pri rôznych vlnových dĺžkach optického signálu takmer nelíši.

Vypočítané závislosti prenosového útlmu na polomere pre vybrané materiály substrátu a krycej vrstvy sú uvedené v kap. 6.1.

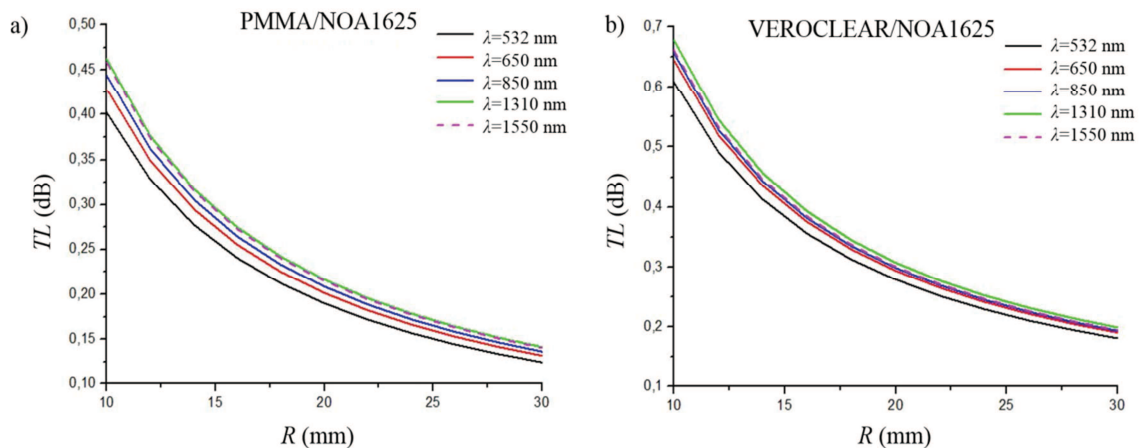
6. Návrh planárneho optického zatočeného vlnovodu

6.1 Výpočty útlmu zatočeného vlnovodu

Pre návrh zatočeného vlnovodu je dôležité vypočítať útlm podľa vzťahov 5.1 na str. 32 a 5.3 na str. 33. Následne je možné z vykreslených grafov závislosti tohto útlmu na polomere vlnovodu pre rôzne vlnové dĺžky a pre rôzne materiály substrátu a vlnovodnej vrstvy určiť vhodné polomery vlnovodov, u ktorých je predpoklad nízkych hodnôt útlmu. Tieto grafy pre substráty PMMA a VEROCLEAR, vlnovodné vrstvy NOA a pre päť vlnových dĺžok (532 nm, 650 nm, 850 nm, 1310 nm a 1550 nm), sú uvedené na obr. 6.1 a 6.2. Pre výpočet boli použité hodnoty indexu lomu uvedené v tab. 4.2 až 4.7 na str. 23 a 24.



Obr. 6.1: Závislosť útlmu zatočeného vlnovodu na jeho polomere pre vlnové dĺžky 532 nm, 650 nm, 850 nm, 1310 nm a 1550 nm a pre kombinácie materiálov substrát/vlnovodná vrstva: a) PMMA/NOA73, b) VEROCLEAR/NOA73, c) PMMA/NOA88, d) VEROCLEAR/NOA88.



Obr. 6.2: Závislosť útlmu zatočeného vlnovodu na jeho polomere pre vlnové dĺžky 532 nm, 650 nm, 850 nm, 1310 nm a 1550 nm a pre kombinácie materiálov substrát/vlnovodná vrstva:
a) PMMA/NOA1625, b) VEROCLEAR/NOA1625.

Z grafov vyplýva, že najmenší prenosový útlm by mal byť podľa teoretických výpočtov dosiahnutý v prípade vlnovodu so substrátom PMMA a s vlnovodnou vrstvou NOA1625, konkrétne pri najväčšom polomere a najväčšie útlmy by mali byť dosiahnuté pri použití substrátu VEROCLEAR a vlnovodnej vrstvy NOA73 v prípade najmenších polomerov.

Z uvedeného vyplýva, že veľký kontrast indexu lomu materiálov substrátu a vlnovodnej vrstvy (napr. PMMA/NOA1625) umožňuje použitie vlnovodov s menším polomerom a je možná vyššia integrácia štruktúr, pretože útlm je nižší ako v prípade materiálov s menším kontrastom indexu lomu (napr. VEROCLEAR/NOA1625).

Na základe grafov útlmu zatočených vlnovodov boli najskôr zvolené tri polomery vlnovodov, ktoré tvorili prvú emisiu vzoriek. Prvá emisia bola tvorená zatočenými vlnovodmi s drážkami s polomerami 10 mm, 20 mm a 30 mm na spoločnom substráte (motívy Z, ZV). Následne boli vyrobené ďalšie dve emisie. Druhá emisia bola tvorená vlnovodmi s polomerami 1 mm, 3 mm a 5 mm na spoločnom substráte (motív Z1) a tretiu emisiu tvorili zatočené vlnovody s polomerami 2 mm, 4 mm a 6 mm na jednom substráte (motív Z2).

6.2 Metóda sledovania lúča (Ray-tracing)

Metóda sledovania lúča (Ray-tracing), ktorú využíva program OptiCAD popísaný v kap. 6.3, je založená na princípe dopadajúcich a odrazených lúčov na rozhraní dvoch prostredí, ktorý je popísaný Snellovým zákonom. Jedná sa o geometrické zobrazenie dráhy lúča. Veľký počet lúčov simuluje zdroj svetla, napr. diódu. Každý lúč má vlastnú dĺžku dráhy a smer. Závisí teda na uhloch lúčov, ktoré vstupujú do objektu. Pomocou opticky citlivej vrstvy (detektorov) môžeme v simulačnom programe zobraziť histogram na mieste, kde chceme zistiť výkon a miesto dopadajúcich lúčov. Táto metóda je veľmi náročná na výpočtový výkon, pretože pokiaľ chceme dosiahnuť veľkú presnosť simulácie, je nutné použiť veľký počet lúčov (tisíce až milióny) [8].

6.3 Návrh zatočeného vlnovodu pomocou programu OptiCAD

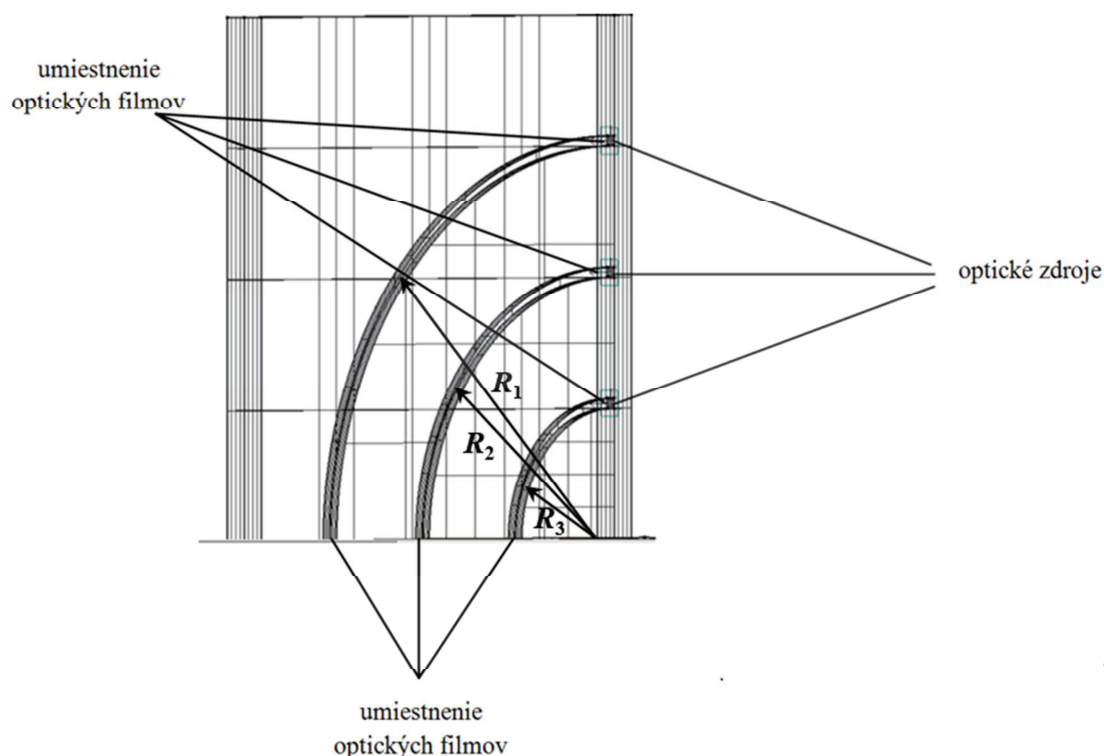
Simulačný program OptiCAD je nesequenčný, optický, analytický a vizualizačný software od firmy OptiCAD Corporation [30], ktorý umožňuje analýzu pomocou odrazu lúča, lomu, rozptylu a polarizácie svetla na ľubovoľne umiestnenom optickom prvku v priestore.

Základná knižnica programu obsahuje viaceré typy optických prvkov, napr. zrkadlá, optické šošovky alebo hranoly. Umožňuje použiť svetelné zdroje, ktoré môžu byť bodové, plošné, objemové alebo radové. Optický zdroj je tiež možné zdefinovať pomocou tabuliek (napr. vlnových dĺžok) alebo matematických rovníc. Program obsahuje aj rôzne typy detektorov – bodové aj plošné (okružného alebo pravouhlého tvaru) [8].

Pre simuláciu v programe OptiCAD bol použitý model zatočených vlnovodov so šírkou $750\ \mu\text{m}$, pôvodne vytvorený v programe FreeCAD ako súbor stl a naimportovaný do programu OptiCAD vo formáte iges. V tomto programe boli do štruktúry vložené modely zdroja žiarenia pracujúceho na určitej vlnovej dĺžke (na každom vstupe vlnovodu jeden zdroj). Za týmito zdrojmi boli umiestnené filmy, ktoré merali prechádzajúce žiarenie, vždy jeden v malej vzdialenosti za zdrojom a druhý na výstupe vlnovodu.

Popis nastavenia simulácie v prostredí OptiCAD je uvedený v Prílohe D.

Ukážka modelu zatočeného vlnovodu s polomerami vlnovodov 10, 20 a 30 mm importovaného do programu OptiCAD je na obr. 6.3.



Obr. 6.3: Štruktúra zatočeného vlnovodu so šírkou vlnovodu $750\ \mu\text{m}$ v prostredí programu OptiCAD.

Na základe výsledkov simulácií je možné vypočítať prenosový útlm zatočeného vlnovodu podľa vzťahu:

$$TL = -10 \log \frac{P_{det}}{P_{in}} \quad (6.1)$$

kde P_{det} je výkon v mieste detektora umiestneného na výstupe vlnovodu a P_{in} je výkon na detektore umiestnenom priamo za zdrojom žiarenia.

Výsledky simulácie (veľkosti optických výkonov a z nich určený prenosový útlm) pre zdroj vlnovej dĺžky $\lambda = 650$ nm s výkonom $100 \mu\text{W}$ sú v tab. 6.1 až 6.2.

V tab. 6.1 je uvedený príklad výsledkov simulácie pre zatočený vlnovod so substrátom PMMA a vlnovodnou vrstvou NOA73.

Tab. 6.1: Výsledky simulácie zatočeného vlnovodu so substrátom PMMA a vlnovodnou vrstvou NOA73 ($n_f=1,555$, $n_s=1,489$), s polomerami 10, 20, 30 mm a pri zvolenom $P_{in}=100 \mu\text{W}$ v programe OptiCAD ($\lambda=650$ nm).

polomer vlnovodu R (mm)	l (mm)	P_{det} (μW)	TL (dB)
10	15,7	9,28	10,32
20	31,4	5,55	12,56
30	47,1	3,35	14,75

kde l je dĺžka vlnovodu a TL je prenosový útlm.

V tab. 6.2 je uvedený príklad výsledkov simulácie pre zatočený vlnovod so substrátom VEROCLEAR a vlnovodnou vrstvou NOA73.

Tab. 6.2: Výsledky simulácie zatočeného vlnovodu so substrátom VEROCLEAR a vlnovodnou vrstvou NOA73 ($n_f=1,555$, $n_s=1,531$), s polomerami 10, 20, 30 mm a pri zvolenom $P_{in}=100 \mu\text{W}$ v programe OptiCAD ($\lambda=650$ nm).

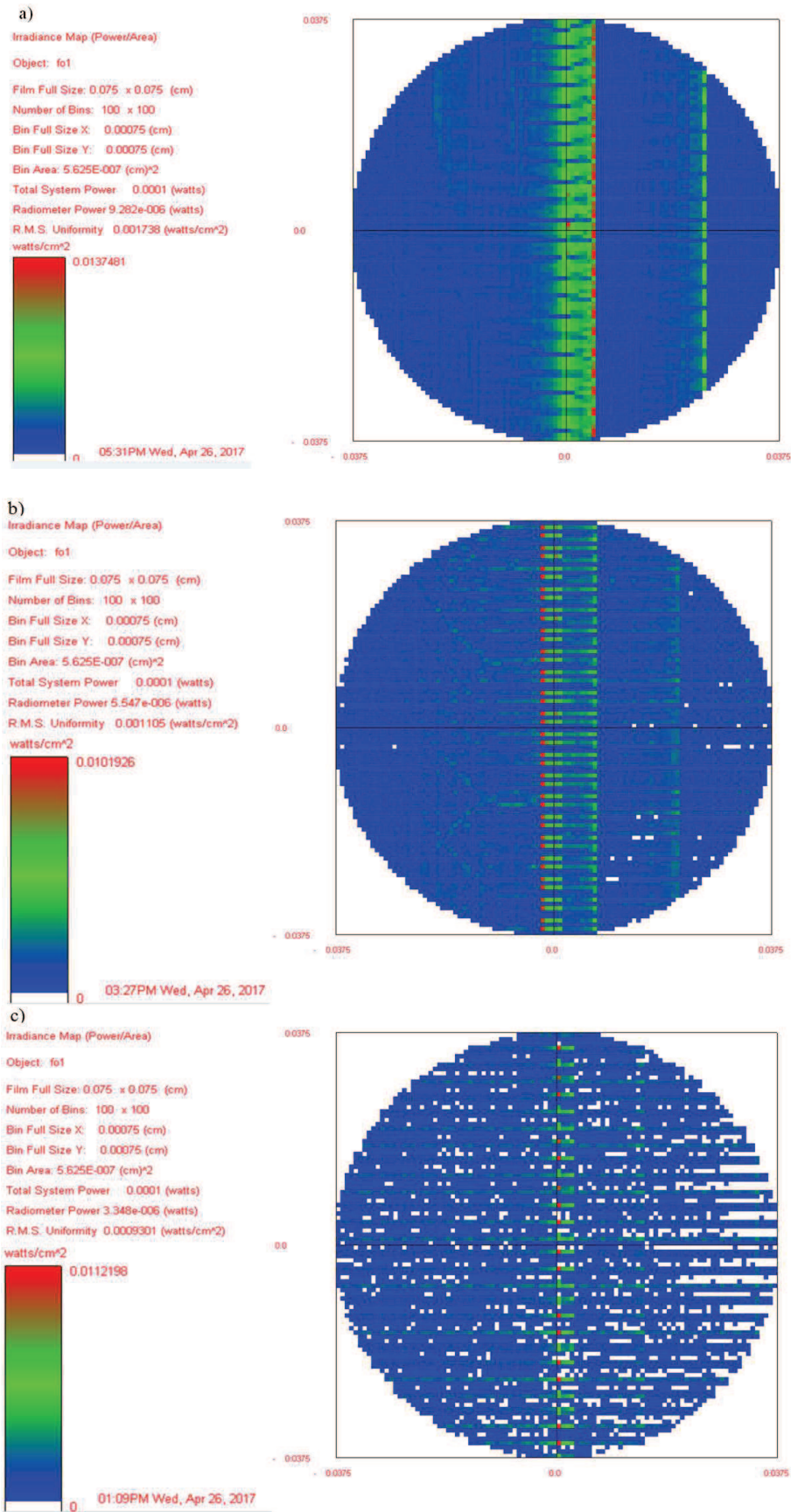
polomer vlnovodu R (mm)	l (mm)	P_{det} (μW)	TL (dB)
10	15,7	9,17	10,38
20	31,4	5,48	12,61
30	47,1	3,33	14,78

kde l je dĺžka vlnovodu a TL je prenosový útlm.

Z tab. 6.1 a 6.2 vyplýva, že najnižší prenosový útlm zatočených vlnovodov s polomerami 10, 20 a 30 mm bol dosiahnutý v prípade vlnovodu s najnižším polomerom (10 mm). Podľa výsledkov simulácie sa prenosový útlm s rastúcim polomerom zvyšuje. Tieto výsledky ale nezodpovedajú teoretickým výpočtom uvedeným v kap. 6.1, pretože nasimulovaná závislosť útlmu na polomere vlnovodu je opačná.

V prípade vlnovodu so substrátom PMMA a vlnovodnou vrstvou NOA73 bol vypočítaný útlm nepatrne menší ako v prípade vlnovodu so substrátom VEROCLEAR a vlnovodnou vrstvou NOA73, čo je možné pripísať nižšiemu kontrastu indexu lomu v prípade materiálov VEROCLEAR/NOA73 (substrát/krycia vrstva).

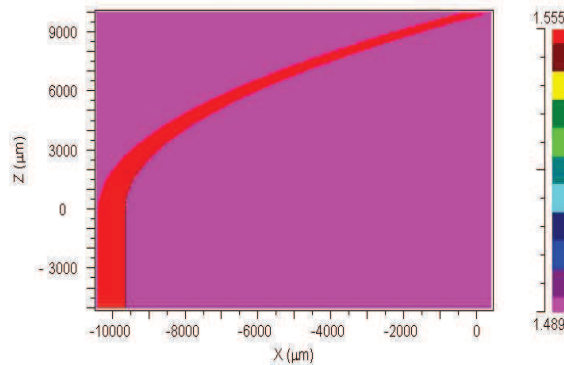
Na obr. 6.4 sú uvedené príklady grafu zobrazujúceho výsledok simulácie výkonovej hustoty dopadajúcej na optický film umiestnený na výstup zatočeného vlnovodu PMMA/NOA73 (substrát/vlnovodná vrstva) s polomerom 10, 20 a 30 mm, pričom je zrejmé, že maximálna hustota výkonu sa nachádza vždy v strednej časti optického filmu.



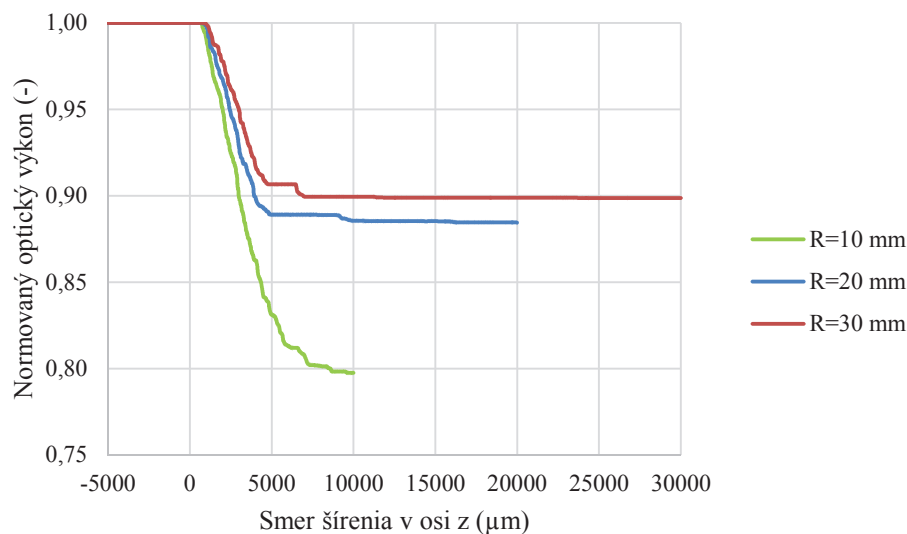
Obr. 6.4: Výsledok simulácie výstupnej hustoty výkonu zatočeného vlnovodu so substrátom PMMA a vlnovodnou vrstvou NOA73 ($\lambda = 650$ nm, $n_f = 1,555$, $n_s = 1,489$): a) $R = 10$ mm, b) $R = 20$ mm, c) $R = 30$ mm.

6.4 Návrh zatočeného vlnovodu pomocou programu BeamPROP

V simulačnom programe BeamPROP bol vytvorený 2D model zatočeného vlnovodu a bola simulovaná závislosť výstupného normovaného optického výkonu na polomere zatočeného vlnovodu (obr. 6.5). Simulovaný vlnovod sa skladal z priameho úseku dĺžky 5 mm (začínajúceho sa v súradnici $Z = -5000 \mu\text{m}$) a zatočeného vlnovodu (začínajúceho sa v súradnici $Z = 0 \mu\text{m}$). Na obr. 6.6 sú vykreslené priebehy normovaného výkonu podĺž štruktúry pre prípad vlnovej dĺžky 650 nm, polomery $R=10 \text{ mm}$, 20 mm a 30 mm a pre použité materiály PMMA/NOA73 (substrát/vlnovodná vrstva). Nastavenie simulácie v programe BeamPROP je uvedené v Prílohe C na obr. C.13 a C.14.



Obr. 6.5: Profil indexu lomu zatočeného vlnovodu so substrátom PMMA a vlnovodnou vrstvou NOA73 so šírkou vlnovodu $750 \mu\text{m}$, s polomerom $R=10 \text{ mm}$ ($\lambda=650 \text{ nm}$, $n_f=1,555$, $n_s=1,489$).



Obr. 6.6: Výsledky simulácie zatočeného vlnovodu so substrátom PMMA a vlnovodnou vrstvou NOA73 v programe BeamPROP ($\lambda = 650 \text{ nm}$, $n_f=1,555$, $n_s=1,489$): $R = 10 \text{ mm}$, 20 mm , 30 mm .

V tab. 6.3 sú uvedené hodnoty normovaných výstupných optických výkonov dosiahnuté pri simulácii v programe BeamPROP a vypočítané hodnoty prenosového útlmu podľa vzťahu:

$$TL = -10 \log \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (6.2)$$

kde P_{out} je normovaný výstupný optický výkon a P_{in} je referenčný normovaný vstupný výkon ($P_{in}=1$).

Tab. 6.3: Výstupné normované výkony zatočených vlnovodov a prenosový útlm zatočeného vlnovodu so substrátom PMMA a vlnovodnou vrstvou NOA73 – simulácia v programe BeamPROP.

R (mm)	p_{out} (-)	TL (dB)
10	0,798	0,98
20	0,885	0,53
30	0,899	0,46

Z tab. 6.3 vyplýva, že normovaný výstupný optický výkon by mal podľa výsledkov tejto simulácie s rastúcim polomerom rásť a prenosový útlm s rastúcim polomerom klesať.

V tab. 6.4 sú uvedené motívy zatočených vlnovodov vyrobené v rámci diplomovej práce, jedná sa o 22 vzoriek líšiacich sa polermi vlnovodov a v jednom prípade materiálom substrátu a krycej vrstvy (motívy Z, Z1 a Z2 so substrátom PMMA a motív ZV so substrátom VEROCLEAR RGD810). Uvedený vlnovodný materiál zodpovedá materiálu uvažovanému pri návrhu daného motívu zatočeného vlnovodu, pri zalievaní štruktúr boli použité aj iné polyméry NOA.

Tab. 6.4: Vyrobené motívy planárnych zatočených vlnovodov.

motív	substrát a krycia vrstva	vlnovodná vrstva	popis	počet vyrobených vzoriek
Z	PMMA	NOA73	polomer vlnovodov 10 mm, 20 mm a 30 mm	10
Z1	PMMA	NOA72	polomer vlnovodov 1 mm, 3 mm a 5 mm	5
Z2	PMMA	NOA72	polomer vlnovodov 2 mm, 4 mm a 6 mm	5
ZV	VEROCLEAR RGD810	NOA73	polomer vlnovodov 10, 20 a 30 mm	2

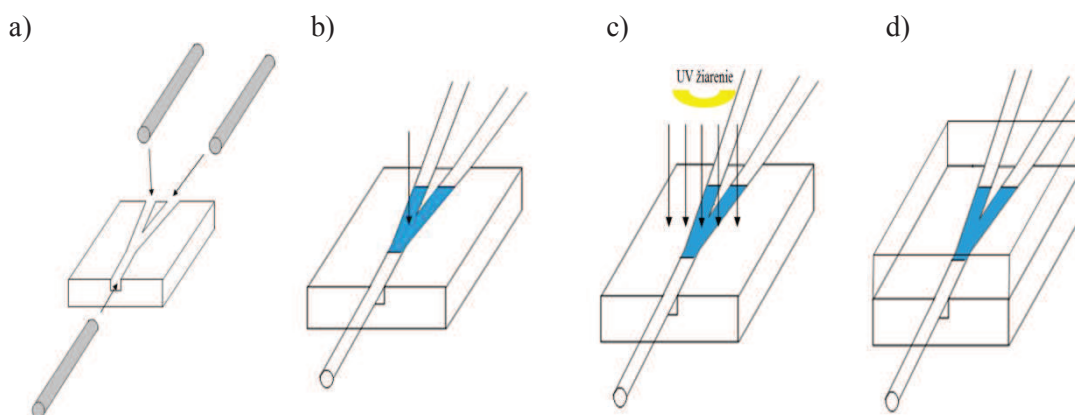
Zoznam všetkých vyrobených vzoriek vrátane použitých materiálov substrátu a vlnovodnej vrstvy je uvedený v Prílohe A.

7. Výroba navrhnutých planárnych štruktúr

7.1 Výroba štruktúr s použitím CNC gravírovania

Do substrátov PMMA boli pred samotnou výrobou štruktúr najskôr vytvorené drážky pomocou CNC gravírovania. Pre gravírovanie bol použitý frézovací stroj CNC NONCO Kx3, so šírkou frézy 0,6 mm, rýchlosťou otáčania 1800 ot/min a rýchlosťou posunu 36 mm/min (obr. 7.1a)) [31].

Drážky, vytvorené v substráte, boli očistené od drobných nečistôt pomocou izopropylalkoholu. Následne boli do vyrobených drážok vložené a pripevnené POF vlákna ESKA SH 3001 s polomerom 750 μm , a to buď bez konektorov, na konce ktorých boli nasadené tzv. Bare Fiber Adapter konektory alebo POF vlákna s FC/PC konektormi. V prípade vlákien bez konektorov je potrebné naleštenie ich koncov, čím sa dosiahne ich lepšie zarovnanie a naviazanie optického signálu. Na leštenie boli použité leštiace papiere s rôznou hrúbkou zrna (3 mm, 0,3 mm a 0,1 mm). Takto pripravená štruktúra bola zaliata vlnovodnou vrstvou NOA (7.1b)). Pri nanášaní vlnovodného polyméru do drážok je potrebné minimalizovať vznik vzduchových bublín a vzniknutú vrstvu zarovnať tak, aby nebola vyššia ako okolitý substrát. Nasleduje vytvrdenie vrstvy pomocou UV žiarenia (7.1c)). Doba vytvrdzovania sa pohybovala väčšinou v rozmedzí 10 min až 30 min. Nakoniec bola na substrát pripevnená krycia vrstva, v prípade navrhovaných štruktúr bola z rovnakého materiálu ako substrát (7.1d)).



Obr. 7.1: Postup výroby rozbočnice 1x2Y: a) vytvorenie drážok v substráte, b) vloženie vlákien a naniesenie vlnovodnej vrstvy, c) vytvrdenie vlnovodnej vrstvy, d) asemblácia krycej vrstvy.

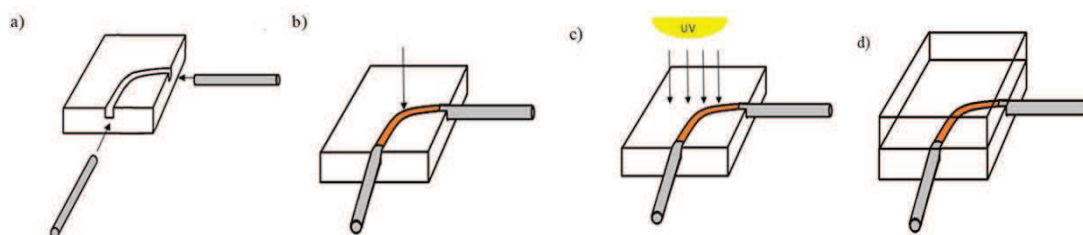
Týmto spôsobom bolo vyrobených 5 motívov planárnych štruktúr s drážkami vytvorenými CNC gravírovaním, z toho štyri prislúchali rozbočniciam 1x2Y (motívy 1-4) a jeden zatočenému vlnovodu (motív Z).

Výroba zatočených vlnovodov s malými polomerami

V prípade zatočených vlnovodov s menšími polomerami ($R = 1 \text{ mm}, 2 \text{ mm}, 3 \text{ mm}, 4 \text{ mm}, 5 \text{ mm}, 6 \text{ mm}$) bol z dôvodu nedostatočného priestoru pre vloženie vlákien vedľa seba zvolený odlišný spôsob výroby. Do drážok neboli vkladané vlákna, ale k hranám substrátu boli kolmo na vstupy vlnovodov pripevnené fólie, na ktoré bol pred zaliatím drážok vlnovodnou vrstvou nanesený separátor SP-3 od firmy ELCHEMCo. Pri nanášaní vlnovodnej vrstvy do drážok fólie zabraňovali úniku vlnovodného polyméru z drážok a separátor mal zabezpečiť bezproblémové odstránenie fólií po vytvrdení vlnovodnej vrstvy a vytvorenie opticky kvalitného čela vlnovodu pre naviazanie

a vyvízanie optického signálu. Na substráty s vytvrdenou vlnovodnou vrstvou bola po vytvrdení a odstránení fólií pripevnená krycia vrstva. Týmto spôsobom boli vyrobené 2 motívy (Z1 a Z2).

Na obr. 7.2 je uvedený postup výroby zatočeného vlnovodu.



Obr. 7.2: Postup výroby zatočeného vlnovodu: a) vytvorenie drážok v substráte, b) vloženie vlákien a naniesenie vlnovodnej vrstvy, c) vytvrdenie vlnovodnej vrstvy, d) assembling krycej vrstvy.

7.2 Výroba štruktúr s použitím 3D tlače

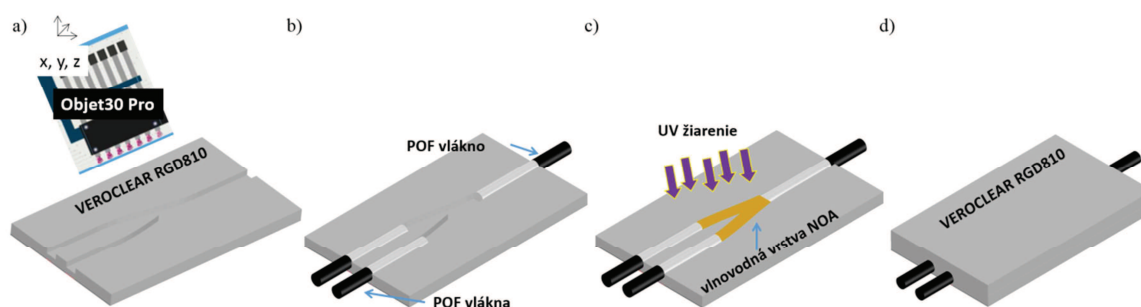
3D tlač spočíva v spracovaní geometrického návrhu planárnej štruktúry v softvérovom programe a následnej tlači pri použití transparentného materiálu. Jedná sa o technológiu doposiaľ bežne nepoužívanú na výrobu vlnovodov.

V tomto prípade boli drážky vytvorené v polymérnom materiáli VEROCLEAR RGD810 na základe návrhu v programe ProgeCAD, pričom na ich tlač bola použitá tlačiareň Precision Desktop Objet30 Pro.

Postup výroby 3D štruktúry je nasledovný: Tekutý polymér (VEROCLEAR) je vstreknutý do vytvorenej vamičky a drobné kvapky sú vytvrdené UV žiarením. Postupným ukladaním jemných vrstiev polyméru vo vamičke je vytvorený presný 3D model planárnej štruktúry. Pri výrobe je použitý aj podporný materiál pre komplexnejšie štruktúry, ktorý je možné odstrániť. Tento materiál je pred tlačou vyčistený. Povrch materiálu vytvorenej štruktúry môže byť vyhladený použitím roztoku hydroxidu sodného [32].

Nasledujúci postup výroby planárnej štruktúry (pripevnenie POF vlákien, zaliatie drážok vlnovodnou vrstvou, jej vytvrdenie a pripevnenie krycej vrstvy) je rovnaký ako v prípade rozbočníc zo substrátu PMMA s drážkami vyrobenými CNC gravírovaním (obr. 7.3).

Týmto spôsobom bolo vyrobených 7 motívov, z toho šesť predstavovali 1x2Y rozbočnice (motívy V1, V2, VA až VD) a jeden zatočený vlnovod (motív ZV).



Obr. 7.3: Postup výroby rozbočnice so substrátom a krycou vrstvou z materiálu VEROCLEAR RGD810: a) tlač motívu, b) vloženie vlákien, c) naniesenie a vytvrdenie vlnovodnej vrstvy, d) assembling krycej vrstvy [32].

8. Diagnostika a meranie útlmu vyrobených štruktúr

8.1 Meranie indexu lomu

Meranie indexu lomu použitých materiálov využíva metódu jednohranolovej vidovej spektroskopie (obr. 8.1a)). Pre toto meranie bol použitý prístroj Metricon 2010.

Princíp jednohranolovej spektroskopie spočíva v naviazaní monochromatického svetelného zväzku do vlnovodu a rovnakým spôsobom sa zväzok aj vyvážuje z vlnovodu. Merané sú synchronne uhly, z ktorých je možné určiť závislosť indexu lomu na hrúbke vlnovodnej vrstvy, prípadne je možné určiť indexy lomu objemových vzoriek [33, 34].

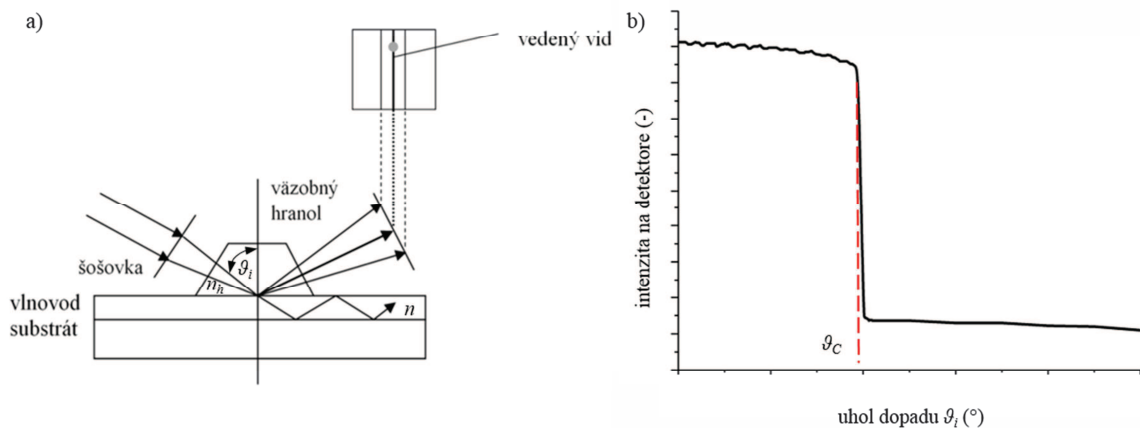
Pri meraní indexu lomu je laserový zväzok zaostrený na základňu hranola, zväzok sa od základne hranola odráža do fotodetektora, až kým uhol dopadu lúča nedosiahne kritický uhol ϑ_c , ktorý je daný vzťahom [35, 36]:

$$\vartheta_c = \frac{n}{n_h} \quad (8.1)$$

kde n je index lomu meraného materiálu a n_h je index lomu väzobného hranola.

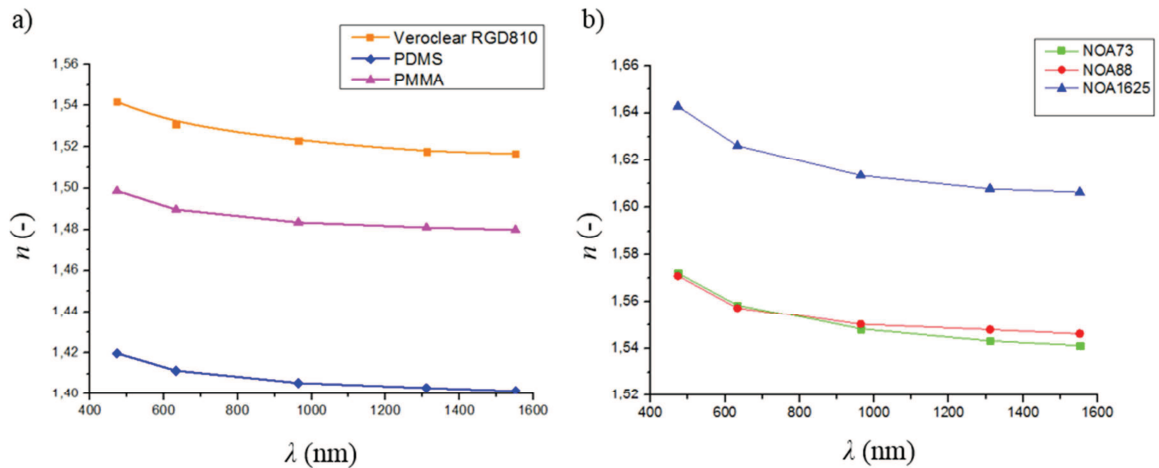
Na fotodetektore vzniká svetelná stopa s tmavými čiarami, čo je zapríčinené tým, že časť žiarenia dopadajúceho na základňu pod synchronnými uhlami sa naviaže do hranola a na detektore sa nezobrazí, čo sa prejaví tmavou čiarou. Z výrazného poklesu intenzity zmeranej na detektore (obr. 8.1 b)) je možné určiť kritický uhol.

Väzobná oblasť musí byť čo najmenšia, aby nedochádzalo k okamžitému vyvážovaniu svetla z vlnovodu [33 - 35].



Obr. 8.1: Princíp merania indexu lomu pomocou väzobného hranola: a) usporiadanie merania, b) určenie kritického uhla [28].

Na obr. 8.2a) sú uvedené závislosti zmeraných hodnôt indexu lomu vybraných substrátov (VEROCLEAR, PMMA a PDMS) na vlnovej dĺžke a na obr. 8.2b) sú vykreslené závislosti indexu lomu polymérov NOA na vlnovej dĺžke. Meranie prebiehalo na $\lambda=473$ nm, 632,8 nm, 964 nm, 1311 nm a 1552 nm a zo získanej závislosti boli aproximované hodnoty pre vlnové dĺžky 532 nm, 650 nm, 850 nm, 1310 nm a 1550 nm. Zmerané hodnoty indexu lomu boli využité pre návrh štruktúr uvedených v kap. 4 a 6.

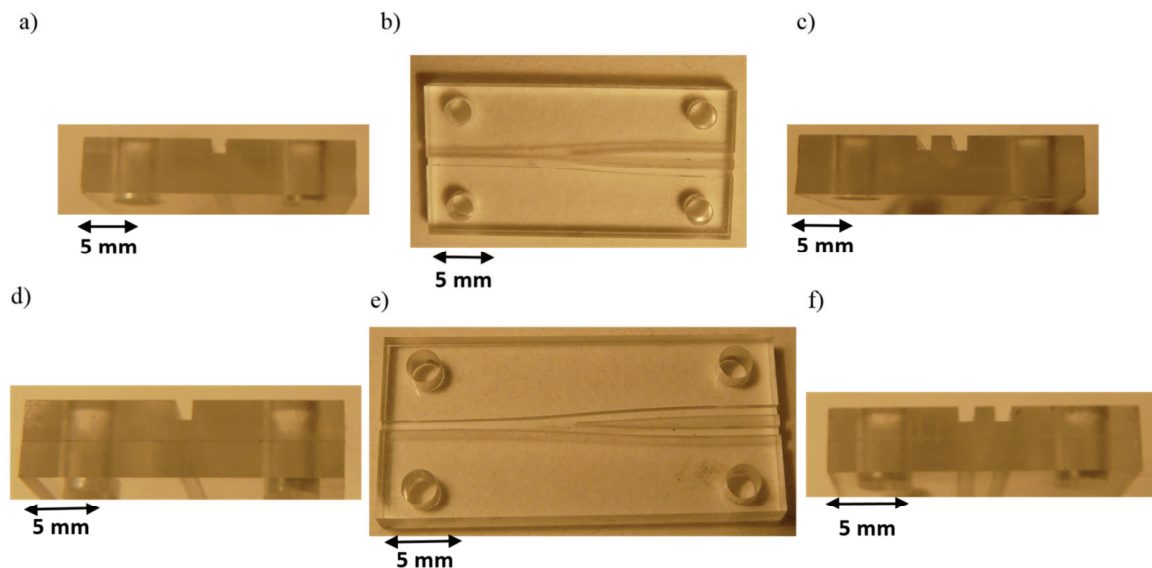


Obr. 8.2: Závislosť hodnoty indexu lomu vybraných polymérov na vlnovej dĺžke: a) substráty VEROCLEAR RGD810, PDMS a PMMA, b) vlnovodné materiály NOA.

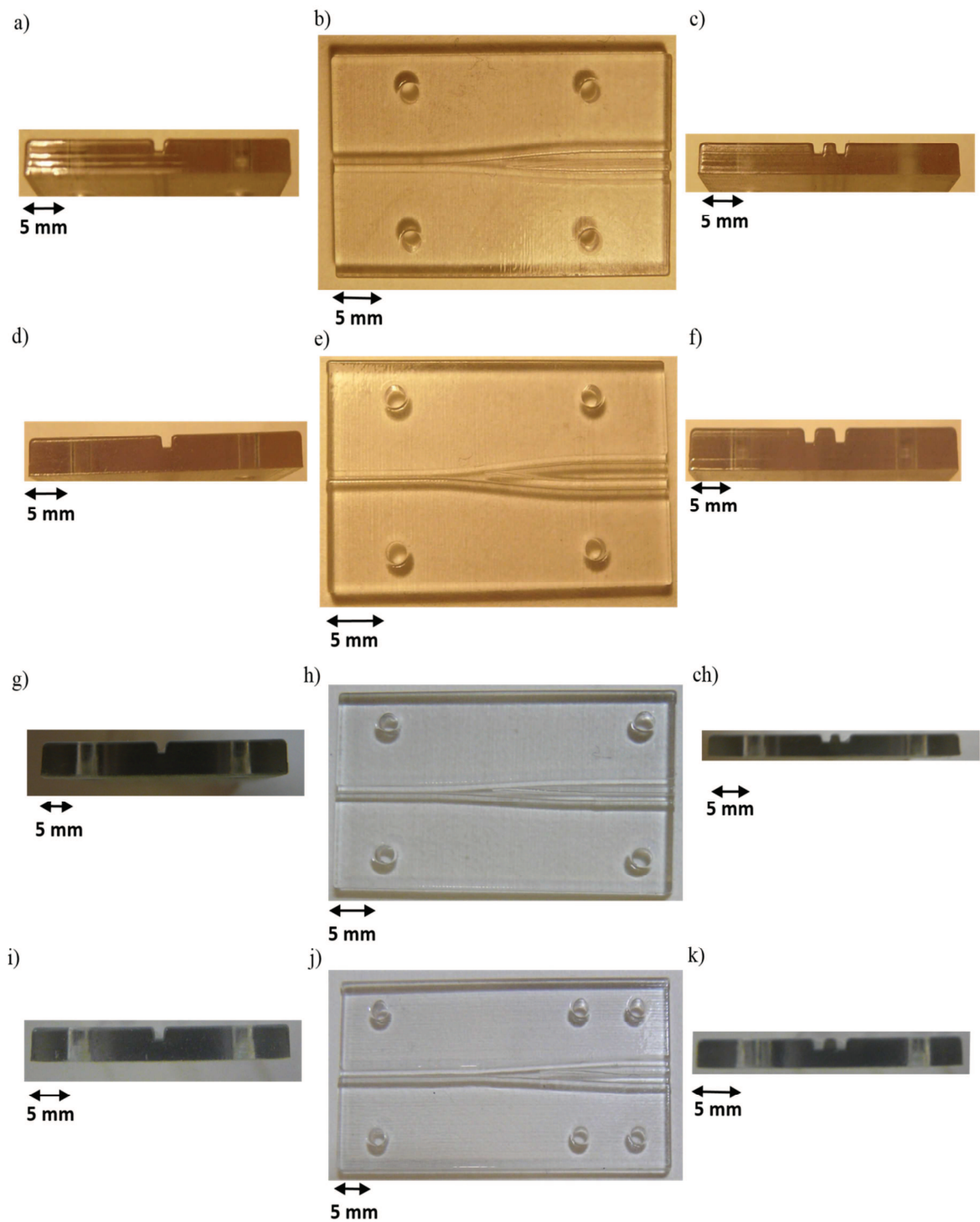
Z grafov je zrejmé, že index lomu materiálov pre substrát a vlnovodnú vrstvu s rastúcou vlnovou dĺžkou klesá.

8.2 Optická kontrola vyrobených štruktúr

Vyrobené substráty (z materiálov PMMA, resp. VEROCLEAR) boli pred pripevnením POF vlákien a zaliatím nafotené pri pohľade zo vstupnej strany, zhora a z výstupnej strany. Na obr. 8.3 až 8.7 sú uvedené fotografie substrátov vybraných motívov. Fotografie boli vyhotovené pomocou digitálneho fotoaparátu Panasonic DMC-FZ18.

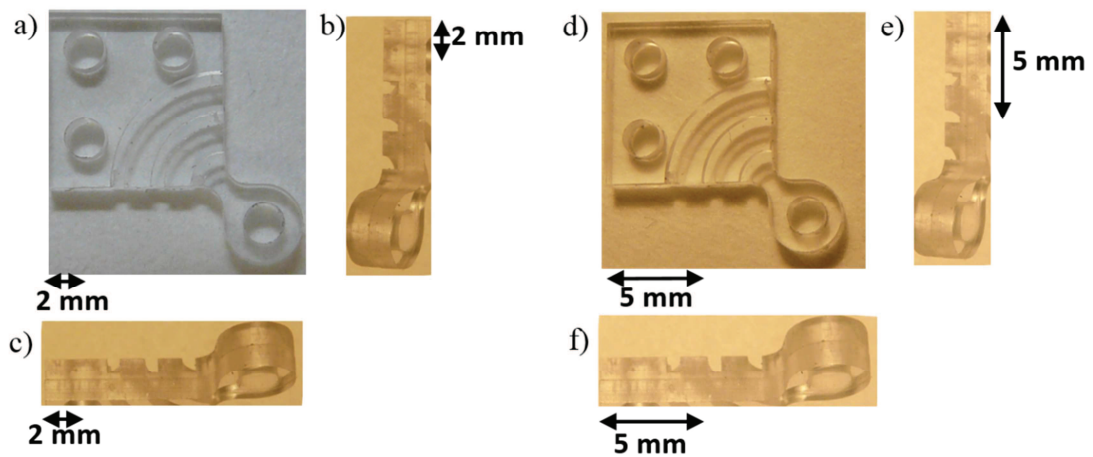


Obr. 8.3: Substráty s drážkami – 1x2Y rozbočnice: motív 1 (PMMA/NOA73): a) vstupný pohľad, b) pohľad zhora, c) výstupný pohľad; motív 4 (PMMA/NOA73): d) vstupný pohľad, e) pohľad zhora, f) výstupný pohľad.

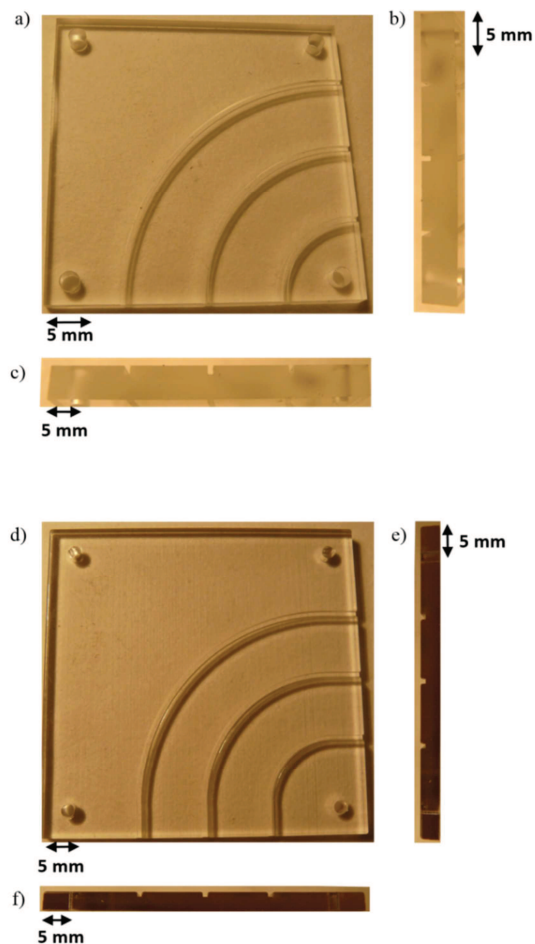


Obr. 8.4: Substráty s drážkami - 1x2Y rozbočnice:

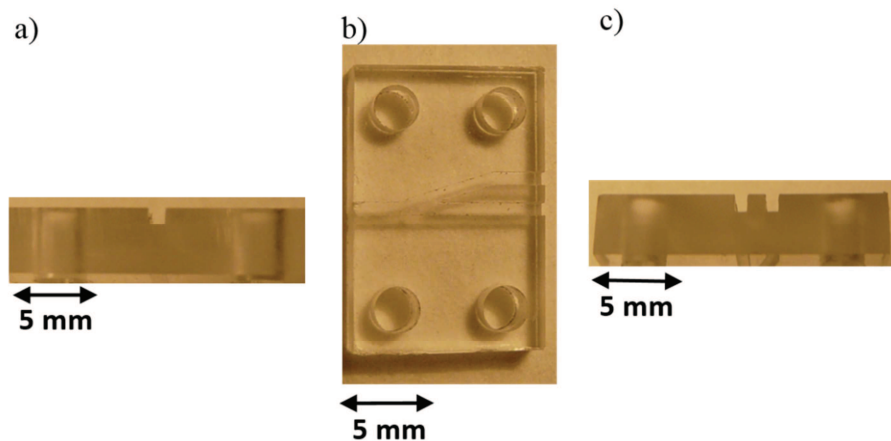
motív V1 (VEROCLEAR/NOA73): a) vstupný pohľad, b) pohľad zhora, c) výstupný pohľad;
 motív V2 (VEROCLEAR/NOA1625): d) vstupný pohľad, e) pohľad zhora, f) výstupný pohľad;
 motív VA (VEROCLEAR/NOA73): g) vstupný pohľad, h) pohľad zhora, ch) výstupný pohľad;
 motív VB (VEROCLEAR/NOA73): i) vstupný pohľad, j) pohľad zhora, k) výstupný pohľad.



Obr. 8.5: Substráty s drážkami zatočených vlnovodů:
 zatočený vlnovod s poloměry $R=1, 3, 5$ mm - motiv Z1 (PMMA/NOA73):
 a) pohľad zhora, b) vstupný pohľad, c) výstupný pohľad;
 zatočený vlnovod s poloměry $R=2, 4, 6$ mm - motiv Z2 (PMMA/NOA73):
 d) pohľad zhora, e) vstupný pohľad, f) výstupný pohľad.



Obr. 8.6: Substráty s drážkami zatočených vlnovodů:
 zatočený vlnovod s poloměry $R=10, 20, 30$ mm - motiv Z (PMMA/NOA73):
 a) pohľad zhora, b) vstupný pohľad, c) výstupný pohľad;
 zatočený vlnovod s poloměry $R=10, 20, 30$ mm - motiv ZV (VEROCLEAR/NOA73):
 d) pohľad zhora, e) vstupný pohľad, f) výstupný pohľad.



Obr. 8.7: Substrát s drážkami 1x2Y rozbočnice - motív 2 s deliacim pomerom výstupných výkonov 80:20 (PMMA/NOA73): a) vstupný pohľad, b) pohľad zhora, c) výstupný pohľad.

Všetky vzorky boli vyrobené bez viditeľných chýb, geometrické rozmery sa zhodovali s návrhmi. Šírka vlnovodov bola 750 μm a bolo do nich možné bezproblémovo vložiť konce optických vlákien.

Fotografie detailov špecifických častí vlnovodov motívov VA a VB (rôzna šírka vlnovodov v jednom prípade, resp. dvojitý módový skrambler v druhom) sú uvedené v Prílohe E.

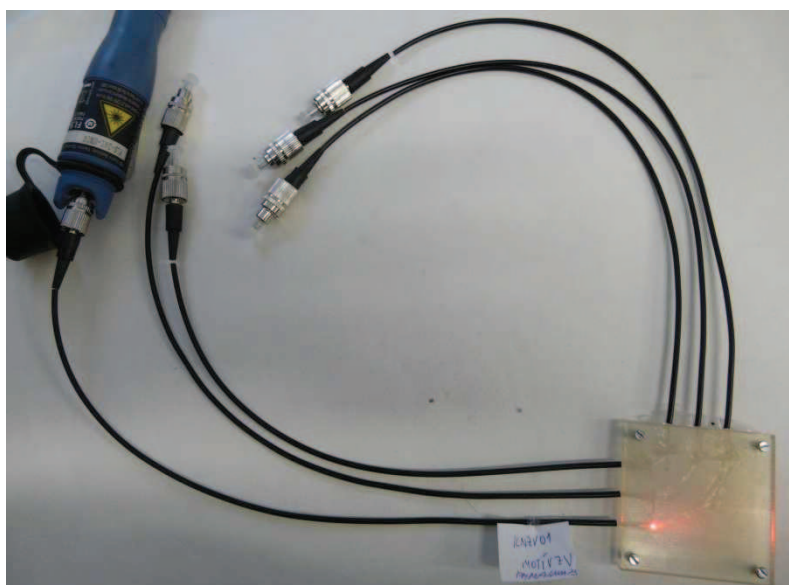
Na obr. 8.8 až 8.10 sú fotografie vybraných vyrobených vzoriek, ktorými prechádza signál s $\lambda=650\text{ nm}$.



Obr. 8.8: 1x2Y rozbočnica so substrátom PMMA a vlnovodnou vrstvou NOA72 – vzorka KN103.



Obr. 8.9: 1x2Y rozbočnica so substrátom VEROCLEAR a vlnovodnou vrstvou NOA72 – vzorka KNVB02.



Obr. 8.10: Zatočený vlnovod so substrátom VEROCLEAR a vlnovodnou vrstvou NOA73 – vzorka KNZV01.

8.3 Meranie vložného optického útlmu

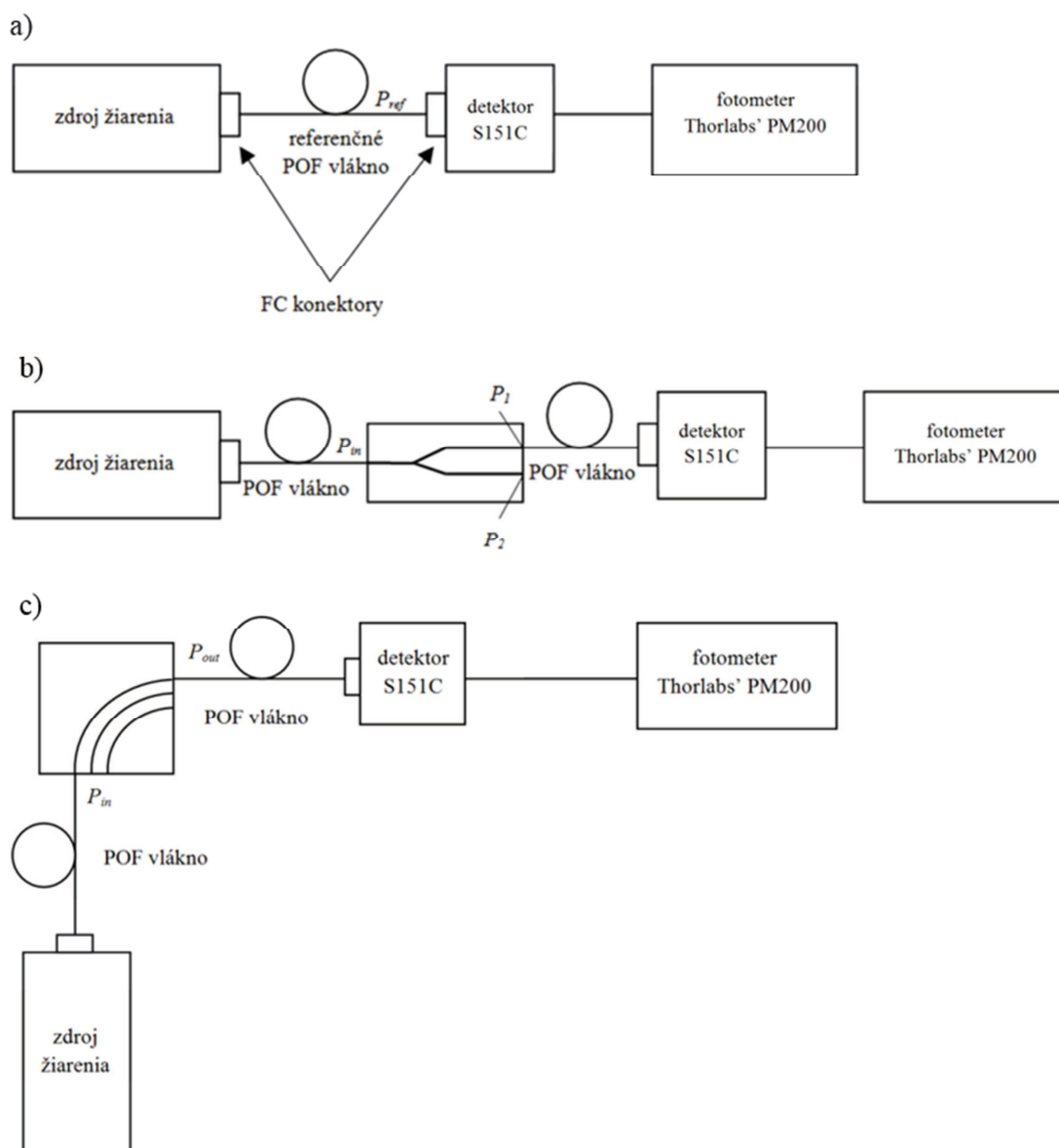
Na meranie optického výkonu som používal fotometer Thorlabs' PM200, na ktorom som volil vlnovú dĺžku detekovaného žiarenia. Zdrojmi žiarenia boli laserové zdroje pracujúce na vlnových dĺžkach 532 nm (zdroj DPGL-2100 Nd:YV04), 650 nm (zdroj Safibra OFLS-5FP-650) a 850 nm (Safibra OFLS-5 DFB-850). Pri používaní zdroja na $\lambda=532$ nm bol na napájacom zdroji nastavený výstupný prúd 0,5 A.

Pred meraním bolo zvolené vhodné referenčné vlákno rovnakej dĺžky, akú mala meraná rozbočnica spolu s POF vláknami a toto vlákno bolo pomocou FC konektorov alebo Bare Fiber Adapter konektorov prepojené so zdrojom žiarenia a kremíkovým detektorom S151C vhodným pre vlnové dĺžky od 400 nm do 1100 nm (obr. 8.11a)).

Po zmeraní výstupného výkonu referenčného vlákna pre požadované vlnové dĺžky som pomocou FC konektorov alebo pomocou Bare Fiber Adapter konektorov prepojil laserový zdroj s testovanou štruktúrou a s kremíkovým detektorom. Pomocou meracieho prístroja Thorlabs' PM200 som zmeral výstupné výkony jednotlivých ramien rozbočnice (obr. 8.11b)), resp. jedného zo zatočených vlnovodov (obr. 8.11c)).

V prípade vlákien s pripevnenými FC konektormi bolo meranie jednoduchšie, pretože ich bolo možné priamo prepojiť so zdrojom a detektorom, u vlákien bez konektorov bolo nutné vždy pred meraním nasunúť na ich konce rozoberateľné konektory (Bare Fiber Adapter).

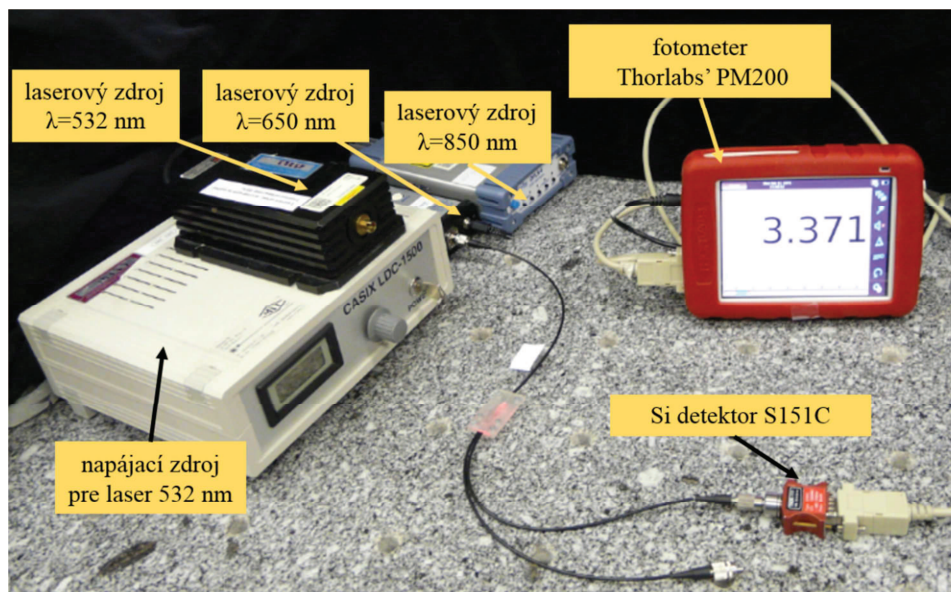
Zatočené vlnovody s malými polomerami ($R=1$ mm, 3 mm, 5 mm a $R=2$ mm, 4 mm, 6 mm), ktoré nemali optické vlákna, boli pri meraní upevnené na podložku a k jednotlivým vstupom a výstupom boli nasmerované samostatné POF vlákna, jedno pripojené k zdroju a druhé k detektoru.



Obr. 8.11: Schéma zapojenia meracieho pracoviska:

- a) meranie výstupného výkonu referenčného vlákna, b) meranie výstupných výkonov rozbočnice, c) meranie výstupných výkonov zatočeného vlnovodu.

Meracie pracovisko pre meranie výstupných optických výkonov, z ktorých bolo možné určiť vložný optický útlm planárnych štruktúr, tvorené tromi laserovými zdrojmi a fotometrom s kremíkovým detektorom je uvedené na obr. 8.12.



Obr. 8.12: Meracie pracovisko pre meranie výstupného optického výkonu.

Zo zmeraných výstupných výkonov je možné vypočítať vložný optický útlm. Pre 1x2Y rozbočnicu platí vzťah:

$$\alpha = -10 \log \frac{P_1 + P_2}{P_{ref}} \quad (8.2)$$

kde P_1 a P_2 sú namerané výstupné optické výkony vystupujúce z jednotlivých vlákien a P_{ref} je výstupný optický výkon referenčného vlákna.

V prípade zatočeného vlnovodu je vložný útlm vypočítaný podľa vzťahu:

$$\alpha_{1,2,3} = -10 \log \frac{P_{1,2,3}}{P_{ref}} \quad (8.3)$$

kde $P_{1,2,3}$ je zmeraný výstupný optický výkon vystupujúci z vlákna prislúchajúceho danému vlnovodu s určitým polomerom (jednému z troch vlnovodov na spoločnom substráte) a P_{ref} je výstupný výkon zmeraný na výstupe referenčného vlákna.

Pre vložný optický útlm prepočítaný na jednotku dĺžky (napr. 1 cm alebo 1 mm) platí vzťah:

$$A = \frac{\alpha}{l} \quad (8.4)$$







kde l je dĺžka vlnovodu vyjadrená v daných jednotkách (napr. v cm alebo v mm).

8.4 Výsledky merania vložného optického útlmu 1x2Y rozbočníc

V tab. 8.1 až 8.2 sú uvedené výsledky merania referenčného a výstupných optických výkonov, pomery výstupných výkonov a hodnoty vložného útlmu vypočítané podľa vzťahu 8.2 pre vybrané vzorky 1x2Y rozbočníc.

V tab. 8.1 sú uvedené výstupné výkony a hodnoty vložného optického útlmu pre 1x2Y rozbočnice so substrátom a krycou vrstvou z materiálu PMMA.

Tab. 8.1: Výsledky merania a vložný útlm rozbočníc 1x2Y so substrátom PMMA.

označenie	motív a tvar	materiály	λ (nm)	P_{ref} (μ W)	P_1 (μ W)	P_2 (μ W)	$P_1:P_2$ (%)	α (dB)
KN101		PMMA/NOA72	532	1022,2	164,4	98,6	62,5:37,5	5,90
			650	203,6	33,0	20,0	62,3:37,7	5,85
			850	424,8	105,0	46,0	66,3:33,7	4,67
KN102*		PMMA/NOA73	532	1259,5	295,0	265,0	52,7:47,3	3,52
			650	288,41	56,8	48,4	54,0:46,0	4,38
			850	683,7	132,4	117,0	53,1:46,9	4,38
KN 103*		PMMA/NOA72	532	1259,6	202,0	278,0	42,1:57,9	4,19
			650	288,9	45,6	64,0	41,6:58,4	4,21
			850	684,0	83,2	115,9	41,8:58,2	5,36
KN201*		PMMA/NOA72	532	1131,3	9,0	229,0	3,8:96,2	6,77
			650	280,5	1,9	54,8	3,4:96,5	6,94
			850	682,9	4,6	150,2	3,0:97,0	6,45
KN301		PMMA/NOA73	532	589,7	78,0	80,0	49,4:50,6	5,72
			650	211,0	24,0	25,0	49,0:51,0	6,34
			850	554,7	85,0	90,0	48,6:51,4	5,01
KN403*		PMMA/NOA1625	532	1498,3	368,0	195,1	65,4:34,6	4,25
			650	311,5	60,6	32,6	65,0:35,0	5,24
			850	587,6	111,9	61,1	64,7:35,3	5,31







kde λ je vlnová dĺžka použitého žiarenia, P_{ref} je referenčný výkon, P_1 a P_2 sú výstupné optické výkony a α je vložný útlm. Označenie * znamená, že v prípade danej vzorky boli použité optické vlákna s FC konektormi, u ostatných štruktúr boli použité vlákna bez konektorov.

Z hľadiska vložného optického útlmu rozbočníc so substrátom a krycou vrstvou z PMMA bola podľa tab. 8.1 najnižšia hodnota dosiahnutá v prípade vzorky KN102 s vláknami s FC konektormi (substrát z PMMA a vlnovodná vrstva NOA73). Na vlnovej dĺžke 532 nm dosahoval vložný útlm 3,52 dB, na $\lambda=650$ nm a $\lambda=850$ nm bol vložný útlm 4,38 dB. Najvyššiu mieru symetrie výstupných optických výkonov vykazovala vzorka KN301 (49,4%:50,6% na vlnovej dĺžke 532 nm).

Rozbočnice motívu 2 s deliacim pomerom vstupného optického výkonu 80:20 pri meraniach nevykazovali predpokladaný deliaci pomer, čo mohlo byť spôsobené použitím lomeného odbočovacieho ramena namiesto ramena tvaru S, prípadne vznikom porúch vo vlnovodnom materiáli v odbočovacom ramene.

V tab. 8.2 sú uvedené zmerané hodnoty výstupných výkonov a vypočítané hodnoty vložného útlmu pre vybrané 1x2Y rozbočnice so substrátom a krycou vrstvou z materiálu VEROCLEAR RGD810.

Tab. 8.2: Výsledky merania a vložný útlm rozbočnic 1x2Y so substrátom VEROCLEAR RGD810.

označenie	motív a tvar	materiály	λ (nm)	P_{ref} (μ W)	P_1 (μ W)	P_2 (μ W)	$P_1:P_2$ (%)	α (dB)
KNV01*	V1 	VEROCLEAR/ NOA72	532	1258,7	201,0	180,0	52,8:47,2	5,19
			650	289,2	37,0	34,0	52,1:47,9	6,10
			850	684,3	67,6	64,0	51,4:48,6	7,16
KNV02*	V1 	VEROCLEAR/ NOA73	532	1258,0	143,0	108,0	57,0:43,0	7,00
			650	288,9	34,6	26,6	56,5:43,5	6,74
			850	394,4	51,8	37,1	58,3:41,7	6,47
KNV03	V2 	VEROCLEAR/ NOA1625	532	849,7	28,5	24,5	53,8:46,2	12,05
			650	140,8	8,9	7,3	54,9:45,1	9,39
			850	391,3	23,3	19,7	54,2:45,8	9,59
KNVA01*	VA 	VEROCLEAR/NOA72	532	1160,0	24,4	38,8	38,6:61,4	12,64
			650	302,0	3,2	5,0	39,0:61,0	15,66
			850	595,0	5,9	8,4	41,3:58,7	16,19
KNVB01*	VB 	VEROCLEAR/NOA72	532	1160,0	108,8	106,3	50,6:49,4	7,32
			650	302,0	21,1	20,2	51,1:48,9	8,64
			850	595,0	43,5	42,8	50,4:49,6	8,39
KNVC01*	VC 	VEROCLEAR/NOA72	532	1595,0	183,5	202,0	47,6:52,4	6,17
			650	302,9	46,2	50,8	47,6:52,4	4,95
			850	595,0	101,3	108,0	48,4:51,6	4,54

kde λ je vlnová dĺžka použitého žiarenia, P_{ref} je referenčný výkon, P_1 a P_2 sú výstupné optické výkony a α je vložný útlm. Označenie * znamená, že v prípade danej vzorky boli použité optické vlákna s FC konektormi, u ostatných štruktúr boli použité vlákna bez konektorov.

Podľa tab. 8.2 bol najnižší vložný útlm spomedzi rozbočnic so substrátom VEROCLEAR RGD810 dosiahnutý v prípade vzorky KNVC01 základného typu s vláknami s FC konektormi a s vlnovodnou vrstvou NOA72, a to 4,54 dB na $\lambda=850$ nm. Na ďalších vlnových dĺžkach $\lambda=532$ nm a $\lambda=650$ nm bol vložný útlm 6,17 dB resp. 4,95 dB. O niečo vyšší vložný útlm dosahovala rozbočnica KNVB01 s módovým skramblerom a najvyšší útlm spomedzi motívov s rozdielnym tvarovým riešením vlnovodov VA, VB a VC mala vzorka KNVA01 s rozdielnymi šírkami vlnovodov (750 μ m na vstupe a výstupe, 650 μ m v strednej časti). Najvyššia miera symetrie výstupných výkonov bola v prípade rozbočnice KNVB01 s módovým skramblerom s FC konektormi, pomer výkonov bol 50,4:49,6.

8.5 Výsledky merania vložného optického útlmu zatočených vlnovodov

V tab. 8.3 až 8.6 sú uvedené výsledky merania referenčného a výstupných optických výkonov, hodnoty vložného útlmu vypočítané podľa vzťahu 8.3 a hodnoty vložného útlmu prepočítaného na 1 cm resp. 1 mm dĺžky vlnovodu podľa vzťahu 8.4 pre vybrané vzorky zatočených vlnovodov.

V tab. 8.3 sú uvedené zmerané výstupné optické výkony a vypočítané vložné útlmy pre vybrané vzorky zatočených vlnovodov so substrátmi PMMA a VEROCLEAR a s polormi vlnovodov 10 mm, 20 mm a 30 mm.

Tab. 8.3: Výsledky merania a vložný útlm vybraných zatočených vlnovodov s polormi 10, 20 a 30 mm.

KNZ01*	λ (nm)	$P_{ref}(\mu W)$	R	R	R	R	R	R
			30 mm	20 mm	10 mm	30 mm	20 mm	10 mm
PMMA/ NOA73			$P_1(\mu W)$	$P_2(\mu W)$	$P_3(\mu W)$	$\alpha_1(\text{dB})$	$\alpha_2(\text{dB})$	$\alpha_3(\text{dB})$
	532	1719,9	8,6	44,3	75,0	23,01	15,89	13,60
	650	254,7	3,5	13,3	15,5	18,62	12,82	12,16
	850	533,6	12,0	41,2	55,0	16,48	11,12	9,87
KNZ02			R	R	R	R	R	R
			30 mm	20 mm	10 mm	30 mm	20 mm	10 mm
	λ (nm)	$P_{ref}(\mu W)$	$P_1(\mu W)$	$P_2(\mu W)$	$P_3(\mu W)$	$\alpha_1(\text{dB})$	$\alpha_2(\text{dB})$	$\alpha_3(\text{dB})$
	532	649,9	5,7	17,0	26,5	20,57	15,82	13,90
KNZ04			R	R	R	R	R	R
			30 mm	20 mm	10 mm	30 mm	20 mm	10 mm
	λ (nm)	$P_{ref}(\mu W)$	$P_1(\mu W)$	$P_2(\mu W)$	$P_3(\mu W)$	$\alpha_1(\text{dB})$	$\alpha_2(\text{dB})$	$\alpha_3(\text{dB})$
	532	879,1	0,4	2,2	36,3	33,42	26,02	13,84
KNZV01*			R	R	R	R	R	R
			30 mm	20 mm	10 mm	30 mm	20 mm	10 mm
	λ (nm)	$P_{ref}(\mu W)$	$P_1(\mu W)$	$P_2(\mu W)$	$P_3(\mu W)$	$\alpha_1(\text{dB})$	$\alpha_2(\text{dB})$	$\alpha_3(\text{dB})$
	532	1217,2	0,15	0,22	2,50	39,09	37,43	26,87
VEROCLEAR/ NOA73	650	201,7	0,04	0,06	0,70	37,03	35,27	24,60
	850	470,3	0,06	0,08	1,60	38,94	37,69	24,68

kde λ je vlnová dĺžka použitého žiarenia, R je polomer vlnovodu, P_{ref} je výstupný výkon referenčného vlákna, P_1, P_2 a P_3 sú výstupné optické výkony a α_1, α_2 a α_3 sú vložné útlmy zodpovedajúce jednotlivým vlnovodom na spoločnom substráte. Označenie * znamená, že v prípade danej vzorky boli použité optické vlákna s optickými FC konektormi, u ostatných štruktúr boli použité vlákna bez konektorov.

Podľa výsledkov v tab. 8.3 bola najnižšia hodnota vložného optického útlmu zatočených vlnovodov dosiahnutá v prípade vzorky KNZ01 so substrátom PMMA a vlnovodnou vrstvou NOA73 a s vláknami s FC konektormi, jeho hodnota bola 9,87 dB na $\lambda=850$ nm pri polomere vlnovodu 10 mm.

Z tab. 8.3 tiež vyplýva, že vložný útlm zatočeného vlnovodu sa zvyšuje s rastúcim polomerom vlnovodu, čo je dané najmä absorpčnými stratami vo vlnovodnom materiáli.

Vložný útlm vzoriek uvedených v tab. 8.3 bol zároveň prepočítaný na 1 cm dĺžky každého vlnovodu. Výsledky pre vzorky z tab. 8.3 sú uvedené v tab. 8.4.

Tab. 8.4: Výsledky merania a vložný útlm prepočítaný na 1 cm pre vybrané zatočené vlnovody s polomeri 10, 20 a 30 mm.

		R=30 mm	R=20 mm	R=10 mm
KNZ01*		l_1	l_2	l_3
		47,12 mm	31,42 mm	15,71 mm
	λ (nm)	A_1 (dB/cm)	A_2 (dB/cm)	A_3 (dB/cm)
	532	4,88	5,06	8,66
	650	3,95	4,08	7,74
850	3,50	3,54	6,28	
		R=30 mm	R=20 mm	R=10 mm
KNZ02		l_1	l_2	l_3
		47,12 mm	31,42 mm	15,71 mm
	λ (nm)	A_1 (dB/cm)	A_2 (dB/cm)	A_3 (dB/cm)
	532	4,37	5,04	8,85
	650	3,70	4,68	8,06
850	3,22	4,00	6,97	
		R=30 mm	R=20 mm	R=10 mm
KNZ04		l_1	l_2	l_3
		47,12 mm	31,42 mm	15,71 mm
	λ (nm)	A_1 (dB/cm)	A_2 (dB/cm)	A_3 (dB/cm)
	532	7,09	8,28	8,81
	650	5,83	6,38	7,57
850	5,59	6,02	7,45	
		R=30 mm	R=20 mm	R=10 mm
KNZV01*		l_1	l_2	l_3
		47,12 mm	31,42 mm	15,71 mm
	λ (nm)	A_1 (dB/cm)	A_2 (dB/cm)	A_3 (dB/cm)
	532	8,30	11,91	17,11
	650	7,86	11,22	15,66
850	8,26	12,00	15,71	

kde l_1, l_2 a l_3 sú dĺžky vlnovodov a A_1, A_2, A_3 sú vložné útlmy prepočítané na 1 cm dĺžky vlnovodu zodpovedajúce jednotlivým zatočeným vlnovodom na spoločnom substráte.

Z tab. 8.4 je zrejmé, že vložný útlm prepočítaný na 1 cm dĺžky vlnovodu s rastúcim polomerom klesá a najnižšie hodnoty dosahuje v prípade vzorky KNZ02, kde na $\lambda=850$ nm je útlm 3,22 dB/cm pri polomere vlnovodu 30 mm.

V tab. 8.5 sú uvedené namerané výstupné optické výkony a vypočítané hodnoty vložného útlmu vybraných vzoriek menších zatočených vlnovodov s polomeri 1,3,5 mm (KNZ102) a 2,4,6 mm (KNZ204).

Tab. 8.5: Výsledky merania a vložný útlm vybraných zatočených vlnovodov s polomeri 1 až 6 mm.

		R=5 mm	R=3 mm	R=1 mm	R=5 mm	R=3 mm	R=1 mm	
KNZ102	λ (nm)	P_{ref} (μ W)	P_1 (μ W)	P_2 (μ W)	P_3 (μ W)	α_1 (dB)	α_2 (dB)	α_3 (dB)
	532	1006,5	8,1	7,3	10,3	20,94	21,39	19,90
	650	200,6	2,2	1,9	2,4	19,60	20,24	19,22
	850	289,3	2,7	2,9	5,1	20,30	19,99	17,54
		R=6 mm	R=4 mm	R=2 mm	R=6 mm	R=4 mm	R=2 mm	
KNZ204	λ (nm)	P_1 (μ W)	P_2 (μ W)	P_3 (μ W)	α_1 (dB)	α_2 (dB)	α_3 (dB)	
	532	1003,2	13,3	8,5	11,0	18,78	20,72	19,60
	650	198,2	4,6	2,8	2,8	16,34	18,50	18,50
	850	289,8	4,0	2,7	2,7	18,60	20,31	20,31

kde P_1, P_2 a P_3 sú výstupné optické výkony a α_1, α_2 a α_3 sú vložné útlmy zodpovedajúce jednotlivým vlnovodom s daným polomerom na spoločnom substráte.

V tab. 8.6 sú vložné útlmy vzoriek KNZ102 a KNZ204 prepočítané na 1 mm dĺžky vlnovodu.

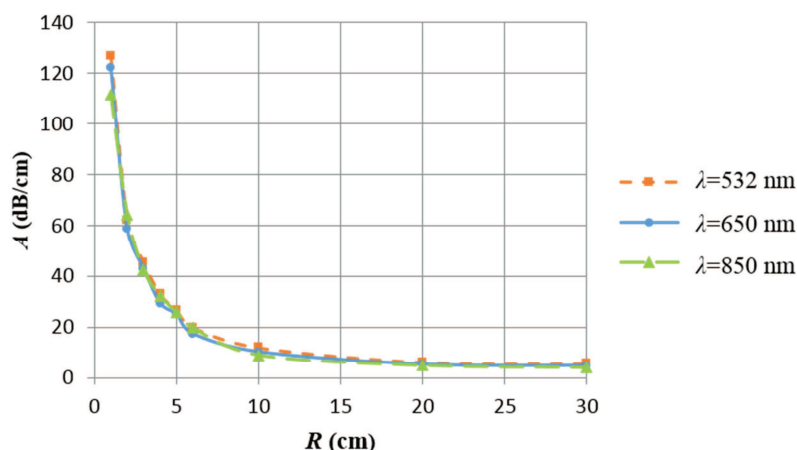
Tab. 8.6: Výsledky merania a vložný útlm prepočítaný na 1 mm pre vybrané zatočené vlnovody s polomeri 1 až 6 mm.

KNZ102 PMMA/NOA72		R=5 mm	R=3 mm	R=1 mm
		$l_1=7,85$ mm	$l_2=4,71$ mm	$l_3=1,57$ mm
	λ (nm)	A_1 (dB/mm)	A_2 (dB/mm)	A_3 (dB/mm)
	532	2,67	4,54	12,68
	650	2,50	4,30	12,24
KNZ204 PMMA/NOA72		R=6 mm	R=4 mm	R=2 mm
		$l_1=9,42$ mm	$l_2=6,28$ mm	$l_3=3,14$ mm
	λ (nm)	A_1 (dB/mm)	A_2 (dB/mm)	A_3 (dB/mm)
	532	1,99	3,30	6,24
	650	1,73	2,95	5,89
	850	1,97	3,23	6,47

kde l_1 , l_2 a l_3 sú dĺžky vlnovodov a A_1 , A_2 a A_3 sú vložné útlmy prepočítané na 1 mm dĺžky vlnovodu zodpovedajúce jednotlivým zatočeným vlnovodom na spoločnom substráte.

Z tab. 8.5 a 8.6 vyplýva, že najnižšia hodnota vložného útlmu bola dosiahnutá u vzorky KNZ204, kde vložný útlm dosahoval na $\lambda=650$ nm v prípade vlnovodu s polomerom 6 mm hodnotu 16,34 dB a vložný útlm prepočítaný na 1 mm dĺžky vlnovodu bol 1,73 dB/mm. Vložný útlm, na rozdiel od zatočených vlnovodov s väčšími polomeri (10 mm, 20 mm, 30 mm), nemá už jednoznačnú závislosť vložného útlmu štruktúry na polomere vlnovodu, ale vložný útlm prepočítaný na 1 mm (resp. na 1 cm) dĺžky vlnovodu s rastúcim polomerom klesá, rovnako ako u zatočených vlnovodov s väčšími polomeri.

Na obr. 8.13 je súhrnný graf závislosti vložného útlmu prepočítaného na 1 cm dĺžky vlnovodu pre vybrané polomery vlnovodu a pre vlnovú dĺžku 650 nm. V tomto grafe sú zhrnuté vypočítané hodnoty útlmu pre tri vzorky z materiálov PMMA/NOA72 (substrát/vlnovodná vrstva), konkrétne KNZ102 (s polomeri vlnovodov $R=1,3,5$ mm), KNZ204 (s polomeri vlnovodov $R=2,4,6$ mm) a KNZ03 (s polomeri v $R=10,20,30$ mm).



Obr. 8.13: Závislosť vložného útlmu prepočítaného na 1 cm dĺžky vlnovodu na polomere vlnovodu pre $\lambda=532$ nm, 650 nm, 850 nm, použité hodnoty útlmu zmerané pre vzorky KNZ102, KNZ204 a KNZ03.

Z grafu vyplýva, že hodnota prepočítaného vložného útlmu na 1 cm klesá s rastúcim polomerom vlnovodu, pričom to platí pre vzorky zatočených vlnovodov s menšími (1, 2, 3, 4, 5 a 6 mm) aj väčšími polomeri (10, 20 a 30 mm) a pre všetky tri vlnové dĺžky.

Zložky niektorých optických strát vznikajúcich v zatočenom vlnovode – v dôsledku Fresnelových odrazov, nesúlady prierezu jadra planárneho vlnovodu a vlákna a rozdielu numerických apertúr vlnovodu a vlákna, vypočítané podľa vzťahov 3.1 až 3.3 na str. 18 a 3.5 na str. 19 (kde za celkový útlm T_L bol dosadený vložný optický útlm vlnovodov α), sú uvedené v tab. 8.7. Zložky, ktoré nebolo možné samostatne určiť sú uvedené v stĺpci označenom ako ostatné zložky a boli vypočítané odčítaním súčtu ostatných zložiek od celkového vložného optického útlmu štruktúry.

Tab. 8.7: Vybrané zložky optických strát zatočených vlnovodov pre $R = 10$ mm.

označenie	motív	materiály	λ (nm)	α (dB)	R_L (dB)	A_L (dB)	NA_L (dB)	ostatné zložky $L_{sc} + PR_L + TR_L + RD_L$ (dB)
KNZ01	Z	PMMA/ NOA73	532	13,60	0,005	1,189	0,743	11,66
			650	12,16	0,004	1,189	0,954	10,01
			850	9,87	0,003	1,189	1,091	7,59
KNZ03	Z	PMMA/ NOA72	532	18,93	0,005	1,189	0,743	16,99
			650	16,14	0,004	1,189	0,954	13,99
			850	14,14	0,003	1,189	1,091	11,86
KNZ04	Z	PMMA/ NOA1625	532	13,84	0,019	1,189	2,490	10,14
			650	11,90	0,016	1,189	2,319	8,38
			850	11,70	0,015	1,189	2,158	8,34

kde α je vložný útlm, R_L sú straty spôsobené Fresnelovými odrazmi, A_L straty z dôvodu nesúlady prierezu jadra optického vlákna a planárneho vlnovodu, NA_L straty spôsobené rozdielnou numerickou apertúrou vlákna a vlnovodu, L_{sc} sú straty rozptylom, PR_L sú prenosové straty, TR_L straty spôsobené prechodom medzi rovným a zatočeným vlnovodom a RD_L sú straty vyžarovaním.

Zložky strát pre ďalšie dva polomery $R=20$ mm a $R=30$ mm sú uvedené v Prílohe B.

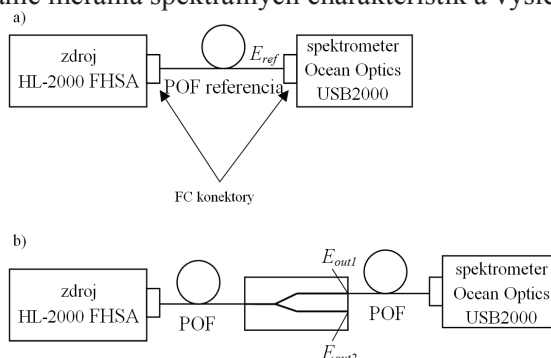
8.6 Meranie spektrálnych charakteristík

Vybrané vzorky s vlnovodnou vrstvou (rozbočnice 1x2Y) boli podrobené spektrálnej analýze, pričom bola zmeraná intenzita na výstupe referenčného vlákna a na výstupe ľavého a pravého výstupného vlákna rozbočnice. Veličina E_{norm} zodpovedá normovanej intenzite optického signálu, vzťahujúcej sa na namerané hodnoty referenčného vlákna a bola vypočítaná podľa vzťahu:

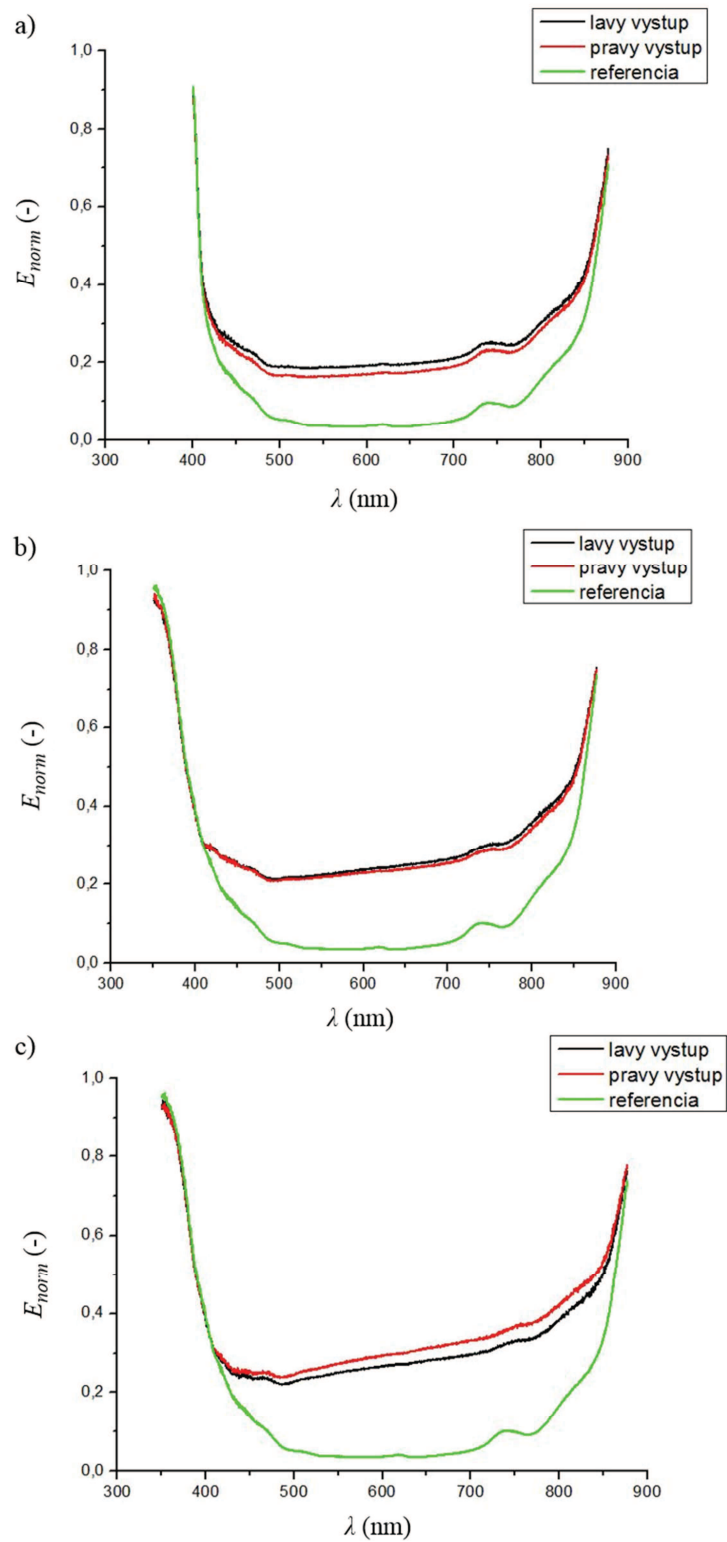
$$E_{norm1,2} = \frac{E_{out1,2}}{E_{ref}} \quad (8.5)$$

kde $E_{out1,2}$ je intenzita signálu zmeraná na výstupe ľavého alebo pravého výstupného vlnovodu a E_{ref} je intenzita signálu na výstupe referenčného vlákna.

Na obr. 8.14 je usporiadanie merania spektrálnych charakteristík a výsledky sú na obr. 8.15.



Obr. 8.14: Schéma zapojenia meracieho pracoviska pre meranie spektrálnych charakteristík.



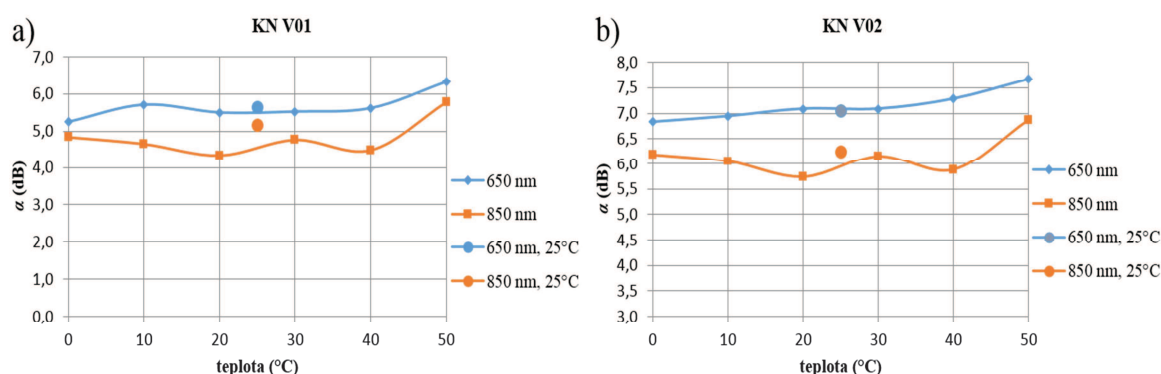
Obr. 8.15: Závislosť normovanej intenzity na vlnovej dĺžke: a) vzorka KN101 (PMMA/NOA72), b) vzorka KN103 (PMMA/NOA72), c) vzorka KNV01 (VEROCLEAR/NOA72).

Z hľadiska symetrie normovanej intenzity na výstupoch bola približne symetrická naprieč celým spektrom vzorka KN103 (substrát PMMA, vlnovodná vrstva NOA72).

Podľa uvedených grafov sú vzorky použiteľné v pásme vlnových dĺžok asi 400 nm až 850 nm, tento rozsah je daný použitými POF vláknami.

8.7 Meranie v teplotnej komore

Pre zistenie teplotnej odolnosti boli vybrané vzorky podrobené meraniu v teplotnej komore na Katedre elektrotechnológie FEL ČVUT. Jednalo sa o vzorky KNV01, KNV02 a KNZ01. Vzorky boli položené na rošt v strednej časti komory TSS 70/66 s objemom 66 litrov a s teplotným rozsahom -80 až 220 °C [37]. Pomocou POF vlákien s dĺžkou 5 m, ktoré boli zavedené do komory cez priechodky, boli merané vzorky prepojené s laserovými zdrojmi a s fotometrom Thorlabs PM200 s kremíkovým detektorom. Meranie prebiehalo na vlnových dĺžkach 650 nm a 850 nm. Pomocou fotometra boli následne zmerané výstupné optické výkony pri rôznej teplote v teplotnej komore. Vzorky 1x2Y rozbočnic KNV01 a KNV02 boli testované v rozmedzí 0°C až 50°C s krokom 10°C, vzorka zatočeného vlnovod KNZ01 bola testovaná v rozsahu teplôt 0 až 80 °C s krokom 20°C. Zmerané výstupné výkony a vypočítaný vložný útlm testovaných vzoriek sú uvedené v grafoch na obr. 8.16 a 8.17.



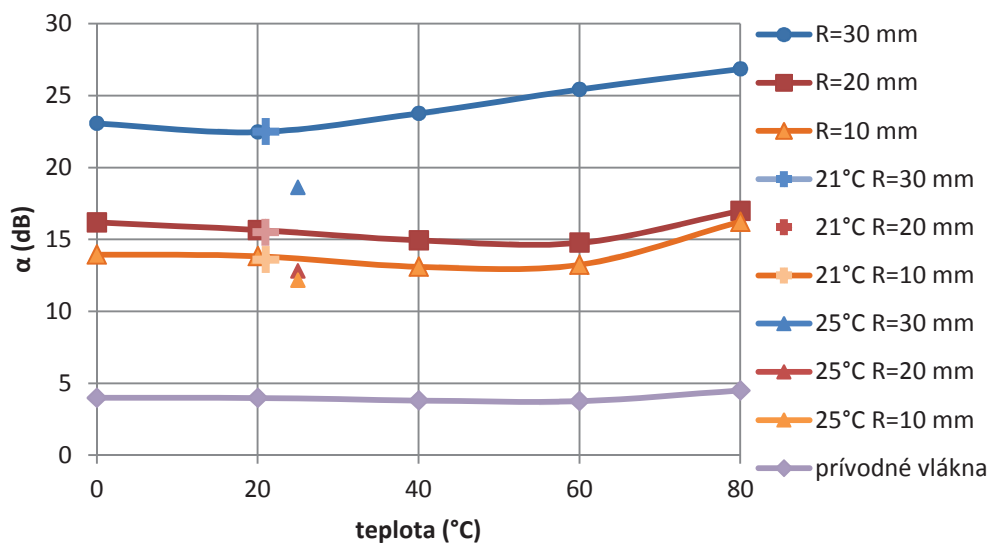
Obr. 8.16: Závislosť vložného útlmu vzoriek na teplote:

- vzorka KNV01 so substrátom VEROCLEAR a vlnovodnou vrstvou NOA72,
- vzorka KNV02 so substrátom VEROCLEAR a vlnovodnou vrstvou NOA73.

Z hodnôt vložného útlmu uvedených na obr. 8.16 vyplýva, že vzorky 1x2Y rozbočnic sú z hľadiska vložného útlmu pomerne teplotne stabilné až do teploty 40°C vrátane. Pri porovnaní týchto hodnôt s hodnotami nameranými v laboratóriu pri teplote asi 25°C (označené v grafoch bodmi) boli hodnoty zmerané v teplotnej komore v prípade vzorky KNV01 nižšie a v prípade KNV02 dosahovali porovnateľné hodnoty. Odlišnosti v prípade vzorky KNV01 mohli byť spôsobené vplyvom chyby detektora, ktorá dosahuje 4%.

V teplotnej komore boli testované aj vlastnosti jednej vzorky zatočeného vlnovodu s označením KNZ01. Výsledky pre vlnovú dĺžku 650 nm sú v grafe na obr. 8.17, kde body označené krížikmi sú hodnoty vložného útlmu zmerané v teplotnej komore pri teplote 21°C (pred začiatkom testovania) a body označené trojuholníkmi prislúchajú vložnému útlmu zmeranému v laboratóriu za bežných podmienok pri teplote 25°C. Zmerané boli aj výstupné výkony dvoch referenčných POF vlákien s dĺžkami 50 cm a 58,5 cm a metódou dvoch dĺžok bol určený merný útlm vlákna, z ktorého boli určené vložné útlmy samotných prívodných vlákien zatočeného vlnovodu.

KNZ01, 650 nm



Obr. 8.17: Závislosť vložného útlmu vzorky KNZ01 so susbtrátom PMMA a vlnovodnou vrstvou NOA73 na teplote, $\lambda=650$ nm.

Z grafu na obr. 8.17 vyplýva, že sa vložný útlm vzorky v prípade polomerov 10 a 20 mm výrazne nemenil do 60°C, ale pri teplote 80°C mierne vzrástol. Vlnovod s polomerom 30 mm vykazoval zvyšovanie vložného útlmu už od teploty 40 °C a pri 80°C bol vyšší o viac ako 4 dB v porovnaní s útlmom dosiahnutom pri 20 °C. Hodnoty vložného útlmu zmerané v laboratóriu za bežných podmienok pri teplote 25°C (označené v grafe bodmi) boli v tomto prípade o niečo nižšie ako hodnoty zmerané pri testovaní v teplotnej komore. Vložný útlm samotných prívodných POF vlákien štruktúry dosahoval okolo 4 dB až 5 dB.

9. Záver

V rámci diplomovej práce som sa zaoberal návrhom planárnych optických rozbočníc 1x2Y a zatočených vlnovodov, ktoré boli prispôbené na vloženie POF vlákien s priemerom jadra 738 μm a s priemerom plášťa 750 μm . Návrhu 1x2Y rozbočníc predchádzali teoretické výpočty hlavných parametrov rozbočníc podľa analýzy p. D. Beltramiho [25] – uhla zvieraného výstupnými ramenami, numerickej apertúry, relatívneho kontrastu indexu lomu a dĺžky spoločného (taperovaného) vlnovodu. Upravený návrh bol urobený pomocou špecializovaného softwaru BeamPROP od firmy RSoft.

V prípade zatočených vlnovodov boli spočítané optické útlmy zodpovedajúce rôznym polomerom vlnovodu podľa vzťahov publikovaných p. D. Israelom [29] a p. S. Musom [28]. Simulácie zatočených vlnovodov prebiehali, rovnako ako v predchádzajúcom prípade, v programe BeamPROP a navyše bola použitá aj simulácia v programe OptiCAD.

Po návrhu nasledovala výroba vybraných štruktúr. Pri výrobe navrhnutých 1x2Y rozbočníc a zatočených vlnovodov boli použité substráty PMMA a VEROCLEAR RGD810 a ako vlnovodné vrstvy boli použité materiály NOA72, NOA73, NOA88 a NOA1625.

V prípade substrátov z materiálu PMMA boli drážky jednotlivých motívov vytvorené pomocou CNC gravírovania, substráty z materiálu VEROCLEAR RGD810 vrátane drážok pre vlnovodnú vrstvu boli vyrobené pomocou 3D tlače, pričom bola použitá tlačiareň Objet 30Pro od firmy Stratasys.

Vyrobených bolo 14 motívov, z toho 10 motívov prislúchalo rozbočniciam 1x2Y (motívy 1 – 4 so substrátom a krycou vrstvou z materiálu PMMA a vlnovodnou vrstvou z materiálov NOA a motívy V1, V2, VA až VD so substrátom/krycou vrstvou z materiálu VEROCLEAR RGD810 a s vlnovodnou vrstvou z materiálov NOA). V prípade motívov 1 až 4, V1, V2, VC a VD sa jednalo o návrh konvenčnej rozbočnice 1x2Y, ktorá sa skladala z jedného vstupného vlnovodu, taperovanej časti vlnovodov a výstupných vlnovodov. Motív VA bol navrhnutý podľa rozbočnice prezentovanej p. T. Klotzbücherom [16], jednalo sa o kompaktnú štruktúru, v prípade ktorej bol použitý zmenšený rozmer ramien vlnovodov v porovnaní s pripojenými POF vláknami. Motív VB obsahoval dvojité módové skrambler [17].

Zatočené vlnovody boli vyhotovené v 4 motívoch (motívy Z a ZV s polomerami vlnovodov $R=10\text{ mm}$, 20 mm , 30 mm , motív Z1 s polomerami $R=1\text{ mm}$, 3 mm , 5 mm a motív Z2 s polomerami $R=2\text{ mm}$, 4 mm , 6 mm), pričom substrát a krycia vrstva motívov Z, Z1 a Z2 boli z materiálu PMMA a substrát a krycia vrstva motívu ZV boli z materiálu VEROCLEAR RGD810.

Spolu bolo vyrobených 53 planárnych optických štruktúr.

Po vyrobení vybraných motívov nasledovalo meranie výstupných výkonov a vyhodnotenie vložného optického útlmu planárnych štruktúr pri použití POF vlákien s priemerom plášťa jadra 750 μm bez konektorov a s FC konektormi.

Najnižšiu hodnotu vložného optického útlmu spomedzi rozbočníc 1x2Y so substrátom PMMA a zároveň v rámci všetkých vyrobených rozbočníc vykazovala rozbočnica s vlnovodnou vrstvou NOA73 s vláknami s FC konektormi (vzorka KN102), kde na vlnovej dĺžke 532 nm dosahoval vložný útlm hodnotu 3,52 dB na celú štruktúru. Pomer výstupných výkonov bol 52,7:47,3.

Na vlnovej dĺžke 650 nm, na ktorú sú používané POF vlákna primárne určené, vykazovala táto rozbočnica vložný útlm 4,38 dB.

Najnižšia hodnota útlmu u vzoriek so substrátom VEROCLEAR RGD810 bola zistená v prípade vzorky s vlnovodnou vrstvou NOA72 základného typu s vláknami s FC konektormi (vzorka

KNVC01) na vlnovej dĺžke 850 nm, vložný útlm dosahoval 4,54 dB a pomer výstupných výkonov bol 48,4:51,6. V prípade $\lambda=650$ nm bol vložný útlm 4,95 dB.

Pri porovnaní 3 rôznych typov rozbočníc so substrátom VEROCLEAR a s vlnovodnou vrstvou NOA72 z výsledkov meraní vyplýva, že najnižší útlm vykazovala rozbočnica základného typu (vzorka KNV01), o niečo vyšší útlm bol dosiahnutý v prípade rozbočnice s dvojitém módomým skramblerom (vzorka KNVB01) a výrazne vyšší vložný útlm nad 10 dB bol zistený v prípade rozbočnice s rôznou šírkou vlnovodov podľa návrhu T. Klotzbüchera (vzorka KNVA01).

V prípade zatočených vlnovodov vykazovali najnižší vložný útlm spomedzi vlnovodov s polomeri $R=10, 20, 30$ mm vzorky so substrátom PMMA a vlnovodnou vrstvou NOA73 (vzorka KNZ01 s vláknami s FC konektormi a vzorka KNZ02 s vláknami bez konektorov). Najmenší vložný útlm vykazovala vzorka KNZ01, kde bol vložný útlm 9,87 dB pri polomere $R=10$ mm na vlnovej dĺžke $\lambda=850$ nm. Na vlnovej dĺžke $\lambda=650$ nm mala táto vzorka vložný útlm pri polomere 10 mm 12,16 dB.

V prípade vyrobených vzoriek zatočených vlnovodov s polomeri $R=10, 20, 30$ mm rástol vložný útlm štruktúry so zväčšujúcim sa polomerom, čo bolo spôsobené absorpčnými stratami, ktoré boli na základe výsledkov meraní v rámci strát prejavujúcich sa vo vlnovode dominantné.

Najnižší útlm prepočítaný na 1 cm vlnovodu bol dosiahnutý u štruktúry so substrátom PMMA a vlnovodnou vrstvou NOA73 (vzorka KNZ02), jeho hodnota bola 3,22 dB/cm na $\lambda=850$ nm pri polomere 30 mm. V prípade $\lambda=650$ nm vykazovala vzorka pri uvedenom polomere útlm 3,70 dB/cm.

V prípade zatočených vlnovodov s menšími polomeri ($R=1, 2, 3, 4, 5, 6$ mm) bol najnižší vložný útlm dosiahnutý u vzorky so substrátom PMMA a vlnovodnou vrstvou NOA72 (vzorka KNZ204), útlm dosahoval 16,34 dB pri polomere 6 mm na vlnovej dĺžke $\lambda=650$ nm. Závislosť vložného útlmu na polomere vlnovodu v prípade menších polomerov však na rozdiel od vlnovodov s polomeri 10 mm, 20 mm a 30 mm nebola jednoznačná.

Najmenšia hodnota vložného útlmu prepočítaná na 1 mm dĺžky vlnovodu bola dosiahnutá tiež v prípade vzorky KNZ204 pri polomere 6 mm, táto hodnota bola 1,73 dB/mm na vlnovej dĺžke $\lambda=650$ nm.

V prípade všetkých zatočených vlnovodov, vrátane vlnovodov s malými polomeri, vložný útlm prepočítaný na 1 cm dĺžky vlnovodu klesal s rastúcim polomerom.

V rámci diagnostiky vyrobených štruktúr boli zmerané spektrálne charakteristiky troch vzoriek 1x2Y rozbočníc – dvoch vzoriek so substrátom PMMA a vlnovodnou vrstvou NOA72 (vzorky KN101, KN103) a jednej vzorky so substrátom VEROCLEAR a vlnovodnou vrstvou NOA72 (vzorka KNV01). Meranie ukázalo, že tieto vzorky sú použiteľné v rozsahu vlnových dĺžok 400 až 850 nm, čo je dané použitými POF vláknami. Najvyššiu mieru symetrie výstupnej normovanej intenzity optického signálu zmeranej na výstupe ľavého a pravého ramena vykazovala vzorka KN103 so substrátom PMMA a vlnovodnou vrstvou NOA72.

Vybrané optické štruktúry (dve rozbočnice 1x2Y so substrátom VEROCLEAR a vlnovodnou vrstvou NOA72 resp. NOA73 a zatočený vlnovod so substrátom PMMA a vlnovodnou vrstvou NOA73 s polomeri 10, 20 a 30 mm) boli podrobené meraniu v teplotnej komore. Meranie výstupných optických výkonov týchto planárnych štruktúr a následný výpočet hodnôt vložného útlmu ukázali, že v prípade rozbočníc 1x2Y sa do teploty asi 40°C neprejavil vplyv teploty na hodnotu vložného optického útlmu. Zatočený vlnovod vykazoval výraznejšie zvyšovanie útlmu s rastúcou teplotou pri najväčšom polomere (30 mm), vložný útlm vlnovodov s polomeri 10 a 20 mm sa s teplotou výraznejšie nemenil až do teploty okolo 60°C.

Z uvedených meraní vyplýva, že vybrané planárne štruktúry sú z hľadiska vložného útlmu teplotne stabilné až do teplôt okolo 40°C.

Meraním vlastností optických rozbočníc a zatočených vlnovodov bolo preukázané, že sú v súlade s urobenými návrhmi a počítačovými simuláciami v programe BeamPROP.

10. Použitá literatura

- [1] Specification sheet SH 3001, Polyethylene Jacketed Optical Fiber Cord, Mitsubishi Rayon, CO. LTD., ESKA Optical Fiber Division, pp. 2-3.
- [2] Maštera, R.: *Návrh optické mnohavidové výkonové rozbočnice 1x2 a 1x3 rozbočnice pro POF vlákna*, Praha: ČVUT 2013. Bakalářská práce, ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 148 s.
- [3] Novotný, K.: *Optická komunikační technika*, Praha: ČVUT 1998. Skriptum, ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 165 s.
- [4] Neruda, M.: *Optické planární vlnovody*, Praha: ČVUT 2016. Diplomová práce, ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 83 s.
- [5] Klapuch, J.: *Návrh nového polymerního optického vlnovodu*, Praha: ČVUT 2010. Bakalářská práce, ČVUT, Fakulta elektrotechnická.
- [6] Novotný, K., Škvor, Z., Mazánek, M., Pechač, P.: *Vlny a vedení*, Praha: ČVUT 1998, Skriptum, ČVUT, Fakulta elektrotechnická.
- [7] Schröfel, J., Novotný, K.: *Optické vlnovody*, Praha: SNTL/ALFA 1986, 232 s.
- [8] Ngoc Kien, Pham: *Návrh mnohavidové optické rozbočnice pomocí metody Ray Tracing*, Praha: ČVUT 2012. Diplomová práce, ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 83 s.
- [9] Dutton, H.: *Understanding Optical Communication*, IBM 1998, 638 p.
- [10] Tůma, H.: *Návrh 1x3 optické polymerní rozbočnice*. Praha: ČVUT 2011. Bakalářská práce, ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 76 s.
- [11] Nekvindová, P. a kol.: *Návody pro laboratoře oboru anorganická chemie*, Praha: VŠCHT. [online]. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/ach/pub/navlab-Planarni_opticke_vlnovody.pdf>.
- [12] Ziemann, O., Krauser, J., Zamzow, P., Daum, W.: *POF Handbook. Optical Short Range Transmission Systems*, Berlin: Springer 2008, pp. 46-59.
- [13] Takezawa, Y., Akasaka, S., Ohara, S., Ishibashi, T., Asano, H., Taketani, N.: *Low excess losses in a Y-branching plastic optical waveguide formed through injection molding*, Applied Optics, 1994, Vol. 33, No. 12, pp. 2307-2312.
- [14] Hamid, H., Fickenscher, T., Thiel, D.: *Experimental assessment of SU-8 optical waveguides buried in plastic substrate for optical interconnections*, Applied Optics, 2015, Vol. 54, No. 22, pp. 6623-6631.
- [15] Senior, J.: *Optical Fiber Communications: Principles and Practice*, 3rd edition, Prentice-Hall, 2008.
- [16] Klotzbücher, T., Braune, T., Dadic, D., Spzagala, M., Koch, A.: *Fabrication of optical 1x2 POF couplers using the Laser LIGA technique*, Proceedings of SPIE Vol. 4941, 2003, pp. 121-132.
- [17] Gao, Y., Gong, Z., Bai, R., Hao Y., Li, X., Jiang, X. Wang, M., Pan, J., Yang, J.: *Multimode-Waveguide-Based Optical Power Splitters in Glass*, Chinese Physics Letters 2008, Vol. 25, No. 8, pp. 2912-2914.
- [18] Waynant, M.N., Ediger, R.W.: *Electro-Optics Handbook (2nd Edition)*. McGraw-Hill, 2000.
- [19] <http://www.elflow.com/microfluidic-tutorials/microfluidic-reviews-and-tutorials/the-poly-di-methyl-siloxane-pdms-and-microfluidics/>
- [20] Norland Products, UV adhesives, Norland Optical Adhesive 73 [online],[cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <<https://www.norlandprod.com/adhesives/NOA%2073adhesives/NOA%2073.html>>.

- [21] Stratasy: Veroclear RGD810, bezpečnostní list [online]. [cit. 2017_02_27] Dostupný z: <http://global72.stratasy.com/~media/Main/Files/SDS/Transparent-Materials/SDS-06119-VeroClear-RGD810-CZ.ashx>
- [22] Knietael, M.: *Optické planární mnohavidové výkonové rozbočnice*, Praha: ČVUT 2015. Bakalářská práce, ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 72 s.
- [23] Eska fibre cable, [online]. cit[2017-05-10] Dostupné z: <http://i-fiberoptics.com/eska-fiber-cable.php>
- [24] PDMS Sylgard 184 [online] .[cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://www.elchemco.cz/zbozi/25/sylgard-182-a-184/>
- [25] Beltrami, D.: *Planar multimode waveguides and devices*, Optical and Quantum Electronics, Vol. 31, 1999, pp. 307 – 326.
- [26] Barkman, O.: *Návrh optických kanálkových difúzních rozbočnic na skleněných podložkách*. Praha: ČVUT 2011. Diplomová práce, ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 85 s.
- [27] RSoft design group, BeamPROP 8.1 User Guide, 2008.
- [28] S. Musa, A. Borreman, A. A. M. Kok, M. B. J. Diemeer, A. Driessen: *Experimental study of bent multimode optical waveguides*, AppliedOptics, 2004, Vol. 43, No. 30, pp. 5705-5707.
- [29] Israel, D., Baets, R., Shaw, N., Goodwin, M.: *Study of multimode polymeric waveguide bends for backplane optical interconnect*, Fourth Micro-optics Conference and Eleventh Topical Meeting on Gradient-Index Optical Systems, Tokyo, 1993, pp. 27-29.
- [30] OptiCAD software, [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.opticad.com/whatis.html>
- [31] Prajzler, V., Knietael, M., Maštera, R.: *Large core optical planar splitter for visible and infrared region*, Optical and Quantum Electronics, Vol. 48, No. 155, 2016.
- [32] Prajzler, V., Kulha, P., Knietael, M., Enser, H.: *Large core plastic planar optical splitter fabricated by 3D printing technology*, Optics Communications, Vol. 400, 2017.
- [33] Hypš, P.: *Flexibilní optické polymerní vlnovody pro přenos dat mezi elektrooptickými moduly*, Praha: ČVUT 2015. Diplomová práce, ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 88 s.
- [34] Metricon Corporation [online]. [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <http://www.metricon.com>
- [35] Prajzler, V., Nekvindová, P., Špírková, J., Novotný, M.: *The evaluation of the refractive indices of bulk and thick polydimethylsiloxane and polydimethyl-diphenylsiloxane elastomers by the prism coupling technique*, New York: Springer Science+Business Media, 2017.
- [36] Prajzler, V., Nekvindová, P., Hypš, P., Jeřábek, V.: *Properties of the Optical Planar Polymer Waveguides Deposited on Printed Circuit Boards*, Radioengineering, Vol. 24, No. 2, 2015, pp. 442–448.
- [37] Thermal Shock Test Chambers, Series TSS, TSS 70/66 [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <https://www.cts-umweltsimulation.de/en/products/shock-tss.html>

Príloha A

V nasledujúcich tabuľkách A.1 a A.2 sú uvedené všetky vyrobené planárne štruktúry.

Tab. A.1: Zoznam vyrobených vzoriek.

označenie	druh	konektor	vlnovod	motív	poznámka	výroba
KNZ01	bend A	FC	750 μ m	motív Z	R =10,20,30 mm, PMMA/NOA73	CNC
KNZ02	bend A	bez FC	750 μ m	motív Z	R =10,20,30 mm, PMMA/NOA73	CNC
KNZ03	bend A	bez FC	750 μ m	motív Z	R =10,20,30 mm, PMMA/NOA72	CNC
KNZ04	bend A	bez FC	750 μ m	motív Z	R =10,20,30 mm PMMA/NOA1625	CNC
KNZ05	bend A	bez FC	750 μ m	motív Z	R =10,20,30 mm PMMA/NOA72	CNC
KNZ06	bend A	bez FC	750 μ m	motív Z	R =10,20,30 mm PMMA/NOA72	CNC
KNZ07	bend A	bez FC	750 μ m	motív Z	R =10,20,30 mm PMMA/NOA72	CNC
KNZ08	bend A	bez FC	750 μ m	motív Z	R =10,20,30 mm PMMA/NOA72	CNC
KNZ09	bend A	bez FC	750 μ m	motív Z	R =10,20,30 mm PMMA/NOA72	CNC
KNZ10	bend A	bez FC	750 μ m	motív Z	R =10,20,30 mm PMMA/NOA72	CNC
KNZ101	bend B	-	750 μ m	motív Z1	R=1,3,5 mm PMMA/NOA72	CNC
KNZ102	bend B	-	750 μ m	motív Z1	R=1,3,5 mm PMMA/NOA72	CNC
KNZ103	bend B	-	750 μ m	motív Z1	R=1,3,5 mm PMMA/NOA72	CNC
KNZ104	bend B	-	750 μ m	motív Z1	R=1,3,5 mm PMMA/NOA72	CNC
KNZ105	bend B	-	750 μ m	motív Z1	R=1,3,5 mm PMMA/NOA72	CNC
KNZ201	bend C	-	750 μ m	motív Z2	R =2,4,6 mm PMMA/NOA72	CNC
KNZ202	bend C	-	750 μ m	motív Z2	R =2,4,6 mm PMMA/NOA72	CNC
KNZ203	bend C	-	750 μ m	motív Z2	R =2,4,6 mm PMMA/NOA72	CNC
KNZ204	bend C	-	750 μ m	motív Z2	R =2,4,6 mm PMMA/NOA72	CNC
KNZ205	bend C	-	750 μ m	motív Z2	R =2,4,6 mm PMMA/NOA72	CNC
KNZV01	bend D	FC	750 μ m	motív ZV	R =10,20,30 mm, VEROCLEAR/NOA73	3D tlač
KNZV02	bend D	zničený	750 μ m	motív ZV	R =10,20,30 mm VEROCLEAR/NOA73	3D tlač

Tab. A.2: Zoznam vyrobených vzoriek.

označenie	druh	konektor	vlnovodu	motív	poznámka	výroba
KN101	1x2Y	bez FC	750 μm	motív 1	PMMA/NOA72	CNC
KN102	1x2Y	FC	750 μm	motív 1	PMMA/NOA73	CNC
KN103	1x2Y	FC	750 μm	motív 1	PMMA/NOA72	CNC
KN104	1x2Y	bez FC	750 μm	motív 1	PMMA/NOA73	CNC
KN105	1x2Y	FC	750 μm	motív 1	PMMA/NOA73	CNC
KN201	1x2Y,80:20	FC	750 μm	motív 2	PMMA/NOA72	CNC
KN202	1x2Y,80:20	bez FC	750 μm	motív 2	PMMA/NOA73	CNC
KN203	1x2Y,80:20	FC	750 μm	motív 2	PMMA/NOA72	CNC
KN204	1x2Y,80:20	bez FC	750 μm	motív 2	PMMA/NOA72	CNC
KN301	1x2Y	bez FC	750 μm	motív 3	PMMA/NOA73	CNC
KN302	1x2Y	FC	750 μm	motív 3	PMMA/NOA72	CNC
KN401	1x2Y	bez FC	750 μm	motív 4	PMMA/NOA88	CNC
KN402	1x2Y	FC	750 μm	motív 4	PMMA/NOA72	CNC
KN403	1x2Y	FC	750 μm	motív 4	PMMA/NOA1625	CNC
KN404	1x2Y	bez FC	750 μm	motív 4	PMMA/NOA72	CNC
KNV01	1x2Y	FC	750 μm	motív V1	VEROCLEAR/ NOA72	3D tlač
KNV02	1x2Y	FC	750 μm	motív V1	VEROCLEAR/ NOA73	3D tlač
KNV03	1x2Y	bez FC	750 μm	motív V2	VEROCLEAR/ NOA1625	3D tlač
KNV04	1x2Y	bez FC	750 μm	motív V2	VEROCLEAR/ NOA72	3D tlač
KNVA01	1x2Y	FC	750 μm	motív VA	VEROCLEAR/ NOA72	3D tlač
KNVA02	1x2Y	FC	750 μm	motív VA	VEROCLEAR/ NOA72	3D tlač
KNVA03	1x2Y	bez FC	750 μm	motív VA	VEROCLEAR/ NOA72	3D tlač
KNVB01	1x2Y	FC	750 μm	motív VB	VEROCLEAR/ NOA72	3D tlač
KNVB02	1x2Y	FC	750 μm	motív VB	VEROCLEAR/ NOA72	3D tlač
KNVB03	1x2Y	bez FC	750 μm	motív VB	VEROCLEAR/ NOA72	3D tlač
KNVC01	1x2Y	FC	750 μm	motív VC	VEROCLEAR/ NOA72	3D tlač
KNVC02	1x2Y	FC	750 μm	motív VC	VEROCLEAR/ NOA72	3D tlač
KNVC03	1x2Y	bez FC	750 μm	motív VC	VEROCLEAR/ NOA72	3D tlač
KNVD01	1x2Y	FC	750 μm	motív VD	VEROCLEAR/ NOA72	3D tlač
KNVD02	1x2Y	bez FC	750 μm	motív VD	VEROCLEAR/ NOA72	3D tlač
KNVD03	1x2Y	FC	750 μm	motív VD	VEROCLEAR/ NOA72	3D tlač

kde bend A je zatočený vlnovod s polomerami $R = 10, 20, 30$ mm, bend B a bend C zatočený vlnovod s polomerami $R = 1, 3, 5$ mm, resp. $R = 2, 4, 6$ mm (všetky tri druhy so substrátom PMMA) a bend D je zatočený vlnovod s polomerami $R = 10, 20, 30$ mm a substrátom VEROCLEAR RGD810.

Príloha B

Zložky optických strát zatočeného vlnovodu pre polomery vlnovodu $R=20$ mm a $R=30$ mm

V tab. B.1 sú vyčíslené zložky strát zatočeného vlnovodu s polomerom 20 mm a v tab. B.2 zložky strát zatočeného vlnovodu s polomerom 30 mm, vypočítané podľa vzťahov 3.1 až 3.3 na str. 18 a 3.5 na str. 19.

Tab. B.1: Vybrané zložky optických strát zatočených vlnovodov s rôznymi vlnovodnými vrstvami pre $R = 20$ mm.

označenie	motív	materiály	λ (nm)	α (dB)	R_L (dB)	A_L (dB)	NA_L (dB)	ostatné zložky $L_{sc} + PR_L + TR_L + RD_L$ (dB)
KNZ01	Z	PMMA/ NOA73	532	15,89	0,005	1,189	0,743	13,95
			650	12,82	0,004	1,189	0,954	10,67
			850	11,12	0,003	1,189	1,091	8,84
KNZ03	Z	PMMA/ NOA72	532	19,57	0,005	1,189	0,743	17,63
			650	16,71	0,004	1,189	0,954	14,56
			850	15,41	0,003	1,189	1,091	13,13
KNZ04	Z	PMMA/ NOA1625	532	26,02	0,019	1,189	2,490	22,32
			650	20,06	0,016	1,189	2,319	16,54
			850	18,91	0,015	1,189	2,158	15,45

kde R_L sú straty spôsobené Fresnelovými odrazmi, A_L straty z dôvodu nesúladu prierečného prierezu jadra optického vlákna a planárneho vlnovodu, NA_L straty spôsobené rozdielnou numerickou apertúrou vlákna a vlnovodu, L_{sc} sú straty rozptylom, PR_L sú prenosové straty, TR_L straty spôsobené prechodom medzi rovným a zatočeným vlnovodom a RD_L sú straty vyžarovaním.

Tab. B.2: Vybrané zložky optických strát zatočených vlnovodov s rôznymi vlnovodnými vrstvami pre $R = 30$ mm.

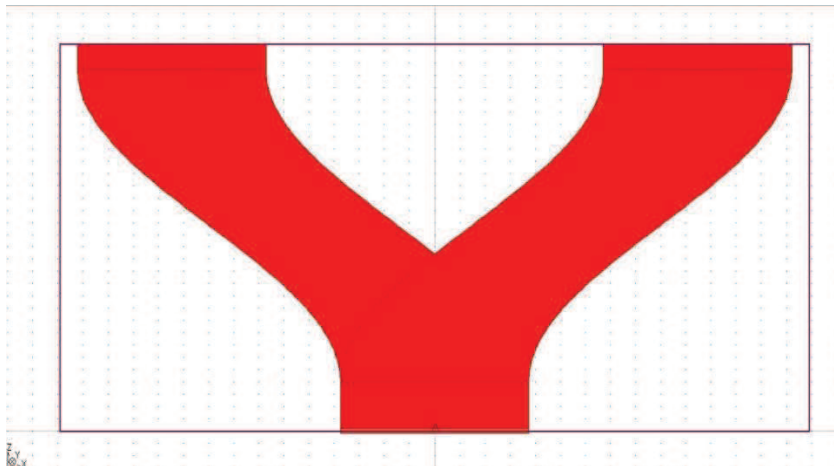
označenie	motív	materiály	λ (nm)	α (dB)	R_L (dB)	A_L (dB)	NA_L (dB)	ostatné zložky $L_{sc} + PR_L + TR_L + RD_L$ (dB)
KNZ01	Z	PMMA/ NOA73	532	23,01	0,005	1,189	0,743	21,07
			650	18,62	0,004	1,189	0,954	16,47
			850	16,48	0,003	1,189	1,091	14,20
KNZ03	Z	PMMA/ NOA72	532	26,54	0,005	1,189	0,743	24,60
			650	22,44	0,004	1,189	0,954	20,29
			850	19,32	0,003	1,189	1,091	17,04
KNZ04	Z	PMMA/ NOA1625	532	33,42	0,019	1,189	2,490	29,72
			650	27,46	0,016	1,189	2,319	23,94
			850	26,36	0,015	1,189	2,158	23,00

kde R_L sú straty spôsobené Fresnelovými odrazmi, A_L straty z dôvodu nesúladu prierečného prierezu jadra optického vlákna a planárneho vlnovodu, NA_L straty spôsobené rozdielnou numerickou apertúrou vlákna a vlnovodu, L_{sc} sú straty rozptylom, PR_L sú prenosové straty, TR_L straty spôsobené prechodom medzi rovným a zatočeným vlnovodom a RD_L sú straty vyžarovaním.

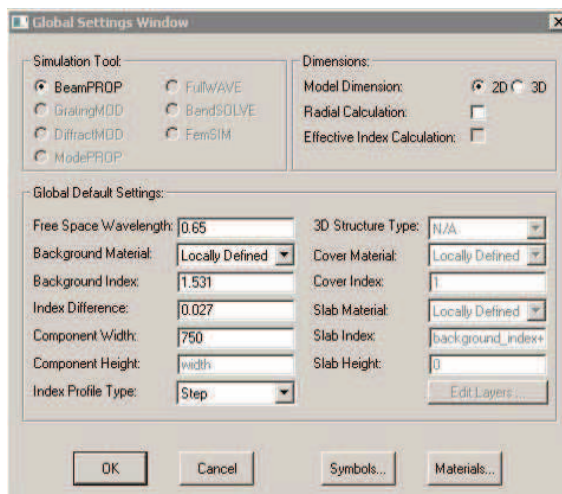
Príloha C

Nastavenia v simulačnom programe BeamPROP™

Nastavenie parametrov 1x2Y rozbočnice



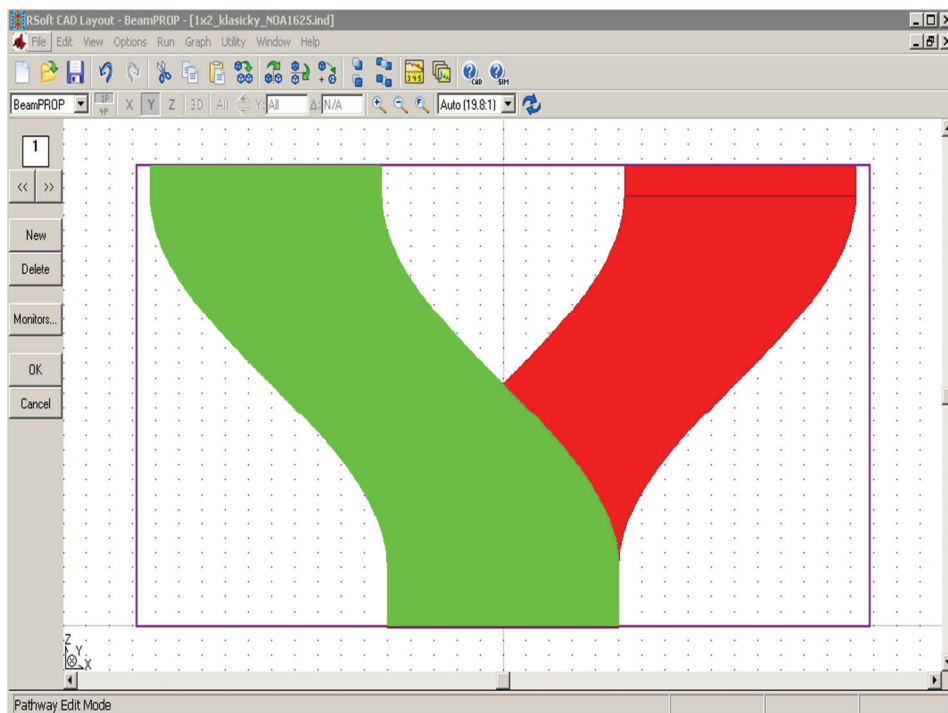
C.1: 2D rozbočnica 1x2Y základného typu.



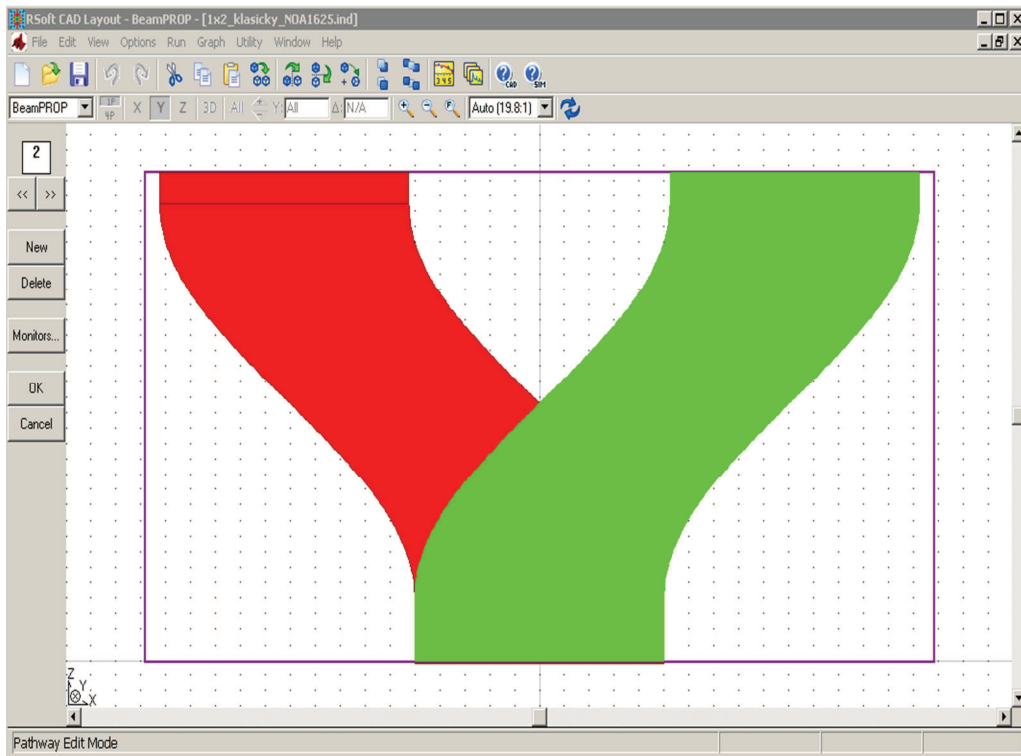
C.2: Globálne nastavenie pre 1x2Y rozbočnicu VEROCLEAR/NOA73 základného typu – definícia vlnovej dĺžky, indexov lomu substrátu a vlnovodnej vrstvy, priečných rozmerov vlnovodu.



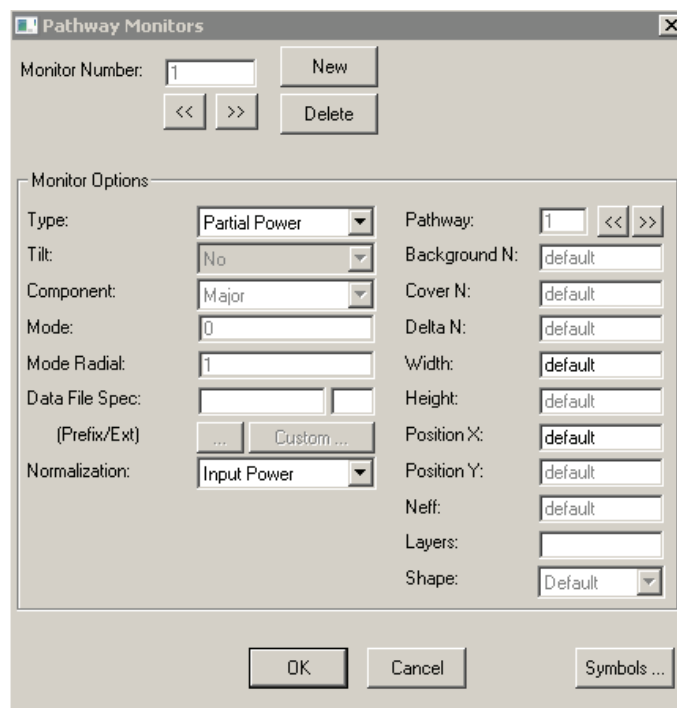
C.3: Nastavenie zdroja žiarenia.



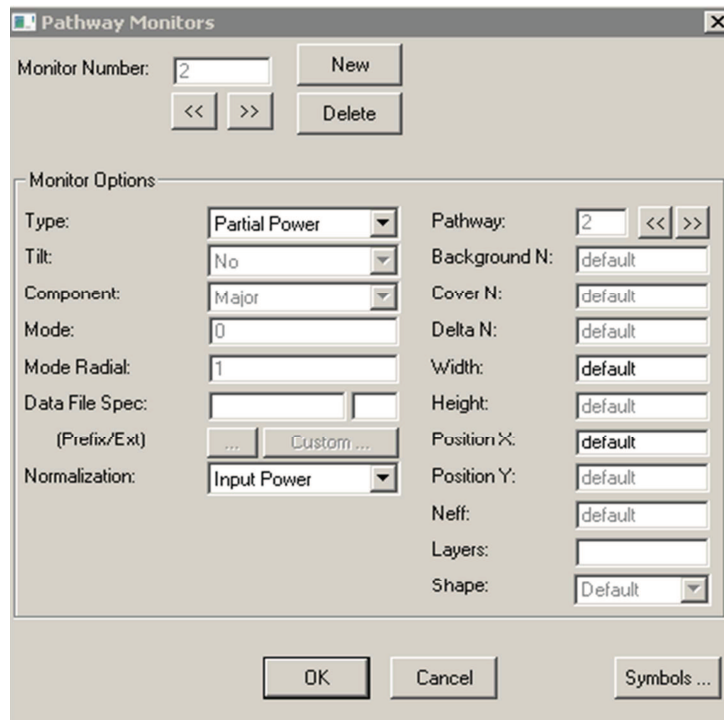
C.4: Nastavenie ľavej vetvy, rozbočnica základného typu.



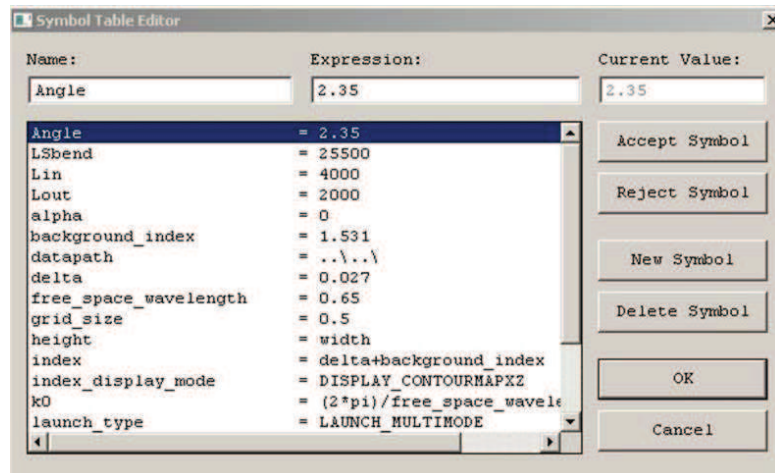
C.5: Nastavenie pravej vetvy, rozbočnica základného typu.



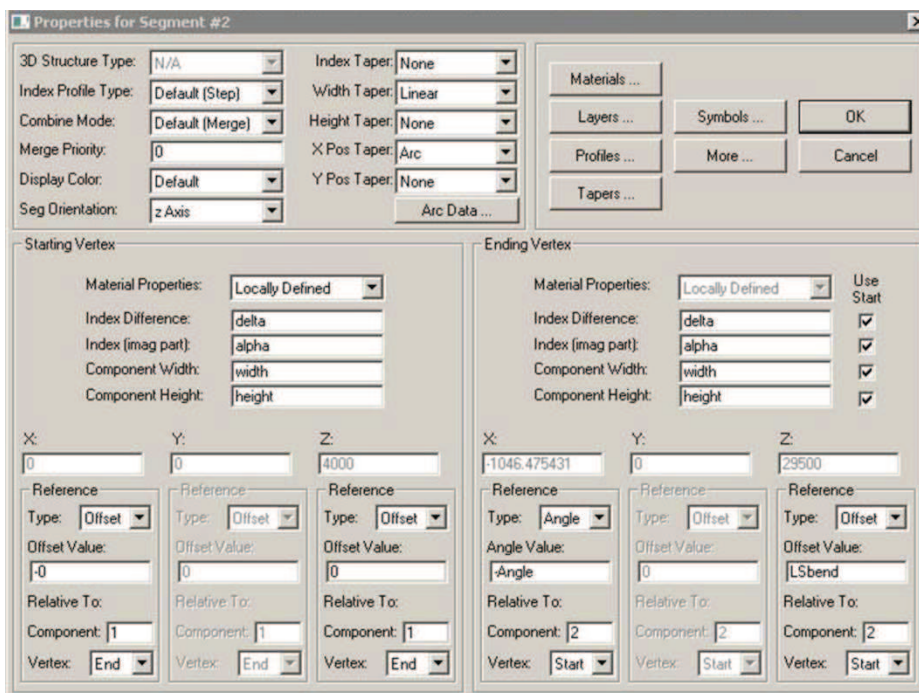
C.6: Nastavenie parametrov pre vetvu 1, rozbočnica základného typu.



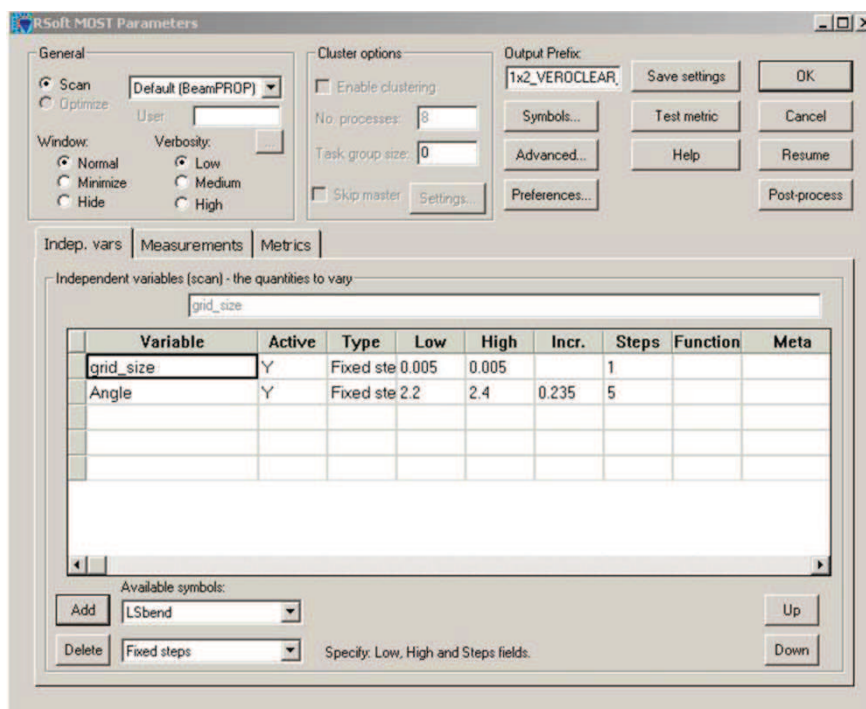
C.7: Nastavenie parametrov pre vetvu 2, rozbočnica základného typu.



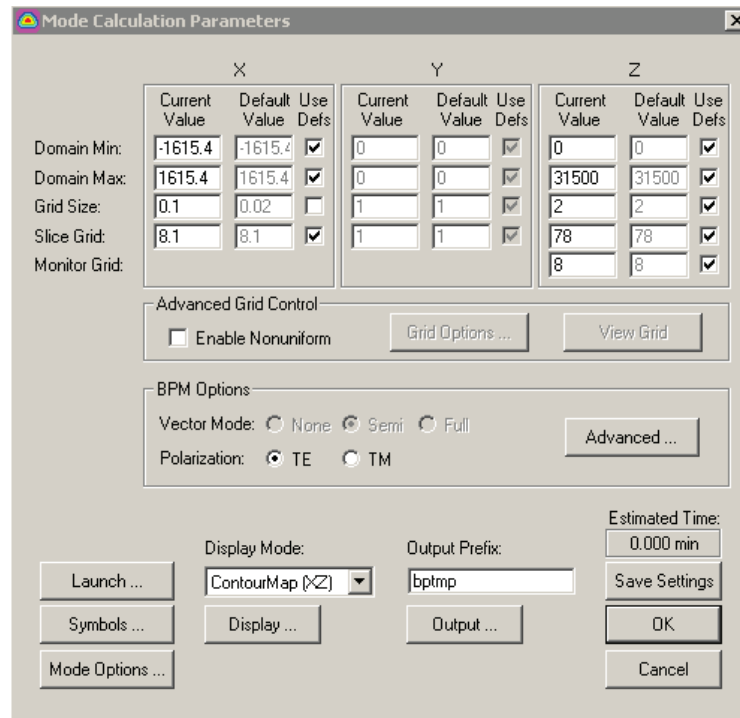
C.8: Nastavenie parametrov rozbočnice, rozbočnica základného typu.



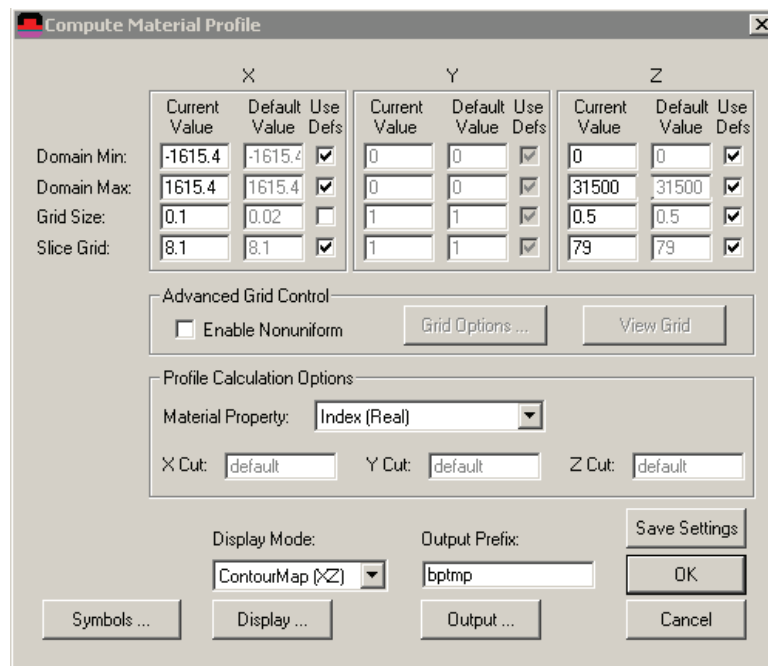
C.9: Nastavenie daného komponentu rozbočnice, rozbočnica základného typu.



C.10: Nastavenie parametrov pre simuláciu výstupných normovaných výkonov rozbočnice – výber komponentov pre optimalizáciu, rozbočnica základného typu.

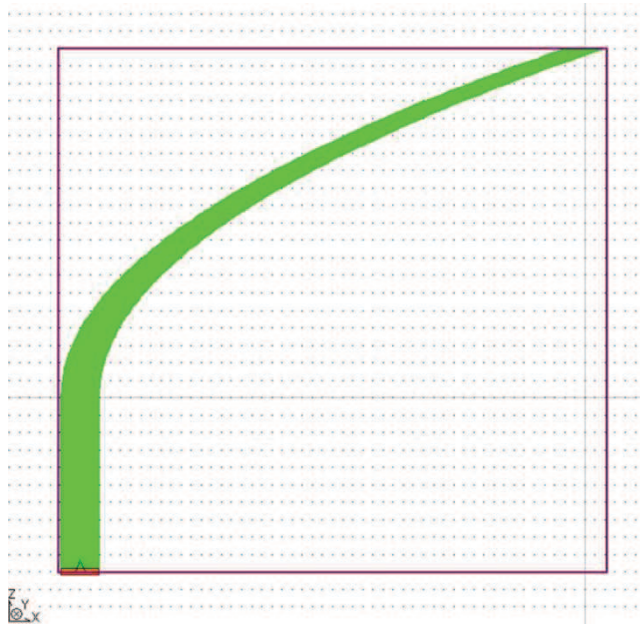


C.11: Nastavenia parametrov vidov.

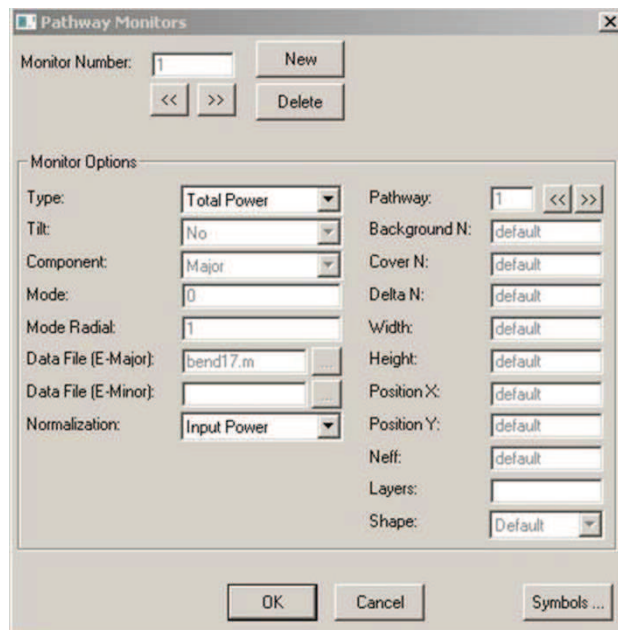


C.12: Nastavenia pre vykreslenie profilu indexu lomu.

Nastavenie parametrov zatočeného vlnovodu



C.13: Nastavenie cesty pre optický signál (zatočený vlnovod).



C.14: Nastavenie parametrov zatočeného vlnovodu.

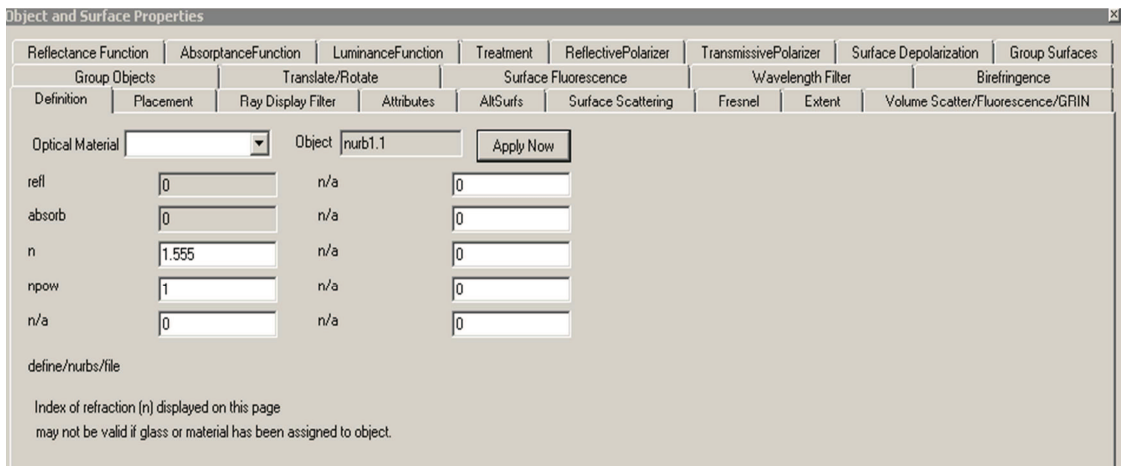
Príloha D

Postup simulácie v programe OptiCAD

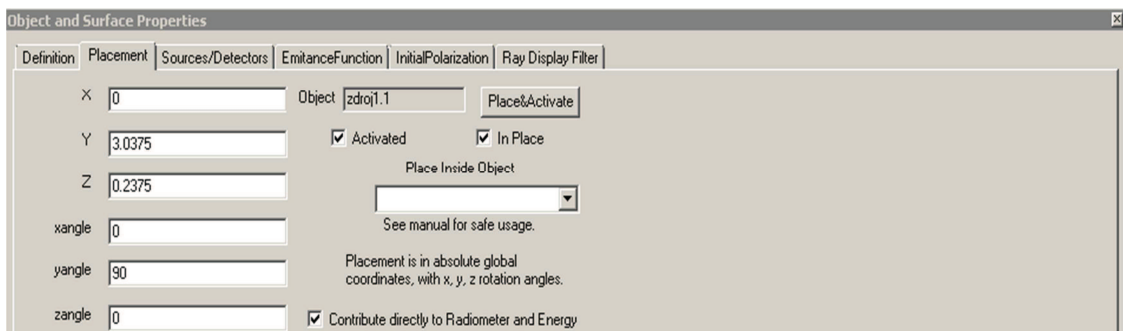
V simulačnom programe OptiCAD boli simulované zatočené vlnovody, ktoré boli vytvorené v programe FreeCAD a importované vo formáte .iges.

Pred analýzou je potrebné nastaviť parametre vlnovodu – indexy lomov použitých materiálov (obr. D.1), umiestnenie zdrojov žiarenia a detektorov (obr. D.2), ich parametre (obr. D.3), počiatočnú polarizáciu vyžarovanej vlny (obr. D.4), vlnovú dĺžku (obr. D.5), materiál detektorov a odrazivosť resp. priepustnosť rozhraní a vrstiev.

Po zvolení určitého typu simulácie je ešte potrebné zadefinovať počet simulovaných lúčov a uhol lúčov vystupujúcich zo zdroja (obr. D.6) a nastaviť simuláciu detektora (obr. D.7). Po prebehnutí simulácie je okrem iných výsledkov k dispozícii graf rozloženia hustoty výkonu, ktorá dopadá na zvolený detektor.



Obr. D.1: Nastavenie indexu lomu materiálu.



Obr. D.2: Umiestnenie optického prvku (zdroja, detektora) v simulačnom prostredí programu OptiCAD.

Object and Surface Properties

Definition | Placement | Sources/Detectors | EmissionFunction | InitialPolarization | Ray Display Filter

Optical Material Object zdroj1.1

total_power (watts)	<input type="text" value="0.001"/>	n/a	<input type="text" value="0"/>
n/a	<input type="text" value="0"/>	n/a	<input type="text" value="0"/>
n/a	<input type="text" value="0"/>	n/a	<input type="text" value="0"/>
n/a	<input type="text" value="0"/>	n/a	<input type="text" value="0"/>
n/a	<input type="text" value="0"/>	n/a	<input type="text" value="0"/>

define/lightsource

Index of refraction (n) displayed on this page
may not be valid if glass or material has been assigned to object.

Obr. D.3: Nastavenie parametrov optického prvku (zdroja) – vysielaný optický výkon.

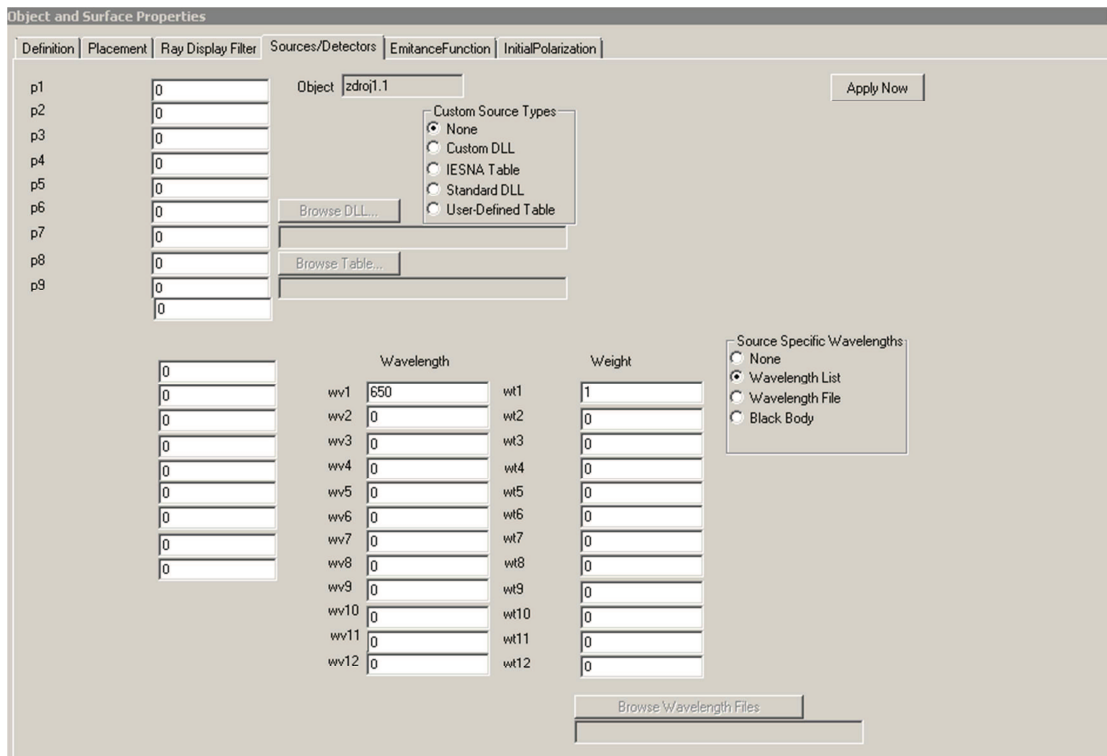
Object and Surface Properties

Definition | Placement | Sources/Detectors | EmissionFunction | InitialPolarization | Ray Display Filter

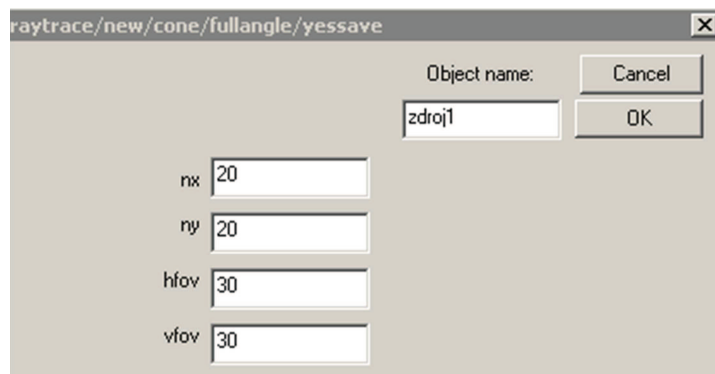
Source Local Initial Polarization Object zdroj1.1

Ex	<input type="text" value="1"/>
Ey	<input type="text" value="1"/>
Ez	<input type="text" value="0"/>
Phx	<input type="text" value="0"/>
Phy	<input type="text" value="0"/>
Phy	<input type="text" value="0"/>

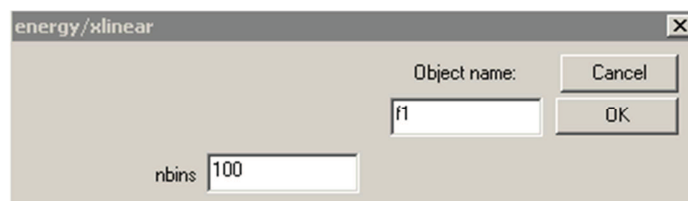
Obr. D.4: Nastavenie počiatkovej polarizácie žiarenia.



Obr. D.5: Nastavenie vlnovej dĺžky a jej váhy.



Obr. D.6: Nastavenie počtu lúčov a počiatočného uhla lúčov vystupujúcich zo zdroja.

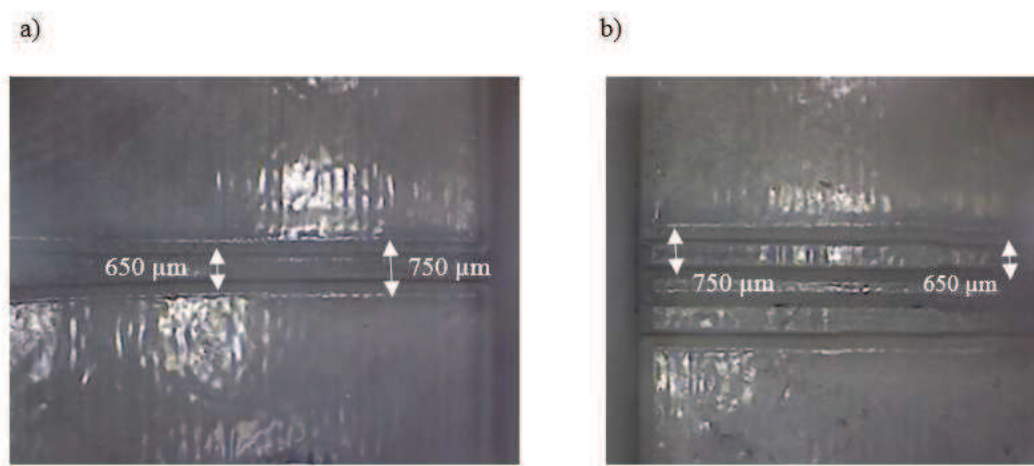


Obr. D.7: Nastavenie snímání signálu detektorom – počet citlivých buniek.

Príloha E

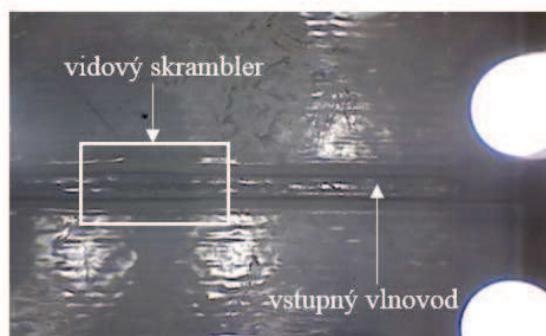
Na obr. E.1 a E.2 sú detailné fotografie vybraných častí 1x2Y rozbočnic, prislúchajúcich motívu VA a VB, vytvorené optickým mikroskopom.

Na obr. E.1 sú nafotené vstupné (a) a výstupné vlnovody (b) motívu VA, ktoré majú odlišnú šírku (750 μm) ako majú vlnovody v strednej časti štruktúry (650 μm). Tento motív bol navrhnutý podľa rozbočnice publikovanej tímom pod vedením p. T. Klotzbüchera [16].



Obr. E.1: Motív VA s rôznou šírkou vlnovodov [16].

Na obr. E.2 je odfotený dvojité vidový skrambler [17], ktorý bol súčasťou motívu VB a nachádzal sa medzi vstupným vlnovodom a vlnovodnými ramenami.



Obr. E.2: Motív VB s vyznačeným dvojitém vidovým skramblerom [17].